



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GMI/23
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - XII

GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO - GMI

LEVANTAMENTO DO RISCO REAL DE FALHAS EM PARA-RAIOS

**P. A. Lisboa
H. P. Amorim Jr.**

**C. K. C. Arruda
R. C. da Fonte
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel**

**L. A. M. C. Domingues
R. A. Meyberg**

RESUMO

Este Informe Técnico apresenta um conjunto de metodologias e ferramentas computacionais para cálculo do risco de falha de equipamentos, cuja aplicação pode auxiliar os profissionais de manutenção e operação das empresas a definir os planos de manutenção preventiva e a priorizar os investimentos na renovação dos equipamentos.

Apresentam-se metodologias de cálculo e previsão do risco de falha de equipamentos adequadas à análise de pequenas amostras. Estas metodologias são utilizadas em áreas com características similares de baixa ocorrência de falhas, como aeronáutica e nuclear e foram adaptadas ao estudo de equipamentos elétricos. Mostra-se como, a partir de informações escassas como número de equipamentos de determinado tipo em operação e tempo de operação até a ocorrência de uma falha se obtêm modelos de risco de falha no tempo, que permitem elaborar previsões de falha futura e, em decorrência, elaborar estratégias otimizadas de manutenção e troca de equipamentos.

Aqui surge uma outra dificuldade inerente ao desenvolvimento deste tipo particular de modelos: a dificuldade de obtenção de dados para validação. Neste trabalho foram montados ensaios de envelhecimento acelerado, de modo a obter uma base de dados suficiente para realizar a validação dos modelos propostos. A validação desses modelos é apresentada numa sequência de testes, de complexidade crescente. Inicialmente foram realizados testes em bancada de laboratório, de envelhecimento acelerado, onde se aplicou o modelo de previsão de falha na fase inicial e, ao final dos testes, se comparou as previsões com o resultado final, com desempenho totalmente satisfatório. Em seguida se realizou a modelagem de falha de um conjunto expressivo de pára-raios de alta tensão.

O desenvolvimento aqui apresentado insere-se na construção de uma metodologia para tratar um problema do gerenciamento de ativos das empresas. O caminho proposto visa o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de simulação de subestações de modo a quantificar o número de ocorrências e tempo de interrupção decorrente da falha de cada equipamento na SE.

PALAVRAS-CHAVE

Para-raios, Subestação, Risco de falha, Weibull, MTTF.

1.0 - INTRODUÇÃO

A principal dificuldade prática na avaliação do risco de falha de equipamentos reside na ausência de dados para quantificar esse risco utilizando técnicas estatísticas convencionais. Em áreas da indústria como eletrônica ou mecânica o número de itens produzidos é elevado bem como o número de ocorrências de falha. Neste caso o fabricante pode, sem grande dificuldade, determinar a probabilidade de um tipo de peça falhar nos próximos 6 meses, 1 ano, etc.

Na área de sistemas de potência, contudo, não só o número de equipamentos de um determinado tipo e modelo é comparativamente reduzido, como, sobretudo, as ocorrências de falha são escassas, pela natureza da atividade de produção e transmissão de energia elétrica, onde o custo da falha é bastante alto. Neste caso, onde se tem registro de, por exemplo, apenas 3 ou 4 ocorrências de falha de um determinado tipo de equipamento, as técnicas estatísticas convencionais não têm, naturalmente, validade.

Neste trabalho apresentam-se metodologias de cálculo e previsão do risco de falha de equipamentos adequadas à análise de pequenas amostras. Estas metodologias são utilizadas em áreas com características similares de baixa ocorrência de falhas, como aeronáutica e nuclear e foram adaptadas ao estudo de equipamentos elétricos. A partir de informações escassas como número de equipamentos de determinado tipo e tempo de operação até a ocorrência de uma falha, se obtêm modelos de risco de falha no tempo, que permitem elaborar previsões de falha futura e, em decorrência, elaborar estratégias otimizadas de manutenção e troca de equipamentos.

Neste contexto, a distribuição estatística mais adequada é a Weibull, muito utilizada para análise de tempo de vida. Com esta técnica, é possível ainda nas primeiras falhas, estimar com razoável precisão o comportamento probabilístico de falhas do conjunto momentos mais tarde, onde já terão ocorridos falhas e os consequentes prejuízos. É necessário ressaltar que a utilização da distribuição de Weibull pressupõe falhas não-reparáveis, ou seja, o equipamento falhado deve ser retirado da amostra quando registrada a falha.

2.0 - CONCEITOS DE CONFIABILIDADE

2.1 Modos de falha

Por Falha, avaria, defeito, ou pane se entende a perda parcial ou total de um componente ou ainda uma modificação nas propriedades do mesmo que reduza sensivelmente ou totalmente as suas condições de trabalho. Um Modo de Falha é definido como qualquer evento que cause uma falha funcional, como por exemplo a queima de uma lâmpada, ou a queima de velas num motor de carro. Para a análise de equipamentos não-reparáveis o histórico de falhas deve ser separado por modo de falha. Assim apenas um modo de falha pode ser analisado por vez, devendo este estar bem definido nos registros, assim como as informações sobre o momento da falha.

Uma falha pode ser classificada como reparável ou não-reparável. Na primeira o equipamento falhado, pode ser reparado e voltar a funcionar. Na falha não-reparável, o equipamento falhado deve ser retirado de operação, por incapacidade de conserto ou por opção. Neste trabalho somente é tratada a este tipo de falha, requisito para a utilização do modelo de Weibull. Portanto, o pára-raio é também considerado neste trabalho um equipamento não-reparável e cada falha registrada significa uma unidade sendo retirada de operação.

2.1.1 Suspensões

Em uma amostra, nem todos os elementos necessariamente vão apresentar falha, ou o seu modo de falha pode não corresponder àquele de interesse na análise. A isso é dado o nome de *suspensão*. A suspensão ocorre quando um equipamento falha devido a um modo de falha não correspondente àquele sob análise, sendo retirado definitivamente de operação, não podendo por isso vir a falhar através do modo de falha em questão. O uso da suspensão enriquece o registro, pois nos fornece informação mais precisa sobre os equipamentos analisados.

2.1.2 Idade do equipamento (ciclo)

A medida da idade de um equipamento ou componente assume diferentes formas, como tempo de operação, número de chaveamentos, quilometragem, etc. Neste trabalho a medida da idade é chamada de ciclo, ou simplesmente de tempo, que é em geral a medida mais usada para análise de vida.

2.2 Formatos de Registro de Ocorrências

Na metodologia Weibull, os formatos mais comuns de histórico de falhas são as listas de ocorrências simples e agrupadas (intervalos). O primeiro formato dispõe as ocorrências com a informação dos momentos (ciclos) em que foram registradas e a classificação da ocorrência como falha ou suspensão. O segundo formato lista uma série de intervalos de tempo. Cada um deles contém o registro do momento inicial, do momento final, e a quantidade de falhas e suspensões que ocorreram no intervalo. Nesta forma, o histórico 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.

2.3 Modelo de Weibull

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

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \right] \quad [1]$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad [2]$$

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad [3]$$

$$MTTF = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad [4]$$

Onde t é o tempo. 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 método gráfico é utilizado o chamado gráfico Weibull. Este contém no eixo das abscissas a contagem dos ciclos e no eixo das ordenadas a frequência acumulada de falhas (CFD), conforme mostra a figura 1. A primeira etapa é determinar os pontos que serão desenhados no gráfico. Para isto é usado o ranqueamento das falhas e em seguida é atribuído um valor de CDF para cada uma delas. Nesta etapa alguns modelos são usados como o Posto Mediano (*Median Rank*), Convenção de Hazen, *Probit*, entre outros [1].

Os modelos são diferentes para históricos de falhas na forma de lista, ou em intervalos. No caso deste último, cada período que houver falha consiste em um ponto a ser desenhado no gráfico.

Uma vez determinados os pontos do gráfico, uma reta pode ser ajustada entre os pontos por algum método de regressão. Da reta ajustada os parâmetros da distribuição Weibull (β) e (η) são obtidos.

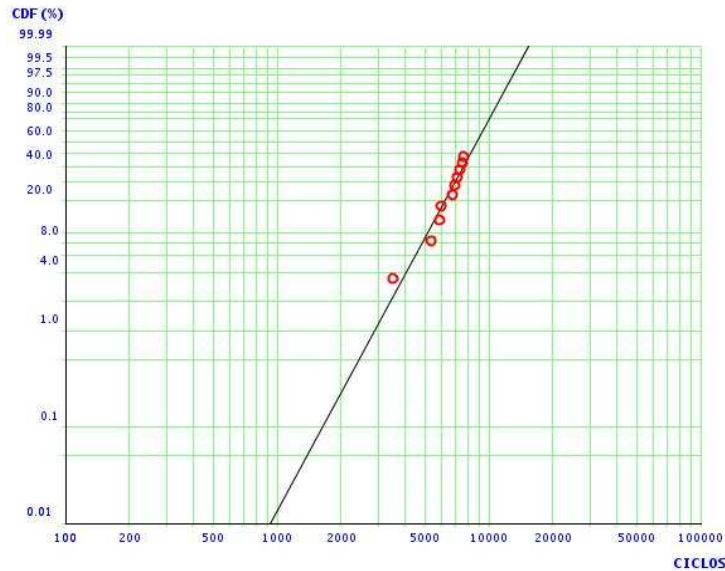


Figura 1 – Gráfico Weibull com a reta ajustada.

Um parâmetro chamado de quadrado do coeficiente de correlação (R^2), mede a qualidade do ajuste da reta aos pontos, ou seja, mede a linearidade entre os pontos. Quanto melhor o ajuste da reta (R^2 tendendo para 1), mais adequada é a distribuição de probabilidade Weibull para representar o comportamento da amostra.

Uma vez determinados os parâmetros da equação de Weibull, pode-se calcular a *taxa de falhas* instantânea em um dado instante t é dada por:

$$h(t) = \left(\frac{\beta}{\eta} \right) \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad [5]$$

Um ponto do gráfico Weibull nos diz quanto da amostra terá falhado no ciclo t . Com a CDF e a taxa de falhas pode-se estudar o comportamento do risco de falha dos equipamentos.

3.0 - METODOLOGIA

3.1 Tratamento de dados

Os dados analisados neste estudo foram obtidos no acervo de ensaios realizados pelo CEPEL ao longo dos anos. Na maioria dos casos os ensaios envolveram as técnicas de medição de temperatura, de corrente de fuga e de radiointerferência. Os registros presentes nos diversos relatórios dos ensaios mostravam diversos detalhes dos pára-raios, como registro e código internos, código da linha de transmissão, tensão da linha, tipo, modelo e fabricante, entre outros.

Os critérios adotados para a avaliação das condições dos pára-raios foram desenvolvidos com base em tratamentos estatísticos sobre os resultados das medições. Foram estabelecidos limites, relacionados ao desvio padrão da amostra avaliada, assumindo uma aproximação com a gaussiana.

Após a emissão do relatório dos ensaios, os pára-raios considerados suspeitos e falhados passaram por inspeção mais rigorosa e mais informações a respeito dos equipamentos puderam ser obtidas.

Para toda análise estatística de dados, é sabido que quanto maior a quantidade e precisão dos registros, maior grau de confiança terão os resultados. A metodologia Weibull aplicada à confiabilidade exige um bom grau de detalhamento nos registros de ocorrência, principalmente dados ligados ao tempo de vida e ao momento da falha. Como o relatório tinha o objetivo de diagnóstico e não do estudo da confiabilidade, foi necessário no presente trabalho uma etapa de análise e adequação dos registros de ocorrência.

Nem todas as planilhas encontradas no relatório continham os dados relativos ao tempo de operação dos pára-raios. Essas unidades foram então eliminadas da análise. Uma seleção das famílias de pára-raios que possuíam estes dados foi feita e os equipamentos foram rearranjados em novas planilhas.

Os pára-raios foram classificados por tensão de operação. Um conjunto de pára-raios de 765 kV com 48 unidades e um conjunto de 500 kV com 74 unidades foram analisados separadamente.

3.2 Critério para a falha Weibull

O relatório dos ensaios dos pára-raios recomendava que as tomadas de decisão, com base nos resultados das medições, deveriam dar prioridade pela ordem ao resultado da técnica de termovisão, da corrente de fuga e por último da rádio interferência.

Na etapa de inspeção posterior ao relatório, nenhum pára-raio considerado suspeito ou defeituoso somente pelo diagnóstico de rádio interferência apresentou falha efetiva. Assim, para a contabilização das falhas, desconsiderou-se o diagnóstico de rádio interferência.

Em seguida os pára-raios foram agrupados por tempo de operação e chegou-se a uma tabela de falhas por intervalos de 5 anos, ou seja, cada ciclo equivale a 1 ano. Os registros do conjunto de 765 kV são mostrados na Tabela 1 e os registros do conjunto de 500 kV na Tabela 2.

Tabela 1 – Quadro de falhas dos pára-raios de 765 kV

Tempo de Operação (anos)	Unidades	Suspensões	Falhas
Entre 15 e 20	33	30	3
Entre 21 e 25	12	11	1
Entre 26 e 30	3	2	1

Tabela 2 – Quadro de falhas dos pára-raios de 500 kV

Tempo de Operação (anos)	Unidades	Suspensões	Falhas
Entre 20 e 25	53	48	5
Entre 26 e 31	21	16	5

3.3 Obtenção dos parâmetros da distribuição Weibull

O modelo usado para determinar os pontos do gráfico antes do ajuste da reta foi o *Probit*. Para o ajuste da reta utilizou-se uma regressão linear através do método dos mínimos quadrados. Para a realização dos cálculos e o desenho dos gráficos foi utilizado um software de confiabilidade chamado Conweib, desenvolvido pelo CEPEL seguindo metodologias descritas em [1].

3.4 Validação

A validação da metodologia foi realizada sobre componentes que apresentam apenas um modo de falha somente, como lâmpadas incandescentes e peças de computador. No caso das lâmpadas, um ensaio acelerado foi feito com 20 unidades, utilizando 110% da tensão nominal. O conjunto foi submetido até a falha completa e, durante as primeiras falhas, já se podia estimar com precisão razoável a distribuição de probabilidade final do conjunto. Este ensaio é apresentado com maiores detalhes em [2]. A figura 2 mostra a montagem do experimento.



Figura 2 – Aparato experimental dos ensaios de validação da metodologia.

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

O conjunto de pára-raios de 765 kV obteve o parâmetro de forma (β) maior do que 1 (1,31615), significando que os equipamentos se encontram na última fase da curva de vida útil de um equipamento, a tradicional *Curva da Banheira*, isto é, encontram-se na fase de falhas por envelhecimento ou desgaste. A figura 3 mostra a saída do programa Conweib para este caso.

O conjunto de pára-raios de 500 kV obteve o parâmetro de forma (β) igual a 3,39, bem maior do que 1, significando que os equipamentos se encontram em fase avançada de falhas por envelhecimento. A Figura 4 mostra a saída do programa Conweib. A Tabela 2 mostra o resumo dos parâmetros da distribuição Weibull para os dois casos.

Tabela 2 - Resumo dos resultados, método de Weibull por intervalo para ciclo em anos

	β	η	R^2
765 kV	1,31615	160,254	0,999868
500 kV	3,39398	54,7387	1

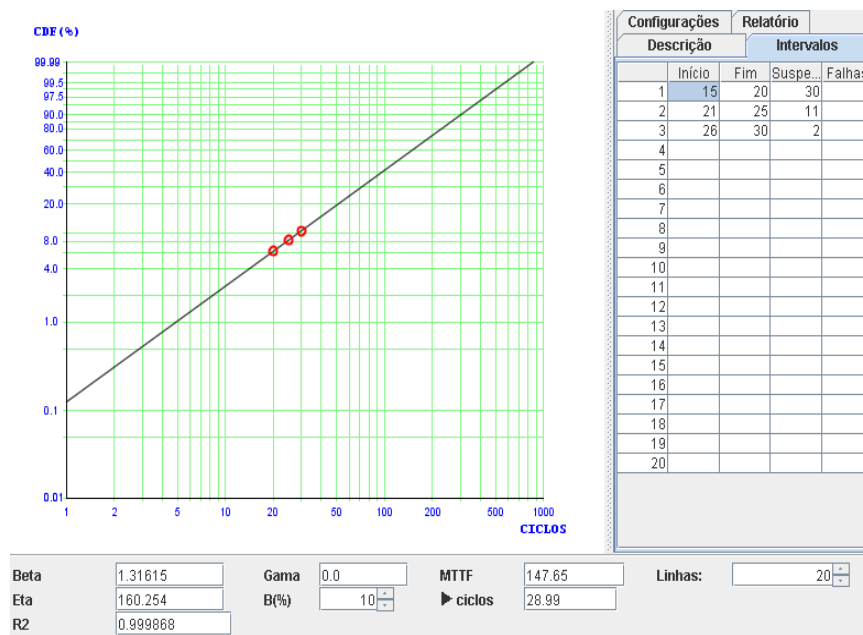


Figura 3 - Gráfico Weibull por intervalos de 5 anos para pára-raios de 765 kV

Nos casos analisados, o histórico de ocorrências de pára-raios forneceu poucos intervalos com falha. Neste caso os gráficos apresentaram poucos pontos. No caso do conjunto com 500 kV, somente dois pontos foram desenhados e o ajuste da reta foi perfeito. Neste caso o parâmetro R^2 , se igual a um, e não representa, desta forma, a medida da qualidade do ajuste.

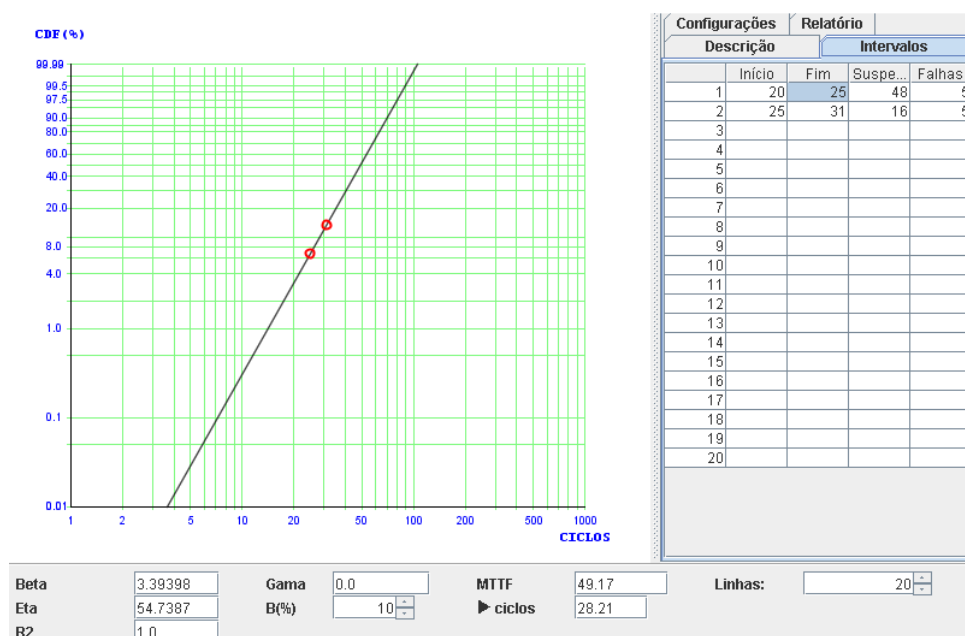


Figura 4 - Gráfico Weibull por intervalos de 5 anos para pára-raios de 500 kV

A análise das taxas de falha, mostra que esta é crescente para os dois casos. Para o caso dos pára-raios de 500 kV este aumento se dá de forma acelerada. A figura 5 mostra os gráficos da taxa de falha ao longo dos anos. No momento do relatório os equipamentos de 765 kV mais velhos tinham 30 anos e o conjunto tinha taxa de falha instantânea de 0,0048 falhas/ano. Hoje estes estão com 35 anos e sua taxa de falha é de 0,0051 falhas/ano, segundo a previsão Weibull. No caso dos pára-raios de 500 kV, na data do relatório, os equipamentos mais velhos chegavam a 31 anos. A taxa de falha nesta data era de 0,0159 falhas/ano e em cinco anos atingiu 0,0227 falhas/ano. O segundo conjunto está em pior estado, com um aumento de cerca de 43% na taxa de falha em cinco anos, enquanto que no primeiro caso, o aumento é de apenas 6%.

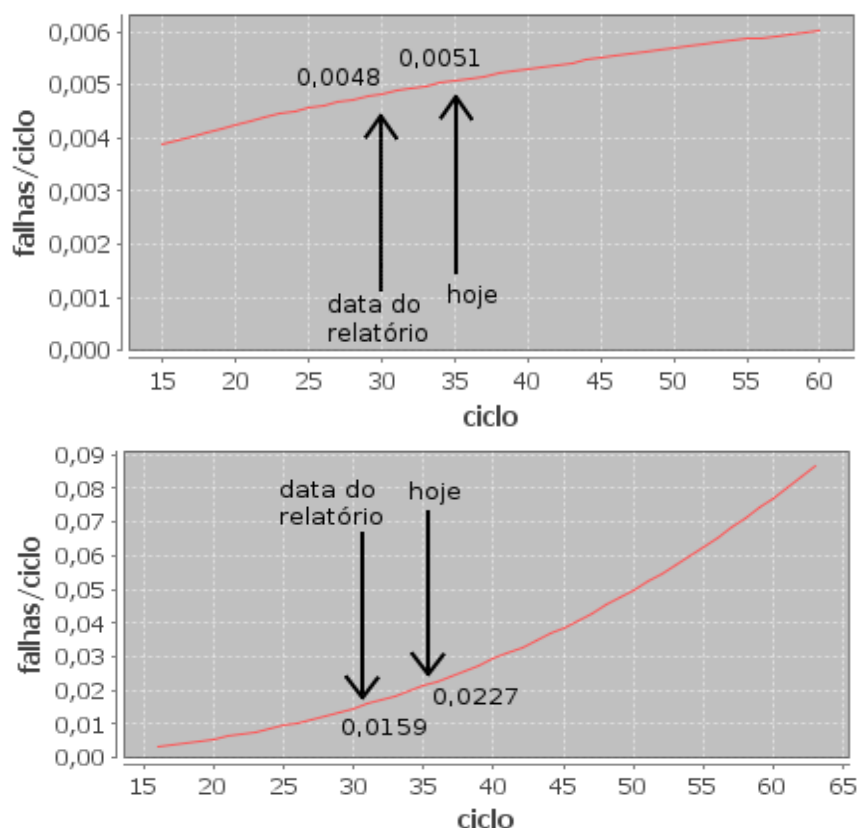


Figura 5- Gráfico da taxa de falha instantânea (falhas/ano) do conjunto de 765 kV (esq.) e de 500 kV (dir.)

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível quantificar taxas de falhas para um conjunto de pára-raios de alta tensão, utilizando o modelo estatístico de Weibull. Estas taxas são mais adequadas aos equipamentos estudados do que as taxas típicas, encontradas na literatura ou em trabalhos realizados em países de outros continentes e com outras condições climáticas.

O processo estatístico de levantamento dos riscos de falha, parte inicial do estudo da confiabilidade, depende enormemente da disposição dos dados de registro de falhas. Esta metodologia permite fazer um tratamento estatístico a partir de informações escassas, o que não acontece com os métodos estatísticos tradicionais. Ainda sim, o estudo do risco da falha com registros de falhas incompletos é oneroso e torna o resultado menos preciso. Por isso, para o melhor estudo da confiabilidade, recomenda-se a implantação de uma filosofia de registro de falhas orientada para esta aplicação.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

1. ABERNETHY, R. B. **The New Weibull Handbook**. 4th. ed. : , 2000.
2. QUEIROZ, L. F.; ZAGHETTO, S. L. M.; OLIVEIRA, J. A. **Métodos Quantitativos Aplicados na Otimização da Manutenção Realizando Previsão Orçamentária para Troca de Componentes Buscando Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade de Equipamentos**. XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Florianópolis: . 2011.