



GSE/ 01

17 à 22 de outubro de 1999
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil

GRUPO VIII
GRUPO DE ESTUDOS DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)

**ASPECTOS DE CONFIABILIDADE DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO
CONSTATADOS NA INSPEÇÃO E ENSAIOS DE RECEBIMENTO EM FÁBRICA : SUBSÍDIOS PARA
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO PRODUTO E SUAS CONSEQUÊNCIAS PARA O
FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA**

João Carlos Carneiro
CPFL -Companhia Paulista de Força e Luz

RESUMO

A Divisão de Soluções de Engenharia é responsável, dentre outros, pela definição e recebimento de equipamentos elétricos de alta tensão para subestações de distribuição, de transmissão e de usinas, subestações móveis, bem como assessoramento técnico aos outros órgãos da CPFL sobre estes equipamentos.

Ao longo dos últimos anos constatamos uma redução significativa na qualidade das matérias-primas, nas fases de fabricação e do equipamento completo relativas a falhas em ensaios de rotina, tipo e especiais realizados tanto no acompanhamento de fabricação quanto na inspeção e ensaios finais de recebimento, conforme prescrições das Especificações Técnicas pertinentes, fundamentadas em Normalização Técnica correspondente.

O aumento da não qualidade constatado nas várias fases do processo de aquisição e fabricação de equipamentos (de matéria-prima - peças - partes - acessórios, de fabricação - equipamento semi-pronto e de inspeção no recebimento final em fábrica do equipamento pronto e acabado), além de provocar grandes prejuízos para o próprio fabricante, aumenta sobremaneira os custos com reinspeção e os riscos de ocorrerem problemas no recebimento no almoxarifado, na instalação, montagem e operação destes equipamentos pelo cliente.

Uma assistência técnica pós-venda eficaz, segmento que teve um significativo crescimento nos últimos

anos inclusive pela redução da qualidade atual dos produtos e serviços com conseqüente aumento de lucratividade neste ramo de atividade, pode amenizar as conseqüências das irregularidades detetadas nas fases de recebimento do equipamento no almoxarifado ou em operação no cliente. A idéia é não chegar ao extremo de recorrer a estes mecanismos de direito, uma vez que o cliente, no caso a CPFL, pagou por um produto novo e isento de defeitos.

Este estudo apresenta sucintamente uma conceituação sobre o tema, amplamente disseminado em vasta literatura dedicada, e uma metodologia para o mapeamento dos aspectos de confiabilidade através de dados de problemas em inspeção e ensaios de recebimento de equipamentos elétricos de alta tensão destinados às Subestações do Sistema Elétrico da CPFL relatados no período de 1980 à 1995. Também realiza a devida estratificação, análise, interpretação e conclusões sobre o seu desempenho neste evento em fábrica, considerado uma oportunidade ímpar de avaliação da consciência para a qualidade do fabricante (situação conjuntural do respectivo setor produtivo) para, dentre outros, ser utilizado como subsídios na busca da superação para o fenômeno descrito anteriormente.

PALAVRAS-CHAVE

Confiabilidade - Equipamentos Elétricos de Alta Tensão

1.0 - INTRODUÇÃO

Espera-se que equipamentos elétricos de alta tensão, assim como outros produtos técnicos, exerçam sua função não somente por ocasião do fornecimento, pelo

contrário, a funcionalidade deve estar assegurada além de um período pré-determinado. A este aspecto temporal da qualidade, denomina-se confiabilidade.

Deste mesmo modo, o custo de aquisição de um equipamento está relacionado tanto aos parâmetros iniciais de compra (valor inicial) como também com os parâmetros relacionados ao seu recebimento (seguros, alfândegas, etc), montagem (falta de peças, irregularidades, etc) energização (falhas, deficiências de materiais, etc) e operação (manutenção, falha, etc).

2.0 - CONFIABILIDADE - CONCEITO

2.1 - Definição básica

Confiabilidade é a capacidade de uma unidade de observação satisfazer as exigências necessárias para a finalidade de uso, nos limites pré-estabelecidos, que foram especificados para manter suas propriedades por um período determinado.

Essa capacidade é descrita quantitativamente com o auxílio de características adequadas. De acordo com a definição, a toda característica correspondem dados referentes à critérios de falhas, solicitação e duração.

2.2 – Resultados da confiabilidade

Resultados da confiabilidade não podem ser formulados com determinação, devido a probabilidade ser sempre de natureza teórica. A base para avaliação de confiabilidade é, portanto, associada as probabilidades.

Os resultados referem-se sempre a um conjunto de unidades observadas, comparáveis, e devem, devido a esta particularidade, possuir características de valor médio em relação a uma única unidade observada.

2.3 - Avaliação da confiabilidade

A avaliação da confiabilidade para componentes e equipamentos é realizada nos laboratórios e campos de prova do fabricante (pesquisa, desenvolvimento, projeto, fabricação, ensaios), como também nas instalações do cliente (recebimento, montagem, pré-energização, operação, manutenção).

Em primeiro plano, encontra-se a avaliação da confiabilidade por atributos; neste caso a confiabilidade é caracterizada exclusivamente por dados que descrevem o comportamento de falhas (bom, ruim; com falhas, sem falhas). Destes dados obtem-se valores estimativos, principalmente para as

características de confiabilidade, tais como taxa de falhas, probabilidade de sobrevivência, etc.

As regras, pelas quais determinam-se esses valores estimativos dependem da lei de distribuição estatística que se usa como base, isto é, se estamos tratando de falhas prematuras, por desgaste ou casuais.

Sendo o tipo de distribuição de vida útil conhecido e os valores estimativos para os valores de seus parâmetros calculados, o resultado deve ser interpretado estatisticamente.

3.0 - FALHAS - CONCEITO

3.1 – Definição básica

Durante o tempo de fornecimento de um conjunto de unidades observadas não reparáveis, podem apresentar-se três fases, demonstradas com auxílio da “curva banheira” da taxa de falhas $\lambda(t)$.

Na fase de falhas prematuras, observa-se o aumento acentuado da taxa de falhas, que pode ser debitado a deficiência de fabricação e de materiais. A essa fase segue a fase de operação normal com valor constante de taxa de falhas (λ). Após a operação normal, com o início do envelhecimento e desgaste a taxa de falhas aumenta.

Dados de confiabilidade para componentes eletrônicos, equipamentos e sistemas são, geralmente, baseados em taxa de falhas constantes, apesar da determinação dos instantes t_1 e t_2 , que separam as três fases, não ser exata (ver Figura 1).

A taxa de falhas é utilizada para a descrição de comportamento de falhas em unidades observadas não reparáveis, mas também em unidades observadas reparáveis.

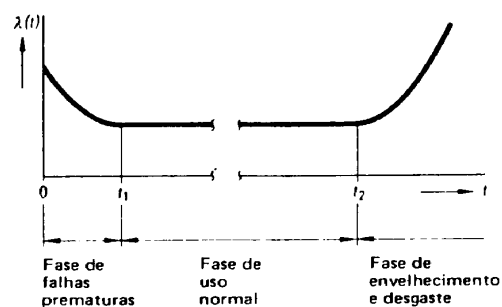


FIGURA 1 - Evolução Temporal de Falhas

Ainda, as falhas podem ser divididas em graves que provocam a saída (explosão, etc) da unidade da operação para reparos e aquelas que não provocam a saída imediata para reparos (cromatografia, etc).

3.2 - Taxa de falhas (TF)

A taxa de falhas é sempre calculada numa base anual, no sentido de ter-se um mesmo referencial para comparação de resultados. Assim, a taxa de falhas expressa a incidência de falhas num período de observação de 8760 horas ou 1 ano de serviço das unidades de mesma família.

$TF = NF / (n \times dt)$; onde:

NF = número de falhas da família
n = número de unidades da família
dt = período de observação

3.3 - Taxa de falhas acumuladas (TFa)

A taxa de falhas acumuladas é utilizada quando se deseja obter o índice anual para um período de observação maior do que um ano. Exprime um valor médio ponderado do período total de observação.

$TFa = \sum NF / \sum (n \times t)$; onde:

NF = n° de falhas acumuladas da família no período
n = n° de unidades acumuladas da família no período
t = período de observação acumulado

4.0 –PROBABILIDADE&CONFIABILIDADE

O conceito de confiabilidade, como uma probabilidade, significa que qualquer tentativa de quantificá-la deve envolver o uso de métodos estatísticos.

Portanto, um entendimento e/ou revisão nos conceitos relacionados à estatística é uma base necessária para a evolução neste assunto.

4.1 - Métodos alternativos

Os métodos usados para quantificar a confiabilidade são de probabilidades e estatísticas matemáticas, uma vez que estamos tratando com incertezas. Com este método não podemos assegurar com certeza se o equipamento vai ou não falhar naquele período de tempo, mas podemos fazer uma previsão de probabilidade de falha.

Estatísticas de confiabilidade podem ser divididas em tratamentos de funções discretas, funções contínuas e processos pontuais.

As funções discretas referem-se ao tratamento de dois estados, como equipamento em estado normal de operação e estado de falha.

- Distribuição binomial
- Distribuição de Poison

As funções contínuas descrevem as situações de confiabilidade governadas por uma variável contínua, como tempo ou distância percorrida.

- Distribuição normal (gausseana)
- Distribuição lognormal
- Distribuição exponencial
- Distribuição gamma
- Distribuição de Weibull

As estatísticas de processos pontuais são usadas em relação a sistemas reparáveis, quando mais de uma falha pode ocorrer em um tempo contínuo.

- Análise de tendências
- Processos sobrepostos

A escolha do método dependerá do problema e o tipo de dados disponíveis.

Um dos tratamentos estatísticos mais simples e populares dados à confiabilidade, em função do número de equipamentos, taxa de falhas média no tempo de observação, refere-se a distribuição Exponencial e Poison.

4.2 - Distribuição exponencial

A distribuição exponencial é muito usada e de fácil solução para representar o tempo até a falha de um equipamento. A seleção deste modelo considera que as falhas permanecem constantes no tempo de observação. Para certas situações de falha e porções da vida do equipamento, o fato de assumir como constante a média de falhas pode ser apropriado.

$f(t, \lambda) = e^{-\lambda t}$ onde:

N = número de unidades de ensaio

λ = taxa de falhas

t = duração do intervalo de tempo de observação

O parâmetro λ deve ser conhecido ou estimado por qualquer condição de aplicação específica.

A Figura 2 representa a confiabilidade R (t), cuja formação é dada por:

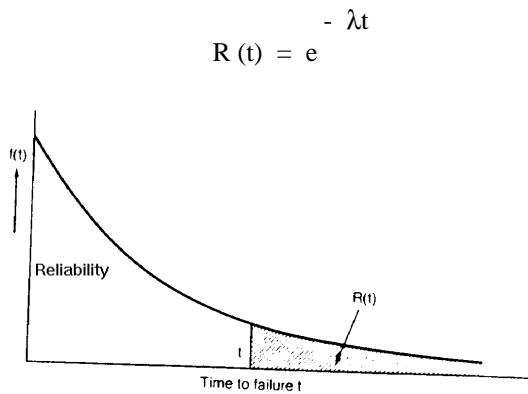


FIGURA 2 - Distribuição Exponencial Típica

4.3 - Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson, introduzida muitas vezes como distribuição limite da distribuição binomial, tem um significado próprio na confiabilidade técnica.

Supondo-se que, o número de falhas num intervalo de tempo é proporcional à duração do intervalo de tempo - número de falhas é independente da situação do intervalo de tempo - número de falhas é independente da quantidade de falhas que antecederam o intervalo de tempo considerado, a distribuição do número de falhas num intervalo de tempo de duração t é descrita pela distribuição de Poisson.

$$F(x/\mu) = \exp(-\mu) \cdot \sum_{i=0}^x (\mu^i / i!)$$

Esta distribuição cumulativa de Poisson (função de distribuição) indica a probabilidade que em N unidades de ensaio (no caso de falha é imediatamente substituída) num intervalo de tempo de duração t representam-se no máximo x falhas.

- μ = número de falhas médias
- $\mu = N\lambda t$ em N unidades de ensaios
- $\mu = \lambda t$ para uma unidade de ensaio
- λ = taxa de falhas constante
- t = duração do intervalo de tempo de observação
- N = número de unidades de ensaio
- x = número de falhas

A probabilidade de em N unidades de ensaios num intervalo de tempo t apresentarem exatamente x falhas, é dada por:

$$P(x/\mu) = e^{-\mu} \cdot (\mu^x / x!) = F(x/\mu) - F(x-1/\mu)$$

Para x = 0, obtém-se à partir de F(x / μ) para uma unidade de ensaio, a probabilidade de sobrevivência

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\mu} \quad \text{para N unidades} \quad R(t) = e^{-N\lambda t}$$

Assim sendo, é possível definir por exemplo qual é a probabilidade de apresentarem-se no máximo x falhas, se N componentes (módulos, equipamentos, etc) similares, que possuem uma taxa de falhas constante, funcionam cada qual num intervalo de tempo de duração t.

Existe uma relação estreita entre a distribuição exponencial e de Poisson (ver Figura 3). Enquanto a distribuição de Poisson descreve a distribuição do número de falhas x em um intervalo de tempo de duração t, a distribuição exponencial representa a distribuição das vidas úteis de unidades observadas não reparáveis e a distribuição dos intervalos de falhas (tempo de funcionamento entre falhas seguidas) em unidades observadas reparáveis.

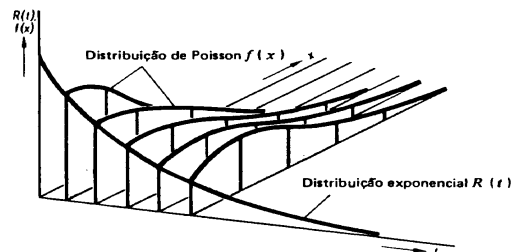


FIGURA 3 - Distribuições Exponencial e Poisson

Pode-se notar que para se determinar a confiabilidade de um equipamento, as distribuições de Poisson e Exponencial podem ser utilizadas, uma vez que são representadas da mesma maneira.

4.4 – Confiabilidade (R) - Formulação

A confiabilidade (*reliability*) é definida então como a probabilidade de sobrevivência de uma unidade ou grupo de unidades que possuam uma taxa de falhas média constante no período de observação.

$$R(t) = e^{-\mu} \quad ; \quad R(t) = e^{-N\lambda t}$$

4.5 - Risco de falha (Rf) - Formulação

O risco de falha (RF) é definido como a probabilidade de não sobrevivência de uma unidade ou grupo de unidades que possuam uma taxa de falhas média constante no período de observação.

$$Rf(t) = 1 - R(t) \quad ; \quad Rf(t) = 1 - e^{-\mu} \quad ; \quad Rf(t) = 1 - e^{-N\lambda t}$$

5.0 - RECEBIMENTO DE EQUIPAMENTOS

Tradicionalmente os conceitos de confiabilidade são aplicados para avaliar os equipamentos instalados e em operação entre os períodos t_1 e t_2 da curva de $\lambda(t)$ indicada na Figura 1. A distribuição exponencial é utilizada considerando constante a taxa de falhas (λ).

No caso específico de ensaios de equipamentos destinados as subestações (transformador de potência, disjuntores de alta tensão, etc), que possuem produção não seriada de elevada complexidade, onde as unidades são reparáveis e reensaiadas, a aplicação de planos de amostragem para ensaios de confiabilidade parece não ser adequada.

Portanto, na inspeção de recebimento, todas as unidades são submetidas a ensaios de rotina, sendo uma unidade do lote escolhida como protótipo para os ensaios de tipo e eventualmente especiais, sempre de acordo com a normalização técnica pertinente.

A idéia é implantar o conceito de confiabilidade e risco de falha para a fase de inspeção e ensaios finais de recebimento de equipamentos elétricos de alta tensão em fábrica, realizado pelo Setor de Tecnologia de Equipamentos.

Isto deve-se ao fato de que apesar do crescente volume de problemas encontrados na inspeção e ensaios de recebimento (falhas casuais) nos últimos anos (desde 1990) constatado e registrado, estes eventos não necessariamente são percebidos de imediato na fase de recebimento no almoxarifado (prazo de entrega), comissionamento na Subestação ou período de operação do equipamento, uma vez que foram reparados, reensaiados e reaprovados em fábrica.

5.1 - Taxa de falhas no recebimento

A taxa de falhas para representa o índice de falhas por inspeção por equipamento por ano.

$TF = NF / n * q * dt$; onde:

NF = número de falhas do lote de fornecimento

n = número de unidades do lote de fornecimento

q = número de inspeções do lote de fornecimento

dt = período de observação = 1 ano

5.2 - Taxa de falhas acumuladas no recebimento

A taxa de falhas acumuladas para o caso representa o índice de falhas acumulado para um período de observação maior, sendo um valor médio ponderado.

$TFa = \Sigma NF / \Sigma (n * q * t)$; onde:

NF = n de falhas acumuladas do lote de fornecimento

n = número de unidades acumuladas do lote

q = número de inspeções acumuladas do lote

t = período de observação acumulado

5.3 - Confiabilidade - Risco de falha recebimento

Utilizando os conceitos estatísticos e probabilísticos da distribuição exponencial e de Poisson para obter a probabilidade de não ocorrer falha temos:

5.3.1 - Confiabilidade no recebimento

A confiabilidade representa a probabilidade de não ocorrer falha nos equipamentos em inspeções e ensaios no período de observação, considerando uma taxa de falhas média constante (λ) para a determinada família de equipamentos do fornecimento.

$$R(t) = e^{-N\lambda t}$$

5.3.2 - Risco de falhas no recebimento

O risco de falha representa a probabilidade de ocorrer falhas nos equipamentos em inspeções e ensaios no período de observação considerando uma taxa de falhas médias constantes (λ) para a determinada família de equipamentos do fornecimento.

$$Rf(t) = 1 - e^{-N\lambda t}$$

5.4 - Massa de dados

Os dados utilizados para elaboração deste trabalho foram obtidos através do histórico existente no Setor de Tecnologia de Equipamentos transcrito nos relatórios de não conformidade durante a inspeção e ensaios de recebimento de equipamentos em fábrica e utilizados na tentativa do inter-relacionamento com eventuais falhas em operação como base de rastreabilidade na análise de sua causa para obtenção de providências cabíveis junto aos fabricantes.

As falhas foram divididas em duas partes: 1-falhas críticas relacionadas ao projeto do equipamento ocorridas nos ensaios de tipo, especiais ou de rotina que provocaram a abertura para reparos da unidade; 2-falhas graves relacionadas ao processo de fabricação do equipamento ocorridos nos ensaios de rotina que não provocaram a abertura da unidade para reparos.

Importante ressaltar que, uma vez sanadas estas irregularidades, novos ensaios são realizados e em caso de sucesso o equipamento é considerado aprovado e na maioria dos casos não compromete o prazo de entrega contratual, portanto não é percebido pelo cliente as grandes dificuldades encontradas em

fábrica, que na verdade representam uma espécie de termômetro a respeito da consciência na condução dos preceitos primários da qualidade.

Como dado adicional podemos citar que o corpo técnico do setor foi responsável por equipamentos elétricos de alta tensão para subestações no período de 1984 - 1994, os quais representaram um investimento de US\$ 120 milhões (US\$=R\$) feito pela empresa.

5.5 - Tratamento de dados

Como descrito anteriormente, tendo em vista as peculiaridades de fabricação e avaliação de adequação e conformidade com a especificação técnica pertinente, baseada na Normalização correspondente, tornou-se necessário a busca de uma nova metodologia para gerenciar e subsidiar a interpretação e tomada de decisão nesta fase do processo de aquisição de equipamentos elétricos de alta tensão.

Assim, aplicamos os conceitos de risco de falhas e confiabilidade descritos no presente estudo técnico, os quais confirmaram o sentimento expresso sobre a redução do nível de qualidade de equipamentos elétricos de alta tensão de uma maneira geral de uma forma geral para todos os equipamentos elétricos de alta tensão inspecionados e ensaiados no período em estudo.

6.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 - Conclusões

A utilização desta metodologia de obtenção de taxa de falhas e falhas acumuladas por inspeção por equipamento por ano, tendo como subproduto a definição de confiabilidade de uma família de equipamentos de determinado fornecedor, apresenta-se como ferramenta fundamental de engenharia.

Ainda, estratificando estes dados existentes por fabricante, por classe de tensão, por ano de fabricação, por família de equipamentos e por tipo de falha, bem como o interrelacionamento da falha com os ensaios da especificação, que são baseados em Normas Técnicas pertinentes, tem-se a possibilidade, dentre outros, de obter as seguintes melhorias:

- Análise situacional do universo de problemas com o estado atual político, mercadológico, econômico, conjuntural do setor produtivo.
- Reavaliação dos critérios de pré-qualificação de fornecedores, utilizando também como subsídios os parâmetros indicados no presente estudo.
- Rastreamento de casos de ocorrências em operação no campo e o interrelacionamento com eventuais problemas em inspeção e ensaios.

- Retroalimentação periódica aos fabricantes sobre os problemas mais frequentes, para as devidas ações pró-ativas durante o processo de compra, visando a melhoria contínua.
- Referência para os profissionais do Setor como “feed back” nas várias fases do processo de compra (análise de documentos, acompanhamento de fabricação e inspeção e ensaios de recebimento).
- Disponibilidade de dados para consultas internas ou externas em forma de índices de falhas, confiabilidade, etc.

6.2 - Recomendações

O plano de ação recomendado para superar os resultados das não conformidades constatadas, as quais relacionam-se basicamente à mudanças de atitude em relação a qualidade global de um fornecimento desde a apresentação da proposta até a perfeita operação de um equipamento durante o período de sua vida útil, passa pela sensibilização do fabricante para a importância estratégica do seu produto para o cliente até a utilização de cláusulas nas especificações técnicas que resguardam o cliente contra problemas de projeto e fabricação, dependendo do nível de conscientização que se encontra o fabricante.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Patrick D.T. O'Connor - Practical Reliability Engineering - 1988
- [2] W.Grant, Clyde F. Coombs Jr. - Handbook of Reliability Engineering and Management- 1988
- [3] Siemens - Confiabilidade / Tabelas e Nomogramas - 1987
- [4] João Carlos Carneiro - Aspectos de confiabilidade de equipamentos elétricos de alta tensão na inspeção e ensaios de recebimento em fábrica – Avaliação da consciência para a qualidade — 1996. Apresentado no VII Seminário Latino Americano da Cigré 1997 e VI Seminário de Materiais no Setor Elétrico 1998.
- [5] João Carlos Carneiro, Enéas Bittencourt Pinto, José Luiz Pereira Brittes, José Roberto da Silva e Luiz Fernando Machado Braga - Uma reflexão sobre a nova estrutura econômica e relações com a qualidade e confiabilidade no Setor Elétrico Brasileiro — 1997. Trabalho Final do Curso de Especialização em Administração Avançada do Programa de Educação Continuada da Fundação Getúlio Vargas.(1996/19)

