

# Desenvolvimento de Metodologia de Manutenção Baseada em Confiabilidade para Redes de Distribuição Urbanas da ENERSUL

J.A. Doniak, M. Massuda Sob<sup>o</sup>, E. G. Pereira, ENERSUL e  
M.Klimkowski, S.F. Sciamarella, M. Bassler, C.J. Suckow, e R.Vivekananda, LACTEC

## RESUMO

O objetivo do projeto foi pesquisar e adaptar para a distribuição, conceitos de Manutenção Baseada em Confiabilidade (MBC) aplicados com sucesso em vários ambientes, inclusive no sistema elétrico, na área de Geração. Foi realizado um nivelamento da equipe Enersul/Lactec dos conceitos básicos de MBC, auxiliado por especialista com experiência em sistemas elétricos. A metodologia na forma tradicional foi disponibilizada para análise de materiais e equipamentos componentes das redes de distribuição, cujo produto orientará ações a serem desenvolvidas no sentido de melhorar a qualidade dos mesmos. Todavia, cada alimentador tem sua confiabilidade dependente dos tipos e quantidades de materiais e equipamentos que o compõem e de eventos externos específicos que atuam sobre o mesmo. Para avaliar a influência destes fatores e medir a participação da manutenção preventiva nos resultados da confiabilidade, foi desenvolvido metodologia complementar com facilidades de informatização para simular os prováveis efeitos da manutenção preventiva nos índices FEC.

## PALAVRAS-CHAVE

Confiabilidade; Manutenção; Manutenção Baseada em Confiabilidade; Redes de Distribuição; Taxa de Falha.

## I. INTRODUÇÃO

Nas avaliações iniciais do projeto, foi concluído como importante realizar um encontro de nivelamento da equipe de especialistas da Enersul sobre os conceitos básicos da Manutenção Baseada em Confiabilidade (MBC), o que foi realizado com a participação da Copel, que vem implantando esta metodologia na área de geração desde maio de 1996 e vem realizando experiências de implantação da metodologia na distribuição. Foi realizado um encontro técnico sobre o tema, considerado treinamento básico para a discussão das etapas seguintes. O alimentador de distribuição possui duas características distintas quanto aos materiais e equipamentos que o compõem. A primeira decorre da existência de equipamentos, em pequena quantidade mas de significativa importância na sua confiabilidade. Destacamos o disjuntor de saída na subestação, religadores

instalados na rede e chaves tele-controladas de manobra. Pela quantidade e importância, tem controle do seu desempenho e de manutenção realizados individualmente. A aplicação da metodologia MBC para estes materiais não exige nenhuma adaptação. A segunda é expressa pela característica da maioria de outros tipos de materiais e equipamentos que pela importância e quantidade não tem controle individual de desempenho, apenas é conhecida a taxa média de falhas por tipo pelo controle dos sistemas de acompanhamento das ocorrências de interrupções da empresa. Devido alto custo de um controle individual desta classe de materiais e componentes, não se implantou a prática de um controle de vida útil individual nas empresas em geral, não existindo dados como data de instalação, valores das solicitações de sobrecorrentes de curto circuito ou de sobretensões de descargas atmosféricas as quais possam ter sido submetidos. Outro fator que deve ser associado ao desempenho do alimentador, que em geral apresenta grande extensão exposta ao meio ambiente, são os eventos externos que causam muitas interrupções, independente da qualidade dos materiais e equipamentos e não podem ser deixados de lado em uma metodologia de análise da Manutenção Baseada na Confiabilidade esperada do sistema de distribuição. Os estudos demonstraram que a metodologia deve abranger duas formas distintas de analisar e controlar um alimentador: A primeira é aplicar a metodologia MBC na sua forma tradicional para os equipamentos de controle individual, através de ferramenta informatizada que auxilie a formação de um plano de inspeção e manutenção destes componentes. A segunda é adaptar a metodologia para avaliar a influência dos demais materiais e equipamentos não controlados individualmente no alimentador. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia considerando o alimentador como um sistema em análise cujo desempenho é dependente de seus componentes representados por seus blocos de operação delimitados por chaves de proteção. Foi criado um aplicativo informatizado para associar a taxa de falhas dos materiais existentes, devidamente separadas na parte corretiva e preventiva, decorrente de um análise global dos materiais pela metodologia MBC, em cada bloco, em função da quantidade dos materiais e equipamentos existentes. Algoritmos

Este trabalho faz parte do Programa Anual de Pesquisa e Desenvolvimento da ENERSUL, ciclo 2001/2002 e está sendo realizado em parceria com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC

foram associados para avaliar a participação da manutenção corretiva e preventiva esperada por alimentador ou bloco, e os valores finais esperados de FEC dos mesmos. Este produto final permite, via aplicativo informatizado, prever o ganho esperado da manutenção preventiva, em que segmentos do alimentador ela é mais eficiente ou, se mesmo com a manutenção preventiva os índices de desempenho esperados não tem probabilidade de que as metas sejam atingidas.

A metodologia permite simular modificações no alimentador em termos de mudança de tipos de materiais, de padrão de redes ou ações em eventos externos, verificando a influencia de cada um destes fatores no resultado final do desempenho do alimentador.

## II. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

### A. Aplicação da metodologia MBC para materiais e equipamentos de redes de distribuição.

O projeto foi baseado na aplicação das Planilhas de Informação e Decisão, base da Metodologia MBC. A Planilha de Informação e Decisão é o documento gerador da informação e decisão para a tomada de ações corretivas ou preventivas. Nas planilhas são listados os componentes e analisados sob a ótica de suas funções, falhas funcionais, modos de falha, efeitos críticos no material e no sistema, curvas de taxas de falhas, condições visuais do efeito da falha, consequências da falha, ação padrão, tarefas propostas, periodicidade e responsabilidade. Devido à importância e complexidade de cada sistema, a Planilha deve ser elaborada por uma equipe multidisciplinar da Empresa, composta de elementos das áreas de engenharia, manutenção e operação. Eventualmente também podem participar especialistas externos

As planilhas foram adequadas para o uso tanto de equipamentos individuais, como disjuntores, religadores e chaves tele-comandadas, como também para componentes genéricos de um alimentador, como postes, isoladores transformadores chaves-fusíveis, etc.

Para cada modo de falha foi determinada uma ação padrão que em principio é do tipo corretiva ou preventiva. Observamos que no caso de um Sistema de Distribuição, no Alimentador Urbano, a maioria das falhas tem consequências operacionais, ou seja, afetam a distribuição de energia, provocam uma redução da receita e também causam dano à imagem da Empresa. Este fato faz com que se deva analisar a validade da adoção de ações preventivas. Estas ações serão válidas de execução toda vez que o custo total em realizá-las durante um determinado período de tempo é menor que o custo das consequências operacionais citadas somadas ao custo do reparo no mesmo espaço de tempo. Porém, caso seja constatado um risco potencial de segurança a terceiros ou ao meio ambiente, as considerações de custo devem ser ignoradas e adotadas as medidas preventivas.

### B. Manutenção corretiva.

Constitui como uma das atividades rotineiras das áreas de manutenção de redes, com a finalidade de restauração de energia a consumidores atingidos por interrupção de energia, estas ocorrências. Todavia, a minimização destas ocorrências é uma das metas da área de manutenção e por isso o método de análise para a identificação das ocorrências que geram manutenção corretiva e suas causas deve subsidiar outras áreas envolvidas que tem papel importante na padronização de materiais, equipamentos, padrões de montagens, qualificação de produtos, aquisição e inspeção de qualidade.

Quando a causa esta ligada à qualidade de material, os responsáveis por especificação, aquisição e recebimento do material devem receber informações do que está ocorrendo em termos de quantidade e custos de manutenção para que seja avaliado se determinadas falhas devem ser mantidas como normais do processo ou justifiquem ações de mudanças de paradigmas no processo de especificação e aquisição.

Quando a causa está ligada a padrões construtivos, as áreas de planejamento e projeto devem ser informadas sobre os pontos fracos e a quantidade de ocorrências de intervenção de manutenção que o atual padrão de redes de distribuição está apresentando. Quando a causa não é intrínseca ao componente, fato comum em redes de distribuição aéreas expostas ao meio ambiente, tais como vandalismo, fogo debaixo de redes, etc., devem ser agrupadas para a gerencia de manutenção quantificar estas ocorrências e avaliar a oportunidade de acionar meios para reduzi-las, por exemplo, através de campanhas de conscientização.

### C. Manutenção Preventiva

O objetivo da manutenção preventiva está centrado nas atividades de determinação das condições dos componentes das redes de distribuição relativo aos modos de falha cujos estados potenciais de falha são passíveis de previsão através de inspeção visual ou instrumental.

Por isso, o principal problema da manutenção preventiva é a montagem de programas de inspeções e de manutenções preventivas, seja em termos de tarefas a serem realizadas, de custos destas atividades e de recursos necessários para realizá-las.

A metodologia de análise de modos de falha MBC por componentes da rede de distribuição, deve associar para cada modo de falha, em quais o estado potencial da falha pode ser detectado, e o tipo de tarefa a ser realizado para detectar ou corrigir estes estados de falha potencial.

Como exemplo de tarefas, podemos citar a inspeção de trechos a serem realizadas podas de arvores, estruturas onde deve ser trocado algum componente ou equipamento, etc.

Além de associar a cada modo de estado potencial de falha o tipo da tarefa, é necessário associar o numero de vezes em que cada tarefa será executada ou repetida quan-

do for o caso, no período do planejamento. Por exemplo, realização de tarefas de inspeção visual da rede pode ter uma periodicidade igual a 2, caso o período do planejamento seja um ano e se deseja realizar esta tarefa duas vezes no ano. Já para tarefas que resultam do levantamento de dados das inspeções e originam tarefas individualizadas, como exemplo, tarefa de trocar isoladores danificados em estruturas determinadas pela inspeção, a substituição destes materiais será feita uma única vez e a periodicidade será de 1 vez no período.

Como exemplo de programas, tarefas que podem ser realizadas ao mesmo tempo por determinada equipe devem ser agrupadas em uma mesma relação constituindo um programa. Por exemplo:

- Programa de Inspeção Visual;
- Programa de Inspeção Instrumental;
- Programa de Poda de Árvore;
- Programa de Limpeza de Isoladores e
- Programa de Aferição de Equipamentos.

O procedimento de associação da área responsável por ações de caráter preventivo para cada modo de falha, na montagem da planilha de modos de falha da Metodologia MBC, facilitará a montagem de programas de manutenção preventivos específicos por área especializada dentro da unidade de manutenção preventiva da Empresa.

Para acompanhamento da confiabilidade dos componentes e como item de verificação e controle da Metodologia MBC, deve ser adotada a taxa de falha média do componente. Para determinação dos valores iniciais deverá ser adotado, como por exemplo, o valor histórico dos últimos cinco anos.

**D. Confiabilidade de alimentadores**

A análise de materiais e equipamentos com a aplicação das técnicas da Metodologia MBC descritas neste projeto formam uma planilha de informação e decisão sobre os modos de falha de cada material e equipamento componente da rede de distribuição, aplicável a qualquer alimentador.

As diferentes características entre os alimentadores como extensões por diferentes áreas geográficas, carga e níveis de curto circuito da rede, conduzem que diferentes alimentadores têm diferentes probabilidades de falha, sendo uma parte inerente as suas características físicas (extensão, tipos e quantidades de materiais e equipamentos componentes) e outra função das características das solicitações externas variáveis em cada caso (árvores, descargas atmosféricas, etc). Estas premissas permitem desenvolvimento de algoritmos para metodizar a geração de taxas de falhas do alimentador ou dos seus segmentos, bem como simular o estado potencial de falha de cada alimentador ou segmento associado aos valores de FEC potencial. A metodologia incluiu, respeitando a estrutura específica em

termos da natureza e quantidade de componentes e ações de eventos externos, a simulação da confiabilidade de cada alimentador, permitindo verificar se a parcela de manutenção preventiva possível é suficiente para manter o alimentador dentro das metas de qualidade fixadas e, em caso negativo, simular mudanças necessárias em seus materiais, equipamentos ou padrões, em parte ou no seu todo, para atingir a metas desejadas de qualidade. Um alimentador, em geral, é formado por inúmeros segmentos delimitados por equipamentos de proteção, determinando segmentos ou blocos do alimentador.

Dessa forma temos o alimentador como um sistema, seus blocos como componentes do sistema e os materiais e equipamentos que compõem cada segmento fontes de falhas que podem levar a falha do bloco ou do alimentador todo.

Assim, temos dois tipos de blocos: bloco denominado troncal e blocos dos ramais do alimentador. Todo alimentador é dependente do equipamento de proteção inicial, na saída da Subestação. Este equipamento marca o início do que definimos de bloco troncal como sendo a extensão de rede iniciada na Subestação até encontrar uma chave de proteção ou o fim de um trecho de rede. Vide Fig 1 – área de cor de fundo amarela.

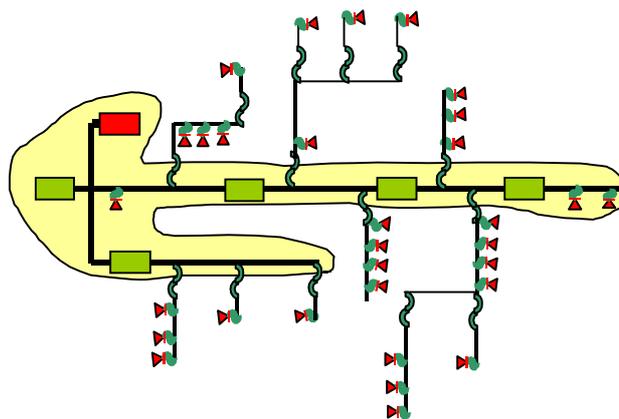


FIGURA 1 - Unifilar de um alimentador com o bloco troncal identificado.

Este bloco é caracterizado por inexistir equipamentos de proteção que o seccionem automaticamente em caso de defeito ao longo do mesmo. Em caso de defeito neste segmento, a proteção é realizada pelo equipamento de proteção que está situado na Subestação onde o alimentador se origina, causando a interrupção de todo alimentador.

Defeitos em qualquer outro trecho fora da área troncal da rede causarão interrupção em blocos parciais de consumidores, variáveis em função do segmento com defeito. A estes segmentos denominaremos blocos ramais dos alimentadores. Também são iniciados por um equipamento de proteção (geralmente uma chave fusível). Vide Fig 2- áreas coloridas.

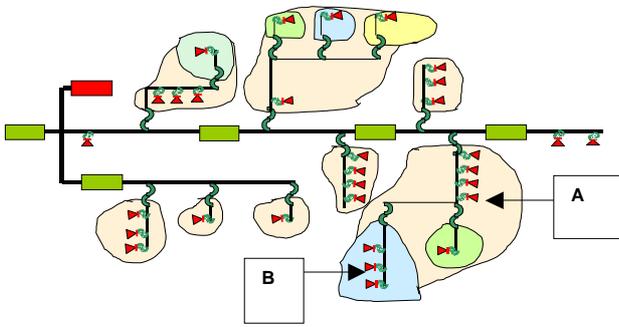


FIGURA. 2 - Unifilar de um alimentador com os blocos ramais identificados

Um bloco de ramal pode conter outros blocos menores e por isso a identificação do bloco pela sua chave de início é muito importante porque, conforme figura 2, um defeito na rede de alta tensão no ponto A desliga toda a topologia para frente deste bloco, envolvendo o desligamento dos consumidores dos blocos menores contidos a partir da chave de início do bloco maior. Um defeito em B, nesta figura, desliga somente os consumidores do bloco que contém o ponto B.

O referencial de desempenho de um bloco está vinculado a dois parâmetros, conforme figura 3 :

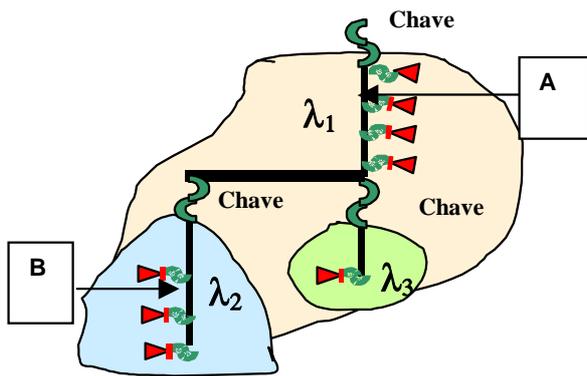


FIGURA. 3 Detalhe da Figura 2 – Pontos A e B

1ª - Como a soma das taxas de falhas dos materiais/equipamentos existentes neste bloco.

$\lambda$  = taxa de falha de um material ou equipamento em um período de tempo

$\lambda_1 = \sum \lambda$  dos materiais e equipamentos existentes entre as chaves 1 e 3 e as chaves 1 e 2

$\lambda_2 = \sum \lambda$  dos materiais e equipamentos existentes após a chave 2

$\lambda_3 = \sum \lambda$  dos materiais e equipamentos existentes após a chave 3

O número total de falhas esperada após a chave 1 é a taxa de falhas do conjunto iniciado pela chave 1, donde:

$$\lambda \text{ após chave 1} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$$

Porém como pode ser observado na figura 3, neste exemplo, o bloco iniciado pela chave 1 envolve blocos menores em seqüência. A soma das taxas de falhas de todos estes blocos informa quantas falhas são esperadas no conjunto, porém não informa uma idéia de valor associada com a consequência destas falhas.

2ª - Como a soma das taxas de falhas dos materiais/equipamentos existentes na topologia em cada trecho após uma chave até as chaves seguintes ou fim de trechos multiplicado pelo número de consumidores desligados em cada falha que desligue a topologia após a chave considerada. Dessa forma estamos associando a taxa de falhas prováveis de ocorrer com uma idéia de valor que representa a consequência de falhas dos materiais no conjunto do bloco 1.

Então podemos escrever :

Consequência da falha do bloco iniciado pela chave 1 =  $(\lambda_1 \times \text{quantidade de consumidores desligados pelas chaves 1, 2 e 3}) + (\lambda_2 \times \text{quantidade de consumidores desligados pelas chave 2}) + (\lambda_3 \times \text{quantidade de consumidores desligados pela chave 3})$ .

Fazendo :

C1 = quantidade de consumidores desligados pela chave 1

C2 = quantidade de consumidores desligados pela chave 2

C3 = quantidade de consumidores desligados pela chave 3

Calim = quantidade de consumidores do alimentador, e calculando a somatória das consequências de cada falha após a chave 1, onde se inclui as consequências das chaves 2 e 3 e dividindo a soma pela quantidade dos consumidores do alimentador, temos :

$$FECprob = (\lambda_1.C1 + \lambda_2.C2 + \lambda_3.C3) / Calim$$

Chegamos a fórmula igual do FEC, mas em termos de um FEC probabilístico do bloco a partir da chave 1, (caso ocorram todas as interrupções que representa o risco de falhas da taxa de falha). Esta relação é válida para aplicar a qualquer chave do alimentador, inclusive para a chave de início do mesmo, isto é, para o alimentador.

Generalizando a fórmula, temos :

$$FEC \text{ prob após chave } i = \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i \right) / Calim$$

onde :

i = chave considerada

n = todas as chaves em série após a chave i

Para o alimentador, se associarmos uma duração média das interrupções representadas pela taxa de falhas do alimentador ou diretamente ao FEC probabilístico, o produto nos dará um indicador do DEC probabilístico das interrupções consideradas. Este valor representa a não disponibilidade média do alimentador (ou bloco) em horas e a confiabilidade nesta unidade pode ser colocada percentualmente em termos do período considerado. Considerando como período o ano civil de 365 dias e 24 horas, temos;

$$Confiab. Alim X = ((8760 - FECprob Alim X) / 8760) * 100$$

Ex: Para probabilidade de indisponibilidade no ano de 50 horas, 100 horas, ou 200 horas, considerando 8760 horas ano, teremos:

Indisponibilidade	Confiabilidade
Horas	(% do tempo disponível)
50	99,4292
100	98,8584
200	97,7168

Define-se neste trabalho a expressão taxa de falhas do Alimentador por causas internas, o valor representado pelo produto das taxas de falha de cada tipo de componente (materiais e equipamentos) pela quantidade deste tipo de componente no alimentador. Para uma avaliação da probabilidade de falhas no alimentador função das características das solicitações externas (arvores, descargas atmosféricas, etc), é necessário ser determinado e vinculado a cada alimentador taxa de falhas por solicitações ambientais externas. A soma das taxas de falhas por causas internas e externas, representa o grau de risco de falha (RF) do alimentador. É um índice de probabilidade de falha do alimentador calculado com algoritmo que leva em consideração as características específicas dos materiais e equipamentos que o compõem e de sua exposição ao meio ambiente.

$RF = (S \text{ (componentes por tipo * taxa de falha do componente)}) + (S \text{ taxas de falha do alimentador por cada tipo de ações externas})$

#### E. Avaliação dos efeitos da manutenção preventiva

Realizando a simulação do risco de falha do alimentador desmembrando a taxa de falha, tanto de materiais e equipamentos como de eventos externos, em duas parcelas, sendo uma relativa à parcela das falhas de ação somente corretiva e a outra parcela das falhas evitáveis por ações preventivas, é possível quantificar probabilisticamente a parcela de ganhos no FEC com a realização da manutenção preventiva. Caso não seja possível atingir as metas de qualidade fixadas, estudos de simulação trocando materiais ou padrões da rede em segmentos ou em todo o alimentador, orientarão onde a manutenção preventiva é eficaz e onde há necessidade de ações de reforma de circuitos.

### III. CONCLUSÕES

A realização destes estudos depende de aplicativos informatizados para a montagem de grande quantidade de tabelas e de manipulação de dados, fator que dificulta a sua realização manual. Dois aplicativos referenciais foram modelados, com as regras estabelecidas nesse relatório. Um modelo de geração da Planilha de Informação e Decisão para montagem da tabela MBC de materiais e equipamentos de redes de distribuição, e outro para realizar a montagem da tabela de quantificação de dados físicos da rede por blocos de chaves, respectivas taxas de falhas e FEC provável, apresentando estes dados em planilhas ou telas, para facilitar a realização de simulações de alterações no circuito.

### IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

#### LIVROS:

- [1] Moubray J M. "Reliability-centered Maintenance". Manutenção Centrada em Confiabilidade, 1999;
- [2] Moubray J M. "Maintenance Management – A New Paradigm". Third Annual Conference of the Society of Maintenance & Reliability Professionals. Chicago Illinois. 2 – 4 October 1995;
- [3] Moubray J M. "Maintenance and Product Quality ". International Conference on Total Quality. Hong Kong. 16 – 17 November 1989;
- [4] Moubray J M. "Developments in Reliability-centered Maintenance ". The Factory Efficiency & Maintenance Show and Conference , NEC, Birmingham, UK. 27 – 30 September 1988;
- [5] Smith A M. " Reliability-centered Maintenance". New York, McGraw-Hill. 1993;
- [6] Eletrobrás , Desempenho de Sistemas de Distribuição, Vol 3, Ed. Campus.
- [7] Lafraia, J.R.B., "Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade", 2001

#### PERIÓDICOS:

- [8] EDF Electricité de France ." Reliability Takes Center Stage ". Trasmision & Distribution. August 2001;
- [9] Bonneville Power Administration – "A Case Study – Reliability Centered Maintenance."
- [10] Nagao S K. "Gerenciamento da Manutenção Classe Mundial", São Paulo. 28-30 Agosto, 2001;

#### APOSTILAS:

- [11] Souza, M S. "Manutenção Baseada em Confiabilidade". (apostila apresentada no curso na Enersul em novembro de 2002).

#### NORMAS:

- [12] NBR 5462, "Confiabilidade e manutenibilidade", nov. 1994.

#### LEGISLAÇÃO:

- [13] Portaria nº. 046, de 17 de abril de 1978.
- [14] Resolução ANEEL no 024, de 27 de janeiro de 2000.