Previsão da Manutenção de Disjuntores de Alimentadores de Distribuição através do Método Probabilístico

F. Sato, Unicamp e J. P. Mamede, ELEKTRO

***Resumo* – Na previsão da manutenção de disjuntores utiliza-se o método de cálculo de curto-circuito determinístico, para associar ao número de operações em curto-circuito permitido para cada disjuntor. O valor calculado e utilizado é o maior curto-circuito simétrico. Isto significa considerar um curto-circuito na barra de baixa tensão do transformador de potência da subestação, entretanto, as faltas ocorrem ao longo do alimentador, com valores bem inferiores ao considerado. A utilização do método determinístico admite um valor superestimado que gera excesso de manutenção, desnecessárias para os disjuntores. Este trabalho propõe uma nova forma de abordar o assunto utilizando-se métodos de cálculos probabilísticos, para determinar um valor de curto-circuito mais adequado para a previsão da manutenção. Para potencializar a utilização desta metodologia foi necessário o desenvolvimento de um aplicativo computacional, viabilizado pelo projeto P&D "Desenvolvimento de um Sistema de Previsão da Manutenção de Disjuntores em Alimentadores de Distribuição através do Método Probalístico", o qual foi denominado DjMan[1].**

***Palavras-chaves* – disjuntor, curto-circuito, probabilístico, alimentador, djman.**

I. Introdução

Uma característica peculiar dos sistemas elétricos são as ocorrências de curtos-circuitos, e estes dependem de diversos fatores, os quais podem ser oriundos do próprio sistema ou de fatores externos. Há ainda a sazonalidade, que afetam a freqüência de ocorrência de curtos-circuitos em determinadas regiões e épocas do ano.

Quanto aos fatores externos, exemplos típicos são alimentadores de distribuição que passam por regiões onde ocorrem muitas queimadas da vegetação e acabam por queimar também os postes de madeira, provocando a queda dos cabos ao solo e conseqüentemente causando curto-circuito do tipo fase-terra. Em regiões urbanas são comuns as quedas de objetos dos edifícios sobre cabo nu provocando curto-circuito fase-fase ou trifásico. Em regiões de campo aberto, ou onde encontramos pouca vegetação ou ainda edificações com altura inferior às redes, são comuns descargas atmosféricas diretas e indiretas, provocando múltiplos vazamentos nos isoladores, característica do curto-circuito fase-terra. Estes exemplos mostram que a sazonalidade e a região têm influência sobre o tipo e quantidade da incidência de curto-circuito. Para considerar contribuições precisas destes fatores ou de sua aleatoriedade, seriam necessários registros históricos detalhados de ocorrências nos alimentadores.

A dinâmica da expansão de um Sistema Elétrico ocasiona a elevação da potência de curto-circuito em determinadas barras do sistema, surge a necessidade de verificações periódicas quanto à capacidade de interrupção dos equipamentos de manobras e proteção, para sua adequação aos níveis de correntes das barras onde estão instalados. Para esta adequação, as empresas de distribuição de energia elétrica calculam anualmente as correntes de curtos-circuitos nas barras de suas subestações, que são utilizadas para a verificação da capacidade dos equipamentos e revisão dos planos de manutenção, principalmente os de manutenção dos disjuntores por limite de operação em curto-circuito.

Para determinação do intervalo da manutenção de disjuntores dos alimentadores de distribuição é utilizado o critério que considera que qualquer curto-circuito que provoque a operação do disjuntor contribui para a perda de sua vida útil. Após um número de operações, determinado pelo fabricante em função de características de projeto do disjuntor, haverá necessidade da intervenção da manutenção, para que as características originais sejam asseguradas.

O valor do curto-circuito utilizado na programação do intervalo de manutenção leva em consideração que todos os curtos-circuitos que desligam o disjuntor, possuem a mesma intensidade. Esse critério usa o máximo valor da corrente de curto-circuito no disjuntor, que coincide com a corrente de curto-circuito da barra onde o mesmo está instalado, para a grande maioria dos alimentadores, por serem radiais.

Utilizar a maior corrente de curto-circuito da barra é uma consideração extremamente conservadora para a maioria dos alimentadores [1], já que as correntes atenuam-se para defeitos ao longo do alimentador, como é mostrado na figura 1. Os perfis das correntes de curto-circuito trifásico de dois alimentadores de subestações distintas: um curto com 10,90 km e corrente variando entre 1.058,0 A e 4.896,0 A, um outro mais longo com 33,53 km e corrente variando entre 488,0 A e 8.353,0 A, permitem identificar diversos valores de corrente para uma dada ocorrência. Porém, como não há um método de cálculo ou dados históricos quanto à distribuição das correntes de defeitos nos alimentadores de distribuição, convencionou-se adotar uma posição conservadora, proporcionando uma extrema preservação do equipamento.

[1] Os autores agradecem o apoio financeiro da ELEKTRO Eletricidade e Serviço S.A.
Dr. F. Sato é professor no Departamento de Sistema de Energia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp (Sato@dsee.fee.unicamp.br).
M.Sc. J. P. Mamede trabalha na Coordenação de Engenharia de Manutenção da ELEKTRO (Juracy.mamede@elektro.com.br).

Durante a execução das manutenções nos disjuntores dos alimentadores de distribuição é comum diagnosticar que não há desgaste nos seus contatos móveis e fixos, principalmente em alimentadores com grandes extensões nos quais os valores de curtos-circuitos são muito pequenos. Este fato deve-se ao inadequado critério utilizado para determinação do intervalo de manutenção de operações em curto-circuito, que considera que todas as operações do disjuntor interrompem o máximo valor de corrente da barra, o que não é verdade, já que os defeitos distribuem-se aleatoriamente ao longo de todos os ramos do alimentador.

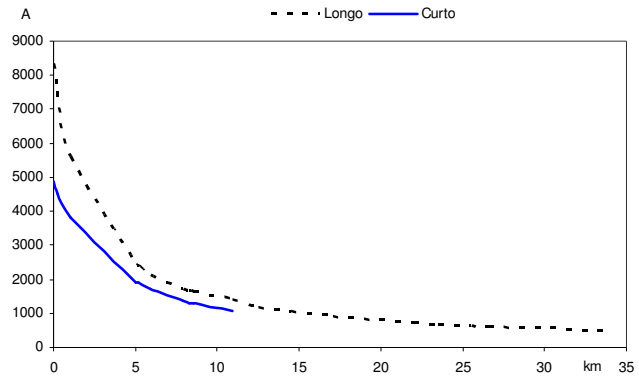

Figura 1. Perfil de curto-circuito trifásico de dois alimentadores.

II. Desenvolvimento do Projeto

A problemática, o objetivo, a metodologia aplicada, o resultado e a conclusão são apresentados conforme foi estabelecido dentro da proposta e execução do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento.

A. Metodologia Aplicada no Projeto

O projeto iniciou-se com uma minuciosa pesquisa bibliográfica dos seguintes assuntos: cálculo de curto-circuito probabilístico, especificações e procedimentos de manutenção de disjuntores. Concomitantemente, foi iniciado o desenvolvimento de um aplicativo para extrair os dados cadastrais das subestações, alimentadores e disjuntores, necessários para alimentar o software de curto-circuito probabilístico. Os dados são extraídos do SGD - Sistema de Gestão da Distribuição da ELEKTRO.

A elaboração do software de cálculo de curto-circuito probabilístico consistiu no desenvolvimento de rotinas para simulação de milhares de curtos-circuitos utilizando o método de Monte Carlo. Geração da função densidade de probabilidade da corrente de curto-circuito do alimentador. Implementação das funções específicas para o sistema de distribuição que modele e considere a aleatoriedade da resistência de falta à terra, as correntes de faltas em todos os ramais primários e também a corrente nominal do disjuntor.

A etapa seguinte consistiu em desenvolver uma metodologia e rotinas de cálculos que define o intervalo de manutenção dos disjuntores para um valor mais realista nos alimentadores de distribuição, dentro de um intervalo de confiança aceitável. A função densidade de probabilidade dos resultados dos cálculos de curtos-circuitos probabilísticos e a curva de manobras em curto-circuito dos disjuntores, fornecida pelos fabricantes nos manuais dos disjuntores permite estimar o intervalo de manutenção.

B. Descrição do Aplicativo

O programa está composto de uma tela principal e de 4 módulos de aplicação. A tela principal desempenha o papel de integrador dos módulos, assim a partir desta serão chamados os módulos do programa. Os módulos de aplicação do programa são: módulo 1 – Importação de Dados do SGD, módulo 2 – Diagrama Unifilar dos Alimentadores, módulo 3 – Curto-circuito Probabilístico e módulo 4 – Previsão da Manutenção de Disjuntores. Na Figura 2 é apresentado o esquema que descreve a relação entre os componentes do programa.

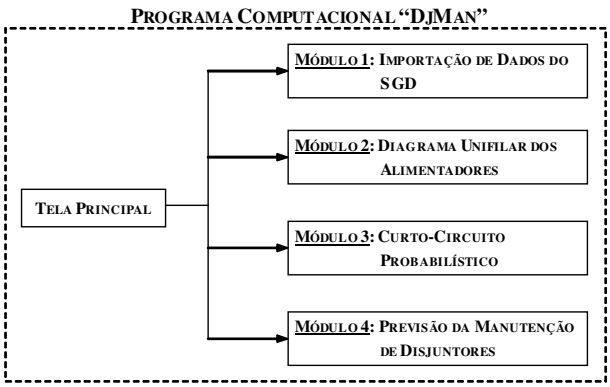

Figura 2. Módulos do aplicativo DjMan.

O Módulo 1, Importação de Dados do SGD realiza a etapa de coleta de dados diretamente do Banco de Dados do SGD da ELEKTRO. Para isso uma rotina baseada em "procedures" de consulta e preenchimento de dados é executada, para fornecer os dados necessários. Estes arquivos proporcionarão os dados necessários para os três módulos de análise seguintes (módulos 2, 3 e 4). Cada arquivo representa uma subestação de distribuição e abrange dados desde a construção topológica dos alimentadores até a caracterização elétrica dos distintos componentes do sistema elétrico de distribuição.

O Módulo 2, Diagrama Unifilar dos Alimentadores, constrói o desenho topológico da rede dos alimentadores ligados a uma subestação. Além disso, permite visualizar as distintas características topológicas (dimensões de alimentadores) e escolher o alimentador a ser analisado.

O Módulo 3, Curto-circuito Probabilístico, gera de forma aleatória os casos de curto-circuito (faltas trifásicas, fase-fase e fase terra) para todos os nós e distâncias entre nós, para distintos tipos de estrutura e características da rede. Este módulo permite editar as probabilidades associadas à estrutura da rede em função do tipo de curto-circuito, o número de simulações, número de classes entre outros dados. O processo de análise do curto-circuito probabilístico está em função dos métodos de simulação estocásticos usados, como o método de Monte Carlo. Como resultado deste módulo é gerada a função de densidade de probabilidades das correntes de curto-circuito.

O Módulo 4, Previsão da Manutenção de Disjuntores, realiza a análise dos intervalos de tempo na manutenção de disjuntores associados a cada alimentador. Dentre os resultados deste módulo tem-se os gráficos de porcentagem de corrente de curto-circuito e o número de operações para manutenção do disjuntor, entre outras. Este módulo permite editar, adicionar ou eliminar distintos tipos de disjuntores armazenados no programa.

A execução do programa executável DjMan.exe, permite a visualização de uma janela, mostrada na figura 3. que dá acesso aos quatro módulos descritos.

Figura 3. Janela principal do aplicativo DjMan.

Os módulos são utilizados em função da etapa de cálculo que encontra o usuário. Foram desenvolvidas distintas ferramentas de apoio baseadas em saídas gráficas, informação do processo, inserção de dados, entre outras.

C. Importação de Dados do SGD

Os dados da rede primária das subestações são obtidos do banco de dados do SGD da ELEKTRO e como resultado são gerados arquivos por subestação.

Os dados alfanuméricos da rede primária das subestações são capturados do banco de dados da ELEKTRO. Tudo isto é realizado através de processos sob a plataforma SGD, o qual presume que estes processos podem estar formados por rotinas sob banco de dados e programas na linguagem do SGD. Estes dados são armazenados em arquivos texto os quais descrevem as características topológicas, elétricas e mecânicas da rede primária dos alimentadores. Cada arquivo contém os dados da rede primária pertencentes a uma subestação, podendo conter vários alimentadores.

O SGD é um sistema de gestão da distribuição desenvolvido pela empresa Soluziona. Esta empresa é a responsável pelas versões utilizadas na ELEKTRO, das modificações do formato de dados e funções do SGD, e das rotinas de extração de dados que usa o programa computacional "DjMan".

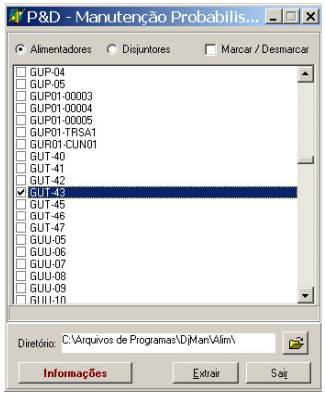

Figura 4. Módulo para extração de dados do SGD.

D. Diagrama Unifilar dos Alimentadores

Carrega os dados cadastrais dos alimentadores de uma subestação, da qual será escolhido o alimentador a ser estudado. É possível visualizar a área atendida pela subestação através do diagrama unifilar de todos seus alimentadores.

Apresenta também as informações da quantidade de registros lidos, bem como a quantidade de quilômetro de rede da subestação e de cada alimentador, conforme mostrado na figura 5.

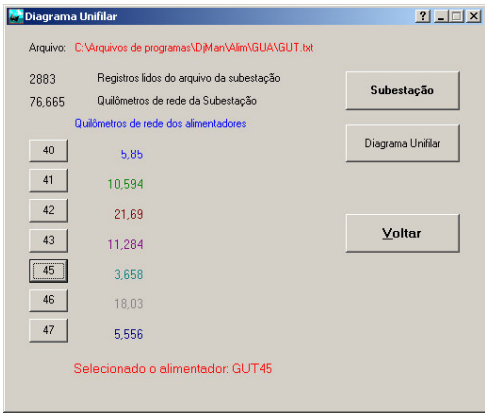

Figura 5. Módulo de escolha do alimentador para simulação.

O alimentador aqui escolhido gera um arquivo de dados necessários para o cálculo de curto-circuito probabilístico no próximo módulo.

E. Curto-circuito Probabilístico

Avaliando-se os alimentadores foram identificadas as principais características que influenciam os valores e o comportamento das correntes de curtos-circuitos, dentre as quais, são as seguintes mais importantes:

- Padrões de estruturas de sustentação e disposição dos cabos dos alimentadores, que influenciam nos parâmetros elétricos da rede e conseqüentemente nos valores dos curtos-circuitos;

- Taxa de falha da rede associada ao padrão de estrutura utilizado em cada trecho, devendo-se

associá-la a probabilidade de incidência de faltas e da avaliação qualitativa da confiabilidade requerida do padrão utilizado;

- Local da falta, que podem atenuar sensivelmente as correntes de curtos-circuitos, conforme se distancia da fonte;

- Seções dos cabos, que quando menor, maior as impedâncias e conseqüentemente reduzem as correntes de curtos-circuitos ao longo do alimentador;

- Tipos de curtos-circuitos, que em função do padrão de estruturas do trecho, aumenta ou diminui a incidência de um determinado tipo de curto-circuito;

- Impedância de falta a terra, que é um parâmentro fortemente aleatório, variando de praticamente zero até um valor máximo característico de cada região, em função principalmente da composição do solo, aterramentos dos neutros, etc.

O cálculo de curto-circuito probabilístico, mostrado na figura 6, é mais importante do aplicativo, pois é através dele que poderemos conhecer o perfil das correntes de curto-circuito de um alimentador e fazer inferência a respeito do comportamento de um equipamento, frente à freqüência de interrupções por curto-circuito, levando em consideração as principais características citadas anteriormente.

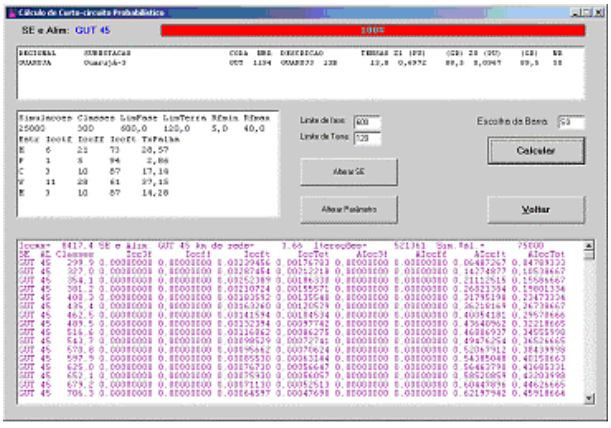

Figura 6. Módulo de cálculo de curto-circuito probabilístico.

Todos os parâmetros poderão ser alterados para que se possa atribuir valores mais próximos do comportamento das características que influenciam os cálculos de curtos-circuitos do alimentador em estudo.

F. Previsão da Manutenção de Disjuntores

A programação da manutenção preventiva dos disjuntores depende basicamente de 03 (três) condições:

a) Tempo em operação;
b) Número de abertura e fechamento em manobras;
c) Número de aberturas em curto-circuito.

O tempo em operação é determinado em função da degradação de materiais como óleos, borrachas de vedação, etc e do acúmulo de sujeira ou poluição.

O número de abertura e fechamento em manobras é um valor determinado em função da avaliação do desgaste das peças móveis e é informado pelo fabricante de acordo com o projeto.

O número de aberturas em curto-circuito pode ser definido com base na experiência de manutenção ou determinado em função do nível de curto-circuito onde o equipamento opera [2].

A condição mais crítica para efeito da manutenção em disjuntor de alimentador de distribuição é aquela que leva em consideração as operações em curto-circuito, devido às várias faltas que ocorrem, em conseqüência, principalmente, da grande extensão da rede. São também as que provocam mais desgaste nos contatos (móveis e fixos) e nas câmaras de extinção de arco, exigindo assim, manutenção preventiva mais constante.

A interrupção de elevadas correntes na faixa de tempo de alguns milissegundos até alguns segundos, quando em operação sob falta, provoca desgaste acelerado dos contatos e das câmaras de extinção de arco, além do desgaste no próprio mecanismo de comando, exigindo diminuição do intervalo de manutenção. O desgaste é proporcional a cada curto-circuito interrompido pelo disjuntor, levando em consideração sua magnitude e tempo da interrupção.

Na prática considera-se a máxima corrente eficaz simétrica obtida para um curto-circuito na saída do disjuntor. É um critério determinístico e bastante conservador, já que em um alimentador de distribuição, as faltas ocorrem ao longo do alimentador [3].

A figura 7 mostra a tela para determinação do intervalo de manutenção do disjuntor.

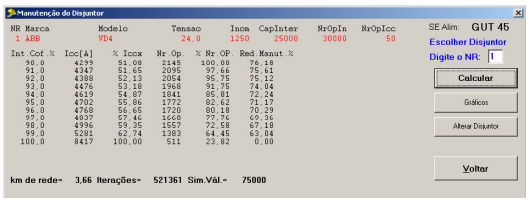

Figura 7. Módulo de previsão de manutenção do disjuntor.

De forma simplificada, os valores das correntes de curto-circuito e os respectivos valores do intervalo de manutenção do disjuntor no alimentador GUT 45, para o intervalo de confiança de 90 a 100%, é mostrado no gráfico da figura 8.

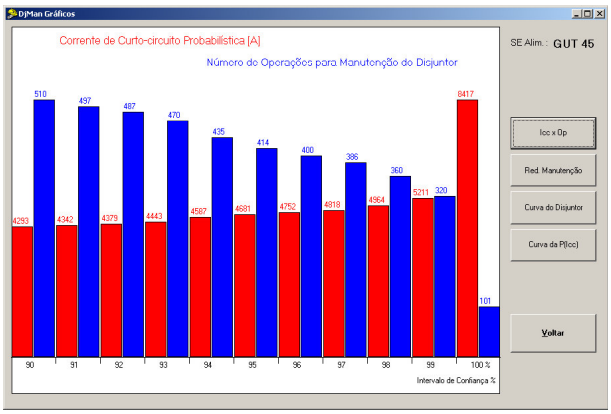

Figura 8. Gráfico do número de operações do disjuntor e do curto-circuito em função do intervalo de confiança.

A análise apenas da corrente de curto-circuito probabilística e do número de operações para manutenção do disjuntor nos mostra que há vantagens significativas abandonar a premissa de utilizar-se a máxima corrente, mas também gera dúvidas quanto ao valor a adotar.

Como o objetivo final desta análise é não comprometer técnica e economicamente o desempenho do alimentador, o risco da aplicação dessa metodologia é muito baixo para a redução da manutenção proporcionada.

A figura 9 facilita a tomada de decisão através da combinação de três fatores a considerar na escolha do intervalo de manutenção do disjuntor, que são:

1. Intervalo de confiança;
2. Valor de curto-circuito em relação ao valor máximo;
3. Redução dos custos de manutenção.

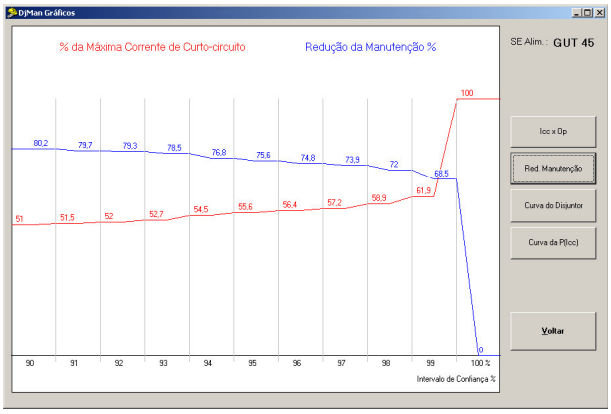

Figura 9.Gráfico da redução da manutenção e da corrente de curto-circuito em função do intervalo de confiança.

A determinação do número de operações para manutenção pode ser efetuada com a utilização do gráfico mostrado na figura 10 (disjuntor 3AH3 15 kV da Siemens®, 1999), a partir do conhecimento da corrente de curto-circuito que o disjuntor irá interromper.

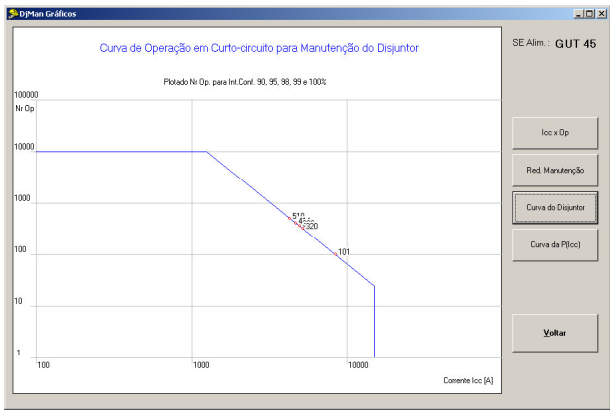

Figura 10.Curva de manutenção do disjuntor em função da corrente de curto-circuito.

Considerando a probabilidade total acumulada das correntes de curto-circuito trifásico, fase-fase e fase-terra, a figura 11 mostra o gráfico do perfil deste alimentador.

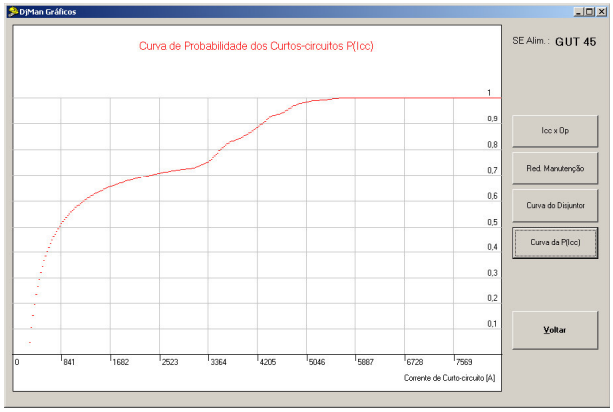

Figura 11.Gráfico da função acumulada de probabilidade de curto-circuito.

G. Conclusão

O método e as rotinas aqui desenvolvidos para cálculos dos curtos-circuitos probabilísticos em rede de distribuição, possui facilidades que permitem modelar o comportamento das correntes nos alimentadores. O estudo de caso através de simulação em um sistema real mostrou que a polarização pelo tipo de estruturas é um refinamento valioso para caracterizar o perfil das correntes.

Dois critérios para definição de parâmetros de cálculos se mostraram satisfatórios. Um deles corresponde à determinação do tamanho da amostra, definida utilizando uma proporção aos quilômetros de rede. O outro envolve a determinação da quantidade de classes, definida através de simulações, concluindo que o valor 300 é a referência ideal, para os alimentadores de média tensão com o valor da corrente de curto-circuito máxima de até 15,0 kA.

Considerar a resistência de falta como um valor constante é uma premissa não confortável nos estudos de curto-circuito e não reflete o comportamento real. Assim sendo, a resistência de falta foi considerada como uma variável aleatória dentro de intervalo pré-definido.

Observou que a significativa atenuação dos valores dos curtos-circuitos nos alimentadores à medida que se distancia da subestação é significativa para a redução da probabilidade de ocorrer o valor máximo de curto-circuito.

A utilização do conceito de intervalo de confiança para determinar que valor de corrente de curto-circuito, mostrou-se como um referencial adequado para determinação do intervalo de manutenção do disjuntor.

Considerando a quantidade de disjuntores de alimentadores de distribuição existente e a facilidade de aplicação desta metodologia, pode-se imaginar quão significativo é o impacto na redução de custo da manutenção.

Em instalações nas quais o disjuntor tem a capacidade de interrupção adequada, mesmo que ocorram correntes de curto-circuito de valores superiores ao utilizado para determinação do intervalo de manutenção, não haverá comprometimento dessa metodologia, pois esses valores serão compensados, com grande margem de certeza, por curtos-circuitos de valores inferiores.

Uma das alternativas a ser avaliada para a redução mais significativa da manutenção dos disjuntores por curto-circuito, bem como, do aumento do índice da confiabilidade do alimentador, é a redução da probabilidade de ocorrência de faltas de valores elevados, com a aplicação de estruturas de padrões de construção mais apropriadas, próximas à subestação.

III. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições de F. A. Fernandes, C. H. C. Lopes, P. de T. G. de Souza, E. A. P. Kohl, A. Cabrino, P. P. Rezende, M. A. Pereira e de F. F. B. Aronés recebidas durante a elaboração deste projeto.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Artigos em Anais de Conferências (Publicados):

[1] Mamede, Juracy P., Sato, Fujio, **Probabilistic Method to Schedule the Circuit Breakers Maintenance in Distribution System**, SCC' 10th International Symposium Short-circuit Currents in Power Systems, Lodz – Poland – October 28-29, 2002.

[3] Mamede, J. Pereira, Sato, Fujio, **Aplicação de um Método Probabilístico para Planejamento da Manutenção de Disjuntores em Sistemas de Distribuição**, XIV Congresso Brasileiro de Automática – Natal RN – 2 a 5 de setembro de 2002.

Dissertações de Teses:

[2] Alves, Edson, **Manutenção de Subestações de Distribuição de Energia Elétrica: Uma Visão Crítica e Atual** – Dissertação de Mestrado – Orientador: Grimoni, José Aquiles Baesso - São Paulo – Universidade de São Paulo, 2003 .