

Otimização da Confiabilidade em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

M. G. Da Silva, A. B. Rodrigues, C. L. C. de Castro, O. R. S. Mendez, A. C. Neto, E. A. Moutinho, N. S. A. Neto, A. B. Cavalcante, M. F. B. Aronés e V. L. P. Casas - DEE/UFMA, J.C. Mendes(CEMAR)

RESUMO

Este projeto de pesquisa tem como objetivo desenvolver métodos e técnicas para avaliar a confiabilidade de redes de distribuição de energia elétrica com configuração radial. Os modelos e técnicas desenvolvidos foram aplicados em uma área piloto definida pela CEMAR. A área definida é a Forquilha com 68500 consumidores espalhados por uma área geográfica cerca de 267km². A avaliação da confiabilidade de sistemas da área Forquilha foi realizada usando-se o método analítico de enumeração de estados. Este método permite calcular índices de confiabilidade dos pontos de carga e do sistema para redes de distribuição. Estes índices foram calculados incluindo-se diversos efeitos como: falhas ativas, passivas, momentâneas, restrições de transferência de carga, curva de carga, falhas operacionais em dispositivos de proteção e chaveamento. Além disso, foram também estimados os custos de interrupção para as classes de consumidores da área Forquilha. Os resultados das análises realizadas permitiram identificar áreas críticas e vulnerabilidades nos alimentadores da Forquilha e também propor diagnósticos para os mesmos.

PALAVRAS-CHAVE

Confiabilidade; Redes de Distribuição; Restrições de transferência de carga; custos de interrupção; índices de confiabilidade; otimização.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, diversas técnicas têm sido utilizadas para o cálculo e a análise de índices de confiabilidade em sistemas de distribuição de energia elétrica [1,2]. Os principais índices usados na análise da confiabilidade de sistemas de distribuição são: taxa de falha (λ), tempo de reparo (r) e indisponibilidade anual (U). Estes índices fornecem informações na análise preditiva dos sistemas. A análise preditiva permite prever variações no desempenho do sistema quando mudanças na topologia ou esquemas de operação são realizados. Os índices λ , r e U podem ser utilizados para calcular novos índices que levam em consideração aspectos associados com o desempenho passado do sistema. Os índices mais utilizados para quantificar o desempenho passado do sistema são associados com o Índice de Frequência Média de Interrupção do Sistema (SAIFI – “System Average Interruption Frequency Index”), o Índice de Duração Média de Interrupção do Sistema

(SAIDI – “System Average Interruption Duration Index”), Índice de Duração Média de Interrupção do Consumidor (CAIDI – “Customer Average Interruption Duration Index”), Energia Média não Fornecida (“ENS-Energy Not Supplied”). A análise preditiva de sistemas de distribuição pode também ser estendida para realizar previsões ou estimativas dos índices SAIFI, SAIDI, CAIDI e ENS. Estas estimativas permitem utilizar os índices SAIFI, SAIDI, CAIDI e ENS no planejamento de sistemas de distribuição. Estes índices podem ser utilizados para analisar a confiabilidade de um alimentador ou de um sistema inteiro. Não é tão complicado utilizar os índices do processo preditivo para incluir o custo de interrupção do fornecimento de energia para o consumidor no cálculo e análise dos índices de confiabilidade para se obter indicativos associados com o benefício da confiabilidade para o consumidor. A incorporação do custo de interrupção na análise de confiabilidade preditiva de sistemas de distribuição permite classificar alternativas de projetos baseando-se na razão de custo/benefício associado com um dado nível de confiabilidade. Atualmente, o método que é considerado o mais prático e mais realista para se obter informações a respeito dos prejuízos causados pela falta de energia é o método de pesquisa direta ao consumidor [3]. Neste projeto de pesquisa o grupo de sistemas de potência do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão aplicou o método de pesquisa direta ao consumidor, na área da Forquilha do sistema de distribuição da CEMAR com o objetivo de estimar os custos de interrupção devido faltas de energia elétrica para as classes consumidoras desta área. Os resultados da pesquisa aos consumidores foram utilizados para gerar a Função Custo de Interrupção. Esta função foi combinada com o método analítico de enumeração de estados [2] para se realizar a análise do custo/benefício na área estudada.

II. MÉTODO UTILIZADO NO CÁLCULO E ANÁLISE DE ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

Existem duas técnicas para avaliar quantitativamente a confiabilidade de sistemas de distribuição: métodos analíticos e de simulação de Monte-Carlo [2]. O método analítico calcula o impacto de cada contingência do sistema

A equipe deste projeto agradece a CEMAR pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste projeto.

(faltas em linhas, transformadores ou dispositivos de proteção) e pondera este impacto baseado na frequência e duração desta contingência para obter índices de confiabilidade. O método de simulação de Monte-Carlo é semelhante ao método analítico, exceto que no método de Monte-Carlo as contingências são sorteadas aleatoriamente. Para qualquer um destes dois métodos a seqüência de avaliação das contingências em redes de distribuição obedece basicamente os seguintes passos:

- 1) **Contingência:** uma falta ocorre no sistema
- 2) **Acionamento de dispositivos de proteção:** dispositivos de proteção (disjuntores, fusíveis) atuam para eliminar a falta.
- 3) **Restauração de pontos de carga a montante da falta:** dispositivos de seccionamento a montante da falta, tais como chaves normalmente fechadas, desconectores (“jumpers”) e fusíveis, são abertos para isolar a falta. Esta operação permite que o dispositivo de proteção que atuou para eliminar a falta seja reinicializado e o fornecimento de energia para todos os consumidores a montante da falta seja restaurado.
- 4) **Restauração dos pontos de carga a jusante da falta:** outras seções que permanecem desenergizadas são isoladas abrindo dispositivos de seccionamento a jusante da falta. Esta operação permite que alguns consumidores localizados a jusante da falta possam ser restaurados através de caminhos alternativos pelo fechamento de chaves NA.
- 5) **Reparo:** o componente que sofreu a falta é concertado e o sistema retorna ao seu estado pré-falta

Nesta pesquisa o método utilizado para calcular os índices de confiabilidade é método de enumeração de estados. O método analítico implementado para analisar os alimentadores da área da Forquilha incorpora as seguintes características:

- Cálculo dos Índices de Confiabilidade: λ , r , U , ENS, SAIFI, SAIDI e CAIDI. São consideradas ambas, cargas transferíveis e não transferíveis do sistema e a incorporação de todos os modos realísticos de falhas, incluindo falhas permanentes, falhas ativas, falhas temporárias, condições de travamento de disjuntores e falhas devido sobrecargas. Estes tipos de falhas são modelados para os seguintes componentes: linhas de transmissão aéreas, transformadores e “jumpers”. Os modos de restauração incluem reparo, substituição, chaveamento, ações de transferência e religamento automático;
- Cálculo do custo de interrupção para consumidores usando o método analítico de enumeração de estados. Criação da Função Custo de Interrupção -CDF (Customer Damage Function) para uma área e o cálculo dos valores médios dos custos de interrupção de energia, por ponto de carga e sistema;

- Alocação ótima de dispositivos de seccionamento usando Computação Evolutiva;
- Cálculo de índices de confiabilidade considerando a Capacidade de Restrições de Transferência de Potência nos alimentadores;
- Modelagem da Curva de Carga Anual do Sistema.

III. RESULTADOS

As subseções A, B e C apresentam os resultados deste projeto de pesquisa associados com: a pesquisa aos consumidores, a análise de confiabilidade, otimização e a interface gráfica do programa computacional ACORDEE [5].

A. Pesquisa Direta aos Consumidores

As Funções Custo de Interrupção foram geradas a partir da estimação dos custos de interrupção de energia para cada classe de consumidores da área Forquilha. As amostras utilizadas nesta estimação são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1

Amostras das classes de consumidores da área Forquilha.

Setor	Amostra
Residencial	500
Comercial	300
Industrial	50
Prédios Públicos	30

A Tabela 2 apresenta as estimativas dos custos de interrupção, resultantes da pesquisa aos consumidores, por respondente para as classes de consumidores da área Forquilha. Resultados mais detalhados estão apresentados em [4].

TABELA 2

Custos de Interrupção para as Classes de Consumidores da Forquilha.

Setor	Duração	R\$/int.	
Residencial	20 min	0,5791	
	1 hora	2,9578	
	4 horas	5,3177	
Comercial	1 min	4,8892	
	20 min	24,6274	
	1 hora	68,3349	
	2 horas	94,5962	
	4 horas	187,4670	
	8 horas	344,3412	
	Prédios Públicos	1 min	0,0000
20 min		13,7931	
1 hora		66,5517	
4 horas		320,3448	
	8 horas	562,0690	
	Industrial	1 min	14,6000
		20 min	95,3778
		1 hora	273,3111
4 horas		522,7111	
	8 horas	925,9333	

B. Análise de Confiabilidade

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a análise de confiabilidade do alimentador AL01C8 da Forquilha. O alimentador AL01C8 é constituído por: 210 pontos de carga, 8 interligações com alimentadores adjacentes, 948 circuitos, 19095 consumidores e possui um pico de carga de 8200 kW. Esta análise foi realizada considerando-se os índices: SAIFI, SAIDI, ENS e Custos de Interrupção Esperados (CIEC). Estes índices foram selecionados por serem os mais utilizados na análise de confiabilidade preditiva de sistemas de distribuição. Além disso, casos de estudos 1,...,4 foram utilizados para analisar os efeitos dos modos de falha dos componentes, nos índices SAIFI, SAIDI, ENS e CIEC. Estes casos de estudos são apresentados a seguir:

Caso 0 - Caso Base:

- A Probabilidade de Falha Operacional das proteções (PFO-proteções) é igual a zero, ou seja, as proteções não travam quando são solicitadas para operarem;
- PFO-chaves NA=0.0;
- Não há restrições de transferência de carga;
- Não há falhas associadas com transformadores e jumpers;

Caso 1:

- Idêntico ao Caso Base, porém com a PFO-fusíveis=0.1 e a PFO-religadores=0.05.

Caso 2:

- Idêntico ao Caso Base, porém com a PFO-chaves NA=0.3

Caso 3:

- Idêntico ao Caso Base, porém com as restrições de transferência de carga incluídas.

Caso 4:

- Idêntico ao Caso Base, porém com falhas de transformadores incluídas. Os dados de falhas dos transformadores usados neste estudo de caso foram:
 - Taxa de falha permanente: 0.01 falhas/ano
 - Tempo de reparo: 5 horas
 - Tempo de chaveamento: 1.0 hora

A Tabela 3 e a Figura 1 apresentam as variações percentuais nos índices SAIFI, SAIDI, ENS e CIEC, com relação aos respectivos índices do Caso Base (Tabela IV), para os casos de estudo 1,...,4.

TABELA 3

Variações percentuais nos índices para o alimentador FQLC8

ÍNDICE	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
SAIFI [f/ano]	7,4423	0,0000	0,0000	2,1165
SAIDI [h/ano]	4,2366	18,7302	1,0945	21,6446
ENS [MWh/ano]	4,1080	18,5911	1,0789	21,5282
CIEC [R\$/ano]	5,4389	15,4094	0,8625	19,3889

TABELA 4

Índices de confiabilidade para o Caso Base do alimentador FQLC8

Índice	Valor Estimado
SAIFI [f/ano]	2,4249
SAIDI [h/ano]	0,6311
ENS [MWh/ano]	3,4684
CIEC [R\$/ano]	88278,5579

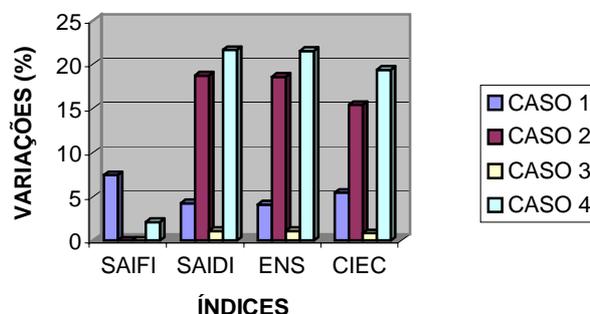


FIGURA 1. Gráfico de barras das variações percentuais nos índices de confiabilidade do alimentador FQLC8.

A partir da Tabela 3 e da Figura 1 pode-se concluir que:

- As falhas em transformadores e as PFO resultaram em variações acima de 15% nos índices SAIDI, ENS e CIEC do FQLC8;
- Restrições de carregamento possuem um impacto quase insignificante nos índices de confiabilidade do alimentador FQLC8. Por exemplo, as restrições de carregamento produziram uma variação de 1.0945% no índice de confiabilidade SAIDI com relação ao SAIDI do Caso Base.

Os resultados apresentados acima permitem realizar o seguinte diagnóstico para o alimentador FQLC8:

- O alimentador FQLC8 tem deficiências associadas com a capacidade de restauração do fornecimento de energia para os consumidores que foram interrompidos após a ocorrência de uma falha. Estas deficiências estão associadas com a operação de chaves NA para realizar transferências de carga entre alimentadores após a ocorrência de uma falha. Isto pode ser um indicativo de que é necessário aumentar o número de equipes de trabalho ou instalar chaves NA automáticas para reduzir os tempos de restauração para os consumidores;
- Embora não tenham sido encontradas falhas associadas com transformadores nos bancos de dados da CEMAR, relacionados com a área da Forquilha, pode-se observar que as falhas destes componentes podem ter efeitos significantes nos índices de confiabilidade do alimentador FQLC8. Devido a isto, recomenda-se que sejam adquiridos mais dados sobre a ocorrência de falhas em transformadores para que os seus efeitos nos índices de confiabilidade possam ser precisamente avaliados.

C. Otimização: Algoritmo Evolutivo

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de otimização da confiabilidade de sistemas de distribuição, nos alimentadores da subestação da Forquilha. Este algoritmo otimiza a confiabilidade de sistemas de distribuição minimizando os custos de interrupção (CIEC) e expansão da rede elétrica através da Alocação Ótima de Dispositivos de Chaveamento (AODC), tais como, chaves NA e NF. A aplicação do algoritmo de AODC foi realizada para todos os alimentadores da subestação da Forquilha. Entretanto, devido ao grande número de resultados e limitação de espaço, será demonstrada nesta seção apenas nos alimentadores AL01C5 e AL01C8 da subestação da Forquilha. Resultados similares, aos obtidos com os alimentadores AL01C5 e AL01C8 também foram encontrados com a aplicação do algoritmo AODC nos demais alimentadores da área da Forquilha. Os valores dos custos de instalação de chaves NA e NF usados na otimização da confiabilidade dos alimentadores AL01C5 e AL01C8 são apresentados na Tabela 5. Além disso, a Tabela 6 apresenta os dados de confiabilidade para as proteções e chaves NA que foram utilizados nos estudos de otimização. Os custos de interrupção para os consumidores foram calculados a partir das funções custo de interrupção apresentadas na Tabela 2.

TABELA 5

Custos de instalação de dispositivos de chaveamento

Custos	Valor
Custo de compra de chave NF manual	362.40 R\$
Custo de instalação de chave NF manual	1440.00 R\$
Custo de compra de chave NA manual	362.40 R\$
Custo de instalação de chave NA manual	27252.56 R\$/Km

TABELA 6

Dados de confiabilidade para proteções e chaves NA que foram utilizados nos estudos de otimização.

Dispositivo	PFO
Fusível	0.10
Religador	0.05
Disjuntor	0.05
Chaves NA	0.30

A Tabelas 7 e 8 apresentam os valores dos índices de confiabilidade SAIFI, SAIDI, ENS e CIEC para as configurações original e otimizada dos alimentadores AL01C5 e AL01C8 após 10 gerações do algoritmo evolutivo. Além disso, estas Tabelas também apresentam as variações percentuais nos índices SAIFI, SAIDI, ENS e CIEC calculadas com relação às configurações originais dos alimentadores AL01C5 e AL01C8. Os custos de expansão e o número de chaves instaladas, para as configurações otimizadas, dos alimentadores AL01C5 e AL01C8 são apresentados na Tabela 9.

TABELA 7

Índices de confiabilidade ótimos para o alimentador AL01C5

Índice	Configuração original	Configuração ótima	Variação (%)
SAIFI [falhas/ano]	0,36139519	0,36139519	0,00000000
SAIDI [horas/ano]	0,24197164	0,22675845	6,28718193
ENS [MWh/ano]	0,24089881	0,22216117	7,77822077
CIEC [R\$/ano]	17940,9258	16143,1884	10,02031524

TABELA 8

Índices de confiabilidade ótimos para o alimentador AL01C8

Índice	Configuração original	Configuração ótima	Variação (%)
SAIFI [falhas/ano]	1,50626024	1,50626024	0,00000000
SAIDI [horas/ano]	1,12105169	0,75382492	32,75734489
ENS [MWh/ano]	6,14996686	4,19232354	31,83177020
CIEC [R\$/ano]	148868,0273	97301,1193	34,63934389

TABELA 9

Custos de instalação e número de chaves associados com as configurações ótimas dos alimentadores AL01C5 e AL01C8

Alimentador	Custo de expansão	Nº de chaves NF instaladas	Nº de chaves NF instaladas
AL01C5	65384,8000	25	2
AL01C8	565148,0000	291	4

A partir das Tabelas 7 e 8 pode-se observar que o algoritmo de AODC produziu reduções significativas nos índices de confiabilidade dos alimentadores AL01C5 e AL01C8. Entretanto, deve ser notado que as maiores reduções nos índices de confiabilidade estão associadas com o alimentador AL01C8. Por exemplo, a redução no CIEC do alimentador AL01C5 foi apenas de 10,0203%, enquanto que a redução no CIEC associada com alimentador AL01C8 foi de 34,6393%. Este efeito está associado com o tamanho do alimentador. Em alimentadores de grande porte, tais como o AL01C8, o número de seções candidatas para instalação de dispositivo de chaveamento é muito grande. Conseqüentemente, o algoritmo evolutivo tem boas chances de obter melhores soluções a cada geração. Por outro lado, em pequenos alimentadores, o número de seções candidatas para a instalação de dispositivos de chaveamento é bastante reduzido. Portanto, as chances do algoritmo evolutivo atingir soluções melhores a cada geração são muito pequenas.

D. Interface Gráfica

O Programa ACORDEE (*Análise de Confiabilidade em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*) é um programa gráfico desenvolvido sobre a plataforma C++ Builder 5.0 da Borland Corporation com Banco de Dados SQL Server 7.0[2-7] proporcionando performance de acesso aos dados, segurança de armazenamento e recursos de redes. Este Programa foi desenvolvido pelo Grupo de Sistemas de Potência do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMA. A versão 1.0 do ACORDEE foi concluída em outubro de 2002.

O Programa ACORDEE é um Programa com Interface Gráfica Interativa que estabelece uma interação amigável

com o usuário, possibilitando maior segurança e conforto no cadastramento do sistema elétrico e de seus respectivos dados, além de garantir uma representação mais didática e representativa dos sistemas de Distribuição de Energia Elétrica em estudo.

O ACORDEE é projetado para calcular índices de confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica, com configuração radial, usando o critério de perda parcial ou total de carga. O Programa pode ser usado para editar dados via teclado do microcomputador. A principal vantagem é a maior flexibilidade em digitar e checar os dados introduzidos. As técnicas empregadas no ACORDEE se baseiam no Método de Enumeração de Estados e cada componente é representado por um modelo de três estados: o estado em operação, o estado imediatamente seguindo uma falha e o estado seguindo uma subsequente operação de chaveamento ou operação de isolamento da falha. Estas técnicas permitem que todos os procedimentos e modos de falha e restauração sejam modelados muito realisticamente e dão uma boa representação do comportamento do sistema.

O Programa fornece duas opções de menus (um menu principal e um menu auxiliar), uma barra de ferramenta de atalhos e outras facilidades para permitir ao usuário realizar um estudo de confiabilidade em sistemas radiais. O menu principal envolve os seguintes passos:

1. Acesso às facilidades do Programa.
2. Acesso ao Banco de Dados.
3. Acesso aos parâmetros de configuração das ferramentas de simulação.
4. Acesso ao arquivo HELP.
5. Entrada de Dados da Curva de Carga.
6. Execução do Fluxo de Carga e Análise de Confiabilidade.
7. Análise de Resultados e Estudos de Sensibilidade.
8. Saída do Programa.

O menu auxiliar envolve os seguintes passos:

1. Entrada de dados dos componentes do sistema.
2. Modo de rotação dos transformadores (de zero a 360 graus).
3. Exclusão de componentes na tela.
4. Saída do Programa.

A Barra de Ferramenta envolve os seguintes passos:

1. Construção de um novo Sistema.
2. Modo de seleção de componentes.
3. Modo de deslocamento dos componentes.
4. Modo de modificação das dimensões do diagrama unifilar do sistema (zoom).
5. Modo de busca de componentes na Tela.
6. Modo de inserção de texto.
7. Modo com grade auxiliar de desenho para auxiliar na construção de linhas retas.
8. Saída do Programa.

O Banco de Dados é composto de um conjunto de planilhas onde são armazenadas todas as informações necessárias para a representação gráfica do sistema elétrico, além dos seus respectivos dados elétricos, dados de confiabilidade e ainda informações pertinentes aos custos de interrupções obtidos dos questionários setoriais. A Figura 2 apresenta uma das telas do programa ACORDEE para demonstrar um dos recursos gráficos do programa.

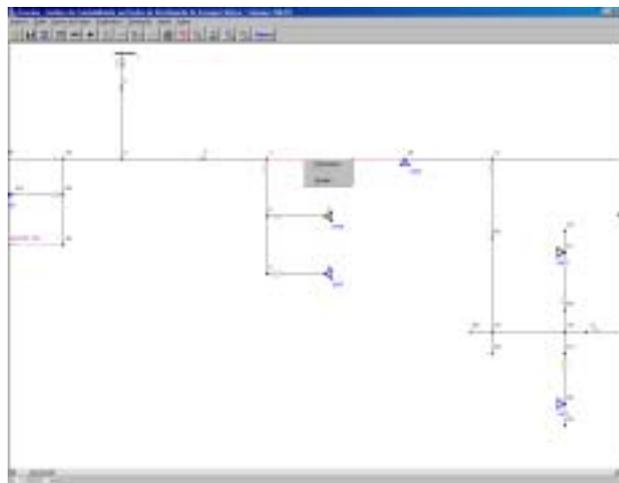


FIGURA 2. Tela do programa ACORDEE mostrando um diagrama unifilar de um sistema de distribuição

IV. CONCLUSÃO.

Este projeto de pesquisa teve como resultado o desenvolvimento de um modelo computacional para avaliar a confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica. As características do modelo desenvolvido foram integradas em um software com uma interface gráfica amigável que permite aos engenheiros e pessoal de planejamento realizar análises interativas da confiabilidade de redes de distribuição.

Os resultados obtidos permitiram identificar áreas críticas e vulnerabilidades da área de estudo definida pela CEMAR. Esta identificação permitiu selecionar e sugerir alternativas de reforço para melhorar o desempenho do sistema de distribuição.

Dentre os resultados deste Projeto estão também incluídos os dados estatísticos resultantes da pesquisa direta às classes de consumidores da área de estudo da CEMAR. Estes dados estatísticos permitiram identificar o impacto de interrupções do fornecimento de energia elétrica nas atividades realizadas pelos consumidores. A avaliação quantitativa e econômica deste impacto foi realizada a partir da geração da Função Custo de Interrupção para cada classe de consumidor. Esta função é utilizada para calcular a razão de custo benefício de diversos projetos e alternativas de reforço e melhoria da rede elétrica. Além disso, esta função foi combinada com os custos de expansão da rede elétrica para formar a função objetivo do problema de alocação ótima de dispositivos de chaveamento. Este problema foi resolvido combinando-se o modelo desenvolvi-

do para a análise de confiabilidade com algoritmos evolutivos. A aplicação do algoritmo de alocação de dispositivos de chaveamento nos alimentadores da Forquilha permitiu obter reduções de até 34% nos índices de confiabilidade dos alimentadores analisados.

V. AGRADECIMENTOS

A equipe do projeto CONFIREDE agradece a CEMAR da qual, em diversos estágios deste projeto, recebeu apoio. A equipe agradece a colaboração dos usuários respondentes da Pesquisa (“survey”) sem os quais não poderia ter sido realizado este trabalho.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Roy Billinton, Fotuhi-Firuzabad and Lina Bertling., Bibliography on the application of probability methods in power systems reliability evaluation, 1996-1999, *IEEE Trans. on PWRs*, 16(4), pp. 231-236, Novembro de 2001.
- [2] Roy Billinton and R. N. Allan, Reliability Evaluation of Engineering Systems, Plenum Press, 1992
- [3] G. Wacker and R. Billinton. Customer Cost of Electric Service Interruption , *Proceedings of IEEE*, 77(6), pp. 919-930, 1989.
- [4] Grupo de Sistemas de Potência, “Relatório Final Completo do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Otimização da Confiabilidade em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”, DEE-UFMA, disponibilizado para a CEMAR em Novembro de 2002.
- [5] Manual do Programa Computacional ACORDEE, Grupo de Sistemas de Potência, DEE/UFMA, Novembro, 2002.