


CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE MULTI-
ÁREA COM RELAÇÃO A VARIAÇÕES NAS TAXAS DE FALHA E REPARO DOS
EQUIPAMENTOS

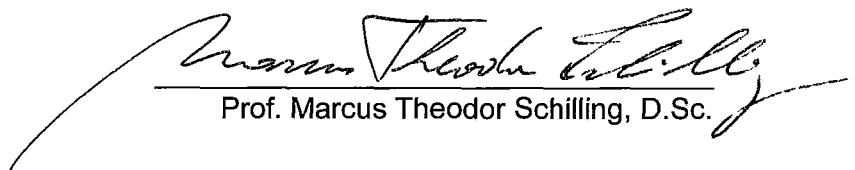
Renato Volponi Lício

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:


Prof. João Lizardo Araújo, D.Sc.
(Presidente)


Eng. Albert C. Geber de Melo, D.Sc.


Prof. Marcus Theodor Schilling, D.Sc.


Eng. João Carlos de Oliveira Mello, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 1995

LÍCIO, RENATO VOLPONI

Cálculo das Sensibilidades dos Índices de Confiabilidade Multi-Área com Relação a Variações nas Taxas de Falha e Reparo dos Equipamentos. (Rio de Janeiro) 1995.

VI, 120p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Sistemas e Computação, 1995)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Confiabilidade Multi-Área

I - COPPE/UFRJ II - TÍTULO (série)

*Dedico este trabalho a minha mulher IRENE,
e aos meus filhos CAROLINA e PEDRO*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao amigo Albert Geber de Melo, pela sugestão do tema desta Tese, pela sua excelente orientação e pelas inúmeras vezes que, com paciência e dedicação tirou dúvidas e apontou caminhos.

Agradeço ao Prof. João Lizardo Araújo pela sua orientação segura, e pelas sugestões feitas ao longo deste trabalho.

Agradeço especialmente a Adelino Rodrigues, Edmundo Pochmann e Carlos Eduardo de A. Silva de FURNAS pelo interesse e compreensão demonstrados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao colegas do Subgrupo de Confiabilidade SGCONF, especialmente a Ivana Costa Nasser e a Jorge Luís de Carvalho Brandão pelo entusiasmo e interesse em acompanhar este trabalho.

Aos meus colegas de FURNAS que durante estes anos compartilharam comigo a ansiedade de ver este trabalho pronto, o meu muito obrigado.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE MULTI-ÁREA COM RELAÇÃO A VARIAÇÕES NAS TAXAS DE FALHA E REPARO DOS EQUIPAMENTOS.

Renato Volponi Lício
Abril, 1995

Orientador: João Lizardo Araújo
Co-orientador: Albert Cordeiro Geber de Melo

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Este trabalho descreve uma metodologia para calcular as sensibilidades de índices de confiabilidade multi-área tais como LOLP, EPNS e LOLF, com respeito a variações nas taxas de falha e reparo dos equipamentos. O sistema é representado por uma *rede de fluxos*, e a condição de suprimento de cada estado é verificada pelo cálculo do *corte mínimo* (fluxo máximo) para o estado. A metodologia desenvolvida é geral, e as sensibilidades são calculadas para variações nas taxas de indisponibilidades forçada dos equipamentos, o que permite obter valores exatos para as derivadas. A metodologia desenvolvida pode ser implementada empregando enumeração de estados, simulação Monte Carlo ou o algoritmo de integração direta. São desenvolvidas expressões para o cálculo das sensibilidades em função de cada algoritmo utilizado. A implementação em programas já existentes de avaliação de confiabilidade que usem integração direta ou simulação Monte Carlo, é simples, pois os índices de confiabilidade e suas sensibilidades com relação às taxas de

indisponibilidade forçada dos equipamentos, podem ser calculados *simultaneamente*. A metodologia proposta é ilustrada e discutida através de um caso estudo, com 5 áreas, derivado do sistema Sul/Sudeste brasileiro, onde são considerados 255 unidades geradoras e 5 interligações. No caso exemplo é mostrado também, que podem ser calculadas com boa aproximação, as sensibilidades para variações simultâneas em mais de um parâmetro de falha ou para vários equipamentos. Estas sensibilidades permitem não só ordenar os equipamentos com relação a seus impactos sobre os índices de confiabilidade como também estimar o impacto das incertezas dos parâmetros sobre os índices de confiabilidade.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

AN APPROACH TO CALCULATE EXACT SENSITIVITIES OF MULTI-AREA RELIABILITY INDICES WITH RESPECT TO DISCRETE VARIATIONS OF EQUIPMENT FAILURE AND REPAIR RATES

Renato Volponi Lício
April, 1995

Thesis Supervisors: João Lizardo Araújo and Albert Geber de Melo

Department: Systems and Computational Engineering

This work describes a methodology for calculating the sensitivities of multi-area reliability indices such as LOLP, EPNS and LOLF with respect to variations in equipment failure and repair rates. The system is modeled as a *linear network flow*, and the capacity of load supply can be assessed by calculating the *minimum capacity cut* between the source and terminal nodes. The methodology is general and calculating sensitivities regarding variations on the forced outage rate of the equipments results in exact values for the derivatives. The developed methodology can be implemented either using state enumeration, Monte Carlo simulation or direct integration algorithms. Expressions are developed for each algorithm. The methodology is easy to implement on existing reliability evaluation programs either using Monte Carlo simulation or direct integration method. The sensitivities of the reliability indices can be calculated simultaneously with reliability indices. The proposed methodology is illustrated in a case study with a 5-area Brazilian

Southeastern system and the results are compared with those obtained using a Monte Carlo scheme. It is also shown that can be obtained a good approximation for variations in more than one failure paramters or for various equipments. These sensitivities allow ranking equipments in terms of their effect on system reliability indices as well as estimating the impact of parameter uncertainty on reliability indices.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	<i>x</i>
LISTA DE TABELAS	<i>xi</i>
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
I.1 Considerações Gerais	1
I.2 Estado da Arte	2
I.3 Estrutura da Tese	3
CAPÍTULO II - CONFIABILIDADE MULTI-ÁREA	5
II.1 Introdução	5
II.2 Modelo dos Equipamentos	6
II.3 Representação Multi-Área de um Sistema de Potência	8
II.3.1 Obtenção da COPFT	9
II.3.2 Teorema do Fluxo Máximo/Corte Mínimo	11
II.3.3 Caracterização dos Modos de Falha	12
II.4 Conceituação Geral dos Índices de Confiabilidade	14
II.4.1 Definição da Função-Teste	14
II.4.2 Função-Teste Alternativa para a LOLF	15
II.5 Cálculo dos Índices via Simulação Monte Carlo	17
II.5.1 Cálculo da Precisão das Estimativas	18
II.5.2 Algoritmo de Simulação Monte Carlo	18
II.6 Exemplo - Cálculo dos Índices Usando Enumeração Sucessiva dos Estados	19
II.7 Cálculo dos Índices via Integração Direta	22
II.8 Exemplo - Cálculo dos Índices usando Integração Direta	27
II.9 Resumo	34
CAPÍTULO III - CÁLCULO ANALÍTICO DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE	35
III.1 Introdução	35
III.2 Cálculo dos Índices de Confiabilidade	35
III.3 Cálculo das Sensibilidades dos Índices de Confiabilidade em relação à indisponibilidade de um equipamento	36

III.3.1	Linearidade dos Índices de Confiabilidade com u_k	41
III.4	Sensibilidades em Relação a um Grupo de Equipamentos	42
III.5	Cálculo das Sensibilidades dos Índices de Confiabilidade via Simulação Monte Carlo	44
III.6	Exemplo de Cálculo das Sensibilidades Usando Enumeração de Estados	47
III.7	Resumo	58
CAPÍTULO IV - CÁLCULO DAS SENSIBILIDADE USANDO ALGORÍTMO DE INTEGRAÇÃO DIRETA		59
IV.1	Cálculo Analítico das Sensibilidades do Índices de Confiabilidade	59
IV.1.1	Obtenção das Expressões para as Sensibilidades	59
IV.1.2	Expressões para as Sensibilidades	64
IV.1.3	Desconvolução da COPFT	65
IV.2	Cálculo das Sensibilidade dos Índices de Confiabilidade Via Simulação Monte Carlo	67
IV.3	Cálculo das Sensibilidade dos Índices de Confiabilidade Empregando o Algoritmo de Integração Direta	67
IV.3.1	Cálculo da Sensibilidade da LOLP	69
IV.3.2	Cálculo da Sensibilidade da EPNS	70
IV.3.3	Cálculo da Sensibilidade da LOLF	71
IV.4	Linearidade dos Índices de Confiabilidade com u_k .	73
IV.5	Exemplo de Cálculo das Sensibilidades Usando o Algoritmo de Integração Direta	73
IV.6	Resumo	81
CAPÍTULO V - APLICAÇÕES DA METODOLOGIA PROPOSTA		82
V.1	Definição do Caso - Estudo	82
V.2	Cálculo das Sensibilidades dos Índices de Confiabilidade via Simulação de Monte Carlo	84
V.3	Cálculo das Sensibilidades dos Índices de Confiabilidade vai Integração Direta	94
V.4	Variações Simultâneas em mais de um Parâmetro	99
V.5	Esforço Computacional	103
V.6	Resumo	105
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS		106
APÊNDICE A - CONVOLUÇÃO DISCRETA PADRONIZADA		109

APÊNDICE B - DESENVOLVIMENTO DETALHADO DOS EXEMPLOS APRESENTADOS	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Pág
II.1 - Comportamento Histórico de Um Equipamento	6
II.2 - Comportamento Histórico Médio de Um Equipamento	7
II.3 - Diagrama de Espaço de Estados de Um Equipamento Modelado a Dois Estados	7
II.4 - Exemplo de um Sistema Multi-Área	8
II.5 - Modelo de Fluxo em Redes	9
II.6 - Cortes em um Sistema com Duas Áreas	12
II.7 - Espaço de Estados para um Sistema de Duas Áreas	23
II.8 - Representação Geométrica dos Cortes do Sistema	24
III.1 - Efeito sobre a LOLP	56
III.2 - Efeito sobre a EPNS	56
III.3 - Efeito sobre a $LOLF_f$	56
III.4 - Efeito da variação da FOR sobre a $LOLF_s$	56
III.5 - Variação em u_1	57
III.6 - Variação em u_2	57
III.7 - Variação em u_3	57
III.8 - Variação em u_4	57
V.1 - Sistema de 5-Áreas Derivado do Sistema Brasileiro	82
V.2 - Sensibilidade da LOLP em Relação aos Equipamentos	97
V.3 - Sensibilidade da EPNS em Relação aos Equipamentos	97
V.4 - Sensibilidade da $LOLF_f$ em Relação aos Equipamentos	98
V.5 - Sensibilidade da $LOLF_s$ em Relação aos Equipamentos	98
A.1 - Estados m, i e n	110
A.2 - Padronização de Uma Unidade Geradora	111

LISTA DE TABELAS

	Pág.
II.1 - Parâmetros do Sistema	19
II.2 - Estados do Sistema	20
II.3 - Identificação dos Cortes do Sistema	21
II.4 - Probabilidades e Taxas de Transição Incremental Para os Estados de Falha	22
II.5 - COPFT inicial do ARCO 1	27
II.6 - COPFT para o ARCO 1	28
II.7 - COPFT para o ARCO 2	28
II.8 - COPFT para o ARCO 3	28
II.9 - Taxas de Transição Incremental para o ARCO 1	32
II.10 - Taxas de Transição Incremental para o ARCO 2	33
II.11 - Taxas de Transição Incremental para o ARCO 3	33
II.12 - Índices de Confiabilidade Usando Integração Direta	34
III.1 - Parâmetros do Sistema	47
III.2 - Valores de $G(e_k)$	48
III.3 - Valores de $H(e_k)$	49
III.4 - Valores de $J(e_k)$	50
III.5 - Valores de G e H para os Estados de Falha do Sistema	50
III.6 - Valores de G e J para os Estados de Sucesso do Sistema	50
III.7 - Probabilidades e Taxas de Transição Incremental para os Estados de Sucesso	54
III.8 - Sensibilidades do Índices de Confiabilidade para Cada Equipamento	55
III.9 - Classificação dos Equipamentos Segundo o Impacto sobre os Índices	55
IV.1 - Parâmetros do Sistema	74
IV.2 - COPFT para o ARCO 1	74
IV.3 - COPFT para o ARCO 1 Considerando a Retirada do Equipamento e_1	75
IV.4 - COPFT para o ARCO 1 Considerando a Retirada do Equipamento e_2	76
IV.5 - COPFT para o ARCO 2	76
IV.6 - COPFT para o ARCO 2 Considerando a Retirada do Equipamento e_3	76
IV.7 - COPFT para o ARCO 3	76
IV.8 - COPFT para o ARCO 3 Considerando a Retirada do Equipamento e_4	76
IV.9 - Sensibilidades da LOLP	80
IV.10 - Sensibilidades da EPNS	80
IV.11 - Sensibilidades da LOLFf	80
IV.12 - Sensibilidades da LOLFs	81

V.1 - Dados de Geração e Carga	83
V.2 - Dados das Interligações	83
V.3 - Taxas de Falha e Reparo das Unidades Geradoras	83
V.4 - Número de Unidades por Área Pertencentes a cada Calse de Falha	84
V.5 - Índices de Confiabilidade Usando Simulação de Monte Carlo	85
V.6 - Sensibilidade da LOLP	85
V.7 - Sensibilidade da EPNS	85
V.8 - Sensibilidade da LOLF para Perturbações nas Taxas de Falha das Interligações	86
V.9 - Sensibilidade da LOLF para Perturbações nas Taxas de Reparo das Interligações	86
V.10 - Estimativa para a Sensibilidade da LOLD para Variação nas Taxas de Reparo das Interligações	86
V.11 - Classificação das Interligações Segundo o Impacto sobre os Índices	87
V.12 - Alteração na Indisponibilidade da Interligação entre as Áreas 1-5	88
V.13 - Novos Valores dos Índices para Variações na FOR da Interligação 5	89
V.14 - Características das Unidades Geradoras	89
V.15 - Sensibilidade da LOLP dos Geradores	90
V.16 - Sensibilidade da EPNS dos Geradores	90
V.17 - Sensibilidade da LOLF para Perturbações nas Taxas de Falha dos Geradores	90
V.18 - Sensibilidade da LOLF para Perturbações nas Taxas de Reparo dos Geradores	90
V.19 - Classificação das Unidades Geradoras Segundo o Impacto sobre os Índices	91
V.20 - Taxas de Falha e Reparo de Itaipu e Angra	91
V.21 - Alterações nas Indisponibilidades de Itaipu e Angra	92
V.22 - Novos Valores dos Índices - $\Delta\mu$ em Uma Unidade Geradora de Itaipu	92
V.23 - Novos Valores dos Índices - $\Delta\lambda$ na Usina de Angra I	92
V.24 - Classificação dos Equipamentos Segundo o Impacto sobre os Índices	93
V.25 - Índices de Confiabilidade Usando Integração Direta	94
V.26 - Comparação entre Valores de Sensibilidade para a LOLP	95
V.27 - Comparação entre Valores de Sensibilidade para a EPNS	95
V.28 - Comparação entre Valores de Sensibilidade para a LOLF _f	96
V.29 - Comparação entre Valores de Sensibilidade para a LOLF _s	96
V.30 - Resultados para Variação na Taxa de Repara da U. G. de Itaipu	99
V.31 - Erro para Variação Simultânea das Taxas de Falha e Reparo	100
V.32 - Erro na LOLP para Variação na FOR de Vários Equipamentos	101
V.33 - Erro na EPNS para Variação na FOR de Vários Equipamentos	102
V.34 - Erro na LOLF para Variação na FOR de Vários Equipamentos	102
V.35 - Tempos de CPU	103
V.36 - Tempos de CPU para o Cálculo das Sensibilidades Através do Reprocessamento da Avaliação dos Índices	104
V.37 - Comparação dos Tempos de CPU entre Simulação Monte Carlo e Integração Direta	104

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As mudanças a nível mundial que têm ocorrido no tratamento comercial da energia elétrica, com ênfase na descentralização, competição e desregulamentação do acesso a esta energia, vem ressaltando a importância da transmissão como um recurso econômico. Tal recurso deve ser valorado, planejado e oferecido da mesma maneira que a geração.

A avaliação da confiabilidade, de sistemas interligados é uma parte importante deste processo, e tem levado a um crescente interesse por métodos eficientes e confiáveis para a análise da confiabilidade de *sistemas multi-área*. [1-7]

Além dos índices usuais, tais como probabilidade de perda de carga - LOLP, valor esperado de potência não suprida - EPNS, e frequência de perda de carga - LOLF, alguns programas de avaliação de confiabilidade produzem *índices de sensibilidade* do desempenho do sistema com relação às *capacidades* de geração e transmissão [4,7]. A informação desta *sensibilidade* é bastante útil nos estudos de planejamento e auxilia na identificação de "gargalos" no sistema, permitindo uma estimativa da relação custo/benefício do incremento na capacidade máxima de geração e/ou interligação.

Um procedimento alternativo para a melhoria do desempenho do sistema, é aumentar a *confiabilidade dos equipamentos*. Reduzir o tempo gasto em manutenções, alocando pessoal adicional para os reparos, ou implementar técnicas de monitoramento e manutenção mais sofisticadas, a fim de estender o intervalo entre manutenções, são procedimentos adotados com este objetivo.

A alternativa de melhorar a *confiabilidade dos equipamentos* tem se tornado cada vez mais atrente em relação a *aumentar a capacidade* máxima de geração e/ou interligação. Isto acontece, não só em função do decréscimo dos custos de monitoramento de equipamentos, como também pelos altos investimentos necessários à expansão do sistema. Tais fatores são agravados ainda pela escassez de recursos e pelas incertezas associadas às condições futuras de operação (crescimento de consumo, custos de combustível, etc.)

Um pequeno exercício, pode mostrar como tanto o conhecimento da *confiabilidade do sistema*, como a relação entre esta e a *confiabilidade dos diversos equipamentos* que o compõe, podem ser importantes para o seu desempenho.

Suponhamos por exemplo, que um determinado sistema elétrico tenha uma carga a atender de 100MW em um determinado período. Suponhamos também que este suprimento seja feito com uma probabilidade de 1% de não atendimento, i. e., com uma LOLP de 1%. Sabe-se que após melhorias realizadas nos equipamentos, o suprimento a carga de 100MW poderá ser feito com uma LOLP de 0,5%. Pode-se então optar pela manutenção do valor deste índice de confiabilidade, ou alternativamente, pode-se aumentar a carga a atender até que se retorne à LOLP anterior de 1%. A última alternativa equivaleria a um aumento real na capacidade de atendimento do sistema.

Normalmente, estamos interessados em buscar soluções que aliem *maiores ganhos a menores investimentos*. Assim, com o conhecimento do impacto da variação dos parâmetros de falha de cada equipamento sobre os índices de confiabilidade, poderemos escolher atuar no sentido de melhorar o desempenho dos equipamentos que possuem a menor relação entre *custo de melhoria/confiabilidade do sistema*

O conhecimento das *sensibilidades dos índices de confiabilidade*, em relação às *taxas de falha e reparo* de cada equipamento do sistema, são úteis para ajudar a responder questões associadas às relações de causa e efeito envolvendo os *índices de confiabilidade* e a *confiabilidade dos equipamentos* [8]. Adicionalmente, estas sensibilidades permitem que os equipamentos sejam ordenados segundo sua importância para a confiabilidade do sistema. Tais sensibilidades, permitem ainda ao planejador, estimar o impacto da incerteza dos parâmetros sobre os índices de confiabilidade, sendo uma ferramenta valiosa na análise de *alternativas* no planejamento e operação.

O cálculo dos novos valores dos índices de confiabilidade, em função da variação em parâmetro de falha de algum equipamento, sem a necessidade de reprocessamento dos programas também é possível, caso as *sensibilidades dos índices de confiabilidade* sejam conhecidas.

O estudo e a implementação computacional de metodologias que possibilitem o conhecimento preciso das *sensibilidades dos índices de confiabilidade* de sistemas interligados, em relação aos *parâmetros de falha de seus equipamentos*, é o tema deste trabalho.

I.2 ESTADO DA ARTE

As *sensibilidades dos índices de confiabilidade* de geração com respeito às *taxas de falha e reparo dos equipamentos* foi pioneiramente apresentada por Patton e Tram em [8]. Nesta referência, é apresentado um método para cálculo das sensibilidades de índices de confiabilidade para sistemas com representação "barra-única", ou

seja, considerando toda a geração e carga agrupadas em uma única área, e a transmissão 100% confiável e com capacidade ilimitada.

Patton e Tram em [8], apresentam expressões para o cálculo da sensibilidade do valor esperado de perda de carga - LOLE, em relação à probabilidade de falha das unidades geradoras. É observado que as derivadas, assim obtidas, são exatas, pois a LOLE tem uma relação linear com a probabilidade de falha de cada equipamento. Neste trabalho são ainda apresentadas expressões aproximadas para as sensibilidades do índices de frequência e duração com relação às taxas de falha e reparo dos geradores.

Expressões para a sensibilidade com respeito aos parâmetros estocásticos das linhas de transmissão foram obtidas e apresentadas por Singh em [9], para sistemas constituídos por duas áreas.

Na Referência [10], Anders faz uma análise das incertezas associadas aos parâmetros de falha e reparo dos equipamentos sobre os índices de confiabilidade, incluindo índices de frequência e duração. A abordagem é feita especificamente para sistemas radiais ou compostos por duas áreas interligadas, tendo-se obtido também expressões exatas para as sensibilidades da LOLE em relação às indisponibilidades forçadas dos equipamentos. É observado nesta referência, que a interligação entre os sistemas é tratada da mesma maneira que as unidades geradoras, quando as tabelas de capacidade disponível são construídas.

Recentemente, na Referência [13], Melo e Pereira, propuseram uma metodologia para o cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade composta - geração e transmissão - em relação a variações nas taxas de falha e reparo dos equipamentos. Nesta referência são calculadas as sensibilidades dos índices LOLP, EPNS e LOLF, em relação às taxas falha e reparo dos equipamentos, sendo obtidos valores exatos para estas sensibilidades.

Nesta Tese, a metodologia descrita na referência [13] é estendida para o cálculo *exato* das *sensibilidades dos índices de confiabilidade*, incluindo os índices de frequência e duração, para sistemas interligados.

A metodologia proposta é geral, podendo ser empregada em algoritmos baseados em enumeração sucessiva de estados ou simulação Monte Carlo. São também apresentadas expressões para o cálculo das sensibilidades quando o método de Integração Direta é usado [4, 7].

I.3 ESTRUTURA DA TESE

Uma vez definido o problema da avaliação das sensibilidades dos índices de confiabilidade em relação às taxas de falha e reparo dos equipamentos do sistema, feito um resumo da evolução dos estudos nesta área, e apresentado o objetivo

básico desta tese, passamos agora a descrever, em linhas gerais, o que irá tratar cada capítulo.

No Capítulo II será feita uma revisão da avaliação de índices de confiabilidade multi-área incluindo os métodos de integração direta e simulação Monte Carlo. Será apresentado um exemplo simples, que ilustrará o cálculo dos índices de confiabilidade, através de enumeração exaustiva dos estados como também usando o algoritmo de integração direta. As metodologias descritas serão ponto de partida para os desenvolvimentos dos Capítulos III e IV.

No Capítulo III, o problema do cálculo das sensibilidade dos índices de confiabilidade é abordado objetivando sua implementação através de simulação Monte Carlo, ou enumeração sucessiva de estados. O mesmo exemplo visto no Capítulo II é usado agora para, através de uma enumeração exaustiva dos estados, calcular as sensibilidades da LOLP, da EPNS e da LOLF em relação a probabilidade de falha dos equipamentos.

No Capítulo IV é desenvolvida uma metodologia para a avaliação das sensibilidades dos índices de confiabilidade, usando o algoritmo de integração direta. O exemplo desenvolvido no Capítulo II usando este algoritmo, é então retomado com o objetivo de ilustrar a metodologia desenvolvida.

O Capítulo V apresenta uma aplicação das metodologias desenvolvidas nos Capítulos III e IV, para os sistemas interligados Sul/Sudeste brasileiro. Nesta aplicação, o sistema é dividido em 5 áreas e são apresentadas as sensibilidades dos índices de confiabilidade em relação aos principais equipamentos. São comparados também os resultados obtidos para as sensibilidades usando simulação Monte Carlo e o algoritmo de integração direta.

Finalmente o Capítulo VI apresenta as principais conclusões obtidas no decorrer desta tese, bem como propostas para desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO II

CONFIABILIDADE MULTI-ÁREA

II.1 INTRODUÇÃO

Pang and Wood [1] e Jamouille [2], desenvolveram de forma independente um método pioneiro para o cálculo da confiabilidade de sub-sistemas interligados, denominado de *decomposição do espaço de estados*. Este método é baseado na decomposição do conjunto de todos os possíveis estados operativos do sistema, definidos pelas capacidades de geração de cada área, níveis de carga e capacidades de interligações, em subconjuntos de *sucesso* (sem corte de carga), *falha* (com corte de carga) e *não-classificados*. Este último subconjunto é novamente decomposto, e os seus estados classificados, até que a probabilidade dos estados não-classificados remanescentes seja desprezível. A metodologia de decomposição do espaço de estados foi posteriormente refinada por Clancy, Gross and Wu [3], com a introdução de um esquema de simulação de Monte Carlo nos últimos estágios da decomposição, aumentando sua eficiência computacional.

Um método alternativo, denominado *integração direta*, foi proposto independentemente por Oliveira, Cunha e Pereira [4] e por Lee [5]. É baseado nas condições de Hoffman-Gale e no conceito de *modos de falha* do sistema. Cada modo de falha é caracterizado pelo subconjunto de estados que possuem as mesmas áreas com corte de carga. O subconjunto de estados pertencentes a um dado modo de falha podem ser representados, *analiticamente*, como um poliedro convexo. A integração analítica dos estados nestes poliedros fornecem os índices de confiabilidade desejados

Os índices usuais produzidos pelos modelos multi-área são a probabilidade de perda de carga (LOLP) - *loss of load probability* - e o valor esperado de potência não suprida (EPNS) - *expected power not supplied*. Os índices de frequência e duração (F&D), frequência média de perda de carga (LOLF) - *loss of load frequency* - e duração média de perda de carga (LOLD) - *loss of load duration* - requerem, a princípio, um esforço computacional maior para serem calculados e usualmente não são incluídos. O método híbrido decomposição do espaço de estados/simulação Monte Carlo foi recentemente estendido por Singh and Lago-Gonzales [6,26] para o cálculo de índices F&D.

Mais recentemente, Melo e outros [7] desenvolveram uma metodologia para avaliação de índices F&D em confiabilidade multi-área, empregando o método de integração direta. Esta metodologia é baseada na extensão dos conceitos de

probabilidade condicional e frequência incremental, originalmente desenvolvidos para sistemas de geração [19,21,23,24], e compostos geração/transmissão [22,25]. As expressões resultantes são de fácil implementação e não aumentam o esforço computacional dos algoritmos existentes de confiabilidade de subsistemas interligados.

Neste Capítulo será feita uma revisão das metodologias de simulação Monte Carlo e integração direta, para o cálculo dos índices de confiabilidade. Salienta-se que estas metodologias encontram-se implementadas no programa CONFINT [20], atualmente em uso pelo GCOI (Grupo Coordenador para Operação Interligada) para a avaliação da confiabilidade dos sistemas interligados Sul/Sudeste e Norte/Nordeste brasileiros. Desde o ano de 1994, a aplicação do modelo CONFINT tornou-se atividade rotineira na elaboração do Plano Anual de Operação. Os índices calculados são a LOLP, a EPNS, a LOLF e a LOLD.

O cálculo dos índices usando dois métodos analíticos: enumeração sucessiva de estados e integração direta será ilustrado através de um exemplo simples. Nos Capítulos III e IV, o mesmo exemplo será retomado para ilustrar o cálculo das sensibilidades dos índices em relação às probabilidades de falha dos equipamentos.

II.2 MODELO DOS EQUIPAMENTOS

Os equipamentos mencionados no escopo desta tese, abrangem não só as unidades geradoras, como também as interligações entre as áreas que compõem o sistema. Cada equipamento está em um processo contínuo de operação, descrito por ciclos falha - reparo. Para simplificar, consideraremos, que cada equipamento possui apenas dois estados: operativo e falho.

Suponha que um determinado equipamento é observado durante um período de tempo em que há os ciclos de falha e reparo tais como mostrado na Figura II.1, onde m_i e r_i , representam os tempos observados dos estados operativo e falho, respectivamente, para o i -ésimo ciclo.

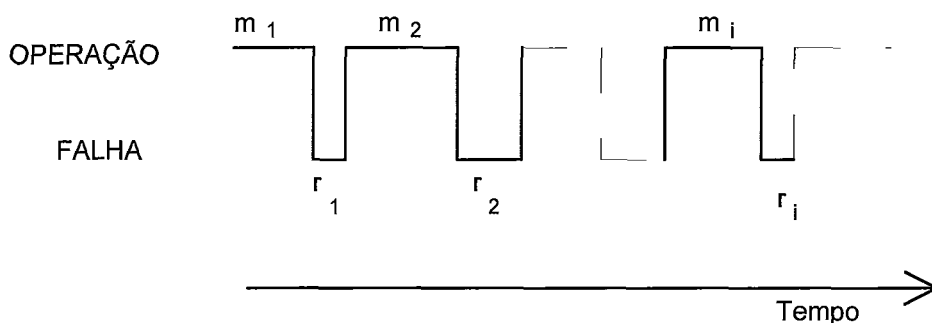


Figura II.1 - Comportamento Histórico de Um Equipamento

O que se deseja é caracterizar esta unidade através de seu comportamento médio. O modelo usual para esta caracterização é um processo de renovação, onde os ciclos falha-reparo são estatisticamente independentes e a distribuição de durações é estacionária no tempo. Os tempos médios gastos nos estados operativo e falho, ou seja, o tempo médio para falha, m , e o tempo médio para reparo, r , podem ser estimados por:

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i \quad (II.1)$$

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (II.2)$$

Deste modo pode-se obter um ciclo médio para o processo falha-reparo, como mostrado na Figura II.2. A partir deste ciclo médio, pode-se passar para a representação do equipamento num diagrama de espaço de estados, Figura II.3, que é a forma usual de representação. Podem ser definidos os seguintes termos:

$$T = m + r \quad \rightarrow \quad \text{período médio do ciclo} \quad (II.3)$$

$$f = 1 / T \quad \rightarrow \quad \text{freqüência média do ciclo} \quad (II.4)$$

$$\lambda = 1 / m \quad \rightarrow \quad \text{taxa esperada de falha} \quad (II.5)$$

$$\mu = 1 / r \quad \rightarrow \quad \text{taxa esperada de reparo} \quad (II.6)$$

$$a = \mu / (\lambda + \mu) \quad \rightarrow \quad \text{disponibilidade, em regime permanente} \quad (II.7)$$

$$u = \lambda / (\lambda + \mu) \quad \rightarrow \quad \text{indisponibilidade, em regime permanente} \quad (II.8)$$

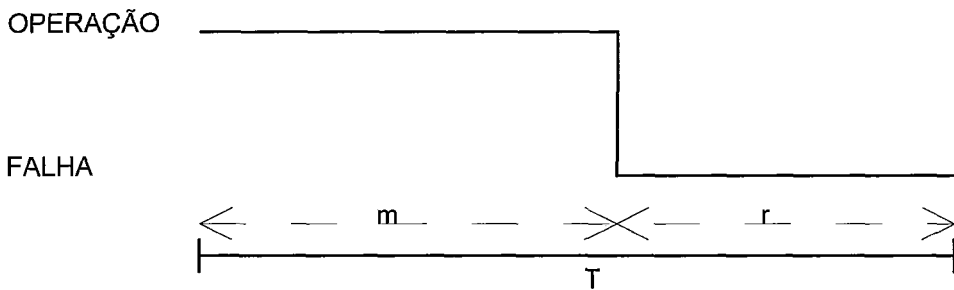


Figura II.2 - Comportamento Histórico Médio de um Equipamento

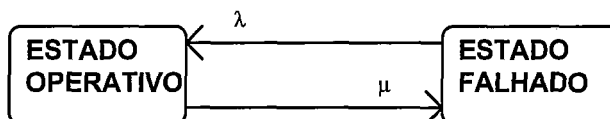


Figura II.3 - Diagrama de Espaço de Estados de um Equipamento Modelado a Dois Estados

A hipótese de estacionariedade no tempo da distribuição das durações faz com que as taxas de falha e reparo possam ser assumidas como constantes. Portanto, tal hipótese coloca a representação dos equipamentos dentro da classe mais restrita dos processos de Markov. Também é assumido que m e r são finitos, isto é, ambos os estados são acessíveis.

II.3 REPRESENTAÇÃO MULTI-ÁREA DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA

Um sistema multi-área pode ser representado através de um modelo linear de fluxo em redes [4]: os nós representam as áreas, e os arcos representam os intercâmbios entre as áreas; a geração de cada área é modelada como um arco chegando ao nó, proveniente do nó "fonte", S ; por sua vez, a demanda de cada área é representada como um arco que deixa o nó e entra no nó "sumidouro", T . A Figura II.4 mostra o diagrama unifilar de um sistema composto de quatro áreas e a Figura II.5 ilustra sua representação em uma rede de fluxos.

Na Figura II.4 estão representadas as unidades geradoras (G) e cargas (L) de cada área, além das interligações (INT) entre elas.

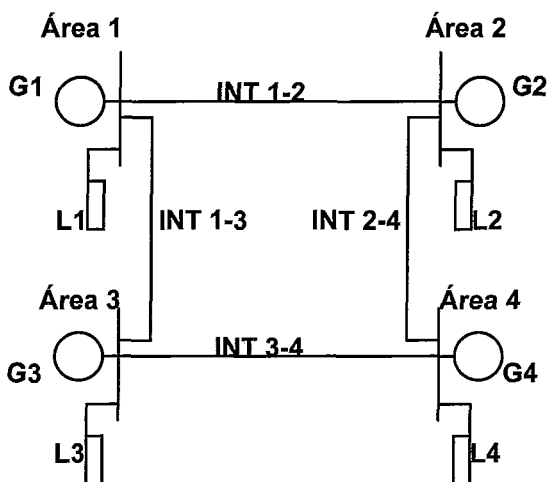


Figura II.4 - Exemplo de um Sistema Multi-Área

Para transformar o sistema da Figura II.4 em um diagrama de fluxos, associamos a cada uma das áreas um nó, e incluímos os nós "fonte" (S) e "sumidouro" (T). A geração de cada área é representada pelo arco que sai do nó fonte e chega ao nó correspondente a área. O arco que sai de um determinado nó e chega ao nó sumidouro, simboliza a carga desta área. As interligações são representadas por arcos entre as áreas correspondentes, conforme pode ser visto na Figura II.5.

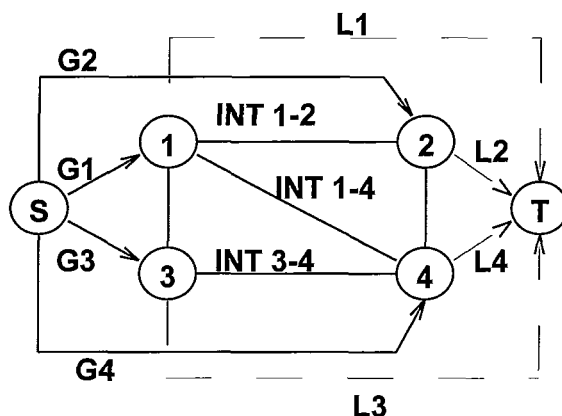


Figura II.5 - Modelo de Fluxo em Redes

II.3.1 Obtenção da COPFT

As capacidades associadas a cada arco são variáveis aleatórias, e podem ser obtidas a partir da combinação dos estados individuais de capacidade de cada *equipamento* (geradores e interligações) e níveis de carga. Por exemplo, a capacidade de cada arco de geração é dada pela soma das capacidades disponíveis das unidades geradoras pertencentes a área. Suas distribuições de probabilidades e de freqüências incrementais, também conhecidas como tabela de probabilidades e freqüências de estados de capacidade indisponível - COPFT, são calculadas a partir da convolução das distribuições dos estados de capacidade de cada um dos equipamentos.

O estado do sistema será representado por um vetor $x = (x_1, x_2, \dots, x_q)$ onde x_i é o estado de capacidade associado ao *i-ésimo* arco e q é o número total de arcos (áreas + interligações) do sistema. Alternativamente, um estado do sistema pode ser representado pelo estado de seus equipamentos, assim, $x = (e_1, e_2, \dots, e_m)$ onde m é o número total de equipamentos e e_k o estado do equipamento k , que pode ser 1 (um) se o equipamento está disponível ou 0 (zero) se estiver falhado.

As probabilidades associadas aos estados dos componentes em função da probabilidade de falha, u_k , de cada equipamento, podem ser obtidas através de um processo de convolução expressado recursivamente supondo-se a inclusão sucessiva de equipamentos ao conjunto de equipamentos correspondentes ao arco.

Após a inclusão de um equipamento e_k , pertencente a um arco j , um estado individual de capacidade de geração ou transmissão surge através de dois eventos mutuamente exclusivos:

evento i - O componente j estava no estado $(c - c_k)$ antes da inclusão do equipamento e_k , e este ao ser adicionado se encontrava no estado c_k ;

evento *ii* - O componente *j* estava no estado c_k antes da inclusão do equipamento e_k e este ao ser adicionado, se encontrava no estado de capacidade nula.

Assim, após a adição do equipamento e_k , as probabilidades dos estados do componente *j* são dadas por:

$$p(x_j) = p'(x_j - c_k) \times (1 - u_k) + p'(x_j) \times u_k \quad (\text{II.9})$$

que pode ser reescrita como:

$$p(x_j) = [p'(x_j) - p'(x_j - c_k)] \times u_k + p'(x_j - c_k) \quad (\text{II.10})$$

onde,

$p(\cdot)$ e $p'(\cdot)$ são valores das probabilidades associadas ao estado (\cdot) do arco *j*, antes e após a inclusão do equipamento e_k respectivamente.

u_k é a taxa de indisponibilidade forçada do equipamento e_k .

Para a frequência incremental relativa aos estados dos componentes, também é possível obter-se uma expressão empregando o mesmo recurso usado para as probabilidades, ou seja a convolução ou adição sucessiva de equipamentos ao conjunto de equipamentos correspondentes ao arco.

Assim, após a adição do equipamento e_k , as frequências incrementais dos estados do componente *j* são dadas por:

$$f_f^{in}(x_j) = p'(x_j - c_k) \times f_k^{in}(c_k) + (1 - u_k) \times f_f^{in'}(x_j - c_k) + p'(x_j) \times f_k^{in}(0) + u_k \times f_f^{in'}(x_j) \quad (\text{II.11})$$

onde $f_f^{in}(\cdot)$ e $f_f^{in'}(\cdot)$ representam as frequências de transição incremental, para os estados de falha, antes e após a inclusão do equipamento e_k ao conjunto de equipamentos pertencentes ao arco *j*.

Temos ainda que:

Sendo o comportamento dos equipamentos considerado como um modelo Markoviano a dois estados - vide Fig.II.2 - e portanto balanceados em frequência, e sendo os parâmetros μ_k e λ_k desses equipamentos as taxas de transição dos estados de falha/sucesso e sucesso/falha respectivamente, podemos escrever:

$$f_k^{in}(c_k) = -f_k^{in}(0)$$

Dependendo da referência que adotemos teremos para as frequências os seguintes valores:

1. A partir de estados de falha:

$$f_k^{in}(0) = u_k \times \mu_k$$

2. A partir dos estados de sucesso:

$$f_k^{in}(c_k) = (1 - u_k) \times \lambda_k$$

Reescrevendo, então a expressão (II.11) para as frequências calculadas a partir de estados de falha e de sucesso, temos:

- A partir de estados de falha:

$$f^{in}(x_j) = [p'(x_j) - p'(x_j - c_k)]u_k \times \mu_k + (1 - u_k) \times f^{in'}(x_j - c_k) + u_k \times f^{in'}(x_j) \quad (\text{II.12})$$

- A partir dos estados de sucesso:

$$f^{in}(x_j) = [p'(x_j - c_k) - p'(x_j)](1 - u_k) \times \lambda_k + (1 - u_k) \times f^{in'}(x_j - c_k) + u_k \times f^{in'}(x_j) \quad (\text{II.13})$$

II.3.2 Teorema do Fluxo Máximo/Corte Mínimo

A classificação de um dado estado em sucesso ou falha pode ser feita através do cálculo do *fluxo máximo* que passa pelo sistema, no sentido do nó S para o nó T , considerando o balanço de potência em cada nó e as capacidades dos arcos. Se o *fluxo máximo* é igual à carga total do sistema, então todos os arcos de demanda que chegam ao nó T , estão *saturados*, i.e., nos seus limites. Assim, todas as cargas das áreas estão sendo atendidas, e o sistema está operando em *sucesso* (sem corte de carga).

De forma equivalente, se o *fluxo máximo* é menor que a carga total, significa que pelo menos uma das cargas das áreas não está sendo atendida em sua plenitude. O montante do corte de carga associado a um estado do sistema, $(LC(x))$ é dado pela diferença entre a carga total (D) e o valor do fluxo máximo ($F_{m\acute{a}x}$).

$$LC(x) = D - F_{m\acute{a}x}(x) \quad (\text{II.14})$$

Uma forma alternativa para resolver este problema é determinar o *corte de capacidade mínima* entre fonte e sumidouro. Um corte é uma partição do conjunto de nós (áreas) do sistema em dois subconjuntos disjuntos, um contendo o nó S , e o

outro contendo o nó T . A capacidade de corte é dada pela soma das capacidades dos arcos que conectam os dois subconjuntos. A Figura II.6 ilustra estes conceitos para um sistema com duas áreas.

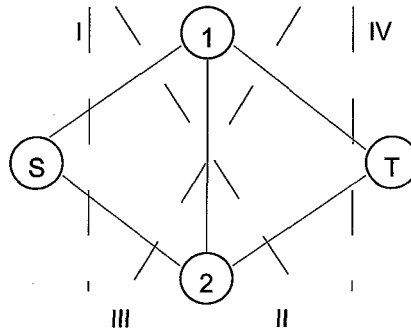


Figura II.6 - Cortes em um Sistema com Duas Áreas

Pode ser demonstrado [15] que o valor do *fluxo máximo* é igual à capacidade do *corte mínimo* ($c\text{-min}$). Uma consequência imediata deste teorema é que o conjunto de arcos que pertencem a $c\text{-min}$ correspondem aos pontos críticos do sistema. Em outras palavras, o aumento nas capacidades dos arcos que não estão no $c\text{-min}$ não amenizaria o corte de carga do sistema.

Outra consequência é que todos os arcos de demanda que pertencem ao $c\text{-min}$ estão nos limites, i. e., as cargas das áreas correspondentes estão sendo atendidas. Note que estes arcos de demanda correspondem justamente às áreas à esquerda do $c\text{-min}$ - vide Fig.II.6 -. De forma análoga, as áreas à direita do $c\text{-min}$ estão "inseguras", i. e., sujeitas a corte de carga. Em resumo, o $c\text{-min}$ também permite o cálculo de índices de confiabilidade a nível de áreas.

A expressão (II.14) pode ser escrita também em função do corte mínimo associado a um estado x do sistema ($C_{min}(x)$) como:

$$LC(x) = D - C_{min}(x) \quad (II.15)$$

II.3.3 Caracterização dos Modos de Falha

Em um sistema com N áreas, existem 2^N cortes possíveis. O corte que passa por todos os arcos de demanda (i. e., com apenas o nó T à direita) é o único associado aos estados de sucesso. Todos os cortes restantes, denominados *modos de falha* do sistema, correspondem a estados de falha.

Conforme já dito, o conjunto de estados associados a um dado modo de falha t , X_t , tem como característica básica o fato da capacidade deste corte, $C_t(x)$, ser mínima:

$$X_t = \{x \in X \mid C_t(x) \leq C_j(x), \text{ para } j = 1, \dots, 2^N \text{ } j \neq t\} \quad (\text{II.16})$$

Os subconjunto $\{X_t\}$ são disjuntos (com pequenas modificações nas restrições de igualdade[4]) e cobrem todo o espaço de estados X . A seguinte relação também é válida:

$$X = X^f \cup X^s$$

onde X^s representa o conjunto de estados de sucesso (isto é o conjunto X_{2^N}) e X^f , o conjunto de estados de falha, definido como a união dos modos de falha do sistema:

$$X^f = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_{2^N-1} \quad (\text{II.17})$$

A capacidade do corte $C_t(x)$ é dada através de uma expressão linear das capacidades de geração das áreas $\{\bar{g}\}$, cargas das áreas $\{d\}$ e capacidades de interligação $\{\bar{f}\}$:

$$C_t(x) = \sum_{i=1}^N \delta_t(i) \bar{g}_i + \sum_{i=1}^N (1 - \delta_t(i)) d_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \Omega_i} \bar{f}_{ij} \delta_t(i, j) \quad (\text{II.18})$$

onde i indexa as áreas, e Ω_i é o conjunto das áreas diretamente conectadas à área i .

O coeficiente $\delta_t(i)$ é igual a zero se a área i está a esquerda do corte t , caso contrário, é igual à unidade. Note que os arcos de geração e demanda de uma mesma área não podem simultaneamente pertencer ao mesmo corte. Analogamente, o coeficiente $\delta_t(i, j)$ é igual à unidade se o arco $\{i, j\}$ está no corte, caso contrário é igual a zero.

Para facilitar a notação, será assumido que tanto $\{\bar{g}\}$ como $\{\bar{f}\}$ estão contidos no vetor x de dimensão q (número de áreas mais número de interligações). Assim a expressão (II.18), pode ser reescrita como:

$$C_t(x) = \sum_{i=1}^q \delta_t(i) \bar{x}_i + \sum_{i=1}^N (1 - \delta_t(i)) d_i \quad (\text{II.19})$$

II.4 CONCEITUAÇÃO GERAL DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

O problema de cálculo dos índices de confiabilidade é equivalente ao de se calcular o valor esperado de uma dada *função-teste* $F(x)$ [22] :

$$E(F) = \sum_{x \in X} F(x)P(x) \quad (\text{II.20})$$

onde $P(x)$ é a probabilidade do estado x do sistema, e $F(x)$ é a função-teste. Seu objetivo é verificar se para um determinado estado, a combinação de capacidade de geração das áreas e as capacidades das interligações é suficiente para suprir a carga. Como o vetor estado do sistema é uma variável aleatória, o resultado também é uma variável aleatória.

II.4.1 Definição da Função-Teste $F(x)$

A LOLP é definida como a probabilidade de *falha* do sistema, ou seja, o somatório das probabilidades de todos os estados de *falha* do sistema.

Pode-se então, definir para a LOLP, $F(x)$ como sendo uma função indicadora $I_f(x)$ tal que:

$$F(x) = I_f(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \text{ é um estado de sucesso} \\ 1 & \text{se } x \text{ é um estado de falha} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Obtem-se então para a LOLP a seguinte expressão:

$$LOLP = \sum_{x \in X^f} P(x) \quad (\text{II.22})$$

onde X^f é o subconjunto de estados de falha do sistema.

Esta função indicadora está baseada na identificação dos estados de *falha*. Pode-se, alternativamente, definir uma função indicadora baseada na identificação dos estados de *sucesso* do sistema.

Se $F(x)$ é o corte de carga associado a um dado estado x , do sistema, $E(F)$ é o valor esperado da potência não suprida - EPNS. Neste caso, a EPNS é definida como o valor esperado de corte no sistema. Assim:

$$EPNS = \sum_{x \in X^f} [D - C_{min}(x)] \times P(x) \quad (\text{II.23})$$

A frequência de falha, LOLF, é definida como o valor esperado da taxa de transição de estados de falha para estados de sucesso [22], ou vice-versa. Assim, a LOLF pode ser calculada como a taxa de transição através da fronteira que separa os estados de falha e sucesso do sistema. Da mesma forma que a LOLP, podemos definir a LOLF tanto para os estado de falha como para os estados de sucesso.

Formulação 1 - estados de falha

$$F(x) = I_f(x)\lambda_B^f(x) \quad (\text{II.24})$$

onde $I_f(x)$ é a função indicadora da LOLP (ver expressão (II.21)), e $\lambda_B^f(x)$ é a soma das taxas de transição a partir do estado de *falha* x , através da fronteira.

Formulação 2 - estados de sucesso

$$F(x) = (1 - I_f(x))\lambda_B^s(x) \quad (\text{II.25})$$

onde $\lambda_B^s(x)$ agora é definida como a soma das taxas de transição a partir do estado de *sucesso* x , através da fronteira.

As funções-teste para a LOLF definidas em (II.24) e (II.25) dependem da identificação de todos os estados que podem cruzar a fronteira a partir do estado x , em uma única transição. Em outras palavras, se o sistema é constituído por m equipamentos, cada um com dois estados, temos a princípio que efetuar $m + 1$ avaliações para atualizar a estimativa da frequência - a *primeira* avaliação para determinar se o estado x é de falha ou sucesso, e as demais m avaliações considerando uma transição em cada um dos m componentes do vetor estado x . O número de cálculos cresceria mais ainda se considerássemos os equipamentos com múltiplos estados.

II.4.2 Função-Teste Alternativa para a LOLF

A referência [22] propôs uma nova formulação para a função-teste da LOLF, baseada nos conceitos de probabilidade condicional e frequência incremental. Ao contrário das funções definidas em (II.24) e (II.25) esta nova função-teste não depende da identificação explícita da fronteira traçada a partir de cada estado. Como anteriormente, temos duas formulações diferentes associadas aos estados de falha e estados de sucesso do sistema.

Formulação 1 - estados de falha

$$F(x) = I_f(x) \sum_{k=1}^m \lambda_f^{in}(e_k) \quad (\text{II.26})$$

onde $\lambda_f^{in}(e_k)$ é a taxa de transição incremental definida como:

$$\lambda_f^{in}(e_k) = \begin{cases} \mu_k & \text{se } e_k \text{ está } \textit{falhado} \\ -\frac{\mu_k \times u_k}{(1-u_k)} & \text{se } e_k \text{ está } \textit{disponível} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Formulação 2 - estados de sucesso

$$F(x) = (1 - I_f(x)) \sum_{k=1}^m \lambda_s^{in}(e_k) \quad (\text{II.28})$$

onde $\lambda_s^{in}(e_k)$ é a taxa de transição incremental definida como:

$$\lambda_s^{in}(e_k) = \begin{cases} \frac{-\lambda_k \times (1-u_k)}{u_k} & \text{se } e_k \text{ está } \textit{falhado} \\ \lambda_k & \text{se } e_k \text{ está } \textit{disponível} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Em ambas as formulações, λ_k e μ_k representam as taxas de falha e de reparo do equipamento e_k e u_k é a probabilidade de falha deste equipamento.

Adicionalmente, definimos ainda os seguintes índices:

Duração de perda de carga - LOLD (*loss of load duration*):

$$LOLD = \frac{LOLP}{LOLF} \quad (\text{II.30})$$

Valor esperado de perda de carga - LOLE (*loss of load expectation*):

$$LOLE = LOLP \times T \quad (\text{II.31})$$

Valor esperado de energia não suprida - EENS (*expected energy not supplied*):

$$EENS = EPNS \times T \quad (\text{II.32})$$

Onde T , representa o período de tempo para o qual é realizado o estudo de confiabilidade.

II.5 CÁLCULO DOS ÍNDICES VIA SIMULAÇÃO MONTE CARLO

Os índices de confiabilidade podem ser calculados enumerando-se exaustivamente os estados do sistema empregando-se as expressões (II.21) a (II.32). Para sistemas reais, porém, esta pode não ser uma opção viável.

Outra alternativa para estimar $E(F)$ em (II.20) é usar a simulação Monte Carlo. No método Monte Carlo não seqüencial, os estados $x \in X$ são amostrados a partir de suas distribuições conjuntas de probabilidades [16]. O valor esperado de qualquer função F , $E(F)$, é calculado (estimado) através do seguinte estimador não tendencioso:

$$\hat{E}(F) = \frac{1}{NE} \sum_{i=1}^{NE} F(x^i) \quad (\text{II.33})$$

onde:

$\hat{E}(F)$ = estimador do valor esperado

NE = número de estados amostrados

x^i = i -ésimo estado amostrado

$F(x^i)$ = resultado do teste para o i -ésimo estado amostrado

A expressão (II.33) é válida para qualquer tipo de função F . Isto significa que o método de simulação Monte Carlo não seqüencial pode produzir os mesmos tipos de índices de confiabilidade produzido pelos métodos ditos "analíticos" (e. g. , enumeração sucessiva de estados) incluindo os índices de freqüência e duração.

Além de produzir os mesmos tipos de índices que os métodos de enumeração, os métodos Monte Carlo podem fornecer distribuições de probabilidades de variáveis de interesse, como por exemplo a potência não suprida em uma determinada área do sistema. Também, podem ser calculados intervalos de confiança (incertezas) para estimativas de qualquer índice, não apenas da LOLP, como no caso do método de enumeração.

Outra característica atrativa da simulação Monte Carlo é que o número de estados amostrados NE necessários para estimar $E(F)$ com a requerida precisão não depende do número de estados do sistema. Em outras palavras, seja θ a LOLP de um dado sistema: o tamanho da amostra requerido para estimar o valor de θ é o mesmo, a despeito do sistema possuir dez áreas, cem áreas ou mil áreas. É interessante contrastar esta característica do método Monte Carlo com o método de enumeração onde há forte dependência com as dimensões do sistema.

II.5.1 Cálculo da Precisão das Estimativas

É importante observar em (II.33), que $\hat{E}(F)$ não é o valor "verdadeiro" (população) do valor esperado de F , $E(F)$ (que é geralmente desconhecido), porém uma estimativa deste valor. Em outras palavras, se o experimento é repetido com uma amostra aleatória diferente, poder-se-ia obter outro valor para estimativa $\hat{E}(F)$. Como x e $F(x)$ são variáveis aleatórias, este estimador, que é uma média de NE estados amostrados a partir de $F(x)$, também é uma variável aleatória. A incerteza associada à estimativa de (II.33) é dada pela variância do estimador:

$$V(\hat{E}(F)) = V(F)/NE \quad (\text{II.34})$$

onde $V(F)$, é a variância da função-teste, estimada por:

$$\hat{V}(F) = \frac{1}{NE} \sum_{i=1}^{NE} [F(x^i) - \hat{E}(F)]^2 \quad (\text{II.35})$$

Através de (II.34) pode-se definir os limites superior e inferior da estimativa. Pelo teorema do Limite Central sabe-se que, para uma amostra suficientemente grande, $E(F)$ tende a possuir uma distribuição de probabilidades Normal, quaisquer que sejam as distribuições originais $P(x)$ dos estados x . Portanto, pode-se determinar os limites superior e inferior para o valor verdadeiro com grau de certeza conhecido. Por exemplo, pode-se afirmar, com 99% de certeza que o valor "verdadeiro" $E(F)$ está no seguinte intervalo:

$$[\hat{E}(F) - 3,0V(\hat{E}(F))^{0,5}; \hat{E}(F) + 3,0V(\hat{E}(F))^{0,5}] \quad (\text{II.36})$$

A expressão (II.34) também indica que a incerteza do estimador depende da variância da função-teste, $V(F)$, e é inversamente proporcional ao tamanho da amostra. Isto confirma a noção intuitiva de que a precisão de um experimento através do método Monte Carlo aumenta quando se aumenta o tamanho da amostra. Usualmente, esta incerteza é representada através de um coeficiente de variação:

$$\beta = V(\hat{E}(F))^{0,5} / \hat{E}(F) \quad (\text{II.37})$$

II.5.2 Algoritmo de Simulação Monte Carlo

A avaliação dos índices de confiabilidade multi-área através do método de simulação Monte Carlo não seqüencial pode ser resumida nos seguintes passos [20]:

i) Inicialize o número de estados amostrados, NE , com o valor 0;

ii) Selecione um estado $x \in X$ a partir da distribuição de probabilidades $P(x)$; atualize NE ;

Um estado do sistema é selecionado a partir dos estados dos componentes. Assim, são sorteados uma série hidrológica, um nível de carga, os estados dos geradores e das interligações.

iii) Para este estado x amostrado, calcule a função-teste $F(x)$ para cada índice de confiabilidade;

A partir dos estados dos componentes do sistema, são calculadas as capacidades de todos os cortes, utilizando a expressão (II.19). Em seguida, identifica-se o corte de capacidade mínima. Se o corte mínimo for o corte que contém somente os arcos de demanda, o estado é um estado de sucesso e $F(x)$ é nula para todos os índices de confiabilidade. Caso contrário, o estado x é um estado de falha, e a função teste associada a cada índice está definida nas expressões (II.15), (II.21) e (II.27).

iv) Atualize as estimativas dos índices de confiabilidade

De posse de $F(x)$, atualize a estimativa $\hat{E}(F)$, usando (II.33)

v) Calcule a incerteza do estimador

A incerteza do estimador para cada índice de confiabilidade, é calculada através da expressão (II.37)

vi) Se as incertezas das estimativas são aceitáveis (dentro da tolerância pré-estabelecida), ou se foi atingido o número máximo de sorteios, pare; caso contrário retorne ao passo ii.

II.6 EXEMPLO - CÁLCULO DOS ÍNDICES USANDO ENUMERAÇÃO SUCESSIVA DOS ESTADOS

O sistema apresentado como exemplo é composto por duas áreas interligadas, cujos principais parâmetros são mostrados na Tabela II.1

Tabela II.1 - Parâmetros do Sistema

EQUIP ^{TO}	ÁREA	CAPACIDADE	TAXA DE FALHA	TAXA DE REPARO	PROB. DE FALHA
e_1	1	30 MW	0,010	0,49	0,0200
e_2	1	20 MW	0,010	0,49	0,0200
e_3	2	10 MW	0,020	0,25	0,0740
e_4	1-2	20 MW	0,001	0,17	0,0058

Na Tabela II.1, e_1 , e_2 e e_3 representam as unidades geradoras e e_4 a interligação entre as áreas. A probabilidade de falha dos equipamentos foi calculada usando a expressão (II.8).

Os valores de taxa de falha e taxa de reparo estão dados em ocorrências/hora.

A área 1 deste sistema atende uma carga de 20MW e a área 2 uma carga de 10MW.

Neste caso, optou-se por representar o estado do sistema através dos estados dos seus equipamentos (unidades geradoras e interligações). Uma alternativa, seria convoluir os estados dos equipamentos e enumerar os estados dos arcos

A Tabela II.2 enumera todos os 16 estados possíveis do sistema, identificando a capacidade de cada um dos equipamentos.

Tabela II.2 - Estados do Sistema

ESTADO do SISTEMA	$c(e_1)$ (MW)	$c(e_2)$ (MW)	$c(e_3)$ (MW)	$c(e_4)$ (MW)
1	30	20	10	20
2	30	20	10	0
3	30	20	0	20
4	30	20	0	0
5	30	0	10	20
6	30	0	10	0
7	30	0	0	20
8	30	0	0	0
9	0	20	10	20
10	0	20	10	0
11	0	20	0	20
12	0	20	0	0
13	0	0	10	20
14	0	0	10	0
15	0	0	0	20
16	0	0	0	0

Para este exemplo, por simplicidade, estamos considerando que as unidades geradoras são térmicas, ou seja, sua capacidade é independente de considerações hidrológicas. Também estamos adotando um único patamar de carga. Assim, os estados do sistema, só dependem dos estados dos equipamentos. Os estados serão então selecionados da Tabela II.2 sucessivamente do estado 1 para o estado 16.

A Tabela II.3 mostra para cada estado do sistema as capacidades dos cortes I, II, III e IV, representados na Figura II.6 e, determinada por inspeção, a capacidade do corte mínimo.

Tabela II.3 - Identificação dos Cortes do Sistema

ESTADO do SISTEMA	CORTE I	CORTE II	CORTE III	CORTE IV	C _{min}	CORTE de CARGA
1	60	80	50	30	30	0
2	60	60	30	30	30	0
3	50	80	40	30	30	0
4	50	60	20	30	20	10
5	30	60	50	30	30	0
6	30	40	30	30	30	0
7	30	60	40	30	30	0
8	30	40	20	30	20	10
9	30	50	50	30	30	0
10	30	30	30	30	30	0
11	20	50	40	30	20	10
12	20	30	20	30	20	10
13	10	30	50	30	10	20
14	10	10	30	30	10	20
15	0	30	40	30	0	30
16	0	10	20	30	0	30

Na Tabela II.3, estão identificados os estados de falha do sistema, i. e., os estados onde o corte de carga é diferente de zero. Para estes estados, o valor da função-teste, $F(x)$, para a LOLP é 1 e para a EPNS é o próprio corte de carga.

Para completar o cálculo dos índices, necessitamos do valor das probabilidades e das taxas de transição incremental (função-teste da LOLF) dos estados de falha. Na Tabela II.4 estão apresentados estes valores para cada estado de falha do sistema.

Tabela II.4 - Probabilidades e Taxas de Transição Incremental para Estados de Falha

ESTADO do SISTEMA	PROBABILIDADE do ESTADO	TAXA de TRANS. INCR.
4	0,00041603	0,400
8	0,00000849	0,900
11	0,00144336	0,729
12	0,00000849	0,900
13	0,00036820	0,959
14	0,00000217	1,130
15	0,00002946	1,229
16	0,00000017	1,400

Na Tabela II.4, a probabilidade de cada estado foi calculada como um produtório das probabilidades associadas aos estados dos equipamentos. As taxas de transição incremental, foram calculadas usando as expressões (II.26) e (II.27).

De posse dos valores da Tabela II.3 e II.4 podemos então calcular os índices de confiabilidade:

$$LOLP = \sum_{x \in X^f} P(x) = 0,00227637$$

$$EPNS = \sum_{x \in X^f} P(x) LC(x) = 0,02706 \text{ MW}$$

$$LOLF = \sum_{x \in X^f} P(x) \lambda^{in}(x) = 0,0016259 \text{ falhas/hora}$$

$$LOLD = \frac{LOLP}{LOLF} = 1,4000246 \text{ horas}$$

Alternativamente, o valor da LOLF poderia ser calculado a partir dos estados de sucesso, usando as formulações apresentadas em (II.28) e (II.29). Este cálculo será de particular interesse ao se avaliar a sensibilidade dos índices de confiabilidade em relação às taxas de falha e reparo dos equipamentos, como será visto nos Capítulos III e IV.

II.7 CÁLCULO DOS ÍNDICES VIA INTEGRAÇÃO DIRETA

O algoritmo de integração direta, descrito detalhadamente em [4], utiliza o conceito de modos de falha (cortes), do sistema, que podem ser representados analiticamente por poliedros convexos. Cada poliedro é construído utilizando o conjunto de desigualdades expressos em (II.16) que define o modo de falha a ele

associado. Tomando como exemplo o sistema composto por duas áreas representado na Figura II.6, identificamos quatro cortes (modos de falha) no sistema, cada qual tendo associado uma capacidade que pode ser calculada pela expressão (II.19):

$$\begin{aligned} C_1(x) &= x_1 + x_2 \\ C_2(x) &= x_1 + x_3 + d_2 \\ C_3(x) &= x_2 + x_3 + d_1 \\ C_4(x) &= d_1 + d_2 \end{aligned}$$

onde x_1 e x_2 representam as capacidades dos arcos de geração das áreas 1 e 2, x_3 , a capacidade da interligação entre as áreas e as capacidades dos arcos de demanda são representadas por d_1 e d_2 , respectivamente para as áreas 1 e 2.

A Figura II.7 representa o espaço de estados para um sistema de duas áreas, com valores de capacidades máximas $x_{1\text{máx}}$, $x_{2\text{máx}}$ e $x_{3\text{máx}}$, respectivamente para os arcos x_1 , x_2 , e x_3 .

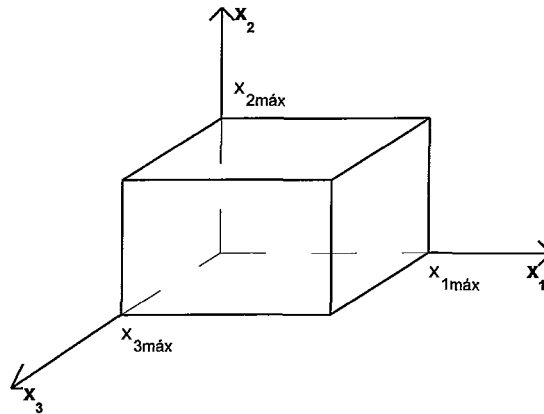


Figura II.7 - Espaço de Estados para um Sistema de Duas Áreas

Usando (II.16), podemos explicitar cada um dos conjuntos de estados que possuem o mesmo corte mínimo:

$$X_1 = \{x \in X \mid x_2 - x_3 < d_2; x_1 - x_3 < d_1; x_1 + x_2 < d_1 + d_2\}$$

$$X_2 = \{x \in X \mid x_3 - x_2 \leq -d_2; x_1 - x_2 < d_1 - d_2; x_1 + x_3 < d_1\}$$

$$X_3 = \{x \in X \mid x_3 - x_1 \leq -d_1; x_2 - x_1 \leq d_2 - d_1; x_2 + x_3 < d_2\}$$

$$X_4 = \{x \in X \mid -x_1 - x_2 \leq -d_1 - d_2; -x_1 - x_3 \leq -d_1; -x_2 - x_3 \leq -d_2\}$$

Cada um dos subconjuntos X_f é uma partição no espaço de estados do sistema, e é representado por um poliedro convexo.

A Figura II.8 representa os conjuntos dos modos de falha X_1 , X_2 , X_3 e X_4 , para valores de cargas d_1 e d_2 , respectivamente para as áreas 1 e 2.

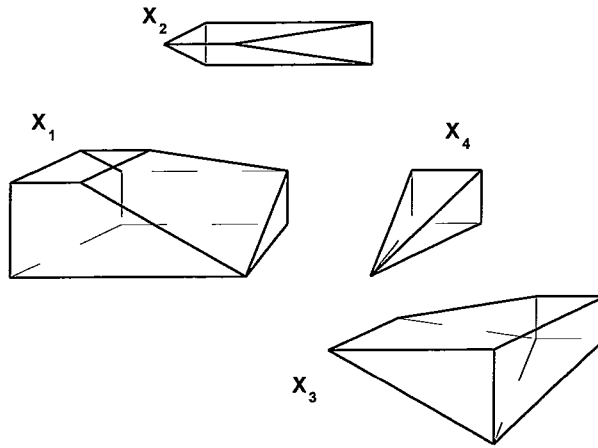


Figura II.8 - Representação Geométrica dos Cortes do Sistema

Podemos notar que os estados nos quais o sistema é capaz de suprir sua carga, são aqueles pertencentes ao subconjunto X_4 , pois para estes estados o valor do corte mínimo (fluxo máximo) é igual à soma das cargas das áreas.

Assim, a probabilidade de falha desse sistema, ou seja a LOLP é a soma das probabilidades dos modos de falha 1, 2, e 3:

$$LOLP = P(X_1) + P(X_2) + P(X_3) \quad (II.38)$$

onde $P(X_t)$ representa a probabilidade total sobre todos os estados no conjunto X_t , $t=1,2,3$.

Como já dito anteriormente, o vetor estado x , é uma variável aleatória, onde os q componentes, representando os arcos de geração e interligação, são também variáveis aleatórias. Pela hipótese de independência das *f. d. p.*'s dos arcos, a probabilidade do estado x , $P(x)$, pode ser dada por:

$$P(x) = \prod_{i=1}^q p(x_i) \quad (II.39)$$

onde $p(x_i)$ é a probabilidade associada ao componente x_i .

A decomposição expressa em (II.17) nos permite escrever:

$$P(X^f) = \sum_{t=1}^{2^N-1} P(X_t) \quad (\text{II.40})$$

e, conseqüentemente:

$$LOLP = \sum_{t=1}^{2^N-1} P(X_t) \quad (\text{II.41})$$

Usando o mesmo princípio, para o cálculo da EPNS podemos reescrever a expressão (II.23):

$$EPNS = \sum_{t=1}^{2^N-1} \sum_{x \in X_t} [D - C_{min}(x)] \times P(x) \quad (\text{II.42})$$

Substituindo (II.19) em (II.42) e rearranjando os termos, temos:

$$EPNS = \sum_{t=1}^{2^N-1} \left[D - \sum_{i=1}^N (1 - \delta_t(i)) d_i \right] P(X_t) - \sum_{t=1}^{2^N-1} \sum_{x \in X_t} P(x) \sum_{j=1}^q \delta_t(j) x_j \quad (\text{II.43})$$

Para a LOLF, usando a função teste definida em (II.26), temos:

$$LOLF = \sum_{t=1}^{2^N-1} \sum_{x \in X_t} P(x) \sum_{j=1}^q \lambda^m(x_j) \quad (\text{II.44})$$

Cada conjunto X_t , para $t = 1, 2, \dots, 2^N-1$, é um poliedro convexo definido pelas restrições lineares expressas em (II.16). Sua probabilidade, $P(X_t)$, pode ser expressa como um somatório múltiplo sobre as componentes $j = 1, 2, \dots, q$:

$$P(X_t) = \sum_{x_1 \in J_1} p(x_1) \left(\sum_{x_2 \in J_2} p(x_2) \left(\dots \left(\sum_{x_j \in J_j} p(x_j) \dots \left(\sum_{x_q \in J_q} p(x_q) \right) \dots \right) \right) \right) \quad (\text{II.45})$$

onde J_1, \dots, J_q são intervalos tais que os limites do intervalo J_j são função dos valores das componentes anteriores x_1, x_2, \dots, x_{j-1} . Esses limites podem ser obtidos recursivamente, como se segue:

O intervalo J_1 é limitado inferiormente por \underline{x}_1 e superiormente por \overline{x}_1 ; para um valor $x_1^* \in [\underline{x}_1, \overline{x}_1]$, J_2 é limitado por $\underline{x}_2(x_1^*)$ e por $\overline{x}_2(x_1^*)$, que são conhecidos, dado um

valor x_1^* , e assim por diante. Estes limites inferiores e superiores podem ser encontrados para qualquer conjunto X_t , empregando o seguinte procedimento [4] :

Sejam $\underline{x}_j(x_1^*, \dots, x_{j-1}^*)$ e $\overline{x}_j(x_1^*, \dots, x_{j-1}^*)$ os limites inferior e superior para a componente x_j , dados previamente os valores x_1^*, \dots, x_{j-1}^* das componentes anteriores.

Seja c_j a capacidade máxima da componente x_j , e b_i o termo independente da restrição $C_i(x) \leq C_i(x)$, $i \neq t$, $i = 1, 2, \dots, 2^N$, quando x_1, \dots, x_{j-1} , são fixados.

Como os valores das $j-1$ componentes estão fixados, cada restrição i pode ser escrita como:

$$\sum_{n=j}^q a_{in} w_{in} \leq b_i \quad (\text{II.46})$$

Para cada componente x_j , em cada restrição, o coeficiente a_{ij} só pode ser não positivo ou não negativo. Portanto, temos dois caso a analisar:

a) o coeficiente da componente x_j na restrição i , a_{ij} , é maior ou igual a zero.

Neste caso, se reescrevermos (II.46), conservando somente x_j do lado esquerdo da desigualdade, teremos:

$$0 \leq x_{ij} \leq b_i - \sum_{n=j+1}^q a_{in} w_{in} \quad (\text{II.47})$$

o que nos dá para limites:

$$\underline{x}_j(x_1, \dots, x_{j-1}) = 0 \text{ e } \overline{x}_j(x_1, \dots, x_{j-1}) = \min_{\substack{i=1, \dots, 2^N \\ i \neq t}}(c_j, b_i - \sum_{n=j+1}^q a_{in} w_{in}) \quad (\text{II.48})$$

onde,

$$w_{in} = \begin{cases} 0 & \text{se } a_{in} \geq 0 \\ c_n & \text{caso contrário} \end{cases}$$

b) o coeficiente da componente x_j na restrição i , a_{ij} , é menor ou igual a zero:

$$\underline{x}_j(x_1, \dots, x_{j-1}) = - \min_{\substack{i=1, \dots, 2^N \\ i \neq t}}(0, b_i - \sum_{n=j+1}^q a_{in} w_{in}) \text{ e } \overline{x}_j(x_1, \dots, x_{j-1}) = c_j \quad (\text{II.49})$$

onde w_{in} é definido como anteriormente

Estas regras permitem-nos construir sucessivamente os intervalos J_1, \dots, J_q , e a partir daí calcular o somatório múltiplo definido em (II.45). Calculada a probabilidade de cada modo de falha, o índice LOLP é obtido usando a expressão (II.41).

Os demais índices são calculados de forma semelhante. Por exemplo, a LOLF é computada através da seguinte expressão:

$$LOLF = \sum_{x_1 \in J_1} p_1(x_1) \left(\sum_{x_2 \in J_2} p_2(x_2) \left(\dots \left(\sum_{x_l \in J_l} p_l(x_l) \dots \left(\sum_{x_q \in J_q} p_q(x_q) \sum_{i=1}^q \lambda^{in}(x_i) \right) \dots \right) \right) \right) \quad (II.50)$$

II.8 EXEMPLO - CÁLCULO DOS ÍNDICES USANDO INTEGRAÇÃO DIRETA

O sistema apresentado na Tabela II.1, será agora desenvolvido usando o algoritmo de integração direta.

Usando as expressões (II.9) e (II.11), podemos calcular os valores da Tabela de Probabilidades e Freqüências de Estados Individuais (COPFT) para cada arco.

O arco 1 representa a geração da área 1. Para obtermos a função de distribuição de probabilidades e as freqüências incrementais para cada estado de geração da área 1, vamos supor inicialmente uma tabela composta somente pelo gerador e_1 , e em seguida adicionar o gerador e_2 .

Tabela II.5 - COPFT Inicial do ARCO 1

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.
1	30	0,98	-0,0098
2	0	0,02	0,0098

Ao adicionarmos a unidade e_2 de capacidade $c_2 = 20\text{MW}$, novos estados de capacidade surgem, ampliando para quatro o número de estados resultantes: 50MW, 30MW, 20MW, e 0MW, cujas probabilidades são calculadas pela expressão (II.9):

$$\begin{aligned} p(0) &= p'(0 - 20)(1-0,02) + p'(0)(0,02) = 0,0004 \\ p(20) &= p'(20 - 20)(1-0,02) + p'(20)(0,02) = 0,0196 \\ p(30) &= p'(30 - 20)(1-0,02) + p'(30)(0,02) = 0,0196 \\ p(50) &= p'(50 - 20)(1-0,02) + p'(50)(0,02) = 0,9604 \end{aligned}$$

e as freqüências incrementais são calculadas pela expressão (II.11)

$$f^{in}(0) = p'(-20)f_k^{in}(20) + (1 - 0,02)f^{in'}(-20) + p'(0)f_k^{in}(0) + (0,02)f^{in'}(0) = 0,000392$$

$$f^{in}(20) = p'(0)f_k^{in}(20) + (1 - 0,02)f^{in'}(0) + p'(20)f_k^{in}(0) + (0,02)f^{in'}(20) = 0,009408$$

$$f^{in}(30) = p'(10)f_k^{in}(20) + (1 - 0,02)f^{in'}(10) + p'(30)f_k^{in}(0) + (0,02)f^{in'}(30) = 0,009408$$

$$f^{in}(50) = p'(30)f_k^{in}(20) + (1 - 0,02)f^{in'}(30) + p'(50)f_k^{in}(0) + (0,02)f^{in'}(50) = -0,019208$$

Temos então a Tabela final para o arco 1:

Tabela II.6 - COPFT para o ARCO 1

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.
1	50	0,9604	-0,019208
2	30	0,0196	0,009408
3	20	0,0196	0,009408
4	0	0,0004	0,000392

Para os demais arcos, a obtenção da tabela é imediata, visto que cada um contém somente um equipamento.

O arco 2 representa a geração da área 2, e sua tabela é a própria tabela do gerador e_3 .

Tabela II.7 - COPFT para o ARCO 2

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.
1	10	0,926	-0,0185
2	0	0,074	0,0185

O arco 3 representa a interligação entre as áreas 1 e 2 :

Tabela II.8 - COPFT para o ARCO 3

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.
1	20	0,9942	-0,0009942
2	0	0,0058	0,0009942

Tendo obtido as COPFT's para cada arco do sistema, o passo seguinte para a obtenção dos índices de confiabilidade é a determinação das restrições lineares que definem cada modo de falha. Em seguida, obtêm-se dos limites dos intervalos J_j , nos somatórios múltiplos, para cada modo de falha.

Usando (II.16), podemos explicitar para o sistema, estas as restrições:

$$X_1 = \{x \in X \mid x_2 - x_3 < 10; x_1 - x_3 < 20; x_1 + x_2 < 30\}$$

$$X_2 = \{x \in X \mid x_3 - x_2 \leq -10; x_1 - x_2 < 10; x_1 + x_3 < 20\}$$

$$X_3 = \{x \in X \mid x_3 - x_1 \leq -20; x_2 - x_1 \leq -10; x_2 + x_3 < 10\}$$

$$X_4 = \{x \in X \mid -x_1 - x_2 \leq -30; -x_1 - x_3 \leq -20; -x_2 - x_3 \leq -10\}$$

Observe que os conjuntos que contém os estados de falha são X_1 , X_2 e X_3 .

É importante observar, que quando as restrições que definem os modos de falha contiverem desigualdades restritas, este fato deve ser considerado para a determinação dos limites de integração, abrindo-se o intervalo de definição desses limites, no extremo apropriado.

Para o modo de falha X_1 , devemos calcular os limites para os intervalos J_1 , $J_2(x_1)$ e $J_3(x_1, x_2)$, como descrito anteriormente.

As restrições que definem o corte X_1 , são:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 < 30 & (1) \\ x_1 - x_3 < 20 & (2) \\ x_2 - x_3 < 10 & (3) \end{cases}$$

- limites para x_1 :

Para definir os limites de x_1 necessitamos das restrições (1) e (2), além dos valores da Tabela II.6, onde temos que $0 \leq x_1 \leq 50$.

Como os coeficientes de x_1 são não negativos, temos por (II.48):

$$\begin{aligned} \underline{x}_1 &= 0 \\ \bar{x}_1 &= \min(50, 30 - (1)w_{12}, 20 - (-1)w_{23}) \end{aligned}$$

onde $w_{12} = 0$, pois seu coeficiente é positivo e pelo fato de ter coeficiente negativo, $w_{23} = 20$ (ver Tabela II.4). Temos então que $x_1 \in J_1 = [0, 30)$, ou ainda, pelo fato dos estados serem discretos, podemos considerar $J_1 = [0, 20]$

- limites para $x_2(x_1)$:

para cada valor de x_1 , calculamos $J_2(x_1)$, usando as restrições (1) e (3), além dos valores da Tabela II.7, onde temos $0 \leq x_2 \leq 10$

para $x_1 = 20$, temos:

$$\begin{aligned} \underline{x}_2(20) &= 0 \\ \bar{x}_2(20) &= \min(10, 10, 10 - (-1)w_{33}) \end{aligned}$$

onde $w_{33} = 20$, pois seu coeficiente é negativo (ver Tabela II.8). Temos então que $x_2(20) \in J_2(20) = \{0\}$

para $x_1 = 0$, temos:

$$\begin{aligned} x_2(0) &= 0 \\ \bar{x}_2(0) &= \min(10, 30, 10 - (-1)w_{33}) \end{aligned}$$

onde $w_{33} = 20$, pois seu coeficiente é negativo (ver Tabela II.8). Temos então que

$$x_2(0) \in J_2(0) = [0, 10].$$

- limites para $x_3(x_1, x_2)$:

Temos agora, que nas restrições (2) e (3) os coeficientes de x_3 são negativos, sendo assim, precisamos calcular somente os valores dos limites inferiores para os intervalos, já que para qualquer valor de x_1 e x_2 teremos $\bar{x}_3 = 20$ (ver Tabela II.8). Assim:

$$\begin{aligned} \underline{x}_3(20, 0) &= -\min(0, 0, 10) = 0 \text{ e } J_3(20, 0) = [0, 20] \\ \underline{x}_3(0, 0) &= -\min(0, 20, 10) = 0 \text{ e } J_3(0, 0) = [0, 20] \\ \underline{x}_3(0, 10) &= -\min(0, 0, 0) = 20 \text{ e } J_3(0, 10) = \{20\} \end{aligned}$$

Tendo determinado os limites para os intervalos, podemos então calcular $P(X_1)$, usando a expressão (II.45):

$$P(X_1) = \sum_{x_1 \in [0, 20]} p(x_1) \left(\sum_{x_2 \in J_2(x_1)} p(x_2) \left(\sum_{x_3 \in J_3(x_1, x_2)} p(x_3) \right) \right)$$

usando os limites calculados para os intervalos, e os valores de probabilidades constantes das Tabelas II.6, II.7 e II.8, temos:

$$\begin{aligned} P(X_1) &= p_1(0)p_2(0)[p_3(0) + p_3(20)] + p_1(0)p_2(10)p_3(20) + p_1(20)p_2(0)p_3(20) \\ P(X_1) &= 0,0004 \times 0,074(0,0058 + 0,9942) + 0,0004 \times 0,926 \times 0,9942 + \\ & 0,0196 \times 0,074 \times 0,9942 \end{aligned}$$

o que nos dá $P(X_1) = 0,0018397$

As restrições que definem o corte X_2 são:

$$\begin{cases} x_1 - x_2 < 10 & (1) \\ x_1 + x_3 < 20 & (2) \\ -x_2 + x_3 \leq -10 & (3) \end{cases}$$

Repetindo os procedimentos anteriores para encontrar os limites dos intervalos de integração teremos:

$x_1 \in J_1 = \{0\}$; $x_2(0) \in J_2(0) = \{10\}$; $x_3(0,10) \in J_3[0,10) = \{0\}$, o que substituído na expressão (II.45) nos dá o valor de $P(X_2)$:

$$P(X_2) = p_1(0)p_2(10)p_3(0)$$

$$P(X_2) = 0,0004 \times 0,926 \times 0,0058$$

o que nos dá $P(X_2) = 0,21 \times 10^{-5}$

As restrições que definem o corte X_3 são:

$$\begin{cases} -x_1 - x_2 & \leq -10 & (1) \\ -x_1 & + x_3 \leq -20 & (2) \\ & x_2 + x_3 < -10 & (3) \end{cases}$$

Repetindo os procedimentos anteriores para encontrar os limites dos intervalos de integração teremos:

$$x_1 \in J_1 = [20, 50] ;$$

$$x_2(20) \in J_2(20) = \{0\} ;$$

$$x_2(30) \in J_2(30) = \{0\} ;$$

$$x_2(50) \in J_2(50) = \{0\} ;$$

$$x_3(20,0) \in J_3(20,0) = \{0\};$$

$$x_3(30,0) \in J_3(30,0) = \{0\};$$

$$x_3(50,0) \in J_3(50,0) = \{0\};$$

Substituindo em (II.45), teremos para $P(X_3)$:

$$P(X_3) = p_1(50)p_2(0)p_3(0) + p_1(30)p_2(0)p_3(0) + p_1(20)p_2(0)p_3(0)$$

$$P(X_3) = (0,9604 + 0,0196 + 0,0196) \times (0,074 \times 0,0058) = 0,0004345$$

Cálculo da LOLP:

Para o cálculo da LOLP usamos a expressão (II.41) :

$$LOLP = P(X_1) + P(X_2) + P(X_3)$$

$$LOLP = 0,0018397 + 0,21 \times 10^{-5} + 0,0004345 = 0,00227637$$

Cálculo da EPNS:

Para o cálculo da EPNS, precisamos conhecer o valor do corte da carga para cada estado. Para cada um dos estados calculamos a capacidade do corte mínimo, lembrando que estados pertencentes ao mesmo modo de falha, possuem os

mesmos arcos no corte. Assim, para os estados $x \in X_1$, cuja característica é pertencerem ao corte I, o valor do corte mínimo é dado pela soma das capacidades dos arcos x_1 e x_2 - vide Figura II.6 - . Para os estados pertencentes a X_2 , cujo corte mínimo é o corte II, sua capacidade é dada por $x_1 + x_3 + d_2$ e finalmente para os estados pertencentes a X_3 , a capacidade é dada por $x_2 + x_3 + d_1$.

Usando a expressão (II.42) e a definição de corte de carga em (II.15), para o cálculo da EPNS, temos para o corte X_1 :

$$p_1(0)p_2(0)[p_3(0)+p_3(20)][30-0]+p_1(0)p_2(10)p_3(20)[30-10]+p_1(20)p_2(0)p_3(20)[30-20]$$

- para o corte X_2

$$p_1(0)p_2(10)p_3(0)[30-10]$$

- para o corte X_3

$$p_1(50)p_2(0)p_3(0)[30-10]+p_1(30)p_2(0)p_3(0)[30-10]+p_1(20)p_2(0)p_3(0)[30-10]$$

Substituindo os valores, temos para a EPNS o valor de 0,02706 MW

Cálculo da LOLF:

A expressão (II.50) pode ser usada para o cálculo da LOLF, antes porém devemos calcular os valores das taxas de transição incremental relativa a cada estado dos arcos do sistema. Lembrando que a frequência incremental associada a um estado pode ser expressa como:

$$f^{in}(x_i) = p(x_i)\lambda^{in}(x_i) \quad (II.51)$$

podemos então, a partir dos valores de frequência incremental das Tabelas II.6, II.7 e II.8, calcular os valores das taxas de transição incremental usando (II.51). Os valores estão apresentados nas Tabelas II.9, II.10 e II.11

Tabela II.9 - Taxas de Transição Incremental para o ARCO 1

ESTADO	CAPACIDADE	TAXA TRANS. INCR.
1	50	-0,02
2	30	0,48
3	20	0,48
4	0	0,98

Tabela II.10 - Taxas de Transição Incremental para o ARCO 2

ESTADO	CAPACIDADE	TAXA TRANS. INCR.
1	10	-0,02
2	0	0,25

Tabela II.11 - Taxas de Transição Incremental para o ARCO 3

ESTADO	CAPACIDADE	TAXA TRANS. INCR.
1	20	-0,001
2	0	0,17

Temos então para o cálculo da LOLF:

- para o corte X_1

$$p_1(0)p_2(0)(p_3(0)[\lambda_1^{in}(0) + \lambda_2^{in}(0) + \lambda_3^{in}(0)] + p_3(20)[\lambda_1^{in}(0) + \lambda_2^{in}(0) + \lambda_3^{in}(20)]) +$$

$$+ p_1(0)p_2(10)p_3(20)[\lambda_1^{in}(0) + \lambda_2^{in}(10) + \lambda_3^{in}(20)] +$$

$$+ p_1(20)p_2(0)p_3(20)[\lambda_1^{in}(20) + \lambda_2^{in}(0) + \lambda_3^{in}(20)]$$

- para o corte X_2

$$p_1(0)p_2(10)p_3(0)[\lambda_1^{in}(0) + \lambda_2^{in}(10) + \lambda_3^{in}(0)]$$

- para o corte X_3

$$p_1(50)p_2(0)p_3(0)[\lambda_1^{in}(50) + \lambda_2^{in}(0) + \lambda_3^{in}(0)] +$$

$$+ p_1(30)p_2(0)p_3(0)[\lambda_1^{in}(30) + \lambda_2^{in}(0) + \lambda_3^{in}(0)] +$$

$$+ p_1(20)p_2(0)p_3(0)[\lambda_1^{in}(20) + \lambda_2^{in}(0) + \lambda_3^{in}(0)]$$

Substituindo os valores, temos para a LOLF o valor de 0,00162590 falhas/hora

Cálculo da LOLD:

Dos valores calculados para a LOLP e para a LOLF, temos:

$$\text{LOLD} = 0,00227637 / 0,00162590 = 1,4000246 \text{ horas}$$

Os índices calculados estão apresentados na Tabela II.12:

Tabela II.12 - Índices de Confiabilidade Usando Integração Direta

LOLP	0,22764%
EPNS	0,02706 MW
LOLF	0,00163 falhas/ano
LOLD	1,40002 horas

II.9 RESUMO

Neste capítulo foi feita uma revisão dos conceitos de confiabilidade multi-área, necessários ao desenvolvimento da metodologia para o cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade.

Inicialmente foi apresentado um breve histórico do desenvolvimento de métodos para o cálculo de índices de confiabilidade multi-área. Em seguida foram mostrados os modelos de representação para os equipamentos e para o sistema de potência. Os índices - LOLP, EPNS, LOLF e LOLD - foram definidos. Foram desenvolvidas expressões para obtenção destes índices através de métodos de enumeração e usando o algoritmo de integração direta. Finalmente, foi apresentado um exemplo simples, com o objetivo de ilustrar o cálculo destes índices de confiabilidade, usando as metodologias mostradas neste capítulo.

CAPÍTULO III

CÁLCULO ANALÍTICO DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE

III.1 INTRODUÇÃO

O problema de *cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade multi-área com relação a variações nas taxas de falha e reparo dos equipamentos*, será abordado de forma indireta, calculando-se as sensibilidades dos índices com relação às indisponibilidades em regime permanente dos equipamentos. Esta abordagem, nos permitirá derivar expressões exatas, como será mostrado, ao contrário do que aconteceria se buscássemos expressões de sensibilidade diretamente em função das taxas de falha e reparo dos equipamentos. A relação entre u , λ e μ , é dada na expressão (II.8) e permite que dada uma variação em λ ou μ , determine-se a variação correspondente em u .

III.2 CÁLCULO DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

O sistema elétrico considerado é dividido em áreas e é representado por uma rede *linear de fluxos*, conforme visto no Capítulo II.

Foi visto também no Capítulo II que os índices de confiabilidade podem ser calculados, avaliando-se o valor esperado de uma função teste $F(x)$, onde x é o estado do sistema.

Para tanto, é necessário que conheçamos, para cada estado x , selecionado do conjunto X de estados do sistema, a sua probabilidade $P(x)$ e o valor da função-teste $F(x)$.

A probabilidade associada a cada estado é função das probabilidades dos estados dos equipamentos do sistema $p(e_k)$.

Cada equipamento e_k considerado (geradores ou interligações), é representado a dois estados, disponível e indisponível, com probabilidades:

$$p(e_k) = \begin{cases} u_k & \text{se } e_k \text{ está indisponível} \\ 1 - u_k & \text{se } e_k \text{ está disponível} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

e taxas de transição :

$\lambda_k \rightarrow$ Taxa de falha - é a taxa de transição do estado disponível para o estado indisponível do equipamento e_k .

$\mu_k \rightarrow$ Taxa de reparo - é a taxa de transição do estado indisponível para o estado para o estado disponível do equipamento e_k .

O valor da função-teste $F(x)$, para a LOLP e para a EPNS, relaciona-se com a condição de atendimento do sistema e com o valor do corte de carga, como já definido no capítulo anterior. Para a LOLF a função teste está relacionada às taxas de falha e reparo dos equipamentos.

Recordando as definições de $F(x)$, para os índices de confiabilidade, temos:

para a LOLP:

$$\text{LOLP} = \sum_{x \in X^f} P(x) \quad (\text{III.2})$$

Para a EPNS:

$$\text{EPNS} = \sum_{x \in X^f} LC(x)P(x) \quad (\text{III.3})$$

E finalmente para a LOLF, considerando as duas formulações:

Formulação 1 - estados de falha

$$\text{LOLF}_f = \sum_{x \in X^f} P(x)\lambda_f^n(x) \quad (\text{III.4})$$

Formulação 2 - estados de sucesso

$$\text{LOLF}_s = \sum_{x \in X^s} P(x)\lambda_s^n(x) \quad (\text{III.5})$$

III.3 CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE EM RELAÇÃO A INDISPONIBILIDADE DE UM EQUIPAMENTO

Para o cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade, com respeito à probabilidade de falha dos equipamentos, deve-se calcular a derivada da expressão que fornece o valor esperado da função-teste $F(x)$ em relação às taxas de saída forçada dos equipamentos.

Assim, derivando a expressão (II.20) da função-teste $E(F)$, em relação a u_k , (probabilidade de falha do equipamento e_k), obtém-se:

$$\frac{\partial E(F)}{\partial u_k} = \sum_{x \in X} \left[\frac{\partial P(x)}{\partial u_k} \times F(x) + P(x) \times \frac{\partial F(x)}{\partial u_k} \right] \quad (\text{III.6})$$

O cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade usando a expressão (III.6) envolve portanto o cálculo das derivadas da probabilidade $P(x)$ e da função-teste $F(x)$ em relação às probabilidades de falha dos equipamentos.

Derivada de $P(x)$

Supondo que as *f. d. p.*'s dos equipamentos são independentes, $P(x)$ pode ser obtido pela expressão a seguir:

$$P(x) = p(e_1) \times p(e_2) \times \dots \times p(e_k) \times \dots \times p(e_m) \quad (\text{III.7})$$

Assim, se o equipamento e_k estiver falhado ($p(e_k) = u_k$), a derivada da probabilidade é dada por:

$$\frac{\partial P(x)}{\partial u_k} = p(e_1) \times p(e_2) \times \dots \times 1 \times \dots \times p(e_m) \quad (\text{III.8})$$

e se o equipamento e_k estiver disponível ($p(e_k) = 1 - u_k$), a derivada de $P(x)$ é dada por:

$$\frac{\partial P(x)}{\partial u_k} = p(e_1) \times p(e_2) \times \dots \times (-1) \times \dots \times p(e_m) \quad (\text{III.9})$$

Dessa maneira, a partir de (III.8) e (III.9), podemos expressar a derivada de $P(x)$ em relação a u_k como:

$$\frac{\partial P(x)}{\partial u_k} = \frac{P(x)}{p(e_k)} \times \frac{\partial p(e_k)}{\partial u_k} \quad (\text{III.10})$$

ou mais simplificada como:

$$\frac{\partial P(x)}{\partial u_k} = G(e_k) \times P(x) \quad (\text{III.11})$$

onde definimos $G(e_k)$, como:

$$G(e_k) = \frac{1}{p(e_k)} \times \frac{\partial p(e_k)}{\partial u_k} = \begin{cases} \frac{1}{u_k} & \text{se } e_k \text{ está indisponível} \\ -\frac{1}{1-u_k} & \text{se } e_k \text{ está disponível} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Derivada de $F(x)$

De acordo com as definições para a função-teste vistas no Capítulo II, para a LOLP e para a EPNS, o valor de $F(x)$ não depende da probabilidade de falha dos equipamentos conseqüentemente o segundo termo do somatório em (III.6) é nulo. Entretanto para a LOLF, a função teste está relacionada às taxas de falha e reparo dos componentes.

Para a LOLF, o cálculo das sensibilidades pode ser simplificado pela observação de que a expressão da LOLF associada a estados de falha (III.4), não depende das taxas de falha λ . Analogamente a formulação associada aos estados de sucesso (III.5), não depende das taxas de reparo μ .

Assim, pela escolha da expressão adequada para a LOLF, considerando qual a taxa de transição que está sendo perturbada, pode-se evitar termos cruzados no cálculo da sensibilidade.

Por este motivo, estudamos as derivadas para ambas as formulações da função-teste $F(x)$ para a LOLF.

Das definições de $F(x)$ para a LOLF, temos:

Formulação 1 - estados de falha

Neste caso supomos que a variação na taxa de saída forçada do componente resulta de uma mudança na sua taxa de falha sendo então a expressão (III.4) usada para a LOLF. Logo:

$$F(x) = \lambda_f^{in}(e_1) + \lambda_f^{in}(e_2) + \dots + \lambda_f^{in}(e_k) + \dots + \lambda_f^{in}(e_m) \quad (\text{III.13})$$

onde:

$$\lambda_f^{in}(e_k) = \begin{cases} \mu_k & \text{se } e_k \text{ está indisponível} \\ -\mu_k \times \frac{u_k}{1-u_k} & \text{se } e_k \text{ está disponível} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Se estamos calculando a derivada de $F(x)$ em relação a taxa de saída forçada de um determinado equipamento, claramente, a derivada da expressão (III.13) reduz-se à derivada da taxa de transição incremental do equipamento em questão.

Assim:

$$\frac{\partial F(x)}{\partial u_k} = \frac{\partial \lambda_f^{in}(e_k)}{\partial u_k} \quad (III.15)$$

que pode ser obtida derivando-se (III.14). Para simplicidade de notação, definimos $H(e_k)$ como sendo:

$$H(e_k) = \frac{\partial \lambda_f^{in}(e_k)}{\partial u_k} = \begin{cases} 0 & \text{se } e_k \text{ está indisponível} \\ -\frac{\mu_k}{(1-u_k)^2} & \text{se } e_k \text{ está disponível} \end{cases} \quad (III.16)$$

Formulação 2 - estados de sucesso

Neste caso, supomos que as variações ocorridas nas taxas de saída forçada dos equipamentos, resultam de mudanças nas suas taxas de *reparo*. A LOLF é calculada pela expressão (III.5), onde $F(x)$ é dada por:

$$F(x) = \lambda_s^{in}(e_1) + \lambda_s^{in}(e_2) + \dots + \lambda_s^{in}(e_k) + \dots + \lambda_s^{in}(e_m) \quad (III.17)$$

onde os valores das taxas de transição incremental são determinados pelo estado do equipamento, sendo:

$$\lambda_s^{in}(e_k) = \begin{cases} -\lambda_k \times \frac{1-u_k}{u_k} & \text{se } e_k \text{ está indisponível} \\ \lambda_k & \text{se } e_k \text{ está disponível} \end{cases} \quad (III.18)$$

Analogamente, ao desenvolvimento a partir de estados de falha, a derivada de $F(x)$, reduz-se ao termo referente ao equipamento em análise.

Definindo $J(e_k)$, como a derivada da taxa de transição incremental de estados de sucesso para estados de falha, (III.18), em relação à taxa de indisponibilidade forçada do equipamento e_k , temos:

$$J(e_k) = \frac{\partial \lambda_s^{in}(e_k)}{\partial u_k} = \begin{cases} \frac{\lambda_k}{u_k^2} & , \text{ se } e_k \text{ está indisponível} \\ 0 & , \text{ se } e_k \text{ está disponível} \end{cases} \quad (III.19)$$

Substituindo (III.11), (III.16), (III.19) e as expressões para a função-teste, em (III.6), teremos as expressões para as sensibilidades da LOLP, EPNS e LOLF em relação à taxa de saída forçada de um dado equipamento e_k .

Sensibilidade para a LOLP

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_k} = \sum_{x \in X^f} G(e_k) \times P(x) \quad (III.20)$$

Sensibilidade para a EPNS

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_k} = \sum_{x \in X^f} LC(x) \times G(e_k) \times P(x) \quad (III.21)$$

onde $LC(x)$ é o corte de carga relativo ao estado x .

Sensibilidade para a LOLF

caso 1 - perturbação na taxa de falha

$$\frac{\partial LOLF_f}{\partial u_k} = \sum_{x \in X^f} [G(e_k) \times \lambda_f^{in}(x) + H(e_k)] \times P(x) \quad (III.22)$$

caso 2 - perturbação na taxa de reparo

$$\frac{\partial LOLF_s}{\partial u_k} = \sum_{x \in X^s} [G(e_k) \times \lambda_s^{in}(x) + J(e_k)] \times P(x) \quad (III.23)$$

Sensibilidade para a LOLD

A partir da definição para a LOLD em (II.30), pode-se escrever [8]:

$$\frac{\partial LOLD}{\partial u_k} = \frac{1}{LOLF} \left[\frac{\partial LOLP}{\partial u_k} - \frac{\partial LOLF}{\partial u_k} \times LOLD \right] \quad (III.24)$$

Assim como para o cálculo dos índices de confiabilidade, as expressões de sensibilidades desenvolvidas neste capítulo também são aplicadas para cada estado selecionado individualmente. Por conseguinte, sua implementação em programas de avaliação de confiabilidade, tanto baseados em enumeração de estados, como usando simulação Monte Carlo, é direta.

Apesar de terem sido apresentadas expressões para o cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade a nível de sistema, em programas que avaliem estes índices por área, é possível também calcular as sensibilidades para cada área.

O cálculo das sensibilidades, empregando a metodologia proposta, consiste basicamente no cálculo de $G(e_k)$, $H(e_k)$ e $J(e_k)$, como será visto no exemplo ao final deste capítulo.

III.3.1 Linearidade dos Índices de Confiabilidade com u_k

Um dos objetivos de se desejar calcular as sensibilidades de índices de confiabilidade em relação aos parâmetros de falha dos equipamentos, é poder reavaliar rapidamente estes índices, para outros valores destes parâmetros de falha.

O novo valor dos índices de confiabilidade, $E(F^*)$, pode ser obtido por:

$$E(F^*) = E(F) + \Delta E(F) \quad (III.25)$$

onde

$$\Delta E(F) = \frac{\partial E(F)}{\partial u_k} \times \Delta u_k \quad (III.26)$$

e Δu_k é a variação em u_k .

Será mostrado que $\Delta E(F)$ resulta de um cálculo exato e não de uma aproximação de primeira ordem. Em outras palavras, as expressões para as sensibilidades desenvolvidas na seção anterior são *exatas*, i.e., os índices de confiabilidade variam linearmente com a indisponibilidade do equipamento e_k

Pela observação de expressão (III.7) é bastante claro que $P(x)$ varia linearmente com u_k . Como para os índices LOLP e EPNS, $F(x)$ não é uma função de u_k , podemos concluir que a LOLP e a EPNS são lineares com respeito à probabilidade de falha de e_k . Como consequência, as expressões (III.20) e (III.21) são exatas [8,10].

Para a LOLF, podemos dividir o somatório da expressão (III.4), ou (III.5), em duas parcelas tomadas sobre os conjuntos dos estados para os quais o componente e_k está indisponível (X_d^f) e para os quais o componente e_k está disponível (X_u^f). Usando, por exemplo, a formulação para $F(x)$ associada aos estados de falha (III.13) e (III.14) e ressaltando a contribuição do equipamento e_k , podemos escrever:

$$LOLF(u_k) = \sum_{x \in X_d^f} (\mu_k + k_2) \times k_1 \times u_k + \sum_{x \in X_u^f} \left[-\frac{\mu_k \times u_k}{(1-u_k)} + k_3 \right] \times [k_1 \times (1-u_k)] \quad (III.27)$$

onde k_1 , k_2 e k_3 são constantes relacionadas às probabilidades e taxas de transição incremental dos outros componentes do sistema.

Podemos ver em (III.27) que se μ_k é constante, i.e., Δu_k é resultado de uma variação apenas em λ_k , a LOLF é uma função linear de u_k . Em conseqüência, a expressão (III.22) é exata. De maneira análoga, podemos mostrar que a expressão (III.23) é exata desde que não haja variações no parâmetro λ_k .

Dessa maneira, a partir da avaliação inicial da confiabilidade de um sistema, e calculadas as sensibilidades dos índices de confiabilidade em relação as taxas de saída forçada dos equipamentos, pode-se analisar o comportamento dos índices em função da variação nos parâmetros de falha de cada equipamento individualmente. Adicionalmente, pode-se recalculer novos índices de confiabilidade em função da variação nos parâmetros de falha de algum equipamento. O conhecimento destas sensibilidades, permite ainda que os equipamentos do sistema sejam *ordenados* em relação aos seus *impactos* para a confiabilidade do sistema.

III.4 SENSIBILIDADES EM RELAÇÃO A UM GRUPO DE EQUIPAMENTOS

O conjunto de equipamentos do sistema, normalmente contém subconjuntos onde os equipamentos são idênticos. Por exemplo, consideramos como usina geradora, um conjunto de unidades geradoras, cujos parâmetros de falha são idênticos. Além de se obter as sensibilidades em relação a cada equipamento individualmente, pode-se estar também interessado em determinar-se as sensibilidades em relação a um conjunto de equipamentos, por exemplo, uma usina.

Para esta situação, será desenvolvida a seguir, as novas expressões para $G(e_k)$, $H(e_k)$, e $J(e_k)$.

Suponhamos então, que em um determinado estado x do sistema, tenhamos δ componentes falhados, neste grupo de η equipamentos iguais.

cálculo de $G(e_k)$:

Da expressão (III.12) temos:

$$G(e_k) = \frac{1}{p(e_k)} \times \frac{\partial p(e_k)}{\partial u_k}$$

Temos agora que $p(e_k)$ não é mais a probabilidade associada ao estado de um único equipamento e sim aos estados de um grupo de equipamentos. O que precisamos conhecer é a quantidade de equipamentos disponíveis e indisponíveis deste grupo para podermos calcular sua probabilidade.

A probabilidade de que, deste grupo de η equipamentos, δ se encontrem falhados é dada por:

$$p(e_k) = \left[(1 - u_k)^{\eta - \delta} (u_k)^\delta \right] \quad (III.28)$$

Derivando (III.28) com relação a u_k , tem-se:

$$\frac{\partial p(e_k)}{\partial u_k} = (\delta - \eta u_k) \times (1 - u_k)^{\eta - \delta - 1} (u_k)^{\delta - 1} \quad (III.29)$$

Substituindo (III.28) e (III.29) em (III.12) temos para $G(e_k)$:

$$G(e_k) = \frac{\delta - \eta u_k}{(1 - u_k)(u_k)} \quad (III.30)$$

cálculo de $H(e_k)$

De (III.16) temos que :

$$H(e_k) = \frac{\partial \lambda_f^{in}(e_k)}{\partial u_k}$$

A taxa de transição incremental $\lambda_f^{in}(e_k)$ refere-se agora não mais a um único equipamento, mais a um grupo de η equipamentos. Sendo assim seu valor também depende do número de equipamentos que estão disponíveis no estado considerado.

Considere novamente que em um determinado estado x selecionado (por Monte Carlo ou enumeração sucessiva de estados) temos δ equipamentos indisponíveis de um total de η componentes. A taxa de transição incremental a partir de estados de falha, relativa a este grupo de equipamentos pode ser obtida a partir da definição das taxas de transição incremental (II.28), onde todos os equipamentos são considerados com as mesmas taxas de reparo e de falha. Assim,

$$\lambda_f^{in}(e_k) = \delta \times \mu_k - (\eta - \delta) \times \mu_k \times \frac{u_k}{(1 - u_k)} \quad (III.31)$$

Como por hipótese, μ_k é constante, para a derivada de (III.31) em relação a u_k temos:

$$H(e_k) = \frac{\partial \lambda_f^{in}(e_k)}{\partial u_k} = -(\eta - \delta) \times \frac{\mu_k}{(1 - u_k)^2} \quad (III.32)$$

cálculo de $J(e_k)$

O procedimento para o cálculo de $J(e_k)$ é idêntico ao usado para se obter $H(e_k)$, apenas usando-se a expressão para a taxa de transição incremental a partir de estados de sucesso:

$$\lambda_s^{in}(e_k) = -\delta \times \lambda_k \times \frac{(1-u_k)}{u_k} + (\eta - \delta) \times \lambda_k \quad (\text{III.33})$$

Como neste caso λ_k é considerado constante, para derivada de (III.33) em relação a u_k , tem-se:

$$J(e_k) = \frac{\partial \lambda_s^{in}(e_k)}{\partial u_k} = \delta \times \frac{\lambda_k}{u_k^2} \quad (\text{III.34})$$

Observe que no caso de variação simultânea de parâmetros de falha de um ou mais equipamentos, idênticos ou não, a propriedade de linearidade dos índices de confiabilidade com relação a u_k não é mais válida. Assim, as equações (III.30), (III.32) e (III.34) são expressões aproximadas. Para verificarmos este fato, basta observar a expressão (III.28) para a probabilidade do conjunto de equipamentos e_k e notarmos que u_k aparece com expoente diferente da unidade.

III.5 CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE VIA SIMULAÇÃO MONTE CARLO

As expressões (III.20), (III.21), (III.22) e (III.23), para o cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade, podem ser resumidas na expressão abaixo:

$$\frac{\partial E(F)}{\partial u_k} = \sum_{x \in X} \left[G(e_k) F(x) + \frac{\partial F(x)}{\partial u_k} \right] \times P(x) \quad (\text{III.35})$$

onde:

$F(x)$ é a função-teste já definida para cada índice

$G(e_k)$ é definido em (III.12), para cada equipamento

$\frac{\partial F(x)}{\partial u_k}$ é a derivada da função-teste $F(x)$ definida em (III.16) e (III.19) para a LOLF

O fato de termos $P(x)$ em evidência no somatório da expressão (III.35) torna imediata a implementação computacional do cálculo das sensibilidades, via simulação Monte Carlo.

A derivada do valor esperado da função-teste (III.35), poderá ser avaliada então, através do seguinte estimador não tendencioso:

$$\frac{\partial \hat{E}(F)}{\partial u_k} = \frac{1}{NE} \sum_{i=1}^{NE} \left[G(e_k^i) F(x^i) + \frac{\partial F(x^i)}{\partial u_k} \right] \quad (\text{III.36})$$

onde:

$\frac{\partial \hat{E}(F)}{\partial u_k}$ representa o estimador da sensibilidade do índice de confiabilidade, calculado como o valor esperado da função-teste $F(x)$, em relação a u_k .

NE é o número de estados amostrados

$G(e_k^i)$ definido em (III.12), é calculado para cada equipamento, considerado seu estado no i -ésimo estado amostrado.

$F(x^i)$ é o resultado da função-teste para o i -ésimo estado amostrado

$\frac{\partial F(x^i)}{\partial u_k}$ é o resultado da derivada da função-teste, conforme definido anteriormente, para o i -ésimo estado amostrado.

Para cada equipamento e_k considerado, deverá ser calculada a incerteza associada à estimativa da sensibilidade dos índices em relação à sua taxa de indisponibilidade forçada. Dentro das mesmas considerações feitas na Seção II.5.1, do Capítulo II, a incerteza será representada por um coeficiente de variação, β_k , calculado para cada equipamento.

$$\beta_k = V \left(\frac{\partial \hat{E}(F)}{\partial u_k} \right)^{0,5} / \frac{\partial \hat{E}(F)}{\partial u_k} \quad (\text{III.37})$$

A metodologia proposta, pode ser facilmente incluída em programas de avaliação de confiabilidade multi-área que empreguem o método de simulação Monte Carlo. As sensibilidades podem ser calculadas simultaneamente à avaliação dos índices de confiabilidade, não havendo por isso aumento significativo do esforço computacional, muito embora seja necessário considerar os estados de sucesso para avaliação da LOLF_s. O algoritmo pode ser resumido nos seguintes passos:

i) Inicialize o número de estados amostrados, NE , com o valor 0;

ii) Seleccione um estado $x \in X$ a partir da distribuição de probabilidade $P(x)$; atualize NE ;

Um estado do sistema é selecionado a partir dos estados dos componentes. Assim, são sorteados uma série hidrológica, um nível de carga, os estados dos geradores e das interligações.

iii) Para este estado x amostrado, calcule a função-teste $F(x)$ para cada índice de confiabilidade, assim como os valores de $G(e_k)$, $H(e_k)$ e $J(e_k)$ para cada equipamento;

A partir dos estados dos componentes do sistema, são calculadas as capacidades de todos os cortes, utilizando a expressão (II.19). Em seguida, identifica-se o corte de capacidade mínima. Se o corte mínimo for o corte que contém somente os arcos de demanda o estado é um estado de sucesso e $F(x)$ é nula para todos os índices de confiabilidade, exceto para a $LOLF_s$. Neste caso, $F(x)$ é dada por (II.29). Caso contrário, o estado x é um estado de falha, e a função teste associada a cada índice está definida nas expressões (II.15), (II.21) e (II.27)

Para os estados de falha, calcular $G(e_k)$ e $H(e_k)$ como definido nas expressões (III.12) e (III.16) e para os estados de sucesso, calcular o valor de $J(e_k)$ como definido em (III.19).

iv) Atualize as estimativas dos índices de confiabilidade e das sensibilidades

De posse de $F(x)$, atualize a estimativa $\hat{E}(F)$, usando a expressão (II.33). De posse de $G(e_k)$, $H(e_k)$ e $J(e_k)$, atualize as estimativas das sensibilidades dos índices usando a expressão (III.36)

v) Calcule as incertezas dos estimadores

A incerteza do estimador para cada índice de confiabilidade, é calculada através da expressão (II.37). A incerteza para a sensibilidade de cada equipamento em relação aos índices é dada por (III.37)

vi) Se as incertezas das estimativas são aceitáveis (dentro da tolerância pré-estabelecida), ou se foi atingido o número máximo de sorteios, para; caso contrário retorne ao passo ii.

Caso se esteja interessado em calcular a sensibilidade em relação a grupos de equipamentos (usinas) a etapa de sorteio deve ainda incluir o sorteio do número de equipamentos falhados, δ , por grupo e usar as definições expressas em (III.30), (III.32) e (III.34) para $G(e_k)$, $H(e_k)$ e $J(e_k)$.

III.6 EXEMPLO DE CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES USANDO ENUMERAÇÃO DE ESTADOS

Para ilustrar a metodologia desenvolvida neste capítulo, faremos uma aplicação simples utilizando o exemplo desenvolvido no capítulo anterior. Será empregado o método de enumeração exaustiva dos estados.

A título de recordação, os parâmetros do sistema usado como exemplo no Capítulo II serão reproduzidos na Tabela III.1.

Tabela III.1 - Parâmetros do Sistema

EQUIP ^{TO}	ÁREA	CAPACIDADE	TAXA DE FALHA	TAXA DE REPARO	PROB. DE FALHA
e_1	1	30 MW	0,01	0,49	0,02
e_2	1	20 MW	0,01	0,49	0,02
e_3	2	10 MW	0,02	0,25	0,074
e_4	1-2	20 MW	0,001	0,17	0,0058

Para este sistema, os índices de confiabilidade encontrados foram:

LOLP= 0,227637%

EPNS= 0,02706 MW

LOLF= 0,00162590 falhas/ano

Vemos da Tabela III.1 que temos quatro equipamentos para os quais podemos calcular as sensibilidades dos índices de confiabilidade em relação às suas probabilidades de falha: geradores e_1 , e_2 , e_3 e a interligação e_4

Para o cálculo das sensibilidades, usando as expressões (III.20-III.23), temos inicialmente que calcular os valores de $G(e_k)$, $H(e_k)$ e $J(e_k)$.

cálculo de $G(e_k)$:

Para cada equipamento temos diferentes valores para $G(e_k)$, em função do equipamento estar ou não disponível. Assim, usando a expressão (III.12), temos:

$$G(e_1) = G(e_2) = \begin{cases} \frac{1}{0,02} = 50 & \text{caso o equipamento esteja indisponível} \\ -\frac{1}{1-0,02} = -1,0204 & \text{caso o equipamento esteja disponível} \end{cases}$$

$$G(e_3) = \begin{cases} \frac{1}{0,074} = 13,5 & \text{caso o equipamento esteja indisponível} \\ -\frac{1}{1-0,074} = -1,08 & \text{caso o equipamento esteja disponível} \end{cases}$$

$$G(e_4) = \begin{cases} \frac{1}{0,0058} = 171 & \text{caso o equipamento esteja indisponível} \\ -\frac{1}{1-0,0058} = -1,0058 & \text{caso o equipamento esteja disponível} \end{cases}$$

A Tabela III.2 resume os valores de $G(e_k)$.

Tabela III.2 - Valores de $G(e_k)$

EQUIP ^{TO}	PARA EQUIP ^{TO} DISPONÍVEL	PARA EQUIP ^{TO} INDISPONÍVEL
e_1 ,	-1,0204	50
e_2 ,	-1,0204	50
e_3 ,	-1,08	13,5
e_4	-1,0058	171

Estes valores serão usados no cálculo da sensibilidade da LOLP, EPNS e da LOLF.

cálculo de $H(e_k)$

Analogamente ao cálculo anterior, usando os parâmetros da Tabela III.1, as taxas de indisponibilidade forçada calculadas para cada equipamento e a expressão (III.16), temos:

$$H(e_1) = H(e_2) = \begin{cases} 0 & \text{caso o equipamento esteja indisponível} \\ -\frac{0,49}{(1-0,02)^2} = -0,5102 & \text{caso o equipamento esteja disponível} \end{cases}$$

$$H(e_3) = \begin{cases} 0 & \text{caso o equipamento esteja indisponível} \\ -\frac{0,25}{(1-0,074)^2} = -0,2916 & \text{caso o equipamento esteja disponível} \end{cases}$$

$$H(e_4) = \begin{cases} 0 & \text{caso o equipamento esteja indisponível} \\ -\frac{0,17}{(1-0,0058)^2} = -0,172 & \text{caso o equipamento esteja disponível} \end{cases}$$

Os Valores de $H(e_k)$ estão resumidos na Tabela III.3

Tabela III.3- Valores de $H(e_k)$

EQUIP ^{TO}	PARA EQUIP ^{TO} DISPONÍVEL	PARA EQUIP ^{TO} INDISPONÍVEL
e_1	-0,5102	0
e_2	-0,5102	0
e_3	-0,2916	0
e_4	-0,172	0

cálculo de $J(e_k)$

Para o cálculo de $J(e_k)$ usamos a expressão (III.18), lembrando que os valores encontrados serão usados no cálculo da sensibilidade da LOLF, a partir de estados de sucesso. Assim, temos:

$$J(e_1) = J(e_2) = \begin{cases} \frac{0,01}{(0,02)^2} = 25 & \text{caso o equipamento esteja indisponível} \\ 0 & \text{caso o equipamento esteja disponível} \end{cases}$$

$$J(e_3) = \begin{cases} \frac{0,02}{(0,074)^2} = 3,65 & \text{caso o equipamento esteja indisponível} \\ 0 & \text{caso o equipamento esteja disponível} \end{cases}$$

$$J(e_4) = \begin{cases} \frac{0,001}{(0,0058)^2} = 29,24 & \text{caso o equipamento esteja indisponível} \\ 0 & \text{caso o equipamento esteja disponível} \end{cases}$$

A Tabela III.4 apresenta os valores de $J(e_k)$

Tabela III.4 - Valores de $J(e_k)$

EQUIP ^{TO}	PARA EQUIP ^{TO} DISPONÍVEL	PARA EQUIP ^{TO} INDISPONÍVEL
e_1	0	25
e_2	0	25
e_3	0	3,65
e_4	0	29,24

III.6.1 Cálculo das Sensibilidades

Para facilitar a compreensão dos cálculos a seguir, as Tabelas III.5 e III.6 mostram para os estados de falha e estados de sucesso do sistema, respectivamente, o estado de cada equipamento, os valores de $G(e_k)$, de $H(e_k)$ e de $J(e_k)$ para todos os estados do sistema.

Tabela III.5 - Valores de G e H para Estados de Falha do Sistema

SISTEMA		STATUS do EQUIPAMENTO				$G(e_k)$				$H(e_k)$			
Estado	Status	e_1	e_2	e_3	e_4	e_1	e_2	e_3	e_4	e_1	e_2	e_3	e_4
4	F	S	S	F	F	-1,02	-1,02	13,5	171	-0,51	-0,51	0	0
8	F	S	F	F	F	-1,02	50	13,5	171	-0,51	0	0	0
11	F	F	S	F	S	50	-1,02	13,5	-1,01	0	-0,51	0	-0,17
12	F	F	S	F	F	50	-1,02	13,5	171	0	-0,51	0	0
13	F	F	F	S	S	50	50	-1,08	-1,01	0	0	-0,29	-0,17
14	F	F	F	S	F	50	50	-1,08	171	0	0	-0,29	0
15	F	F	F	F	S	50	50	13,5	-1,01	0	0	0	-0,17
16	F	F	F	F	F	50	50	13,5	171	0	0	0	0

Tabela III.6 - Valores de G e J para Estados de Sucesso do Sistema

SISTEMA		STATUS do EQUIPAMENTO				$G(e_k)$				$J(e_k)$			
Estado	Status	e_1	e_2	e_3	e_4	e_1	e_2	e_3	e_4	e_1	e_2	e_3	e_4
1	S	S	S	S	S	-1,02	-1,02	-1,08	-1,01	0	0	0	0
2	S	S	S	S	F	-1,02	-1,02	-1,08	171	0	0	0	29,24
3	S	S	S	F	S	-1,02	-1,02	13,5	-1,01	0	0	3,65	0
5	S	S	F	S	S	-1,02	50	-1,08	-1,01	0	25	0	0
6	S	S	F	S	F	-1,02	50	-1,08	171	0	25	0	29,24
7	S	S	F	F	S	-1,02	50	13,5	-1,01	0	25	3,65	0
9	S	F	S	S	S	50	-1,02	-1,08	-1,01	25	0	0	0
10	S	F	S	S	F	50	-1,02	-1,08	171	25	0	0	29,24

Cálculo das sensibilidades da LOLP

A aplicação direta da expressão (III.20) com os valores das probabilidades dos estados obtidos no processo de cálculo dos índices de confiabilidade no Capítulo II, nos dá:

- equipamento e_1 :

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_1} = [(P(4)+P(8)) \times (-1,02)] + [(P(11)+P(12)+P(13)+P(14)+P(15)+P(16)) \times (50)]$$

Substituindo pelos valores das probabilidades dos estados, temos:

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_1} = 0,0922$$

- equipamento e_2 :

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_2} = [(P(4)+P(11)+P(12)) \times (-1,02)] + [(P(8)+P(13)+P(14)+P(15)+P(16)) \times (50)]$$

Substituindo pelos valores das probabilidades dos estados temos:

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_2} = 0,0185$$

- equipamentos e_3 :

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_3} = [(P(13) + P(14)) \times (-1,08)] + [(P(4) + P(8) + P(11) + P(12) + P(15) + P(16)) \times (50)]$$

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_3} = 0,0253$$

- equipamentos e_4 :

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_4} = [(P(11) + P(13) + P(15)) \times (-1,08)] + [(P(4) + P(8) + P(12) + P(14) + P(16)) \times (50)]$$

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_4} = 0,0726$$

Cálculo das sensibilidades da EPNS

Empregando a expressão (III.21) para o cálculo das sensibilidades da EPNS, e usando os valores de corte de carga e probabilidades de estado constantes das Tabelas II.3 e II.4, obtém-se:

- equipamento e_1 :

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_1} = [(P(4) \times LC(4) + P(8) \times LC(8)) \times (-1,02)] + \\ + [(P(11) \times LC(11) + P(12) \times LC(12) + P(13) \times LC(13) + \\ + P(14) \times LC(14) + P(15) \times LC(15) + P(16) \times LC(16)) \times (50)]$$

Substituindo pelos valores das probabilidades e dos cortes de carga dos respectivos estados, temos:

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_1} = 1,1364 \text{ MW}$$

- equipamento e_2 :

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_2} = [(P(4) \times LC(4) + P(11) \times LC(11) + P(12) \times LC(12)) \times (-1,02)] + \\ + [(P(8) \times LC(8) + P(13) \times LC(13) + P(14) \times LC(14) + P(15) \times LC(15) + P(16) \times LC(16)) \times (50)]$$

Substituindo pelos valores das probabilidades dos estados temos:

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_2} = 0,3998 \text{ MW}$$

- equipamento e_3 :

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_3} = [(P(13) \times LC(13) + P(14) \times LC(14)) \times (-1,08)] + \\ + [(P(4) \times LC(4) + P(8) \times LC(8) + P(11) \times LC(11) + \\ + P(12) \times LC(12) + P(15) \times LC(15) + P(16) \times LC(16)) \times (50)]$$

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_3} = 0,2573 \text{ MW}$$

- equipamento e_4 :

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_4} = [(P(11) \times LC(11) + P(13) \times LC(13) + P(15) \times LC(15)) \times (-1,08)] + [(P(4) \times LC(4) + P(8) \times LC(8) + P(12) \times LC(12) + P(14) \times LC(14) + P(16) \times LC(16)) \times (50)]$$

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_4} = 0,7259 \text{ MW}$$

Cálculo das sensibilidades da LOLF

Para o cálculo das sensibilidades da LOLF, como já vimos, temos dois casos a analisar:

caso1 - perturbação nas taxas de falha dos equipamentos:

A análise é feita a partir de estados de falha do sistema, usando a expressão (III.22) e os valores de taxas de transição incremental e probabilidades dos estados da Tabela II.4.

- equipamento e_1 :

Aplicando a expressão (III.22) para cada estado de falha do sistema, temos:

estado 4	$[(-1,02) \times 0,4 + (-0,51)] \times 0,000416 = -0,00382$
estado 8	$[(-1,02) \times 0,9 + (-0,51)] \times 0,00000849 = -0,00001213$
estado 11	$[(50) \times 0,729 + (0)] \times 0,00144 = 0,005196$
estado 12	$[(50) \times 0,9 + (0)] \times 0,00000849 = 0,000382$
estado 13	$[(50) \times 0,959 + (0)] \times 0,000368 = 0,01765$
estado 14	$[(50) \times 1,13 + (0)] \times 0,00000217 = 0,0001226$
estado 15	$[(50) \times 1,229 + (0)] \times 0,00002946 = 0,00181$
estado 16	$[(50) \times 1,4 + (0)] \times 0,00000017 = 0,0000119$

Efetando o somatório sobre os estados de falha:

$$\frac{\partial LOLF_f}{\partial u_1} = 0,07154$$

O detalhamento do cálculo das sensibilidades da LOLF para os demais equipamentos encontra-se no Apêndice B. Os valores correspondentes constam da Tabela III.8.

caso 2 - perturbação nas taxas de reparo dos equipamentos:

A análise é feita a partir de estados de sucesso do sistema, usando a expressão (III.23) , e os valores da taxa de transição incremental e das probabilidades, referentes aos estados de sucesso estão apresentados na Tabela III.7:

Tabela III.7 - Probabilidades e Taxas de Transição Incremental para Estados de Sucesso

ESTADO do SISTEMA	PROBABILIDADE do ESTADO	TAXA de TRANS. INCR.
1	0,88405892	-0,041
2	0,00520034	0,13
3	0,07072471	0,229
5	0,01804202	0,459
6	0,00010613	0,63
7	0,00144336	0,729
9	0,01804202	0,459
10	0,00010613	0,63

- equipamento e_1 :

Aplicando a expressão (III.23) para cada estado de sucesso do sistema, temos:

estado 1	$[(-1,02) \times (0,041) + (0)] \times 0,88406 = -0,0369861$
estado 2	$[(-1,02) \times (-0,13) + (0)] \times 0,0052 = 0,000689841$
estado 3	$[(-1,02) \times (-0,229) + (0)] \times 0,070724 = 0,0165264$
estado 5	$[(-1,02) \times (-0,459) + (0)] \times 0,01804 = 0,0084503$
estado 6	$[(-1,02) \times (-0,63) + (0)] \times 0,0001061 = 0,00006823$
estado 7	$[(-1,02) \times (-0,729) + (0)] \times 0,001443 = 0,00107368$
estado 9	$[(50) \times (-0,459) + (25)] \times 0,018042 = 0,036986$
estado 10	$[(50) \times (-0,63) + (25)] \times 0,0001061 = -0,000689845$

Efetuando o somatório sobre os estados de sucesso:

$$\frac{\partial LOLF_s}{\partial u_1} = 0,026119$$

Para os demais equipamentos, os cálculos encontram-se detalhados no Apêndice B

Os valores das sensibilidades dos índices de confiabilidade para cada equipamento estão apresentados na Tabela III.8:

Tabela III.8 - Sensibilidades dos Índices de Confiabilidade para cada Equipamento

ÍNDICE	e_1	e_2	e_3	e_4
LOLP	0,0922	0,0185	0,0253	0,0726
EPNS	1,1364	0,3998	0,2573	0,7259
LOLF _f	0,0715	0,0178	0,0165	0,0298
LOLF _s	0,0261	0,0085	0,0101	0,0173

A partir da Tabela III.8, observa-se que o gerador de 30 MW da área 1 (e_1) é o equipamento de maior sensibilidade, ou seja, todos os índices de confiabilidade são mais afetados para uma variação na probabilidade de falha deste equipamento, do que para uma mesma variação nos parâmetros de falha dos outros equipamentos. Este fato pode ser explicado pela observação de que a capacidade deste gerador representa 50% da capacidade total de geração do sistema.

Os equipamentos do sistema podem ser classificados segundo os impactos de suas taxas de indisponibilidade forçada sobre os índices de confiabilidade e ordenados conforme a Tabela III.9

Tabela III.9 - Classificação dos Equipamentos Segundo o Impacto sobre os Índices

ÍNDICE	EQUIP. > IMPACTO			EQUIP. < IMPACTO
LOLP	e_1	e_4	e_3	e_2
EPNS	e_1	e_4	e_2	e_3
LOLF _f	e_1	e_4	e_2	e_3
LOLF _s	e_1	e_4	e_3	e_2

Com estes valores de sensibilidades poderemos também calcular novos índices de confiabilidade, caso conheçamos a variação sofrida na taxa de falha ou na taxa de reparo do equipamento e conseqüentemente, a variação na sua probabilidade de falha.

Adicionalmente, valendo-se da linearidade mostrada na seção III.3.1, pode-se fazer uma análise com auxílio de gráficos, dispondo apenas do valor inicial dos índices e das sensibilidades.

Os gráficos mostrados nas Figuras III.1 a III.4 comparam o efeito das perturbações nas probabilidades de falha dos equipamentos, sobre cada um dos índices de confiabilidade calculado.

Nas Figuras III.5 a III.8, é mostrado o impacto da variação de cada indisponibilidade forçada sobre o conjunto dos índices de confiabilidade.

Figura III.1 - Efeito sobre a LOLP

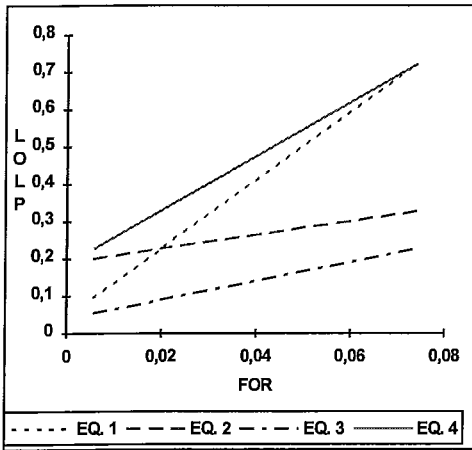


Figura III.2 - Efeito sobre a EPNS

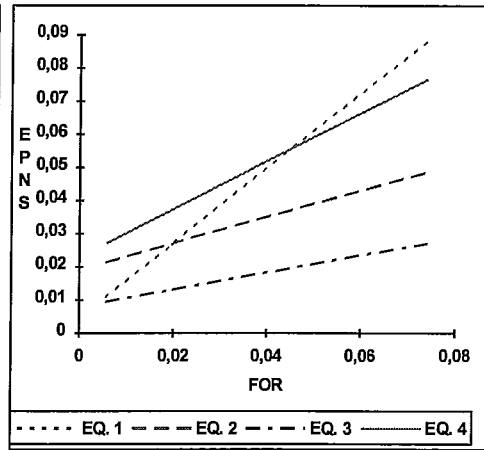


Figura III.3 - Efeito sobre a LOLF_f

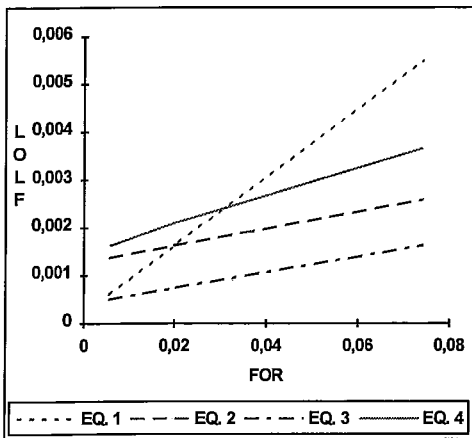


Figura III.4 - Efeito sobre a LOLF_s

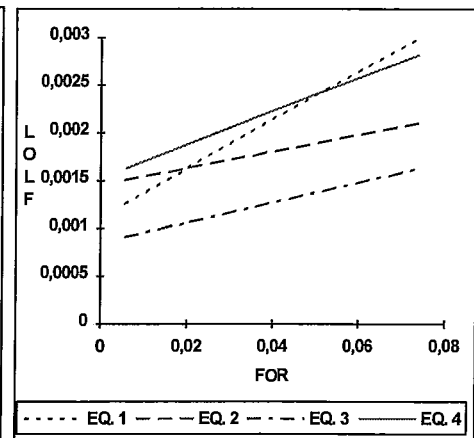


Figura III.5 - Variação em u_1

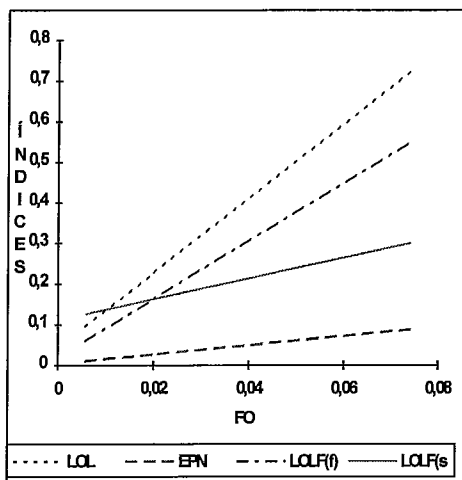


Figura III.6 - Variação em u_2

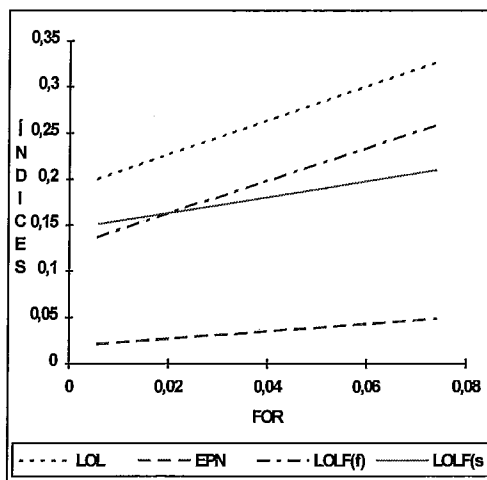


Figura III.7 - Variação em u_3

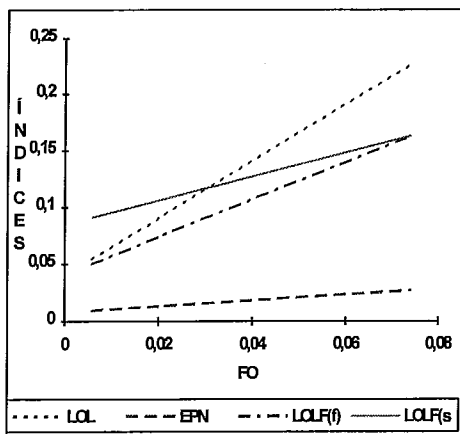
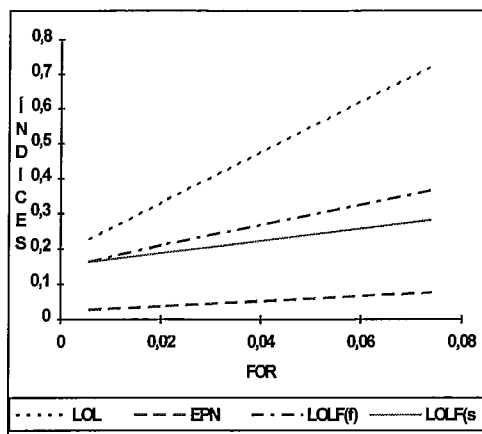


Figura III.8 - Variação em u_4



III.7 RESUMO

Neste capítulo foram desenvolvidas expressões para o cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade em relação às taxas de saída forçada dos equipamentos de um sistema multi-área.

A metodologia desenvolvida neste capítulo é aplicada quando são usados métodos de enumeração. São apresentadas expressões para o cálculo destas sensibilidades, usando simulação Monte Carlo.

Ainda neste capítulo foi mostrado que os índices de confiabilidade têm uma relação linear com as taxas de saída forçada de cada equipamento, um resultado importante, pois permite que se conclua que os valores obtidos para as sensibilidades são exatos. Foram deduzidas também, expressões para a análise das sensibilidades em relação às taxas de saída forçada de um grupo de equipamentos. Para este caso foi mostrado que a relação de linearidade deixa de existir.

A metodologia desenvolvida neste capítulo foi ilustrada com um exemplo simples, que foi desenvolvido usando enumeração exaustiva dos estados.

CAPÍTULO IV

CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES USANDO ALGORITMO DE INTEGRAÇÃO DIRETA

IV.1 CÁLCULO ANALÍTICO DAS SENSIBILIDADES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

A formulação desenvolvida no Capítulo III para o cálculo das sensibilidades, exige a identificação explícita dos estados dos equipamentos no estado do sistema. Uma formulação alternativa pode ser feita identificando apenas os estados dos componentes (arcos). Neste último caso, deve-se construir as COPFT's dos componentes, utilizando-se as expressões para convolução desenvolvidas no Capítulo II, e reproduzidas a seguir:

Para as Probabilidades dos Estados dos Componentes

$$p(x_j) = [p'(x_j) - p'(x_j - c_k)] \times u_k + p'(x_j - c_k) \quad (\text{IV.1})$$

Para as Frequências Incrementais dos Estados dos Componentes

Formulação 1 - para estados de falha

$$f^{in}(x_j) = [p'(x_j) - p'(x_j - c_k)] u_k \times \mu_k + (1 - u_k) \times f^{in'}(x_j - c_k) + u_k \times f^{in'}(x_j) \quad (\text{IV.2})$$

Formulação 2 - para estados de sucesso

$$f^{in}(x_j) = [p'(x_j - c_k) - p'(x_j)] (1 - u_k) \times \lambda_k + (1 - u_k) \times f^{in'}(x_j - c_k) + u_k \times f^{in'}(x_j) \quad (\text{IV.3})$$

IV.1.1. Obtenção de Expressões Para as Sensibilidades

Chama-se a atenção para o fato de que, tanto para as probabilidades como para as taxas de transição incremental, as expressões obtidas até agora, permitem

estabelecer uma relação entre o *estado do sistema*, os *estados dos componentes* e os *estados dos equipamentos* de cada componente.

Para o cálculo das probabilidades, esta relação pode ser visualizada através da expressão (II.39), que fornece a probabilidade de um estado em função da probabilidade dos estados dos componentes, e da expressão (IV.1), que permite calcular a probabilidade associada a um determinado estado do componente em função da probabilidade de falha de qualquer equipamento pertencente a este componente.

As taxas de transição incremental, associadas a um estado do sistema são obtidas através de um somatório efetuado sobre os estados correspondentes dos componentes associados a este estado. Para a obtenção das taxas de transição incremental associadas a cada componente, a partir das taxas de falha e reparo dos equipamentos, pode-se usar (IV.2) ou (IV.3). Assim, analogamente às probabilidades, estabelece-se também uma relação entre o *equipamento*, o *componente* e o *sistema*.

Uma vez estabelecidas relações para $P(x)$ e $F(x)$, os índices de confiabilidade podem ser expressos pelo valor esperado em (II.20). Para a obtenção das sensibilidades destes índices em relação à taxa de indisponibilidade forçada dos equipamentos, calcula-se, a exemplo do que foi visto no capítulo anterior, a derivada da expressão (II.20) em relação a u_k , obtendo-se a expressão (III.6), reproduzida a seguir.

$$\frac{\partial E(F)}{\partial u_k} = \sum_{x \in X} \left[\frac{\partial P(x)}{\partial u_k} \times F(x) + P(x) \times \frac{\partial F(x)}{\partial u_k} \right] \quad (IV.4)$$

Para o desenvolvimento que se segue considera-se o equipamento e_k pertencente ao componente j .

A expressão (IV.4), envolve a necessidade de calcular as derivadas da probabilidade e da função-teste em relação à FOR do equipamento e_k , para compor a derivada dos índices.

Derivada da probabilidade $P(x)$:

Usando a regra da cadeia, temos:

$$\frac{\partial P(x)}{\partial u_k} = \frac{\partial P(x)}{\partial p(x_j)} \times \frac{\partial p(x_j)}{\partial u_k} \quad (IV.5)$$

Suponha que os m equipamentos, e por conseguinte os q componentes (arcos) sejam variáveis aleatórias independentes. Neste caso, a probabilidade do estado é

dada pelo produto da probabilidade da cada componente. Assim, o primeiro termo em (IV.5) é dado por:

$$\frac{\partial P(x)}{\partial p(x_j)} = \frac{P(x)}{p(x_j)} \quad (IV.6)$$

Derivando (IV.1) em relação a u_k , obtem-se a derivada da probabilidade do estado do componente x_j em relação à probabilidade de falha de um equipamento e_k . O segundo termo em (IV.5) é então dado por:

$$\frac{\partial p(x_j)}{\partial u_k} = DP'(e_k) \quad (IV.7)$$

onde:

$$DP'(e_k) = p'(x_j) - p'(x_j - c_k) \quad (IV.8)$$

Substituindo (IV.6) e (IV.7) em (IV.5), podemos escrever:

$$\frac{\partial P(x)}{\partial u_k} = G(e_k) \times P(x) \quad (IV.9)$$

onde,

$$G(e_k) = \frac{p'(x_j) - p'(x_j - c_k)}{p(x_j)} = \frac{DP'(e_k)}{p(x_j)} \quad (IV.10)$$

Observe que (IV.9) não depende do equipamento e_k , mas somente dos demais equipamentos que pertencem ao componente x_j . A equação (IV.9) pode ser obtida, por exemplo, removendo o equipamento e_k da tabela completa da distribuição de probabilidades [8], i. e., "desconvoluindo" o componente que contém o equipamento e_k .

Derivada da função-teste $F(x)$:

Claramente, para a LOLP e EPNS, o segundo termo em (IV.4) é igual a zero. Assim, as sensibilidades para a LOLP e para a EPNS podem ser obtidas substituindo (IV.9) em (IV.4).

Portanto para a expressão (IV.4), a derivada de $F(x)$, somente existirá quando o índice estudado for a LOLF. Neste caso, $F(x) = \lambda^{in}(x)$.

Aplicando para o cálculo da derivada da taxa de transição incremental o mesmo raciocínio usado para obter a derivada das probabilidades, temos, pela regra da cadeia:

$$\frac{\partial F(x)}{\partial u_k} = \frac{\partial \lambda^{in}(x)}{\partial u_k} = \frac{\partial \lambda^{in}(x)}{\partial \lambda^{in}(x_j)} \times \frac{\partial \lambda^{in}(x_j)}{\partial u_k} \quad (IV.11)$$

Como a taxa de transição incremental relativa a um estado x do sistema é o somatório das taxas de transição incremental dos componentes deste estado, temos:

$$\frac{\partial \lambda^{in}(x)}{\partial \lambda^{in}(x_j)} = 1 \quad (IV.12)$$

Assim, a expressão (IV.11) reduz-se a:

$$\frac{\partial \lambda^{in}(x)}{\partial u_k} = \frac{\partial \lambda^{in}(x_j)}{\partial u_k} \quad (IV.13)$$

Para calcular (IV.13) temos duas opções. A primeira é calcular a derivada da taxa de transição incremental, usando a expressão para a convolução das frequências incrementais (IV.2) ou (IV.3) e o fato de que $f^{in}(x_j) = p(x_j) \times \lambda^{in}(x_j)$. Neste caso, deve-se computar a derivada da taxa de transição incremental, dada pela expressão abaixo:

$$\lambda_f^{in}(x_j) = \frac{p'(x_j - c_k)(1 - u_k)[\lambda_k + \lambda_f^{in'}(x_j - c_k)] + p'(x_j)(u_k)[\mu_k + \lambda_f^{in'}(x_j)]}{p'(x_j - c_k)(1 - u_k) + p'(x_j)(u_k)} \quad (IV.14)$$

Outra alternativa é calcular indiretamente a partir da relação entre a frequência incremental e a taxa de transição incremental:

$$f^{in}(x_j) = p(x_j) \times \lambda^{in}(x_j) \quad (IV.15)$$

Derivando (IV.15) em relação a u_k :

$$\frac{\partial f^{in}(x_j)}{\partial u_k} = \frac{\partial \lambda^{in}(x_j)}{\partial u_k} \times p(x_j) + \frac{\partial p(x_j)}{\partial u_k} \times \lambda^{in}(x_j) \quad (IV.16)$$

Explicitando $\frac{\partial \lambda^{in}(x_j)}{\partial u_k}$, temos:

$$\frac{\partial \lambda^{in}(x_j)}{\partial u_k} = \frac{1}{p(x_j)} \times \left[\frac{\partial f^{in}(x_j)}{\partial u_k} - \frac{\partial p(x_j)}{\partial u_k} \times \lambda^{in}(x_j) \right] \quad (IV.18)$$

Para a obtenção de $\frac{\partial f^{in}(x_j)}{\partial u_k}$ derivamos a expressão (IV.2) para o caso de transições a partir de estados de falha ou a expressão (IV.3) para as transições a partir de estados de sucesso. Temos então, para cada caso, as seguintes expressões para a derivada:

Formulação 1 - para estados de falha

$$\frac{\partial f^{in}(x_j)}{\partial u_k} = [p'(x_j) - p'(x_j - c_k)] \times \mu_k + f^{in'}(x_j) - f^{in'}(x_j - c_k) \quad (IV.19)$$

Definindo:

$$DF'(x_j) = f^{in'}(x_j) - f^{in'}(x_j - c_k) \quad (IV.20)$$

Temos:

$$\frac{\partial f^{in}(x_j)}{\partial u_k} = DP'(x_j) \times \mu_k + DF'(x_j) \quad (IV.21)$$

Para derivada da taxa de transição incremental, temos:

$$\frac{\partial \lambda^{in}(x)}{\partial u_k} = \frac{1}{p(x_j)} [DF'(x_j) + (\mu_k - \lambda^{in}(x_j)) \times DP'(x_j)] \quad (IV.22)$$

Formulação 2 - para estados de sucesso

$$\frac{\partial f^{in}(x_j)}{\partial u_k} = [p'(x_j) - p'(x_j - c_k)] \times \lambda_k + f^{in'}(x_j) - f^{in'}(x_j - c_k) \quad (IV.23)$$

Usando a definição (IV.20), temos:

$$\frac{\partial f^{in}(x_j)}{\partial u_k} = DP'(x_j) \times \lambda_k + DF'(x_j) \quad (IV.24)$$

Para a derivada da taxa de transição incremental, temos:

$$\frac{\partial \lambda^{in}(x)}{\partial u_k} = \frac{1}{p(x_j)} [DF'(x_j) + (\lambda_k - \lambda^{in}(x_j)) \times DP'(x_j)] \quad (IV.25)$$

Observe que para o caso de um arco contendo somente um equipamento, (IV.22) e (IV.25), podem também ser calculadas pela derivada das expressões (II.27) e (II.29).

IV.1.2 Expressões Para as Sensibilidades

Para que se obtenha as expressões das sensibilidades dos índices, substituí-se em (IV.4), as expressões encontradas para as derivadas da probabilidade (IV.7) e da função-teste (IV.22) e (IV.25). Assim, temos:

Sensibilidade da LOLP:

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_k} = \sum_{x \in X^f} \left[\frac{DP'(x_j)}{p(x_j)} \right] \times P(x) \quad (IV.26)$$

Sensibilidade da EPNS:

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_k} = \sum_{x \in X^f} \left[\frac{DP'(x_j)}{p(x_j)} \times LC(x) \right] \times P(x) \quad (IV.27)$$

onde $LC(x)$ é o valor do corte da carga associado ao estado de falha x

Sensibilidade da LOLF:

Caso 1 - perturbação na taxa de falha:

$$\frac{\partial LOLF_f}{\partial u_k} = \sum_{x \in X^f} \left[\frac{(\mu_k - \lambda^{in}(x_j) + \lambda^{in}(x)) \times DP'(x_j) + DF'(x_j)}{p(x_j)} \right] \times P(x) \quad (IV.28)$$

Caso 2 - perturbação na taxa de reparo:

$$\frac{\partial LOLF_s}{\partial u_k} = \sum_{x \in X^f} \left[\frac{(\lambda_k - \lambda^{in}(x_j) + \lambda^{in}(x)) \times DP'(x_j) + DF'(x_j)}{p(x_j)} \right] \times P(x) \quad (IV.29)$$

As expressões (IV.26), (IV.27), (IV.28) e (IV.29) podem ser resumidas na forma da derivada do valor esperado da função-teste com formulações para os estados de falha (IV.30) e para os estados de sucesso (IV.31).

$$\frac{\partial E(F)}{\partial u_k} = \sum_{x \in X^f} [F(x)G(x_j) + H(x_j)] \times P(x) \quad (IV.30)$$

$$\frac{\partial E(F)}{\partial u_k} = \sum_{x \in X^s} [F(x)G(x_j) + J(x_j)] \times P(x) \quad (IV.31)$$

onde:

$$G(x_j) = \frac{DP'(x_j)}{p(x_j)} \quad (IV.32)$$

$$H(x_j) = \frac{1}{p(x_j)} [DF'(x_j) + (\mu_k - \lambda^{in}(x_j)) \times DP'(x_j)] \quad (IV.33)$$

$$J(x_j) = \frac{1}{p(x_j)} [DF'(x_j) + (\lambda_k - \lambda^{in}(x_j)) \times DP'(x_j)] \quad (IV.34)$$

Para as sensibilidades da LOLP e da EPNS, emprega-se a expressão (IV.30) fazendo $H(x_j) = 0$

No caso da LOLF, emprega-se (IV.30) quando a variação ocorre na taxa de falha, e (IV.31), quando a variação acontece na taxa de reparo.

IV.1.3. Desconvolução da COPFT

Conforme vimos anteriormente, para o cálculo dos índices de confiabilidade, calculamos por convolução os valores das probabilidades e freqüências incrementais associadas a cada estado dos componentes (arcos) do sistema, ou seja, construímos as tabelas COPFT's para cada área.

Por outro lado, nas expressões de sensibilidade desenvolvidas neste capítulo, constatamos a necessidade de se obter valores de probabilidades e freqüências incrementais dos estados da componente x_j , quando todos os seus equipamentos já foram convoluídos, a exceção do equipamento de interesse, e_k . Assim, uma maneira interessante de se obter estes parâmetros, é retirar o equipamento e_k da tabela COPFT da área correspondente. Este procedimento de remoção pode ser interpretado como uma operação de *desconvolução*, ilustrada a seguir.

Pode-se considerar, sem perda de generalidade, que o equipamento e_k foi o último a ser incluído no cálculo da convolução, resultando na expressão (IV.1). Partindo então desta expressão, e supondo que x_j é um estado da tabela completa, podemos calcular o valor de $p'(x_j)$.

Assim,

$$p'(x_j) = \frac{1}{u_k} \times [p(x_j) - p'(x_j - c_k) \times (1 - u_k)] \quad (IV.35)$$

A expressão (IV.35), é recursiva, e tem para valor inicial (estado de capacidade nula) :

$$p'(0) = \frac{p(0)}{u_k} \quad (IV.36)$$

além disso, para estados de capacidade negativa, temos:

$$x_j - c_k < 0 \Rightarrow p'(x_j - c_k) = 0$$

Dessa maneira podem ser obtidos os valores para as probabilidades supondo a retirada de um único equipamento da configuração.

Analogamente ao que foi feito para as probabilidades, partindo das expressões (IV.2) e (IV.3), podemos encontrar uma expressão para a desconvolução das frequências incrementais:

Formulação 1 - para estados de falha

$$f^{in'}(x_j) = \frac{1}{u_k} \times [f^{in}(x_j) - [p'(x_j) - p'(x_j - c_k)]u_k \times \mu_k - (1 - u_k) \times f^{in'}(x_j - c_k)] \quad (IV.37)$$

onde,

$$f^{in'}(0) = p'(0) \times \lambda^{in'}(0) = \frac{p(0)}{u_k} \times (\lambda^{in}(0) - \mu_k) \quad (IV.38)$$

Formulação 2 - para estados de sucesso

$$f^{in'}(x_j) = \frac{1}{u_k} \times [f^{in}(x_j) - [p'(x_j - c_k) - p'(x_j)](1 - u_k) \times \lambda_k - (1 - u_k) \times f^{in'}(x_j - c_k)] \quad (IV.39)$$

onde,

$$f^{in'}(0) = p'(0) \times \lambda^{in'}(0) = \frac{p(0)}{u_k} \times (\lambda^{in}(0) - \lambda_k) \quad (IV.40)$$

Também temos neste caso, que para estados de capacidade negativa a frequência incremental é definida como zero.

Dessa maneira, usando as expressões (IV.35), (IV.37) e (IV.39) podemos calcular os valores de probabilidade e frequência incremental supondo a exclusão de um determinado equipamento da configuração do sistema.

Repetindo os procedimentos acima, para cada um dos equipamentos, de cada componente, teremos então as tabelas que serão usadas no cálculo das sensibilidades.

Observa-se das expressões (IV.37) e (IV.39), que o cálculo da probabilidade de um determinado estado, deve preceder o cálculo da frequência incremental relativa ao mesmo estado.

IV.2 CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE VIA SIMULAÇÃO MONTE CARLO

Observe que, à semelhança do Capítulo III, as expressões (IV.26) a (IV.29), permitem a estimativa das sensibilidades através do método de simulação Monte Carlo. Entretanto, dada a sua simplicidade, recomenda-se usar a formulação apresentada no Capítulo III, quando se desejar usar simulação Monte Carlo.

IV.3 CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE EMPREGANDO O ALGORITMO DE INTEGRAÇÃO DIRETA

Nesta seção, as expressões desenvolvidas para o cálculo das sensibilidades serão particularizadas para o algoritmo de integração direta.

No Capítulo II vimos que os índices de confiabilidade, usando os conceito do algoritmo de integração direta, podem ser escritos como:

$$LOLP = \sum_{t=1}^{2^N-1} \sum_{x \in X_t} P(x) \quad (IV.41)$$

$$EPNS = \sum_{t=1}^{2^N-1} \sum_{x \in X_t} [D - C_{min}(x)] P(x) \quad (IV.42)$$

$$LOLF = \sum_{t=1}^{2^N-1} \sum_{x \in X_t} P(x) \sum_{j=1}^q \lambda_f^{in}(x_j) \quad (IV.43)$$

O algoritmo de integração direta, agrega os estados que apresentam o mesmo modo de falha, ou seja, o mesmo corte mínimo. Portanto, temos que calcular o valor esperado da função-teste $F(x)$, sobre cada modo de falha X_t que é representado por um poliedro convexo, definido pelas restrições lineares inerentes à rede de fluxos.

O cálculo dos índices de confiabilidade será dado por:

$$E(F(x)) = \sum_{t=1}^{2^N-1} E(F_t) \quad (IV.44)$$

Conforme visto no Capítulo II, este valor esperado pode ser escrito como um somatório múltiplo, sobre as componentes $j = 1, \dots, q$

$$E(F_t) = \sum_{x \in X_t} P(x)F(x) = \sum_{x_1 \in J_1} p_1(x_1) \left(\sum_{x_2 \in J_2} p_2(x_2) \left(\dots \left(\sum_{x_l \in J_l} p_l(x_l) \dots \left(\sum_{x_q \in J_q} p_q(x_q) F(x) \right) \dots \right) \right) \right) \quad (IV.45)$$

onde J_1, \dots, J_q são intervalos cujos limites são funções das componentes anteriores. Estes limites podem ser obtidos recursivamente: O intervalo J_1 é limitado por \underline{x}_1 (inferiormente) e por \overline{x}_1 (superiormente); para um valor $x_1^* \in J_1$, J_2 é limitado por $\underline{x}_2(x_1^*)$ e por $\overline{x}_2(x_1^*)$ que são conhecidos dado x_1^* , e assim por diante. Esses limites inferiores e superiores podem ser facilmente encontrados para cada X_t [4].

Para o cálculo das derivadas, desejamos obter expressões semelhantes às expressões (IV.30) e (IV.31), aplicada a cada modo de falha. Toda a análise feita até então, pode ser estendida ao algoritmo de Integração Direta, para encontrar as sensibilidades dos índices de confiabilidade.

As sensibilidades são obtidas derivando (IV.44) com relação a u_k :

$$\frac{\partial E(F(x))}{\partial u_k} = \sum_{t=1}^{2^N-1} \frac{\partial E(F_t)}{\partial u_k} \quad (IV.46)$$

Para o cálculo de $\frac{\partial E(F_t)}{\partial u_k}$, temos:

$$\frac{\partial E(F_t)}{\partial u_k} = \sum_{x \in X_t} \left[\frac{\partial P(x)}{\partial u_k} F(x) + P(x) \frac{\partial F(x)}{\partial u_k} \right] \quad (IV.47)$$

Observa-se que a diferença entre as formulações em (IV.4) e (IV.47) é justamente o fato dos estados estarem, nesta última, agregados por modo de falha, por este motivo, usaremos a definição em (IV.45) para o valor esperado da função-teste $F(x)$

Vamos então proceder a análise da sensibilidade de cada índice

IV.3.1 Cálculo da Sensibilidade da LOLP

Como a relação entre as probabilidades dos estados das componentes e as probabilidades de falha dos equipamentos não se altera pelo fato de estarmos usando um algoritmo específico, a análise geral para estas derivadas permanece válida.

Temos, em função dos estados pertencentes a um mesmo modo de falha, a seguinte expressão para a LOLP, lembrando que $F(x)$ tem a mesma definição já vista.

$$LOLP = \sum_{t=1}^{2^N-1} P(X_t)$$

assim,

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_k} = \sum_{t=1}^{2^N-1} \frac{\partial P(X_t)}{\partial u_k} \quad (IV.48)$$

sendo:

$$P(X_t) = \sum_{x_1 \in J_1} p_1(x_1) \left(\sum_{x_2 \in J_2} p_2(x_2) \left(\dots \left(\sum_{x_l \in J_l} p_l(x_l) \dots \left(\sum_{x_q \in J_q} p_q(x_q) \right) \dots \right) \right) \right) \quad (IV.49)$$

Assim, como anteriormente, podemos usar a regra da cadeia para relacionar a derivada da probabilidade associada a um dado modo de falha com a derivada das probabilidades de suas componentes em relação à probabilidade de falha dos equipamentos:

$$\frac{\partial P(X_t)}{\partial u_k} = \frac{\partial P(X_t)}{\partial p(x_j)} \frac{\partial p(x_j)}{\partial u_k} \quad (IV.50)$$

Pode ser observado da expressão (IV.49) que $P(X_t)$ é expresso como um produto das probabilidades dos componentes. Assim, o primeiro termo de (IV.50) é dado por:

$$\frac{\partial P(X_t)}{\partial p(x_j)} = \frac{P(X_t)}{p(x_j)} \quad (IV.51)$$

Observe que em (IV.50), a derivada da probabilidade da componente em relação a probabilidade de falha do equipamento já foi calculada quando derivamos a expressão geral para o cálculo das sensibilidades dos índices, e está expressa em (IV.8).

Logo, todas as considerações já feitas para o segundo termo da regra da cadeia $\frac{\partial p_j(x_j)}{\partial u_k}$ podem ser aplicadas quando usamos o algoritmo de integração direta.

Substituindo (IV.7) e (IV.51) em (IV.49), temos:

$$\frac{\partial P(X_t)}{\partial u_k} = \sum_{x_1 \in J_1} p_1(x_1) \left(\sum_{x_2 \in J_2} p_2(x_2) \left(\dots \left(\sum_{x_l \in J_l} \frac{\partial p_j(x_j)}{\partial u_k} \dots \left(\sum_{x_q \in J_q} p_q(x_q) \right) \dots \right) \right) \right) \quad (IV.52)$$

Não há portanto maiores dificuldades para se calcular a sensibilidade da LOLP, desde que tenhamos previamente calculado os valores das derivadas das probabilidades para os diversos estados de capacidade de cada arco em relação à probabilidade de falha de seus equipamentos.

Finalmente,

$$\frac{\partial LOLP}{\partial u_k} = \sum_{t=1}^{2^N-1} \frac{\partial P(X_t)}{\partial u_k} \quad (IV.53)$$

IV.3.2 Cálculo da sensibilidade da EPNS

Temos para a expressão da EPNS em função dos estados pertencentes a um mesmo modo de falha:

$$EPNS = \sum_{t=1}^{2^N-1} EPNS(X_t) \quad (IV.54)$$

onde,

$$EPNS(X_t) = \sum_{x \in X_t} LC(x) P(x) \quad (IV.55)$$

Temos então que:

$$\frac{\partial EPNS}{\partial u_k} = \sum_{t=1}^{2^N-1} \frac{\partial EPNS(X_t)}{\partial u_t} \quad (IV.56)$$

e,

$$\frac{\partial EPNS(X_t)}{\partial u_t} = \sum_{x \in X_t} \frac{\partial P(x)}{\partial u_k} \times LC(x) \quad (IV.57)$$

onde,

$$\frac{\partial EPNS(X_t)}{\partial u_k} = \sum_{x_1 \in J_1} p_1(x_1) \left(\sum_{x_2 \in J_2} p_2(x_2) \left(\dots \left(\sum_{x_l \in J_l} \frac{\partial p_j(x_j)}{\partial u_k} \cdot \left(\sum_{x_q \in J_q} p_q(x_q) \times LC(x) \right) \dots \right) \right) \right) \quad (IV.58)$$

Comparando as expressões (IV.52) e (IV.58) para o cálculo das sensibilidades, com a expressão (IV.45) para o cálculo dos índices, vemos que para o cálculo das sensibilidades da LOLP e EPNS, basta que no processo de integração, o valor da probabilidade da componente, $p(x_j)$, seja substituído pelas suas derivadas em relação a FOR de cada equipamento que pertence a componente j . Este é um fato importante, e evidencia a simplicidade da implementação computacional em programas que usam o algoritmo de integração direta para o cálculo dos índices de confiabilidade.

IV.3.3 Cálculo da sensibilidade da LOLF

Para a expressão da LOLF temos:

$$LOLF = \sum_{t=1}^{2^N-1} LOLF(X_t) \quad (IV.59)$$

onde,

$$LOLF(X_t) = \sum_{x \in X_t} P(x) \times \lambda^{in}(x) \quad (IV.60)$$

Para a sensibilidade da LOLF temos:

$$\frac{\partial LOLF}{\partial u_k} = \sum_{t=1}^{2^N-1} \frac{\partial LOLF(X_t)}{\partial u_k} \quad (IV.61)$$

Como já foi visto, a função-teste para a LOLF, $\lambda^{in}(x)$, admite diferentes formulações para os estados de falha e de sucesso. Assim, para derivarmos (IV.60), usamos a formulação geral em (IV.47), e temos para cada modo de falha:

$$\frac{\partial LOLF(X_t)}{\partial u_k} = \sum_{x \in X_k} P(x) \times \frac{\partial \lambda^{in}(x)}{\partial u_k} + \sum_{x \in X_k} \frac{\partial P(x)}{\partial u_k} \times \lambda^{in}(x) \quad (IV.62)$$

onde a derivada das taxas de transição incremental é dada pela expressão (IV.22) para estados de falha ou pela expressão (IV.25) para estados de sucesso.

Substituindo (IV.49) e (IV.52) em (IV.62), temos :

Para o primeiro somatório:

$$\begin{aligned} \sum_{x \in X_t} P(x) \times \frac{\partial \lambda^n(x)}{\partial u_k} &= \sum_{x \in X_t} P(x) \times H(x_j) = \\ &= \sum_{x_1 \in J_1} p_1(x_1) \left(\sum_{x_2 \in J_2} p_2(x_2) \left(\dots \left(\sum_{x_l \in J_l} p_l(x_l) \times H(x_j) \dots \left(\sum_{x_q \in J_q} p_q(x_q) \right) \dots \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (V.63)$$

Note que, para a formulação a partir de estados de sucesso, $H(x_j)$, deve ser substituído por $J(x_j)$.

Os valores de $H(x_j)$ e $J(x_j)$, correspondem à $H(e_k)$, e $J(e_k)$ para o estado de capacidade x_j .

Para o segundo somatório:

$$\begin{aligned} \sum_{x \in X_t} \frac{\partial P(x)}{\partial u_k} \times \lambda^n(x) &= \\ &= \sum_{x_1 \in J_1} p_1(x_1) \left(\sum_{x_2 \in J_2} p_2(x_2) \left(\dots \left(\sum_{x_l \in J_l} \frac{\partial p_l(x_l)}{\partial u_k} \dots \left(\sum_{x_q \in J_q} p_q(x_q) \times \left(\sum_{j=1}^q \lambda^n(x_j) \right) \right) \dots \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (IV.64)$$

Podemos observar que a obtenção da sensibilidade da LOLF também é simples, em algoritmos que usam o algoritmo de integração direta, pois os somatórios das expressões (IV.63) e (IV.64) têm a mesma estrutura dos somatórios da LOLP e da EPNS.

Observe que o cálculo da sensibilidade da LOLF em relação às taxas de indisponibilidade forçada dos equipamentos, necessariamente inclui duas formulações: para variações nas taxas de falha (a partir de estados de falha) e para variações nas taxas de reparo dos equipamentos (a partir de estados de sucesso). Assim, para a implementação do cálculo das sensibilidades em programas de avaliação de confiabilidade, deve-se estender a análise também para os estados de sucesso. Para o algoritmo de integração direta, isto significa que deverão ser analisados não só os 2^N-1 modos de falha, mas também o modo de sucesso, totalizando 2^N cortes analisados.

O cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade usando o algoritmo de Integração Direta, pode ser incluído em programas que usam este algoritmo para o cálculo dos índices de confiabilidade, seguindo os procedimentos sugeridos abaixo:

- i) Após a construção da COPFT referente a cada arco, construa COPFT's para cada equipamento, retirando, por "desconvolução", um equipamento de cada vez da COPFT completa usando as expressões (IV.35) e (IV.37)
- ii) Calcule os valores de $DP'(x_j)$ e $DF'(x_j)$ usando as expressões (IV.8) e (IV.20), para cada um dos equipamentos. Com os valores de $DF'(x_j)$, calcule $H(x_j)$ e $J(x_j)$, usando as expressões (IV.33) e (IV.34).
- iii) Simultaneamente ao cálculo da LOLP e da EPNS, calcule a suas sensibilidades em relação a cada FOR, substituindo no somatório da expressão (IV.47) o valor de $p(x_j)$, pelo valor de $DP'(x_j)$ para cada equipamento.
- iv) Calcule a sensibilidade da LOLF usando as expressões (IV.63) e (IV.64), juntamente com (IV.33) e (IV.34).

A seguir, usando o mesmo exemplo dos Capítulos II e III, vamos ilustrar o cálculo das sensibilidades dos índices usando o algoritmo de Integração Direta.

IV.4 LINEARIDADE DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE COM u_k

No Capítulo III foi demonstrada a linearidade dos índices de confiabilidade com u_k . Alternativamente, para a formulação apresentada neste capítulo, pode-se mostrar também que os índices de confiabilidade são lineares com a probabilidade de falha dos equipamentos.

Observa-se na expressão (IV.2), que $p(x_j)$ é linear com u_k , e conseqüentemente, $P(x)$ também.

Para as freqüências incrementais, lembra-se que na expressão (IV.2), a taxa de reparo, μ , é suposta constante, e na formulação da expressão (IV.3), a taxa de falha, λ , é considerada constante. Assim, as freqüências incrementais dos componente, e conseqüentemente do sistema, são lineares com u_k .

IV.5 EXEMPLO DE CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES USANDO O ALGORITMO DE INTEGRAÇÃO DIRETA

Para ilustrar a metodologia desenvolvida neste capítulo, será feita uma aplicação simples, a partir do exemplo apresentado no Capítulo II.

Os parâmetros para o sistema apresentado, estão na Tabela IV.1 a seguir.

Tabela IV.1 - Parâmetros do Sistema

EQUIP ^{TO}	ÁREA	CAPACIDADE	TAXA DE FALHA	TAXA DE REPARO
e_1	1	30 MW	0,01	0,49
e_2	1	20 MW	0,01	0,49
e_3	2	10 MW	0,02	0,25
e_4	1-2	20 MW	0,001	0,17

Para este sistema, os índices de confiabilidade encontrados foram:

LOLP= 0,227637%

EPNS= 0,02706 MW

LOLF= 0,00162590 falhas/ano

A seqüência de solução do exemplo vai seguir os passos do algoritmo proposto na seção anterior.

i) Construção das COPFT'S para cada equipamento a partir da desconvolução da COPFT do arco:

O ARCO 1 contém duas unidades geradoras e sua COPFT completa construída no Capítulo 2 é:

Tabela IV.2 - COPFT para o ARCO 1

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.	TAXA TRANS. INCR.
1	50	0,9604	-0,019208	-0,02
2	30	0,0196	0,009408	0,48
3	20	0,0196	0,009408	0,48
4	0	0,0004	0,000392	0,98

Retirando o equipamento e_1 , temos:

para o estado 4:

$$p'(0) = p(0)/p(e_1)$$

$$f_{in}'(0) = p'(0) \times \lambda_{in}'(0)$$

Substituindo os valores, temos: (para os estados de falha)

$$p'(0) = 0,0004/0,02 = 0,02$$

$$f_{in}'(0) = 0,02 \times (0,98 - 0,49)$$

prossequindo na desconvolução, para os outros estados:

para o estado 3:

$$p'(20) = (1/p(e_1)) \times [p(20) - p'(20-30) \times (1-p(e_1))]$$

$$f^{in'}(20) = (1/p(e_1)) \times [f^{in}(20) - p'(20-30) \times (\mu_1 p(e_1)) - (1-p(e_1)) \times f^{in'}(20-30) - p'(20) \times (\mu_1 p(e_1))]$$

Substituindo os valores, temos: (para os estados de falha)

$$p'(20) = 0,98$$

$$f^{in'}(20) = -0,0098$$

para o estado 2:

$$p'(30) = 1/(0,02) [p(30) - p'(30-20)(1-0,02)] = 0$$

$$f^{in'}(30) = \frac{1}{(0,02)} [f^{in}(30) - p'(10) f_1^{in}(20) + (1-0,02) f^{in'}(10) + p'(30) f_1^{in}(0)] = 0$$

para o estado 1

$$p'(50) = 1/(0,02) [p(50) - p'(50-20)(1-0,02)] = 0$$

$$f^{in'}(30) = \frac{1}{(0,02)} [f^{in}(50) - p'(20) f_1^{in}(30) + (1-0,02) f^{in'}(20) + p'(50) f_1^{in}(0)] = 0$$

Em seguida, a partir da Tabela IV.2, retiramos o equipamento e_2 . O procedimento para a desconvolução deste equipamento é rigorosamente o mesmo, tornando desnecessário sua apresentação aqui.

A partir dos resultados obtidos, podemos construir as tabelas para os equipamentos do arco 1.

Tabela IV.3 - COPFT para o ARCO 1 considerando retirada do equipamento e_1

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.
1	50	0	0
2	30	0	0
3	20	0,98	-0,0098
4	0	0,02	0,0098

Tabela IV.4 - COPFT para o ARCO 1 considerando retirada do equipamento e_2

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.
1	50	0	0
2	30	0,98	-0,0098
3	20	0	0
4	0	0,2	0,0098

O ARCO 2 contém uma unidade geradora e sua COPFT completa construída no Capítulo II é:

Tabela IV.5 - COPFT para o ARCO 2

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.	TAXA TRANS. INCR.
1	10	0,926	-0,0185	-0,001
2	0	0,074	0,0185	0,17

A desconvolução para este arco, representa deixá-lo sem equipamentos, o que significa que o único estado de capacidade possível é zero.

Sendo assim a obtenção da tabela do arco 2, considerando a retirada do equipamento, é imediata:

Tabela IV.6 - COPFT para o ARCO 2 considerando retirada do equipamento e_3

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.
1	10	0	0
2	0	1	0

Finalmente, para o arco 3, cujo equipamento representa a interligação entre as áreas, temos:

Tabela IV.7 - COPFT para o ARCO 3

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.	TAXA TRANS. INCR.
1	20	0,9942	-0,0009942	-0,001
2	0	0,0058	0,0009942	0,17

cuja desconvolução, é idêntica à do arco 1, por conter também só um equipamento.

Tabela IV.8 - COPFT para o ARCO 3 considerando retirada do equipamento e_4

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABIL.	FREQ. INCR.
1	10	0	0
2	0	1	0

ii) Cálculo de $DP'(x_j)$, $DF'(x_j)$, $H(x_j)$ e $J(x_j)$ para cada equipamento:

Para simplificação do cálculo de $J(x_j)$ usamos o fato do sistema ser balanceado em frequência, sendo assim, os valores que envolvem frequência incremental e taxa de transição incremental para os estados de sucesso, são simétricos dos valores calculados para estados de falha.

Para este cálculo, serão usadas as Tabelas IV.3, IV.4, IV.6 e IV.8 que contém a desconvolução para os equipamentos e_1 , e_2 , e_3 , e e_4 , respectivamente.

para o equipamento e_1 : (capacidade = 30MW)

Da Tabela IV.3, usando as expressões (IV.8) e (IV.20), temos:

$$\begin{aligned} DP'(0) &= p'(0) - p'(0-30) = 0,02 \\ DP'(20) &= p'(20) - p'(20-30) = 0,98 \\ DP'(30) &= p'(30) - p'(30-30) = -0,02 \\ DP'(50) &= p'(50) - p'(50-30) = -0,98 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DF'(0) &= \hat{f}^{in}(0) - \hat{f}^{in}(0-30) = 0,0098 \\ DF'(20) &= \hat{f}^{in}(20) - \hat{f}^{in}(20-30) = -0,0098 \\ DF'(30) &= \hat{f}^{in}(30) - \hat{f}^{in}(30-30) = -0,0098 \\ DF'(50) &= \hat{f}^{in}(50) - \hat{f}^{in}(50-30) = 0,0098 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H(0) &= (1/p(0)) [DF'(0) + (\mu_1 - \lambda^{in}(0)) \times DP'(0)] = 0 \\ J(0) &= (1/p(0)) [-DF'(0) + (\lambda_1 + \lambda^{in}(0)) \times DP'(0)] = 25 \\ H(20) &= (1/p(20)) [DF'(20) + (\mu_1 - \lambda^{in}(20)) \times DP'(20)] = 0 \\ J(20) &= (1/p(20)) [-DF'(20) + (\lambda_1 + \lambda^{in}(20)) \times DP'(20)] = 25 \\ H(30) &= (1/p(30)) [DF'(30) + (\mu_1 - \lambda^{in}(30)) \times DP'(30)] = -0,51020408 \\ J(30) &= (1/p(30)) [-DF'(30) + (\lambda_1 + \lambda^{in}(30)) \times DP'(30)] = 0 \\ H(50) &= (1/p(50)) [DF'(50) + (\mu_1 - \lambda^{in}(50)) \times DP'(50)] = -0,51020408 \\ J(50) &= (1/p(50)) [-DF'(50) + (\lambda_1 + \lambda^{in}(50)) \times DP'(50)] = 0 \end{aligned}$$

Para os demais equipamentos, os cálculos encontram-se detalhados no Apêndice B.

iii) Cálculo das sensibilidades da LOLP e da EPNS:

Sensibilidade da LOLP:

1) Integrando o Modo de Falha X_1 :

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_1} = \frac{\partial p_1(0)}{\partial u_1} p_2(0)(p_3(0)+p_3(20)) + \frac{\partial p_1(0)}{\partial u_1} p_2(10)p_3(20) + \frac{\partial p_1(20)}{\partial u_1} p_2(0)p_3(20)$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_1} = 0,02 \times 0,074(0,0058+0,9942) + 0,02 \times 0,926 \times 0,9942 + 0,98 \times 0,074 \times 0,9942$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_1} = 0,0919918$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_2} = \frac{\partial p_1(0)}{\partial u_2} p_2(0)(p_3(0)+p_3(20)) + \frac{\partial p_1(0)}{\partial u_2} p_2(10)p_3(20) + \frac{\partial p_1(20)}{\partial u_2} p_2(0)p_3(20)$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_2} = 0,02 \times 0,074(0,0058+0,9942) + 0,02 \times 0,926 \times 0,9942 - 0,02 \times 0,074 \times 0,9942$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_2} = 0,0184211$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_3} = p_1(0) \frac{\partial p_2(0)}{\partial u_3} (p_3(0)+p_3(20)) + p_1(0) \frac{\partial p_2(10)}{\partial u_3} p_3(20) + p_1(20) \frac{\partial p_2(0)}{\partial u_3} p_3(20)$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_3} = 0,0004 \times 1(0,0058+0,9942) + 0,0004 \times (-1) \times 0,9942 + 0,0196 \times 1 \times 0,9942$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_3} = 0,194887$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_4} = p_1(0)p_2(0) \left(\frac{\partial p_3(0)}{\partial u_4} + \frac{\partial p_3(20)}{\partial u_4} \right) + p_1(0)p_2(10) \frac{\partial p_3(20)}{\partial u_4} +$$

$$+ p_1(20)p_2(0) \frac{\partial p_3(20)}{\partial u_4}$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_4} = 0,0004 \times 0,074(1 - 1) + 0,0004 \times 0,926 \times (-1) + 0,0196 \times 0,074 \times (-1)$$

$$\frac{\partial LOLP(X_1)}{\partial u_4} = -0,0018208$$

Para os demais modos de falha, os cálculos estão detalhados no Apêndice B.

Nos desenvolvimentos a seguir, os cálculos serão mostrados resumidamente e os resultados das sensibilidades de cada índice, por modo de falha são apresentados nas Tabelas IV.10 a IV.13

Sensibilidade da EPNS:

$$\frac{\partial EPNS(X_1)}{\partial u_1} = \frac{\partial p_1(0)}{\partial u_1} p_2(0)[p_3(0)+p_3(20)][30-0] + \\ + \frac{\partial p_1(0)}{\partial u_1} p_2(10)p_3(20)[30-10] + \frac{\partial p_1(20)}{\partial u_1} p_2(0)p_3(20)[30-20] = 1,134325$$

$$\frac{\partial EPNS(X_2)}{\partial u_2} = \frac{\partial p_1(0)}{\partial u_2} p_2(10)p_3(0)[30-10] = 0,00217$$

$$\frac{\partial EPNS(X_3)}{\partial u_4} = p_1(50)p_2(0) \frac{\partial p_3(0)}{\partial u_4} [30-10] + p_1(30)p_2(0) \frac{\partial p_3(0)}{\partial u_4} [30-10] + \\ + p_1(20)p_2(0) \frac{\partial p_3(0)}{\partial u_4} [30-10] = 0,740477$$

Sensibilidade da LOLF (para variações na taxa de reparo - a partir de estados de falha)

A expressão para a LOLF pode ser dividida em dois somatórios representados pelas expressões (IV.63) e (IV.64).

Para o corte X_1 , em relação a u_1 , temos:

Para o primeiro somatório:

$$\frac{\partial LOLF_f(X_1)}{\partial u_1} = p_1(0) \times H_1(0) p_2(0)[p_3(0)+p_3(20)] + p_1(0) \times H_1(0) p_2(10) p_3(20) + \\ + p_1(20) \times H_1(20) p_2(0) p_3(20) +$$

Para o segundo somatório:

$$\frac{\partial p_1(0)}{\partial u_1} p_2(0)(p_3(0)[\lambda_1^{in}(0) + \lambda_2^{in}(0) + \lambda_3^{in}(0)] + p_3(20)[\lambda_1^{in}(0) + \lambda_2^{in}(0) + \lambda_3^{in}(20)]) \\ + \frac{\partial p_1(0)}{\partial u_1} p_2(10) p_3(20)[\lambda_1^{in}(0) + \lambda_2^{in}(10) + \lambda_3^{in}(20)] + \\ + \frac{\partial p_1(20)}{\partial u_1} p_2(0) p_3(20)[\lambda_1^{in}(20) + \lambda_2^{in}(0) + \lambda_3^{in}(20)]$$

$$\frac{\partial LOLF_f(X_1)}{\partial u_1} = 0,0720878$$

Para a sensibilidade da LOLF a partir de estados de sucesso, a integração é feita somente para o modo de falha X_4 , que é o modo de falha que contém os estados de sucesso do sistema.

Para a obtenção das sensibilidades de cada índice, devemos somar os valores encontrados em cada modo de falha, como mostrado nas Tabelas IV.9 a IV.12:

Tabela IV.9 - Sensibilidades da LOLP (p.u)

	X1	X2	X3	TOTAL
$\partial \text{LOLP} / \partial u_1$	0,092060	0,000109	$-8,6835 \times 10^{-6}$	0,092160
$\partial \text{LOLP} / \partial u_2$	0,018487	0,000109	$-8,6835 \times 10^{-6}$	0,018519
$\partial \text{LOLP} / \partial u_3$	0,019488	$-2,34 \times 10^{-6}$	0,005846	0,025331
$\partial \text{LOLP} / \partial u_4$	-0,001823	0,000371	0,074045	0,072593

Tabela IV.10 - Sensibilidades da EPNS (MW)

	X1	X2	X3	TOTAL
$\partial \text{EPNS} / \partial u_1$	1,134325	0,002170	$-8,6835 \times 10^{-5}$	1,136408
$\partial \text{EPNS} / \partial u_2$	0,397917	0,002170	$-8,6835 \times 10^{-5}$	0,400000
$\partial \text{EPNS} / \partial u_3$	0,198801	$-4,6872 \times 10^{-5}$	0,058456	0,257210
$\partial \text{EPNS} / \partial u_4$	-0,021943	0,007421	0,740478	0,725956

Tabela IV.11 - Sensibilidades da LOLF_f (falhas/ano)

	X1	X2	X3	TOTAL
$\partial \text{LOLF} / \partial u_1$	0,072088	0,000123	$-1,215 \times 10^{-5}$	0,072198
$\partial \text{LOLF} / \partial u_2$	0,017667	0,00123	$-1,215 \times 10^{-5}$	0,017778
$\partial \text{LOLF} / \partial u_3$	0,014208	$-3,28 \times 10^{-6}$	0,002453	0,016658
$\partial \text{LOLF} / \partial u_4$	-0,001726	0,0004193	0,031070	0,029763

Tabela IV.12 - Sensibilidades da LOLF_s (falhas/ano)

	X4	TOTAL
$\partial \text{LOLF} / \partial u_1$	0,026122	0,026122
$\partial \text{LOLF} / \partial u_2$	0,008536	0,008536
$\partial \text{LOLF} / \partial u_3$	0,010186	0,010186
$\partial \text{LOLF} / \partial u_4$	0,017333	0,017333

Embora possam parecer estranhos os resultados negativos para as sensibilidades nas Tabelas IV.9 a IV.11, sua explicação é simples.

Particularmente, para o sistema apresentado neste exemplo, temos: para o corte I, as áreas 1 e 2 estão inseguras; para o corte II a área 1 está insegura e a área 2 está atendida; para o corte III a área 1 está atendida e a área 2 está insegura, e para o corte IV, ambas as áreas estão atendidas. O modo de falha X_2 , pode então ser definido como o conjunto de estados para os quais a *área 1 não está sendo suprida e a área 2 está sendo suprida*. Assim, a probabilidade associada a este modo de falha, aumenta com a capacidade de suprimento à área 2, ou com a probabilidade de não suprimento à área 1. Aumentar a capacidade de suprimento à área 2, significa *redução* na FOR da sua unidade geradora, u_3 . Diminuir a probabilidade de suprimento à área 1, significa aumento na FOR das unidades geradoras u_1 e u_2 . Análise semelhante, pode ser feita para o modo de falha X_3 , em relação às FOR's das unidades da área 1.

No Capítulo V será apresentado o estudo de um caso, considerando o Sistema Brasileiro, e serão comparados os resultados obtidos usando simulação de Monte Carlo e o algoritmo de Integração Direta.

IV.6 - RESUMO

Neste capítulo foi desenvolvida uma metodologia para o cálculo analítico das sensibilidades dos índices de confiabilidade. A diferença entre as metodologias apresentadas neste capítulo e no anterior, é a exigência da identificação explícita dos estados dos equipamentos.

A formulação desenvolvida neste capítulo, é feita identificando-se apenas os estados dos componentes (arcos). Neste caso, necessitou-se construir as COPFT's dos componentes, utilizando-se as expressões desenvolvidas no Capítulo II.

A metodologia é aplicada para o desenvolvimento de expressões para o cálculo das sensibilidades, usando o algoritmo de integração direta. Um exemplo simples ilustra a aplicação da metodologia desenvolvida para o algoritmo de integração direta.

CAPÍTULO V

APLICAÇÕES DA METODOLOGIA PROPOSTA

V.1 DEFINIÇÃO DO CASO - ESTUDO

A metodologia desenvolvida para o cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade em relação às taxas de falha e reparo dos equipamentos, para um sistema multi-área, foram implementadas no programa CONFINT [20].

A implementação destas metodologias foi feita a partir dos algoritmos apresentados no Capítulo III, para a simulação Monte Carlo, e no Capítulo IV, para a integração direta.

A seguir ilustraremos uma aplicação dessas metodologias, para um sistema composto por 5 áreas, derivado do sistema interligado Sul/Sudeste Brasileiro e representado na Figura V.1. As características principais deste sistema estão apresentadas nas Tabelas V.1 e V.2

Para ilustrar a precisão da metodologia, serão calculados novos índices de confiabilidade a partir de variação nas taxas de falha e reparo dos equipamentos. Os novos índices serão computados de duas maneiras: usando as sensibilidades e reprocessando o programa com os novos parâmetros de falha.

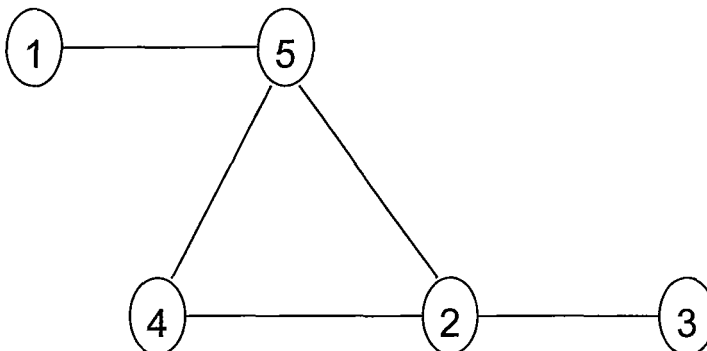


Figura V.1 - Sistema de 5-Áreas Derivado do Sistema Brasileiro

Tabela V.1 - Dados de Geração e Carga

NÚMERO DA ÁREA	NOME DA ÁREA	POTÊNCIA INSTALADA (MW)	CARGA DA ÁREA (MW)	NÚMERO DE USINAS	NÚMERO DE UNIDADES
1	ITAIPU	2531	0	1	4
2	SUL	4711	3235	10	30
3	CEEE	888	2188	4	14
4	SUDESTE1	9143	12746	19	97
5	SUDESTE2	12993	10988	27	110
total		30266	29157	61	255

Tabela V.2 - Dados das Interligações

NÚMERO DA INTERLIG.	DA ÁREA	PARA ÁREA	CAPACIDADE MÁXIMA DA INTERLIG. (MW)	TAXA DE FALHA (occ./hora)	TAXA DE REPARO (occ./hora)	PROB. DE FALHA
1	2	3	1400	$0,5 \times 10^{-5}$	0,05	0.0001
2	2	4	500	$0,5 \times 10^{-5}$	0,05	0.0001
3	2	5	1350	$0,5 \times 10^{-5}$	0,05	0.0001
4	4	5	5000	$0,5 \times 10^{-5}$	0,05	0.0001
5	5	1	2800	$0,5 \times 10^{-5}$	0,05	0.0001

As 255 unidades geradoras foram agrupadas em 12 classes de falha, segundo suas potências e combustível. Os dados estão apresentados na Tabela V.3

Tabela V.3 - Taxas de Falha e Reparo das Unidades Geradoras [27]

CLASSE	TAXA DE FALHA (occ./hora)	TAXA DE REPARO (occ./hora)	PROBABIL. DE FALHA
1	0,00111	0,05219	0,02082
2	0,00069	0,07884	0,00868
3	0,00087	0,04100	0,02078
4	0,00150	0,02857	0,04988
5	0,00085	0,01332	0,05999
6	0,00574	0,01922	0,22997
7	0,00120	0,02131	0,05331
8	0,00389	0,02405	0,13923
9	0,00188	0,02681	0,06553
10	0,00243	0,02917	0,07690
11	0,00564	0,02764	0,16947
12	0,00149	0,02131	0,06535

Para cada área, o número de unidades pertencentes a cada uma das classes, é dado na Tabela V.4

Tabela V.4 - Número de Unidades por Área Pertencentes a Cada Classe de Falha

CLASSE	ÁREA 1	ÁREA 2	ÁREA 3	ÁREA 4	ÁREA 5	TOTAL
1				10	10	20
2			6	18	25	49
3		12	6	62	55	135
4		8		6	16	30
5	4					4
6					1	1
7		3				3
8		1	2			3
9		2			1	3
10					1	1
11				1	1	2
12		4				4

V.2 CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE VIA SIMULAÇÃO MONTE CARLO

Este sistema possui 260 equipamentos, cada um representado a dois estados (indisponível ou disponível). O número total de estados é de 2^{260} , impossibilitando a análise exaustiva destes estados.

Para este exemplo, foram amostrados 300.000 estados, ($NE=300.000$) a partir das funções de distribuição de probabilidades dos equipamentos. Para garantirmos a exatidão das derivadas usadas para o cálculo das sensibilidades, todos os equipamentos foram considerados individualmente. Estamos então calculando as sensibilidades dos índices em relação às indisponibilidades de cada um dos equipamentos, não importando quantos equipamentos com as mesmas características existem no sistema.

A Tabela V.5 apresenta as estimativas dos índices de confiabilidade para este sistema, calculadas através da expressão (II.33), cuja incerteza associada, β , é dada por (II.37). Complementando a Tabela V.5, são apresentados também os limites superior e inferior de variação desses índices, para um intervalo de confiança de 99%, segundo (II.36).

Tabela V.5 - Índices de Confiabilidade Usando Simulação Monte Carlo

ÍNDICE	ESTIMATIVA	β (%)	L_{INF}	L_{SUP}
LOLP (%)	6,5677	0,68862	6,4320	6,7034
EPNS (MW)	23,036	0,98184	22,357	23,715
$LOLF_f$ (10^{-2} oc./horas)	0,7707	0,92239	0,7494	0,7920
$LOLF_s$ (10^{-2} oc./horas)	0,7564	2,33370	0,7034	0,8093
LOLD (horas)	8,5217	-	8,5217	8,5217

O coeficiente de variação para a LOLD foi calculado segundo a referência [25], a partir das estimativas e coeficientes de variação da LOLP e da LOLF. O valor obtido foi desprezível (10^{-8}).

As Tabelas V.6 a V.10 apresentam os resultados obtidos para o cálculo das sensibilidades dos índices LOLP, EPNS, LOLF e LOLD, respectivamente, em relação a variações nas taxas de falha e reparo das *interligações* entre as áreas. O estimador usado para o cálculo das sensibilidades é dado por (III.36), e as incertezas para cada equipamento, β_k , são dadas por (III.37). Também nas Tabela V.6 a V.9, estão as variações admitidas para as sensibilidades, em função da incerteza da estimativa, para um intervalo de confiança de 99%.

Tabela V.6 - Sensibilidade da LOLP

INTERLIGAÇÃO	SENSIBILIDADE (%)	β_k (%)	L_{INF}	L_{SUP}
Áreas 2-3	93,452	19,538	38,676	148,228
Áreas 2-4	0,100	4707,700	-	-
Áreas 2-5	0,100	4708,900	-	-
Áreas 4-5	123,460	16,862	61,006	185,913
Áreas 1-5	106,790	18,202	48,476	165,104

Tabela V.7 - Sensibilidade da EPNS

INTERLIGAÇÃO	SENSIBILIDADE (MW)	β_k (%)	L_{INF}	L_{SUP}
Áreas 2-3	1126,6	18,653	496,166	1735,030
Áreas 2-4	13,303	195,730	-64,811	91,417
Áreas 2-5	7,4615	373,170	-	-
Áreas 4-5	3469,6	16,159	1787,640	5151,560
Áreas 1-5	1438,9	18,972	619,940	2257,860

Tabela V.8 - Sensibilidade da $LOLF_f$ para Perturbações nas Taxas de Falha das Interligações

INTERLIGAÇÃO	SENSIBILIDADE (10^{-2} oc/hora)	β_K (%)	L_{INF}	L_{SUP}
Áreas 2-3	2,1717	75,60	-2,7537	7,0971
Áreas 2-4	-0,0009	862,5	-	-
Áreas 2-5	0,8467	167,07	-3,3971	5,0904
Áreas 4-5	3,1511	67,71	-3,2497	9,5519
Áreas 1-5	1,4106	138,67	-4,4576	7,2788

Tabela V.9 - Sensibilidade da $LOLF_s$ para Perturbações nas Taxas de Reparo das Interligações

INTERLIGAÇÃO	SENSIBILIDADE (10^{-2} oc/hora)	β_K (%)	L_{INF}	L_{SUP}
Áreas 2-3	-0,7564	23,33	-1,2859	-0,2270
Áreas 2-4	2,0264	89,83	-3,4346	7,4873
Áreas 2-5	0,4164	403,86	-4,6291	5,4619
Áreas 4-5	-0,7564	23,33	-1,2859	-0,2270
Áreas 1-5	-0,7564	23,33	-1,2859	-0,2270

Tabela V.10 - Sensibilidade da $LOLD$ para Variação nas Taxas de Reparo das Interligações

INTERLIGAÇÃO	SENSIBILIDADE (horas)
Áreas 2-3	128,82
Áreas 2-4	-2,0825
Áreas 2-5	-4,4169
Áreas 4-5	167,53
Áreas 1-5	146,06

Devido aos elevados coeficientes de variação, nas Tabelas V.6 a V.8, não constam alguns dos valores dos limites do intervalo de confiança, para as sensibilidades das interligações 2-4 e 2-5. A partir da Tabela V.2, observa-se que a falha das interligações tem valores de probabilidade de ocorrência muito pequenos, da ordem de 10^{-4} , o que contribui para que os coeficientes de variação das sensibilidades das interligações seja bastante elevado. Além disso, das características do sistema, observa-se que as interligações da área 2 com as áreas 4 e 5, não são relevantes para determinação de estados de falha desse sistema, já que a área 2 é capaz de suprir as necessidades da área 3. Desses fatos pode-se concluir, que mesmo em estados de falha, os eventos *falha da interligação 2-4* ou *falha da interligação 2-5*,

têm um número de ocorrências muito pequeno, o que explica o alto valor do coeficiente de variação para estas sensibilidades. Ressalta-se que, apesar da falta de precisão da estimativa, os resultados não são comprometidos, face a irrelevância destas interligações na definição de estados de falha do sistema.

É interessante notar na Tabela V.9, os sinais negativos para as estimativas das sensibilidades da LOLF, nas interligações entre as áreas 2-3, 4-5, e 5-1. Este sinal indica que, neste caso, quando o aumento na indisponibilidade destas interligações provém da redução da taxa de reparo (i. e. aumento no tempo médio de reparo), há uma diminuição da LOLF do sistema. Por outro lado, observa-se da Tabela V.6, que o sinal da sensibilidade da LOLP é sempre positivo. Como $LOLP = LOLF \times LODD$, conclui-se que há aumento da LODD, ou seja, da duração média das falhas do sistema. Isto pode ser verificado tanto pelo cálculo da sensibilidade da LODD quanto pela observação da importância destas interligações para o sistema.

A importância das interligações entre as áreas 2-3, 4-5 e 1-5, pode ser constatada considerando que:

- i) A área 3 é radial e está conectada ao sistema através da interligação 2-3, o que a torna dependente desta interligação, já que sua carga é maior que sua geração.
- ii) A área 5 está ligada ao sistema pelas interligações 2-5, 4-5 e 1-5, e é através delas que a área 1 escoia sua geração. Assim a interligação 5, entre as áreas 5 e 1 também é de grande importância para o sistema, pois este depende da geração da área 1 para não ter déficits. A interligação 2-5 tem menos importância para o sistema, já que a área 2 é capaz de suprir sua própria carga, além de poder auxiliar a área 3. A interligação 4, entre as áreas 4 e 5, entretanto é vital para o sistema, já que sem ela não é possível atender a demanda da área 4.

Na Tabela V.11, podemos então classificar as interligações segundo seus impactos sobre os índices de confiabilidade.

Tabela V.11 - Classificação das Interligações Segundo o Impacto sobre os Índices

ÍNDICE	INTERLIG. > IMPACTO				INTERLIG. < IMPACTO
LOLP	4	5	1		2,3
EPNS	4	5	1		2,3
$LOLF_f$	4	1	5		2,3
$LOLF_s$	2	1,4,5			3

Podemos concluir, que mesmo com coeficientes de variação bem maiores do que aqueles encontrados no cálculo das estimativas dos índices, as interligações 1, entre as áreas 2 e 3, 4, entre as áreas 5-4, e 5, entre as áreas 1-5, são aquelas que maior benefício trariam à confiabilidade do sistema, caso tivessem sua própria

confiabilidade aumentada. Por outro lado, variações nas indisponibilidades das interligações 2 e 3, têm pouca relevância para a confiabilidade do sistema.

Para verificar os resultados apresentados, serão estimados novos índices de confiabilidade, supondo variações na taxa de falha da interligação 5. Os novos índices serão estimados tanto reprocessando o programa, quanto usando os valores de sensibilidade apresentados.

Para termos uma variação significativa nos índices, vamos supor que para a interligação 5, a alteração no tempo médio para falhas, resulte num aumento da taxa de falha para $0,5 \times 10^{-4}$ oc./hora.

A alteração na FOR da interligação está resumida na Tabela V.12

Tabela V.12 - Alteração na Indisponibilidade da Interligação Entre as Áreas 1-5

	$\Delta\lambda$	$\Delta\mu$	Δu
Variação Absoluta	$0,45 \times 10^{-4}$	-	0,0009
Variação Percentual	900%	-	900%

Para o cálculo dos novos índices usando os valores de sensibilidade, temos:

$$E(F)^* = E(F) + \frac{\partial E(F)}{\partial u} \times \Delta u \quad (V.1)$$

onde $E(F)$ representa o índice estimado com os parâmetros originais, e $E(F)^*$ a nova estimativa do índice.

Para a interligação 5, temos:

$$LOLP^* = 0,065677 + 1,0679 \times (0,0009) = 0,0666311$$

$$EPNS^* = 23,036 + 1438,9 \times (0,0009) = 24,331$$

$$LOLF^* = 0,0077074 + 0,014106 \times (0,0009) = 0,0077166$$

A Tabela V.13 compara os valores dos novos índices obtidos usando as sensibilidades para variações na FOR da interligação 5 (Valor Estimado) com os valores recalculados através do reprocessamento do programa (Valor Real).

Tabela V.13 - Novos Valores dos Índices para Variações na FOR da Interligação 5

ÍNDICES	VALOR REAL	L_{inf}	L_{sup}	VALOR ESTIMADO
LOLP (%)	6,6510	6,5145	6,7875	6,6631
EPNS (MW)	24,315	24,039	24,592	24,331
LOLF (10^{-2} oc./horas)	0,7745	0,7531	0,7959	0,7717

Da Tabela V.13 verifica-se que todos os índices recalculados pelas sensibilidades estimadas, encontram-se dentro do intervalo de confiança de 99% construído a partir das novas estimativas dos índices, obtidas pelo reprocessamento do programa. Este fato era esperado, visto que as sensibilidades calculadas são valores exatos, como demonstrado nos Capítulos III e IV

Podemos observar que uma variação na indisponibilidade da interligação 5, de 900%, correspondeu em uma variação de cerca de 1,46% na LOLP e de 5,62% na EPNS.

Para as unidades geradoras, podemos fazer uma análise semelhante a que fizemos para as interligações. Para tanto, selecionamos 5 unidades geradoras (1 de cada área), cujas características são apresentadas a seguir.

Tabela V.14 - Características da Unidades Geradoras

UNIDADE	ÁREA	POTÊNCIA	FOR
Itaipu	1	659 MW	0,06000
Charqueadas	2	60 MW	0,13923
Itaúba	3	121 MW	0,02078
Furnas	4	155,8 MW	0,02078
Angra	5	626 MW	0,22970

As Tabelas V.15 a V.18 apresentam os resultados obtidos para o cálculo das sensibilidades dos índices LOLP, EPNS e LOLF, respectivamente, em relação a variações nas taxas de falha e reparo dessas unidades geradoras. Também nas Tabelas V.15 a V.18, estão as variações admitidas para as sensibilidades, em função da incerteza da estimativa, para um intervalo de confiança de 99%.

Tabela V.15 - Sensibilidade da LOLP dos Geradores

GERADORES	SENSIBILIDADE (%)	β_K (%)	L_{INF}	L_{SUP}
Itaipu	17,9660	2,016	16,8795	19,0525
Charqueadas	1,0062	14,154	0,5789	1,4335
Itaúba	6,0378	7,448	4,6689	7,3869
Furnas	2,6973	14,354	1,5358	3,8588
Angra	12,893	12,242	8,1579	17,6281

Tabela V.16 - Sensibilidade da EPNS dos Geradores

GERADORES	SENSIBILIDADE (MW)	β_K (%)	L_{INF}	L_{SUP}
Itaipu	82,609	2,5013	76,4101	88,8079
Charqueadas	4,7061	15,507	2,5168	6,8954
Itaúba	10,101	18,857	4,3868	15,8152
Furnas	13,811	15,066	7,5687	20,0533
Angra	52,748	15,602	28,0588	77,4372

Tabela V.17 - Sensibilidade da $LOLF_f$ para Perturbações nas Taxas de Falha dos Geradores

GERADORES	SENSIBILIDADE (10^{-2} oc/hora)	β_K (%)	L_{INF}	L_{SUP}
Itaipu	1,45220	3,433	1,3026	1,6018
Charqueadas	0,11858	20,643	0,0452	0,1920
Itaúba	0,60850	12,548	0,3794	0,8376
Furnas	0,34800	19,710	0,1422	0,5538
Angra	1,26610	18,898	0,5483	1,9839

Tabela V.18 - Sensibilidade da $LOLF_s$ para Perturbações nas Taxas de Reparo dos Geradores

GERADORES	SENSIBILIDADE (10^{-2} oc/hora)	β_K (%)	L_{INF}	L_{SUP}
Itaipu	1,05510	6,161	0,8601	1,2501
Charqueadas	0,07493	67,822	-0,0775	0,2274
Itaúba	0,37719	17,072	0,1840	0,5704
Furnas	0,32816	36,609	-0,0323	0,6886
Angra	1,02800	38,941	-0,1729	2,2289

Da mesma maneira que ordenamos as interligações podemos também agora classificar cada unidade geradora segundo seu impacto sobre os índices de confiabilidade do sistema.

Tabela V.19 - Classificação das Unidades Geradoras Segundo o Impacto sobre os Índices

ÍNDICE	UNIDADE > IMPACTO				UNIDADE < IMPACTO
LOLP	Itaipu	Angra	Itaúba	Furnas	Charqueadas
EPNS	Itaipu	Angra	Furnas	Itaúba	Charqueadas
LOLF _f	Itaipu	Angra	Itaúba	Furnas	Charqueadas
LOLF _s	Itaipu	Angra	Itaúba	Furnas	Charqueadas

Se para a implantação de um programa de melhoria da confiabilidade de unidades geradoras, houvesse necessidade de se decidir qual ou quais unidades deveriam ter seus parâmetros de falha alterados, uma tabela semelhante à Tabela V.19, poderia ser montada para o sistema completo. Neste exemplo, os maiores benefícios seriam alcançados pela melhoria da confiabilidade das unidades de Itaipu ou da usina nuclear de Angra.

A exemplo do que fizemos para as interligações, vamos selecionar as unidades geradoras de Itaipu e de Angra para recalcular os índices de confiabilidade para variação nas taxas de falha ou de reparo das mesmas, usando tanto as sensibilidades, como o reprocessamento do programa.

As características originais dessas unidades são dadas na Tabela V.20, com valores de taxa de falha e reparo expressos em ocorrências/hora.

Tabela V.20 - Taxas de Falha e Reparo de Itaipu e Angra

UNIDADE GERADORA	TAXA DE FALHA	TAXA DE REPARO	FOR
Itaipu	0,00085	0,013316	0,06000
Angra	0,00574	0,0192165	0,22970

Dos valores de taxa de falha e reparo utilizados, podemos escrever que:

Unidades de Itaipu:

Tempo Médio para Falhas - aprox. 49 dias

Tempo Médio para Reparo - aprox. 3 dias

Usina de Angra dos Reis:

Tempo Médio para Falhas - aprox. 7 dias

Tempo Médio para Reparo - aprox. 2 dias

Se pudéssemos aumentar a confiabilidade da Usina de Angra dos Reis, o caminho provavelmente seria tentar aumentar o tempo médio para falhas, e para Itaipu, o mais provável seria tentar diminuir o tempo médio de reparo.

Vamos então supor uma alteração nestes dados para o recálculo dos índices de confiabilidade.

Para a Usina Nuclear de Angra supomos um tempo médio para falhas de 1 mês, ou seja, 720 horas, e para Itaipu a redução no tempo de reparo para meio dia. Estes novos parâmetros correspondem às alterações da Tabela V.21

Tabela V.21 - Alterações nas Indisponibilidades das Unidades Geradoras

UNIDADE	$\Delta\lambda$	$\Delta\mu$	Δu
Itaipu	-	625,78%	-83,17%
Angra	-75,78%	-	-70,65%

Em função da alteração dos parâmetros de Itaipu, os novos índices seriam:

$$LOLP^* = 0,065677 + 0,17966x(-0,049903) = 0,0567115$$

$$EPNS^* = 23,036 + 82,609x(-0,049903) = 18,913564$$

$$LOLF^* = 0,0077074 + 0,01055x(-0,049903) = 0,007181$$

Em função da alteração dos parâmetros de Angra, os novos índices seriam:

$$LOLP^* = 0,065677 + 0,12893x(-0,162291) = 0,044752$$

$$EPNS^* = 23,036 + 52,748x(-0,162291) = 14,475$$

$$LOLF^* = 0,0077074 + 0,012661x(-0,162291) = 0,0056527$$

As Tabelas V.22 e V.23 comparam os valores dos novos índices obtidos usando as sensibilidades (Valor Estimado) para variações não simultaneas, na taxa de reparo de Itaipu e na taxa de falha de Angra respectivamente, com os valores recalculados através do reprocessamento do programa (Valor Real). Mais uma vez, pode ser constatada a precisão das sensibilidades.

Tabela V.22 - Novos Valores dos Índices - $\Delta\mu$ em Uma Unidade Geradora de Itaipu

ÍNDICES	VALOR REAL	L_{inf}	L_{sup}	VALOR ESTIMADO
LOLP (%)	5,6570	5,5305	5,7835	5,6712
EPNS (MW)	18,975	18,369	19,581	18,914
LOLF (10^{-2} oc./horas)	0,7062	0,6856	0,7268	0,7181

Tabela V.23 - Novos Valores dos Índices - $\Delta\lambda$ na Usina de Angra I

ÍNDICES	VALOR REAL	L_{inf}	L_{sup}	VALOR ESTIMADO
LOLP (%)	4,4330	4,3203	4,5456	4,4752
EPNS (MW)	14,283	13,763	14,804	14,475
LOLF (10^{-2} oc./horas)	0,5634	0,5450	0,5819	0,5653

Assim como para as interligações, mais uma vez constatamos que os valores dos índices calculados usando as sensibilidades estão dentro de um intervalo de confiança de 99% construído a partir de novas estimativas dos índices de confiabilidade calculados reprocessando o programa com os dados alterados.

Este exemplo foi interessante, para mostrar, que a análise das sensibilidades não deve se resumir apenas à ordenação dos impactos, mas também ao que é possível fazer para se modificar realmente as taxas de falha e reparo dos equipamentos. Os parâmetros das unidades geradoras estudadas, mostram que o dado que aparentemente tem mais espaço para modificações é a taxa de falha da Usina de Angra.

Finalmente, para completar a análise das sensibilidades desse sistema, com valores obtidos por simulação Monte Carlo, a Tabela V.24, apresenta os 10 equipamentos analisados, ordenados segundo seus impactos sobre os índices de confiabilidade

Tabela V.24 - Classificação dos Equipamentos Segundo o Impacto sobre os Índices

	LOLP	EPNS	LOLF _f	LOLF _s
EQUIP. > IMPACTO	Interlig. áreas 4-5	Interlig. áreas 4-5	Interlig. áreas 4-5	Interlig. áreas 2-4
	Interlig. áreas 1-5	Interlig. áreas 1-5	Interlig. áreas 1-5	Itaipu
	Interlig. áreas 2-3	Interlig. áreas 2-3	Interlig. áreas 2-3	Angra
	Itaipu	Itaipu	Interlig. áreas 1-5	Interlig. áreas 4-5, 1-5 e 2-3
	Angra	Angra	Angra	Interlig. áreas 2-5
	Itaúba	Furnas	Interlig. áreas 2-5	Itaúba
	Furnas	Interlig. áreas 2-4	Itaúba	Furnas
	Charqueadas	Itaúba	Furnas	
		Interlig. áreas 2-5	Charqueadas	
EQUIP. < IMPACTO	Interlig. áreas 2-4 e 5-2	Charqueadas	Interlig. áreas 2-4	Charqueadas

No conjunto analisado temos que o equipamento mais importante para a confiabilidade do sistema é a interligação entre as áreas 4 e 5. As interligações entre as áreas 2-4 e 2-5, além da unidade geradora da usina de Charqueadas são os equipamentos de menor impacto.

V.3 CÁLCULO DAS SENSIBILIDADES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE VIA INTEGRAÇÃO DIRETA

Nesta seção, serão mostrados os resultados do cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade, para o mesmo sistema da seção anterior, porém usando o algoritmo de integração direta visto nos Capítulos II e IV.

Uma das diferenças no cálculo por integração direta, tanto dos índices como de suas sensibilidades, é a necessidade de montar, por convolução as COPFT's das gerações das áreas. Para viabilizar a sua aplicação, o programa CONFINT usa uma técnica de padronização discreta dos estados de capacidade para montar estas COPFT's (vide ref. [21] e Apêndice A). Em função disto, é necessário que se forneça como dado do programa, o "passo" de padronização dos estados capacidade de geração para cada área.

Para o sistema estudado, foram usados os seguintes incrementos:

área 1 - 659 MW
área 2 - 20 MW
área 3 - 5 MW
área 4 - 25 MW
área 5 - 35 MW

O modelo CONFINT também utiliza ainda duas tolerâncias, para truncamento de probabilidade de estados individuais e para modos de falha. Para este caso-exemplo, foi adotado o valor de 10^{-15} para ambas as tolerâncias.

Os índices de confiabilidade encontrados estão na Tabela V.25, a seguir:

Tabela V.25 - Índices de Confiabilidade Usando Integração Direta

ÍNDICE	ESTIMATIVA
LOLP (%)	6,5577
EPNS (MW)	23,143
LOLF _f (10^{-2} oc./horas)	0,77515
LOLF _s (10^{-2} oc./horas)	0,77515
LOLD (horas)	8,46

Com a introdução da avaliação dos estados de sucesso, necessária para o cálculo da sensibilidade da LOLF_s, é possível calcular a probabilidade dos estados de sucesso. Este valor nos permite conhecer o "gap" na probabilidade, que pode ser definido como:

$$\text{GAP} = 1 - (P_s + \text{LOLP}) \quad (\text{V.2})$$

onde P_s representa a probabilidade associada aos estados de sucesso.

O valor de GAP representa o somatório das probabilidades que foram desprezadas por serem menor que as tolerâncias adotada.

Para este caso-exemplo, foram calculados $P_s = 0,93301$ e $GAP = 0,51295 \times 10^{-3}$.

Comparando a Tabela V.25 com a Tabela V.5, vemos que os índices calculados usando Integração direta, estão dentro do intervalo de confiança de 99%, construídos a partir das estimativas obtidas por simulação Monte Carlo.

As Tabelas V.26 a V.29 comparam para cada índice, os valores de sensibilidade obtidos por Monte Carlo e por Integração Direta.

Tabela V.26 - Comparação entre Valores de Sensibilidade para a LOLP (%)

EQUIPAMENTO	I. DIRETA	MONTE CARLO	L_{INF} 99%	L_{SUP} 99%
Interlig. áreas 2-3	93,4480	93,452	38,676	148,228
Interlig. áreas 2-4	0,0014	0,100	-	-
Interlig. áreas 2-5	0,5169	0,100	-	-
Interlig. áreas 4-5	93,4470	123,460	61,006	185,913
Interlig. áreas 1-5	93,4470	106,790	48,476	165,104
U. G. Itaipu	17,7450	17,966	16,880	19,053
U. G. Charqueadas	1,3799	1,006	0,579	1,434
U. G. Itaúba	5,2029	6,038	4,669	7,387
U. G. Furnas	3,4587	2,697	1,536	3,859
U. G. Angra	10,0120	12,893	8,158	17,628

Tabela V.27 - Comparação entre Valores de Sensibilidade para a EPNS

EQUIPAMENTO	I. DIRETA	MONTE CARLO	L_{INF} 99%	L_{SUP} 99%
Interlig. áreas 2-3	1124,000	1126,60	496,17	1735,03
Interlig. áreas 2-4	0,053	13,30	-64,81	91,42
Interlig. áreas 2-5	0,983	7,46	-	-
Interlig. áreas 4-5	2780,700	3469,60	1787,64	5151,56
Interlig. áreas 1-5	1404,700	1438,90	619,94	2257,86
U. G. Itaipu	82,247	82,61	76,41	88,81
U. G. Charqueadas	4,588	4,71	2,52	6,90
U. G. Itaúba	11,798	10,10	4,39	15,82
U. G. Furnas	14,750	13,81	7,57	20,05
U. G. Angra	39,526	52,75	28,06	77,44

Tabela V.28 - Comparação entre Valores de Sensibilidade para a LOLF_f

EQUIPAMENTO	I. DIRETA	MONTE CARLO	L _{INF} 99%	L _{SUP} 99%
Interlig. áreas 2-3	3,8970	2,1717	-2,7537	7,0971
Interlig. áreas 2-4	0,0002	-0,0009	-	-
Interlig. áreas 2-5	0,0571	0,8467	-3,3971	5,0904
Interlig. áreas 4-5	3,8970	3,1511	-3,2497	9,5519
Interlig. áreas 1-5	3,8970	1,4106	-4,4576	7,2788
U. G. Itaipu	1,4343	1,4522	1,3026	1,6018
U. G. Charqueadas	0,1220	0,1186	0,0452	0,1920
U. G. Itaúba	0,39460	0,6085	0,3794	0,8376
U. G. Furnas	0,4072	0,3480	0,1422	0,5538
U. G. Angra	1,1109	1,2661	0,5483	1,9839

Tabela V.29 - Comparação entre Valores de Sensibilidade para a LOLF_s

EQUIPAMENTO	I. DIRETA	MONTE CARLO	L _{INF} 99%	L _{SUP} 99%
Interlig. áreas 2-3	-0,7758	-0,7564	-1,2859	-0,2270
Interlig. áreas 2-4	0,0001	2,0264	-3,4346	7,4873
Interlig. áreas 2-5	0,0314	0,4164	-4,6291	5,4619
Interlig. áreas 4-5	-0,7758	-0,7564	-1,2859	-0,2270
Interlig. áreas 1-5	-0,7758	-0,7564	-1,2859	-0,2270
U. G. Itaipu	1,1183	1,0551	0,8601	1,2501
U. G. Charqueadas	0,0995	0,0749	-0,0775	0,2274
U. G. Itaúba	0,2277	0,3772	0,1840	0,5704
U. G. Furnas	0,2628	0,3282	-0,0323	0,6886
U. G. Angra	0,8610	1,0280	-0,1729	2,2289

Pode-se observar que o impacto relativo dos equipamentos sobre os índices de confiabilidade é o mesmo obtido via simulação Monte Carlo. Desta forma, os resultados da Tabela V.24 permanecem válidos.

Usando os valores das Tabelas V.26 e V.29 para as sensibilidades dos índices e selecionando as Interligações entre as áreas 2-3 e 1-5, além das Unidades Geradoras de Itaúba e Furnas, podemos mostrar graficamente o efeito da variação nas indisponibilidades forçadas dos equipamentos sobre cada índice.

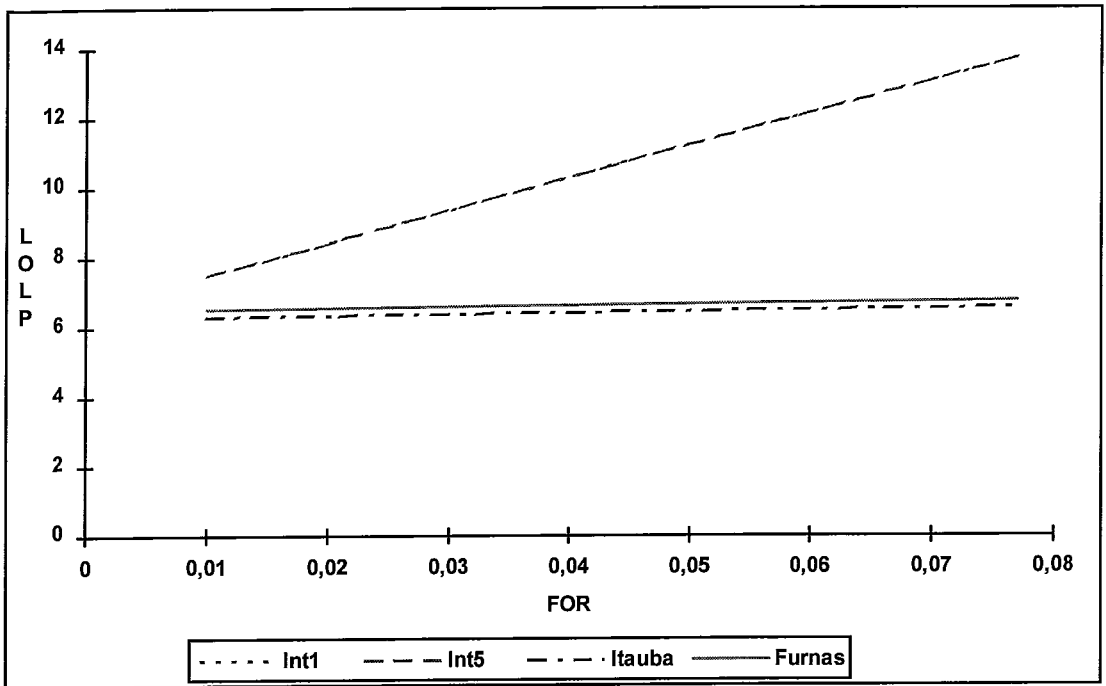


Figura V.2 - Sensibilidade da LOLP em Relação aos Equipamentos

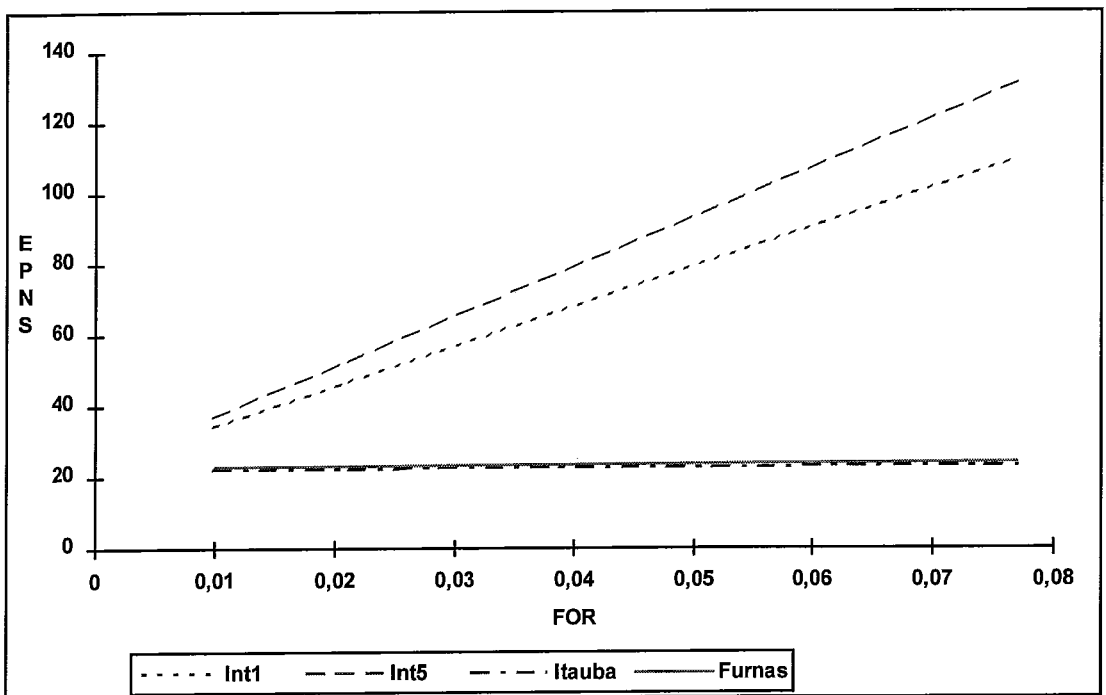


Figura V.3 - Sensibilidade da EPNS em Relação aos Equipamentos

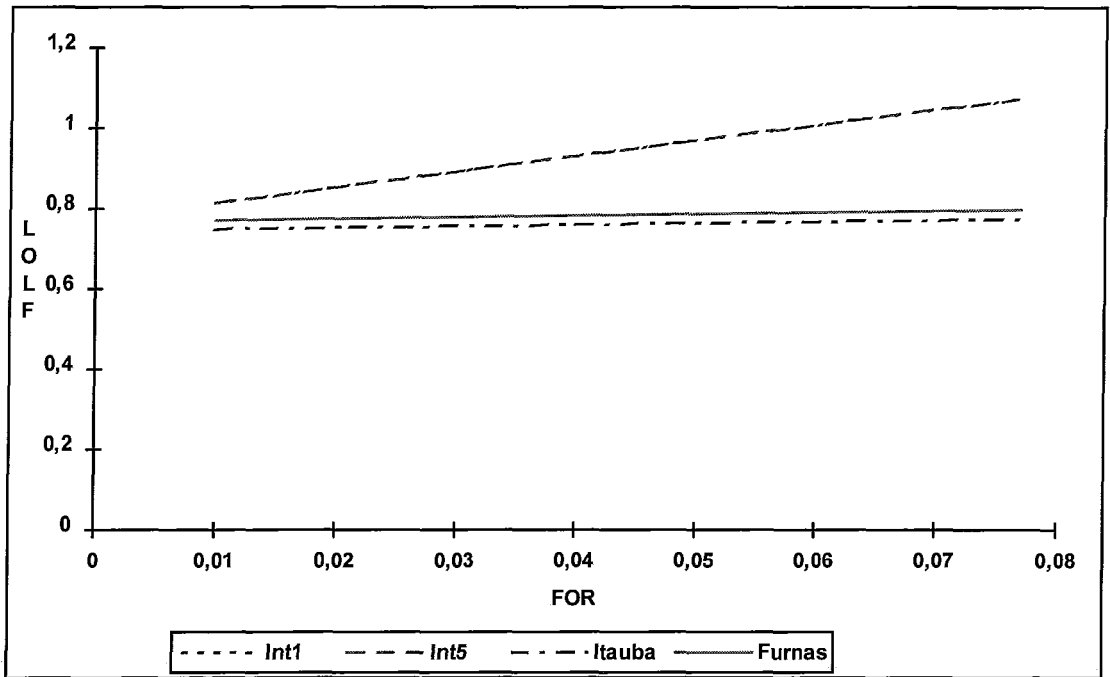


Figura V.4 - Sensibilidade da $LOLF_f$ em Relação aos Equipamentos

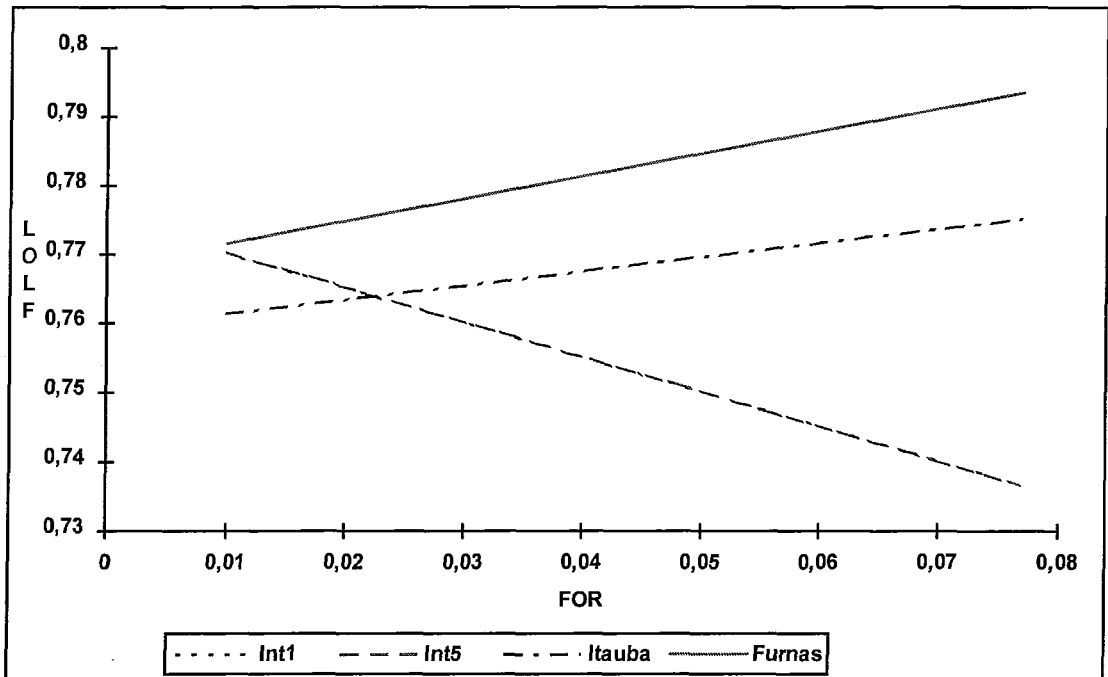


Figura V.5 - Sensibilidade da $LOLF_s$ em Relação aos Equipamentos

Analisando os gráficos, observamos que o impacto da variação das indisponibilidades das interligações é bem maior do que o impacto causado por variações nas unidades geradoras de Itauba e de Furnas.

Com o objetivo de verificar a exatidão das expressões das sensibilidades, calculamos a variação dos índices de confiabilidade com respeito a 50% de incremento na taxa de reparo de um gerador da usina de Itaipu. Esta variação corresponde a um decréscimo de 32% na sua taxa de saída forçada. Os novos índices foram calculados usando os índices de sensibilidade para Itaipu constantes das Tabelas V.26 a V.28 (Valor Estimado) e reprocessando o programa com os novos parâmetros (Valor Real) Os resultados estão na Tabela V.30

Tabela V.30 - Resultados para Variação na Taxa de Reparo da U.G de Itaipu

ÍNDICE	VALOR REAL	VALOR ESTIMADO
LOLP (%)	6,22	6,22
EPNS (MW)	21,604	21,564
LOLF (oc./hora)	0,00752	0,00752

Tendo em mente os erros de arredondamento nos cálculos das COPFT's das áreas, podemos dizer que as expressões para a sensibilidade são bastantes precisas.

V.4 VARIAÇÕES SIMULTÂNEAS EM MAIS DE UM PARÂMETRO

Nos Capítulos III e IV foi demonstrado que as expressões de sensibilidade obtidas para variações na *taxa de falha ou de reparo de um único equipamento*, são exatas.

No caso de variações simultaneas destes dois parâmetros, ou ainda, nos parâmetros de falha de mais de um equipamento, as sensibilidades deixam de ser exatas. Nesta seção será avaliado de forma prática, o erro causado pela estimativa de novos valores dos índices de confiabilidade através das sensibilidades.

Vamos estudar inicialmente o erro causado pela variação simultânea da taxa de falha e de reparo de um único equipamento.

Tanto no Capítulo III quanto no Capítulo IV, foi mostrado que as expressões das sensibilidades, da LOLP e da EPNS dependem somente da derivada da probabilidade do estado em relação à FOR dos equipamentos. A variação na FOR dos equipamentos, por sua vez, pode ser causada tanto por uma variação na taxa de falha como na taxa de reparo dos equipamentos. Como para as sensibilidades destes índices, a *origem* da variação da FOR não influi nos cálculos, as expressões (IV.26) e (IV.27) permanecem exatas.

Para o cálculo da sensibilidade da LOLF, o mesmo não acontece. Por isso, obtivemos duas expressões, para variações em λ e μ .

Uma aproximação para o cálculo da variação da LOLF, $\Delta LOLF$, quando há variação simultânea em λ e μ de um único equipamento, pode ser dada por:

$$\Delta LOLF = \frac{\partial LOLF_f}{\partial u_k} \times \Delta u_\lambda + \frac{\partial LOLF_s}{\partial u_k} \times \Delta u_\mu \quad (V.3)$$

As derivadas da $LOLF_f$ e da $LOLF_s$ em relação a u_k são dadas pelas expressões (IV.28) e (IV.29), respectivamente.

Observa-se que Δu_λ e Δu_μ representam as variações na indisponibilidade do equipamento, quando se variam as taxas de falha e de reparo respectivamente.

Para Δu_λ temos:

$$\Delta u_\lambda = \frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda + \Delta\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (V.4)$$

e para Δu_μ temos:

$$\Delta u_\mu = \frac{\lambda}{\lambda + \mu + \Delta\mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (V.5)$$

Para ilustrar, escolhemos a unidade geradora da usina de Itaipu e calculamos o erro cometido ao variarmos as taxas de falha e de reparo simultaneamente. Foi considerada uma variação de 100% na taxa de falha e de 50% na taxa de reparo.

Na Tabela V.31, o valor estimado refere-se ao cálculo feito usando as sensibilidades e valor real aos índices obtidos pelo reprocessamento do programa.

Tabela V.31 - Erro para Variação Simultânea das Taxas de Falha e Reparo

ÍNDICE	VALOR REAL	VALOR ESTIMADO
LOLP (%)	6,885	6,885
EPNS (MW)	24,536	24,658
LOLF (10^{-2} oc./hora)	0,8108	0,8287

Se lembrarmos dos resultados obtidos na Tabela V.30, vemos que como era previsto só podemos considerar como erro devido à variação simultânea, a diferença no cálculo da LOLF. Esta diferença é muito pouco significativa (2,2%) face às variações dos parâmetros, que resultaram em uma variação de cerca de 30% na FOR do gerador.

Para a variação dos parâmetros de mais de um equipamento, os novos índices são calculados supondo que a variação na FOR de um equipamento não altera os valores de sensibilidade originalmente encontrados para os outros equipamentos. Neste caso os novos índices podem ser *aproximados* pela seguinte expressão:

$$E(F^*) = E(F) + \sum_{k=j}^p \frac{\partial E(F)}{\partial u_k} \times \Delta u_k \quad (V.6)$$

onde estamos considerando a variação nos parâmetros de $j-p+1$ equipamentos.

Para testar a magnitude deste erro, vamos causar perturbações nos parâmetros dos dez equipamentos selecionados para este exemplo e calcular os valores dos novos índices usando (V.6), e reprocessando o programa.

Para cada equipamento, só um parâmetro será variado. A variação será de 25% tanto na taxa de falha quanto na de reparo, conforme o caso.

A cada inclusão de novo equipamento ao conjunto dos equipamentos cuja FOR foi alterada, será feito um acompanhamento do erro. Os equipamentos terão suas taxas de falha ou de reparo alteradas, obedecendo a seguinte ordem:

Interlig. áreas 1-5, Interlig. áreas 2-3, Itaipu, Itauba, Furnas, Interlig. áreas 5-4, Angra, Charqueadas, Interlig. áreas 2-4 e Interlig. áreas 2-5. As alterações serão feitas, alternando taxa de falha e taxa de reparo.

Assim, Interlig. áreas 1-5, Itaipu, Furnas, Angra e Interlig. áreas 2-4, terão alterações de 25% nas suas taxas de falha, e os demais equipamentos sofrerão alterações de 25% nas suas taxas de reparo.

Nas Tabelas V.32 a V.34, valor aproximado refere-se ao cálculo feito usando as sensibilidades e valor real é aquele obtido pelo reprocessamento de programa.

Tabela V.32 - Erro na LOLP para Variação na FOR de Vários Equipamentos

# EQUIP. PERTURB.	VALOR APROX. (%)	VALOR REAL (%)	ERRO (%)
1	6,5600	6,5601	0,00
2	6,5582	6,5582	0,00
3	6,8047	6,8017	0,04
4	6,7504	6,7227	0,41
5	6,7679	6,7374	0,45
6	6,7660	6,7355	0,45
7	7,1852	7,2867	1,41
8	7,1512	7,2607	1,53
9	7,1512	7,2606	1,53
10	7,1512	7,2607	1,53

Tabela V.33 - Erro na EPNS para Variação na FOR de Vários Equipamentos

# EQUIP. PERTURB.	VALOR APROX. (MW)	VALOR REAL (MW)	ERRO (%)
1	23,178	23,178	0,00
2	23,156	23,155	0,00
3	24,298	24,211	0,36
4	24,128	24,028	0,41
5	24,203	24,113	0,37
6	24,147	24,057	0,37
7	25,802	26,242	1,70
8	25,689	26,155	1,81
9	25,689	26,149	1,79
10	25,689	26,150	1,79

Tabela V.34- Erro na LOLF para Variação na FOR de Vários Equipamentos

# EQUIP. PERTURB.	VALOR APROX. (10 ⁻² oc/hora)	VALOR REAL (10 ⁻² oc/hora)	ÊRRO (%)
1	0,7752	0,7752	0,00
2	0,7753	0,7753	0,00
3	0,7952	0,7950	0,03
4	0,7919	0,7895	0,30
5	0,7943	0,7914	0,30
6	0,7939	0,7914	0,31
7	0,8405	0,8461	0,01
8	0,8380	0,8439	0,70
9	0,8380	0,8439	0,70
10	0,8380	0,8439	0,70

Nas Tabelas V.32 a V.34 podemos notar que o maior erro relativo ocorreu para a estimativa da EPNS, sendo de aproximadamente 1,8%, quando consideramos variação simultânea entre 8 e 10 equipamentos.

Este resultado nos leva a crer que podemos usar também as sensibilidades para uma aproximação bastante razoável dos índices de confiabilidade, quando vários equipamentos têm seus parâmetros alterados. Observe que entre o conjunto de equipamentos analisados, estão aqueles que têm mais impacto para a confiabilidade do sistema.

O número de variações simultâneas que se pode fazer, dentro de uma margem aceitável de erro, dependerá das características do sistema e das sensibilidades de cada equipamento. Para o sistema estudado neste capítulo, e para os equipamentos analisados os resultados alcançados usando as sensibilidades indicaram um desvio

muito pequeno em relação às estimativas obtidas pelo reprocessamento do programa.

V.5 ESFORÇO COMPUTACIONAL

Na implementação da metodologia de cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade, empregando o algoritmo de integração direta, há uma relação direta entre o tempo de CPU, e o número de equipamentos do sistema. Isto se deve, principalmente, pelo fato de que para o cálculo das sensibilidades, cada equipamento deve ser considerado. Por exemplo, para o cálculo da sensibilidade da LOLP, o somatório da expressão (IV.52) é executado uma vez para cada equipamento do sistema. Deve-se acrescentar ainda, que há a necessidade de se efetuar a avaliação para os estados de sucesso, para o cálculo da sensibilidade da $LOLF_s$.

Uma alternativa para a avaliação das sensibilidades, para um sistema com N equipamentos, é o reprocessamento do programa, de avaliação dos índices, considerando variações nas taxas de falha e de reparo de cada equipamento. O tempo de CPU para esta alternativa é equivalente a 2N vezes o tempo de CPU necessário para uma avaliação dos índices de confiabilidade.

Na Tabela V.35, é apresentada uma comparação entre os tempos de CPU necessários para a avaliação, através do algoritmo de integração direta, somente dos índices de confiabilidade, e aqueles necessários para uma avaliação incluindo as sensibilidades. Foram feitos testes para três sistemas:

- Sistema 1 : 2 áreas, totalizando 9 equipamentos;
- Sistema 2 : 3 áreas, totalizando 51 equipamentos;
- Sistema 3 : 5 áreas totalizando 260 equipamentos

Foi avaliado também o acréscimo de tempo de CPU devido à inclusão da avaliação do modo de sucesso (MS) no cálculo das sensibilidades.

Os tempos de CPU referem-se aos programas processados em micro computador 486 DX2 (66 MHz).

Tabela V.35 - Tempos de CPU

	AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES		AVALIAÇÃO DAS SENSIBILIDADES	
	Com MS	Sem MS	Com MS	Sem MS
Sistema 1	0,00s	0,00s	0,00s	0,00s
Sistema 2	0,06s	0,05s	2,31s	1,98s
Sistema 3	5min9s	4min.54s	5h45min	5h07min

Da Tabela V.35, observa-se que o acréscimo de tempo quando se inclui o cálculo do modo de sucesso, é bem menor do que aquele quando se inclui o cálculo das sensibilidades.

A título de ilustração, calculou-se os tempos de CPU necessários para a avaliação das sensibilidades, através de reprocessamentos do programa de avaliação dos índices de confiabilidade.

A Tabela V.36, apresenta a estimativa dos tempos de CPU para reprocessamentos do programa de avaliação dos índices de confiabilidade. Esta Tabela foi construída a partir da tabela anterior, multiplicando-se os tempos encontrados para a avaliação dos índices, pelo dobro do número de equipamentos de cada sistema.

Tabela V.36 - Tempos de CPU para o Cálculo das Sensibilidades Através de Reprocessamentos da Avaliação dos Índices

	AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES	
	Com MS	Sem MS
Sistema 1	0,00s	0,00s
Sistema 2	6,12s	5,10s
Sistema 3	43h21min	34h48min

A diferença entre os tempos encontrados para as Tabelas V.35 e V.36 evidencia a vantagem da implementação do cálculo das sensibilidades no programa de avaliação dos índices de confiabilidade.

A Tabela V.37, compara os tempos de CPU para as implementações usando simulação Monte Carlo e o algoritmo de integração direta.

Tabela V.37 - Comparação dos Tempos de CPU entre Simulação Monte Carlo e Integração Direta

	AVALIAÇÃO DAS SENSIBILIDADES			
	Simulação Monte Carlo		Integração Direta	
	Tempo CPU	β	Tempo CPU	GAP
Sistema 1	57,18seg	0,67%	0,00seg	$0,1 \times 10^{-6}$
Sistema 2	7min13seg	0,68%	2,31seg	$0,1 \times 10^{-5}$
Sistema 3	21min17seg	0,69%	5h45min	$0,5 \times 10^{-3}$

Observa-se que, a utilização do algoritmo de integração direta, para o sistema de 5 áreas, do ponto de vista do esforço computacional, é menos vantajosa que a utilização da simulação Monte Carlo. Para os sistemas menores (2 e 3 áreas) é mais vantajoso o emprego do método de integração direta.

Pode-se concluir então, que para sistemas pouco complexos, (pequeno número de áreas e de equipamentos), o método de integração direta leva a um menor custo computacional. Conforme aumenta-se a complexidade do sistema, porém, este método vai se tornando mais dispendioso, sendo recomendado portanto o cálculo através de simulação Monte Carlo. Quando se obtém valores muito baixos de LOLP, podem ser aplicadas técnicas de redução de variância a fim de se obter precisões aceitáveis [28].

V.6 RESUMO

Neste capítulo foi apresentada uma aplicação das metodologias desenvolvidas nos capítulos anteriores, e implementadas no programa CONFINT, para um sistema dividido em 5 áreas e com 260 equipamentos (255 unidades geradoras e 5 interligações).

Foi apresentada também uma discussão sobre o impacto do cálculo das sensibilidades sobre o esforço computacional no programa de cálculo dos índices de confiabilidade.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo apresentamos as principais conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, bem como algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

Nesta Tese foi descrita uma metodologia geral para calcular a sensibilidade de índices de confiabilidade multi-área, incluindo os índices de frequência e duração, com respeito a variações discretas nas taxas de falha e reparo dos equipamentos. Esta metodologia foi implementada no programa CONFINT. As principais conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, estão sintetizadas a seguir:

- i)* Inicialmente, foi desenvolvida uma metodologia baseada na enumeração sucessiva de estados. Para viabilizar a aplicação em sistema reais, de grande porte, esta metodologia foi adaptada para emprego dos algoritmos de integração direta e de simulação Monte Carlo
- ii)* As metodologias descritas permitem que as sensibilidades dos índices de confiabilidade sejam estimadas simultaneamente ao cálculo dos índices. Nos programas que calculam os índices de confiabilidade usando simulação Monte Carlo, a implementação é bastante simples, como pode ser visto pelo algoritmo apresentado no Capítulo III. A implementação em programas que utilizam o algoritmo de integração direta, também é simples, porém há a necessidade da introdução de um procedimento para a desconvolução das tabelas de probabilidades e frequências incrementais de capacidades das áreas.
- iii)* Diferindo dos procedimentos encontrados na literatura, as sensibilidades dos índices de confiabilidade, incluindo os de frequência e duração, não foram calculadas diretamente em relação às variações nas taxas de falha e reparo dos equipamentos, e sim em relação a variações nas suas taxas de indisponibilidade forçada. Com este procedimento, foi demonstrado que os valores calculados para as sensibilidades são valores exatos, e não aproximações de primeira ordem, inclusive para os índices de frequência e duração.
- iv)* O cálculo do índice LOLF pode ser feito computando-se indistintamente as transições dos estados de falha para os estados de sucesso, ou as transições de sucesso para falha. Entretanto para o cálculo preciso de suas sensibilidades, é

mandatória a distinção entre as transições de falha para sucesso e de sucesso para falha.

- v) Em decorrência, há a necessidade de se integrar os estados de sucesso do sistema. A avaliação da probabilidade dos estados de sucesso do sistema, somada à probabilidade de falha, permite o cálculo do "gap" de probabilidades, i. e., o somatório das probabilidades dos estados não analisados. A obtenção do gap de probabilidade é importante para se verificar a precisão das estimativas dos índices.
- vi) O cálculo das sensibilidades dos índices de confiabilidade nos permite não só o cálculo de novos índices em função de variações nas indisponibilidades dos equipamentos, mas também a ordenação destes equipamentos, em função de seu impacto para a confiabilidade do sistema. Dentro da ordenação, ainda podemos separar os equipamentos por classes de importância, de acordo com os valores das suas sensibilidades.
- vii) A metodologia foi aplicada a um caso derivado do sistema Sul/Sudeste brasileiro, podendo ser observado que os valores de sensibilidade obtidos por integração direta Carlo estão dentro do intervalo de confiança obtidos por simulação Monte Carlo.
- viii) Para o sistema estudado, as sensibilidades forneceram uma aproximação bastante razoável para o cálculo dos índices de confiabilidade no caso de variação simultânea dos parâmetros de falha de vários equipamentos.
- ix) Foram também apresentadas expressões para o cálculo das sensibilidades em relação a um grupo de equipamentos com os mesmos valores de parâmetros de falha.
- x) Com relação ao esforço computacional para a obtenção das sensibilidades, observamos que o método de integração direta é mais sensível ao número de equipamentos do que o método de simulação Monte Carlo. O método de integração direta mostrou-se mais vantajoso para o sistema com menor número de áreas e equipamentos. Já o método de simulação Monte Carlo mostrou-se mais vantajoso quando o número de áreas e equipamentos é mais elevado. É interessante ainda observar que esta conclusão é válida não apenas para o cálculo das sensibilidades como também para o cômputo dos próprios índices de confiabilidade.

Como desenvolvimentos futuros, podemos sugerir:

- i) Implementação do cálculo das sensibilidades quando consideramos diversos cenários hidrológicos para determinação das disponibilidades de potência das unidades geradoras do sistema.

- ii) A implementação atual da avaliação de confiabilidade usando simulação Monte Carlo, usa um processo de enumeração de cortes para determinar o corte mínimo da rede de fluxos associada ao sistema. Sugere-se que seja comparada a eficiência deste método algoritmos de fluxo máximo para sistemas com um número elevado de áreas.
- iii) Neste trabalho, todos os equipamentos foram representados por um modelo a dois estados, o que não necessariamente acontece na prática, pois tanto unidades geradoras quanto interligações podem sofrer limitações parciais nas suas capacidades.
- iv) Estender a metodologia proposta para o cálculo do impacto das incertezas associadas aos parâmetros de falha dos equipamentos sobre os índices de confiabilidade.
- v) Estabelecer uma sistemática, envolvendo as áreas de planejamento elétrico e planejamento energético das empresas do sistema elétrico, para definição dos limites de interligação entre as diversas áreas que compõe o sistema. Os índices de sensibilidade das capacidades das interligações, calculados pelo CONFINT, indicam as interligações mais críticas para o sistema, para as quais a definição destes limites, assume particular importância.
- vi) Estender para o cálculo de reserva operativa de potência a representação multi-área para o sistema.
- vii) Adotar índices econômicos no cálculo da confiabilidade.

Finalmente, em uma época caracterizada pela escassez de recursos, e por uma crescente competitividade entre empresas, torna-se cada vez mais importante um planejamento sério, baseado em dados confiáveis e em metodologias capazes de proporcionar elementos para decisões seguras. Neste contexto, a análise das relações causa-efeito apresentadas por estudos de sensibilidades, em qualquer campo da ciência, oferece ao planejador uma ferramenta valiosa para a decisão de alternativas, buscando a otimização dos recursos disponíveis.

Com o trabalho ora apresentado, esperamos estar contribuindo com uma ferramenta a mais para auxiliar em decisões de alternativas para sistemas elétricos.

APÊNDICE A

CONVOLUÇÃO DISCRETA PADRONIZADA [19]

Conforme visto no Capítulo II, seção II.3.1, o processo de construção das tabelas COPFT's das áreas consiste em, ao se adicionar um novo equipamento, atualizar os estados existentes e criar novos estados quando necessário. Contudo para sistemas práticos, o número de unidades é relativamente elevado e esse processo usual de construção das COPFT's é dispendioso em termos de esforço computacional, sobretudo quando se considera que para o cálculo das sensibilidades há necessidade também de se fazer a operação inversa, i. e., a "desconvolução". Para cada um dos processos, o número de combinações por área, pode crescer até 2^w , se estamos considerando os equipamentos representados a dois estados e w , o número máximo de unidades geradoras por área.

Este problema pode ser aliviado parcialmente por um processo de truncamento das COPFT's, desprezando-se os estados com probabilidades menores que um limite especificado. Ainda assim, os requisitos de memória e tempo computacionais continuam excessivos.

Portanto, para se analisar sistemas de grande porte é necessário fazer algumas aproximações realísticas que não introduzam erros inaceitáveis nos resultados finais, e que reduzam o esforço computacional.

A idéia básica da padronização de estados é escolher um intervalo ou passo de padronização, que determinará o número de estados da COPFT da área e o valor de cada estado de capacidade. Durante o processo de convolução um estado de capacidade criado por uma unidade ou combinação de unidades pode não coincidir com alguns dos estados predeterminados (padronizados). Neste caso, as probabilidades, as taxas de transição incremental e conseqüentemente as freqüências incrementais deste estado devem ser *repartidas* entre os dois estados padronizados imediatamente adjacentes, usando um método de ponderação que depende da distancia entre este estados e os dois estados padronizados adjacentes.

Considere para uma área, um estado i (c_i, p_i, f_i^{in}), originado de uma certa combinação de unidades e suponha que c_i é diferente da capacidade de algum estado padronizado. Sejam os estados m (c_m, p_m, f_m^{in}) e n (c_n, p_n, f_n^{in}) os dois estados padronizados imediatamente adjacentes. Assuma ainda que $c_m > c_n$, isto é, $c_m - c_n = \Delta$, onde Δ é o passo de padronização dos estados da COPFT desta área. Estes

estados podem ser representados como na Figura A.1, onde os impulsos representam um dos parâmetros dos estados.

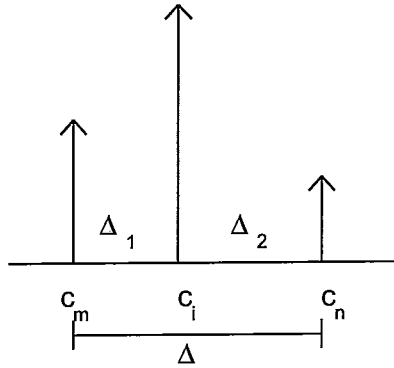


Figura A.1 - Estados m, i e n

O processo de padronização consiste em dividir o estado i em duas partes m_i e n_i , que são combinadas respectivamente com m e n . i. e., $c_{m_i} = c_m$ e $c_{n_i} = c_n$.

A probabilidade p_i é dividida proporcionalmente a distância dos estados i aos estados m e n , dando:

$$p_{m_i} = p_i \frac{c_i - c_n}{c_m - c_n} = p_i \frac{\Delta_2}{\Delta} \tag{A.1}$$

$$p_{n_i} = p_i \frac{c_m - c_i}{c_m - c_n} = p_i \frac{\Delta_1}{\Delta} \tag{A.2}$$

Embora o estado i seja dividido numericamente, a combinação de unidades que o originaram não se altera e, portanto, as taxas de transição incremental são :

$$\lambda_{m_i}^{in} = \lambda_{n_i}^{in} = \lambda_i^{in} \tag{A.3}$$

Das expressões (A.1) a (A.3), pode-se obter os valores das freqüências incrementais:

$$\begin{aligned} f_{m_i}^{in} &= p_{m_i} \lambda_{m_i}^{in} \\ &= \frac{\Delta_2}{\Delta} p_i \lambda_i^{in} \\ &= \frac{\Delta_2}{\Delta} f_i^{in} \end{aligned} \tag{A.4}$$

da mesma forma:

$$f_{n_i}^{in} = \frac{\Delta_1}{\Delta} f_i^{in} \quad (A.5)$$

Os estados de mesma capacidade m e m_i , e n e n_i , são então combinados para fornecer os estados r e s para os quais temos:

$$c_r = c_m = c_{m_i} \quad (A.6)$$

$$c_s = c_n = c_{n_i} \quad (A.7)$$

$$p_r = p_m + p_i \frac{\Delta_2}{\Delta} \quad (A.8)$$

$$p_s = p_n + p_i \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad (A.9)$$

$$f_r^{in} = f_m^{in} + f_i^{in} \frac{\Delta_2}{\Delta} \quad (A.10)$$

$$f_s^{in} = f_n^{in} + f_i^{in} \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad (A.11)$$

Os procedimentos de convolução e desconvolução podem ser simplificados usando o processo de padronização de estados.

No programa CONFINT, é feita a padronização dos estados de capacidade *indisponível* de cada unidade geradora antes da convolução das mesmas para a construção das COPFT's das áreas. Desta maneira, preserva-se o valor correspondente às probabilidades e freqüências incrementais do estado de maior capacidade, como mostra a Figura A.2

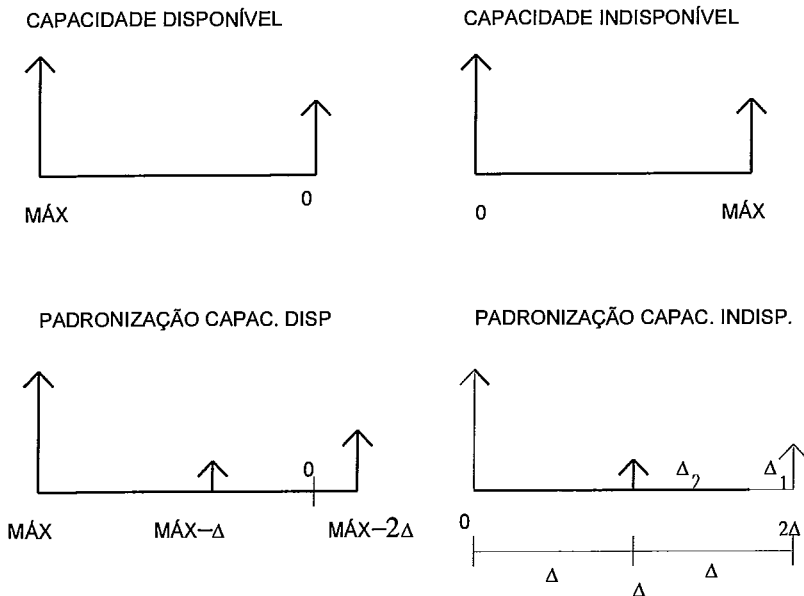


Figura A.2 - Padronização de Uma Unidade Geradora

Na Figura A.2, a padronização da capacidade indisponível faz com que o pulso de máxima capacidade indisponível seja dividido em dois. O pulso de máxima capacidade disponível é preservado, e os demais estados de capacidade disponível são calculados a partir deste estado. Ainda na Figura A.2, MÁX representa o estado de maior capacidade.

Sendo assim cada equipamento terá no máximo três estados de capacidade com pulsos diferentes de zero: O estado de máxima capacidade disponível e os dois estados resultantes da divisão do pulso correspondente ao estado de mínima capacidade disponível.

A COPFT para o equipamento pode ser resumida na Tabela A.1

Tabela A.1 - COPFT para Equipamento com Estados Padronizados

ESTADO	CAPACIDADE	PROBABILIDADE	FREQ. INCREM.
n	MÁX	$1-u_k$	$f^{in}(MÁX)$
:	:	:	:
2	$MÁX-(n-1)\Delta$	$(\Delta_1/\Delta)xu_k$	$(\Delta_1/\Delta)x f^{in}(0)$
1	$MÁX-n\Delta$	$(\Delta_2/\Delta)xu_k$	$(\Delta_2/\Delta)x f^{in}(0)$

Utilizando-se as tabelas com os estados padronizados, pode-se, não só convoluir estados de equipamentos para montar as COPFTs das áreas, como também aplicar os procedimentos vistos para a desconvolução, a fim de calcular as derivadas das probabilidades e das freqüências incrementais.

Deve-se no entanto lembrar que, após a padronização, os equipamentos podem vir a ter um número de estados superior a dois, e as expressões para convolução e desconvolução de estados devem ser generalizadas para contemplar esta nova situação.

Observa-se ainda que a precisão dos índices de confiabilidade estimados através deste método, depende do valor do passo de padronização escolhido.

APÊNDICE B

DESENVOLVIMENTO DETALHADO DOS EXEMPLOS APRESENTADOS

B.1 DETALHAMENTO DOS CÁLCULOS DO EXEMPLO DO CAPÍTULO III

Em seqüência ao desenvolvimento iniciado no Capítulo III, para a sensibilidade da LOLF para perturbação nas taxas de falha dos equipamentos, temos:

- equipamento e_2 :

estado 4	$[(-1,02) \times 0,4 + (-0,51)] \times 0,000416 = -0,00382$
estado 8	$[(50) \times 0,9 + (0)] \times 0,00000849 = 0,000382$
estado 11	$[(-1,02) \times 0,729 + (-0,51)] \times 0,00144 = -0,001797$
estado 12	$[(-1,02) \times 0,9 + (-0,51)] \times 0,00000849 = -0,00001213$
estado 13	$[(50) \times 0,959 + (0)] \times 0,000368 = 0,01765$
estado 14	$[(50) \times 1,13 + (0)] \times 0,00000217 = 0,0001226$
estado 15	$[(50) \times 1,229 + (0)] \times 0,00002946 = 0,00181$
estado 16	$[(50) \times 1,4 + (0)] \times 0,00000017 = 0,0000119$

Efetando o somatório sobre os estados de falha:

$$\frac{\partial LOLF_f}{\partial u_2} = 0,017791$$

- equipamento e_3 :

estado 4	$[(13,5) \times 0,4 + (0)] \times 0,000416 = 0,00225$
estado 8	$[(13,5) \times 0,9 + (0)] \times 0,00000849 = 0,000103$
estado 11	$[(13,5) \times 0,729 + (0)] \times 0,00144 = 0,014029$
estado 12	$[(13,5) \times 0,9 + (0)] \times 0,00000849 = 0,000103$
estado 13	$[(-1,08) \times 0,959 + (-0,29)] \times 0,000368 = -0,0004887$
estado 14	$[(-1,08) \times 1,13 + (-0,29)] \times 0,00000217 = -0,00000328$
estado 15	$[(13,5) \times 1,229 + (0)] \times 0,00002946 = 0,0004887$
estado 16	$[(13,5) \times 1,4 + (0)] \times 0,00000017 = 0,000003213$

Efetando o somatório sobre os estados de falha:

$$\frac{\partial LOLF_f}{\partial u_3} = 0,016482$$

- equipamento e_4 :

- equipamento e_4 :

estado 4	$[(171) \times 0,4 + (0)] \times 0,000416 = 0,028456$
estado 8	$[(171) \times 0,9 + (0)] \times 0,0000849 = 0,0013066$
estado 11	$[(-1,01) \times 0,729 + (-0,17)] \times 0,00144 = -0,0012936$
estado 12	$[(171) \times 0,9 + (0)] \times 0,0000849 = 0,0013066$
estado 13	$[(-1,01) \times 0,959 + (-0,17)] \times 0,000368 = -0,00041851$
estado 14	$[(171) \times 1,13 + (-0)] \times 0,0000217 = -0,0004193$
estado 15	$[(-1,01) \times 1,229 + (-0,17)] \times 0,00002946 = -0,000041487$
estado 16	$[(171) \times 1,4 + (0)] \times 0,0000017 = 0,000040698$

Efetuando o somatório sobre os estados de falha:

$$\frac{\partial LOLF_f}{\partial u_4} = 0,029776$$

caso 2 - perturbação na nas taxas de reparo dos equipamentos:

- equipamento e_2 :

estado 1	$[(-1,02) \times (0,041) + (0)] \times 0,88406 = -0,036986$
estado 2	$[(-1,02) \times (-0,13) + (0)] \times 0,0052 = 0,00068984$
estado 3	$[(-1,02) \times (-0,229) + (0)] \times 0,070724 = 0,016526$
estado 5	$[(50) \times (-0,459) + (25)] \times 0,01804 = 0,036986$
estado 6	$[(50) \times (-0,63) + (25)] \times 0,0001061 = -0,00068985$
estado 7	$[(50) \times (-0,729) + (25)] \times 0,001443 = -0,016526$
estado 9	$[(-1,02) \times (-0,459) + (0)] \times 0,018042 = 0,0084503$
estado 10	$[(-1,02) \times (-0,63) + (0)] \times 0,0001061 = 0,000068226$

Efetuando o somatório sobre os estados de sucesso:

$$\frac{\partial LOLF_s}{\partial u_2} = 0,0085185$$

- equipamento e_3 :

estado 1	$[(-1,08) \times (0,041) + (0)] \times 0,88406 = -0,03915$
estado 2	$[(-1,08) \times (-0,13) + (0)] \times 0,0052 = 0,00073013$
estado 3	$[(13,5) \times (-0,229) + (3,65)] \times 0,070724 = 0,039783$
estado 5	$[(-1,08) \times (-0,459) + (0)] \times 0,01804 = 0,0089438$
estado 6	$[(-1,08) \times (-0,63) + (0)] \times 0,0001061 = 0,000072211$
estado 7	$[(13,5) \times (-0,729) + (3,65)] \times 0,001443 = -0,0089308$
estado 9	$[(-1,08) \times (-0,459) + (0)] \times 0,018042 = 0,0089438$
estado 10	$[(-1,08) \times (-0,63) + (0)] \times 0,0001061 = 0,000072211$

Efetuando o somatório sobre os estados de sucesso:

$$\frac{\partial LOLF_s}{\partial u_3} = 0,010160$$

- equipamento e_4 :

estado 1	$[(-1,01) \times (0,041) + (0)] \times 0,88406 = -0,036460$
estado 2	$[(171) \times (-0,13) + (29,24)] \times 0,0052 = 0,036460$
estado 3	$[(-1,01) \times (-0,229) + (0)] \times 0,070724 = 0,016291$
estado 5	$[(-1,01) \times (-0,459) + (0)] \times 0,01804 = 0,0083300$
estado 6	$[(171) \times (-0,63) + (29,24)] \times 0,0001061 = -0,0083300$
estado 7	$[(-1,01) \times (-0,729) + (0)] \times 0,001443 = 0,0010584$
estado 9	$[(-1,01) \times (-0,459) + (0)] \times 0,018042 = 0,0083300$
estado 10	$[(171) \times (-0,63) + (29,24)] \times 0,0001061 = -0,0083300$

Efetuando o somatório sobre os estados de sucesso:

$$\frac{\partial LOLF_s}{\partial u_4} = 0,017333$$

B.2 DETALHAMENTO DOS CÁLCULOS DO EXEMPLO DO CAPÍTULO IV

Prosseguindo so cálculos para $DP'(x_j)$, $DF'(x_j)$, $H(x_j)$ e $J(x_j)$ para cada equipamento, temos:

para o equipamento e_2 : (capacidade = 20MW)

Da Tabela IV.4, temos:

$$DP'(0) = p'(0) - p'(0-20) = 0,02$$

$$DP'(20) = p'(20) - p'(20-20) = -0,02$$

$$DP'(30) = p'(30) - p'(30-20) = 0,98$$

$$DP'(50) = p'(50) - p'(50-20) = -0,98$$

$$DF'(0) = f^{in}(0) - f^{in}(0-20) = 0,0098$$

$$DF'(20) = f^{in}(20) - f^{in}(20-20) = -0,0098$$

$$DF'(30) = f^{in}(30) - f^{in}(30-20) = -0,0098$$

$$DF'(50) = f^{in}(50) - f^{in}(50-20) = 0,0098$$

$$H(0) = (1/p(0)) [DF'(0) + (\mu_2 - \lambda^{in}(0)) \times DP'(0)] = 0$$

$$J(0) = (1/p(0)) [-DF'(0) + (\lambda_2 + \lambda^{in}(0)) \times DP'(0)] = 25$$

$$H(20) = (1/p(20))[DF'(20) + (\mu_2 - \lambda^{in}(20))xDP'(20)] = -0,51020408$$

$$J(20) = (1/p(20))[-DF'(0) + (\lambda_2 + \lambda^{in}(0))xDP'(20)] = 0$$

$$H(30) = (1/p(30))[DF'(30) + (\mu_2 - \lambda^{in}(30))xDP'(30)] = 0$$

$$J(30) = (1/p(30))[-DF'(30) + (\lambda_2 + \lambda^{in}(30))xDP'(30)] = 25$$

$$H(50) = (1/p(50))[DF'(50) + (\mu_2 - \lambda^{in}(50))xDP'(50)] = -0,51020408$$

$$J(50) = (1/p(50))[-DF'(50) + (\lambda_2 + \lambda^{in}(50))xDP'(50)] = 0$$

para o equipamento e_3 (capacidade = 10MW)

Da Tabela IV.6, temos:

$$DP'(0) = p'(0) - p'(0-10) = 1$$

$$DP'(10) = p'(10) - p'(10-10) = -1$$

$$DF'(0) = f^{in}(0) - f^{in}(0-10) = 0$$

$$DF'(10) = f^{in}(10) - f^{in}(10-10) = 0$$

$$H(0) = (1/p(0))[DF'(0) + (\mu_3 - \lambda^{in}(0))xDP'(0)] = 0$$

$$J(0) = (1/p(0))[-DF'(0) + (\lambda_3 + \lambda^{in}(0))xDP'(0)] = 3,645$$

$$H(10) = (1/p(10))[DF'(20) + (\mu_3 - \lambda^{in}(20))xDP'(10)] = -0,2916$$

$$J(10) = (1/p(10))[-DF'(0) + (\lambda_3 + \lambda^{in}(0))xDP'(10)] = 0$$

para o equipamento e_4 , só há diferença para os valores de $H(x_j)$ e $J(x_j)$, que são :

$$H(0) = (1/p(0))[DF'(0) + (\mu_4 - \lambda^{in}(0))xDP'(0)] = 0$$

$$J(0) = (1/p(0))[-DF'(0) + (\lambda_4 + \lambda^{in}(0))xDP'(0)] = 29,2410$$

$$H(20) = (1/p(20))[DF'(20) + (\mu_4 - \lambda^{in}(20))xDP'(20)] = -0,172$$

$$J(20) = (1/p(20))[-DF'(0) + (\lambda_4 + \lambda^{in}(0))xDP'(20)] = 0$$

A seguir, para o cálculo da sensibilidade da LOLP, é detalhada a integração dos demais modos de falha:

2) Integrando o Modo de Falha X_2 :

$$\frac{\partial \text{LOLP}(X_2)}{\partial u_1} = \frac{\partial p_1(0)}{\partial u_1} p_2(10)p_3(0) = 0,001074$$

$$\frac{\partial \text{LOLP}(X_2)}{\partial u_2} = \frac{\partial p_1(0)}{\partial u_2} p_2(10)p_3(0) = 0,001074$$

$$\frac{\partial \text{LOLP}(X_2)}{\partial u_3} = p_1(0) \frac{\partial p_2(10)}{\partial u_3} p_3(0) = -0,00000234$$

$$\frac{\partial \text{LOLP}(X_2)}{\partial u_4} = p_1(0) p_2(10) \frac{\partial p_3(0)}{\partial u_4} = 0,0003704$$

3) Integrando o Modo de Falha X_3 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{LOLP}(X_3)}{\partial u_1} &= \frac{\partial p_1(50)}{\partial u_1} p_2(0) p_3(0) + \frac{\partial p_1(30)}{\partial u_1} p_2(0) p_3(0) + \frac{\partial p_1(20)}{\partial u_1} p_2(0) p_3(0) = \\ &= -0,00000866 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{LOLP}(X_3)}{\partial u_2} &= \frac{\partial p_1(50)}{\partial u_2} p_2(0) p_3(0) + \frac{\partial p_1(30)}{\partial u_2} p_2(0) p_3(0) + \frac{\partial p_1(20)}{\partial u_2} p_2(0) p_3(0) = \\ &= -0,00000866 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{LOLP}(X_3)}{\partial u_3} &= p_1(50) \frac{\partial p_2(0)}{\partial u_3} p_3(0) + p_1(30) \frac{\partial p_2(0)}{\partial u_3} p_3(0) + p_1(20) \frac{\partial p_2(0)}{\partial u_3} p_3(0) = \\ &= 0,0058456 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{LOLP}(X_3)}{\partial u_4} &= p_1(50) p_2(0) \frac{\partial p_3(0)}{\partial u_4} + p_1(30) p_2(0) \frac{\partial p_3(0)}{\partial u_4} + p_1(20) p_2(0) \frac{\partial p_3(0)}{\partial u_4} = \\ &= 0,0740445 \end{aligned}$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C.K.Pang, A.J.Wood, "Multi-Area Generation System Reliability Calculations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, pp 508-517, Março/Abril de 1975.
- [2] E.Jamouille, "Reliability Evaluation", in *Power System Planning and Operation*, edited by E.El-Abiad, McGraw Hill, 1983.
- [3] D.P.Clancy, G.Gross, F.Wu, "A Decomposition-Monte Carlo Approach for Multi-Area Reliability Calculations", *7th Power System Computation Conference*, Lausanne, 1981.
- [4] G.C.Oliveira, S.H.F.Cunha, M.V.F.Pereira, "A Direct Method for Reliability Evaluation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-2, No. 4, Novembro de 1987.
- [5] F.Lee, "Multi-Area Reliability Evaluation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-2, No. 4, Novembro de 1987.
- [6] C.Singh, A.Lago-Gonzalez, "Improved Algorithms for Multi-Area Reliability Evaluation Using the Decomposition/Simulation Approach", paper No. 88 SM 691-8, *1988 IEEE Summer Meeting*, Portland.
- [7] A.C.G. Melo, G.C. Oliveira, S.H.F. Cunha, M.V.F. Pereira, "Analytically Based Frequency and Duration Calculations for Multi-Area Reliability Evaluation", *11th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Avignon, France, #0 de Agosto a 4 de Setembro de 1993
- [8] A.D.Patton, N.H.Tram, "Sensitivity of Generation Reliability Indices to Generator Parameter Variations", *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-97, No. 4, Julho/Agosto de 1978.
- [9] C.Singh, R.Billinton, "Practical Application of the Frequency and Duration Method of Generating Capacity Reliability Evaluation", *7th PICA Conference*, Maio de 1971.
- [10] G.J. Anders, "A Novel Approach to Frequency and Duration Analysis and Uncertainty Considerations for Radial and Two Interconnected Systems", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-102, No. 7, Julho de 1983.

- [11] G. Hamoud, R. Billinton, "Uncertainty Considerations in Frequency and Duration Analysis for Radial and Two Interconnected Systems", *IEEE PES Winter Meeting*, Paper 82 WM 025-5, New York, Fevereiro de 1982.
- [12] G.J. Anders, *Probability Concepts in Power Systems*, Wiley Interscience, New York, 1989.
- [13] A.C.G.Melo, M.V.F.Pereira, "Sensitivity Analysis of Reliability Indices with Respect to Equipment Failure and Repair Rates", paper No. 94 SM 577-7 PWRs, 1994 *IEEE PES Summer Meeting*, San Francisco, CA, 24 a 28 de Julho de 1994
- [14] R.V.Lício, A.C.G.Melo, J.L.Araújo, "Sensitivity Analysis of Multi-Area Reliability Indices with Respect to Equipment Failure and Repair Rates" 1994 4^o PMAPS, Rio de Janeiro, RJ, Brasil; 26 a 29 de Setembro de 1994.
- [15] L.Ford, D.Fulkerson, "Flows in Network", *Princeton University Press*, 1962
- [16] J. Kleijnen, "Statistics Techniques in Simulation Part I", *Marcel Decker*, New York, 1974
- [17] R.N. Allan, A.M. Leite da Silva, A. Abu-Nasser, R.C. Burchett, "Discrete Convolution in Power System Reliability", *IEEE Transactions*, Vol. R-30, pp.452-456, Dezembro 1981
- [18] R. Billinton, R.N. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques", *Pitman Books*, 1983
- [19] A.C.G. Melo, "Avaliação da Confiabilidade da Capacidade de Geração Através do Método de Frequência e Duração", *Tese de Mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-RJ, Agosto de 1986
- [20] A.C.G. Melo, G.C. Oliveira, S.H.F. Cunha, "Métodos para Cálculo de Confiabilidade em Subsistemas Hidrotérmicos Interligados", *Relatório Técnico* Centro de Pesquisas Elétricas - CEPEL, Projeto CONFINT, Rio de Janeiro, Novembro de 1992.
- [21] A.M. Leite da Silva, A.C.G. Melo, S.H.F. Cunha, "A Frequency and Duration Method for Reliability Evaluation of Large Scale Hydrothermal Generating Systems", *IEE Proceedings Pt. C*, Vol 138, N^o 1, Janeiro de 1991
- [22] A.C.G.Melo, M.V.F. Pereira, A.M.Leite da Silva, "A Conditional Probability Approach to the Calculation of Frequency and Duration in Composite Reliability Evaluation", *paper n^o 92, SM 425-9 PWRs*, 1992 *IEEE - Summer Power Meeting*, Seattle.

- [23] X. Wang , C. Potle "A Concise Frequency and Duration Approach to Generating System Reliability Studies", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-102, N° 8, August 1983.
- [24] C. Singh, "Forced Frequency Balancing Technique for Discrete Capacity System", *IEEE Trans. on Reliability*, Vol r-32, October 1983
- [25] A. C. G Melo, "Cálculo dos Índices de Freqüência e Duração na Avaliação da Confiabilidade Composta de Sistemas de Geração e Transmissão de Grande Porte", *Tese de Doutorado*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-RJ, Outubro de 1990.
- [26] A. Lago-Gonzalez, C. Singh "Modeling of Generating Unit Planned Outages in the Decomposition-Simulation Approach for Multi-Area Reliability Calculations", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 4, N 2, August 1989.
- [27] CIER - Subcomitê de Operação e Manutenção de Sistemas Elétricos, "Manual de Estatísticas de Desligamentos em Sistemas Elétricos : Etapa de Geração", Relatório Técnico, 1978.
- [28] M. V. S. Pereira, M. E. P. Maceira, G. C. Oliveira, L. M. V. G. Pinto "Combining Analytical Models in Monte Carlo Technics in Probabilistic Power System Analysis" *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 7 N 1, February 1992.