

JOÃO MARCO FRANCISCHETTI FERREIRA

**AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE COMPOSTA
CONSIDERANDO ASPECTOS DINÂMICOS**

**FLORIANÓPOLIS
2000**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE COMPOSTA
CONSIDERANDO ASPECTOS DINÂMICOS

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
Como parte dos requisitos para a
Obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

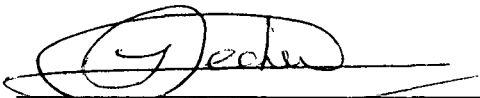
JOÃO MARCO FRANCISCHETTI FERREIRA

Florianópolis, Maio de 2000.

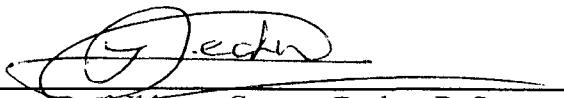
AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE COMPOSTA CONSIDERANDO ASPECTOS DINÂMICOS

João Marco Francischetti Ferreira

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em engenharia elétrica, Área de Concentração em Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’



Prof. Idemar Cassana Decker, D. Sc.
Orientador

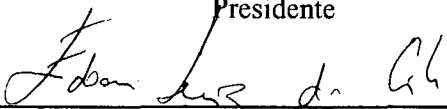


Prof. Idemar Cassana Decker, D. Sc.
Coordenador do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



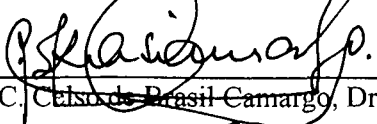
Prof. Idemar Cassana Decker, D. Sc.
Presidente



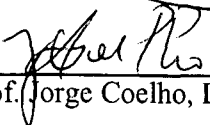
Prof. Edson Lutz da Silva, Dr. Eng.
Co-orientador



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph. D.



Prof. C. Celso de Brasil Camargo, Dr. Eng.



Prof. Jorge Coelho, D. Sc.

À minha esposa Ana Margarida.

Aos meus pais Pedro Paulo e Maria das Graças.

Aos meus irmãos João Leonardo e Joana Angélica.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e amigo Prof. Ildemar Cassana Decker, por ter me dado a oportunidade de desenvolver esse trabalho, pelas oportunas e essenciais orientações e sobretudo pelo apoio, amizade e compreensão demonstrados ao longo desses anos.

Ao meu co-orientador e também amigo Prof. Edson Luiz da Silva, cujos ensinamentos e orientações, sempre precisos e claros, foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ainda pelas oportunidades oferecidas que contribuíram sobremaneira para o meu desenvolvimento pessoal.

Ao CEPEL, em especial os pesquisadores Albert C. G. Melo, João Carlos de Oliveira Mello, Carlos Rubens R. Dornellas, André Marcato, que disponibilizaram uma versão do programa NH2 para estações de trabalho IBM que pôde ser utilizada neste trabalho. Também aos pesquisadores Ricardo Mota Henriques e Julio César Rezende Ferraz pela amizade, apoio e ajuda na solução de alguns problemas encontrados durante o processo de implementação.

Aos meus amigos e companheiros do LabPlan, em especial aos colegas que cursaram comigo as disciplinas de mestrado, Marcelo, Adriano e Erlon.

Aos funcionários da secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, em particular aos amigos Marcos e Wilson cujo convívio tive o prazer de desfrutar.

Aos colegas Nixon Savaris e Daniel Dotta pelo apoio técnico na fase de implementação e execução do programa paralelo desenvolvido.

Às minhas madrinhas Sônia e Maris Stella (*in memoriam*) por terem me acolhido durante o primeiro ano do mestrado e por todo apoio, carinho e amizade.

Aos meus pais Pedro Paulo e Maria das Graças que sempre deram todas as condições para que eu aqui chegasse e cujo exemplo de vida tenho sempre em mente.

À minha esposa Ana Margarida pelo amor, carinho e sobretudo pelo exemplo de dedicação aos trabalhos e estudos.

Acima de tudo a Deus.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE COMPOSTA CONSIDERANDO ASPECTOS DINÂMICOS

João Marco Francischetti Ferreira

Maio/2000

Orientador: Ildemar Cassana Decker, D. Sc.

Co-orientador: Edson Luiz da Silva, D. Sc.

Área de Concentração: Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Confiabilidade Composta, Estabilidade Transitória, Processamento Paralelo.

Números de Páginas: 93

Este trabalho apresenta uma metodologia para a inclusão da avaliação de segurança nos estudos de confiabilidade composta de sistemas de energia elétrica. A avaliação de segurança é feita através da Análise da Estabilidade Transitória de eventuais distúrbios no sistema. A avaliação da confiabilidade composta é realizada através de Simulação Monte Carlo Seqüencial, permitindo uma maior flexibilidade na modelagem dos componentes e respeitando a cronologia dos eventos. Os estados de operação pré-falta são obtidos através da análise de um Fluxo de Potência Ótimo não-linear pelo método dos pontos interiores. Para as análises de estabilidade transitória utiliza-se o método SLEP Iterativo através do programa SLEPM. São utilizados os sistemas IEEE-RTS79 (Reliability Test System - 79) e o IEEE-RTS96 para a avaliação da metodologia proposta. Os resultados obtidos demonstram que a análise determinística da estabilidade transitória nem sempre corresponde, como é normalmente considerado, à análise das situações mais pessimistas. A metodologia desenvolvida também é aplicada ao sistema Sul Brasileiro (SUL92). Para viabilizar, do ponto de vista computacional, tal aplicação, o presente trabalho apresenta os algoritmos utilizados na implementação de um programa baseado em técnicas de processamento paralelo. Os resultados obtidos com esta implementação apresentam ganhos significativos nos tempos computacionais.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

COMPOSITE RELIABILITY EVALUATION CONSIDERING DYNAMICS ASPECTS

João Marco Francischetti Ferreira

May/2000

Advisor: Ildemar Cassana Decker, D. Sc.

Co-supervisor: Edson Luiz da Silva, D. Sc.

Area of Concentration: Electrical Energy Systems Planning.

Keywords: Composite Reliability, Transient Stability, Parallel Processing.

Number of Pages: 93

This work presents a methodology for including the security assessment in the composite reliability studies of electrical energy systems. The security assessment is performed by transient stability analysis of occasional disturbances along the system. The composite reliability evaluation carried out through Sequential Monte Carlo Simulation, which allows flexibility in the components modelling and follows the chronology of the events. The pre-fault operation states are obtained analysing a non-linear Optimal Power Flow, which uses the Interior Point Method. For the transient stability analyses the SLEP Iterative method is used through the SLEPM program. The IEEE-RTS79 (Reliability Test System - 79) and the IEEE-RTS96 systems are used to test the methodology presented. The results obtained have shown that the deterministic transient stability analysis do not always correspond to the most pessimist analysis, as it is normally considered. The methodology developed is also applied to the Brazilian South System (SUL92). For this application become viable, from computational point of view, this works presents also the algorithms used in a program implemented using parallel processing techniques. The results obtained with this program presents substantial improvements in the computational times.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
CAPÍTULO 1 Introdução	1
1.1 - Considerações Gerais	1
1.2 - Revisão Bibliográfica	2
1.3 - Estrutura do Trabalho	4
CAPÍTULO 2 Avaliação da Confiabilidade Composta de SEE	6
2.1 - Introdução	6
2.2 - Análise de Adequação	6
2.2.1 - Representação por Espaço de Estados	7
2.2.1.1 - Seleção de Estados por Enumeração	9
2.2.1.2 - Seleção de Estados por Simulação Monte Carlo Não-seqüencial	10
2.2.2 - Representação Cronológica	11
2.2.3 - Índices de Confiabilidade	15
2.2.4 - Avaliação dos Estados	16
2.3 - Análise de Segurança	16
2.3.1 - Análise Probabilística da Estabilidade Transitória	17
2.3.2 - Modelagem dos Componentes	19
2.3.3 - Índices de Confiabilidade	21
2.4 - Conclusões	22
CAPÍTULO 3 Confiabilidade Composta Considerando Aspectos Dinâmicos	24
3.1 - Introdução	24
3.2 - Seleção dos Estados	24

3.3 - Modelagem dos Componentes	25
3.3.1 - Geradores.....	25
3.3.2 - Carga	26
3.3.3 - Linhas de Transmissão e Transformadores	26
3.3.4 - Sistema de Proteção.....	28
3.4 - Análise dos Estados.....	29
3.5 - Geração e Análise das Séries Sintéticas	31
3.6 - Índices de Desempenho	33
3.7 - Aplicação da Metodologia.....	34
3.7.1 - Resultados para o Sistema IEEE-RTS79.....	35
3.8 - Conclusão	37
CAPÍTULO 4 Aplicação de Processamento Paralelo	39
4.1 - Introdução.....	39
4.2 - Paradigma da Computação Paralela	39
4.3 - Modelo de Programação.....	40
4.4 - Balanceamento da Carga	41
4.5 - Distribuição de Números Aleatórios	42
4.6 - Sistema PVM.....	44
4.7 - Conclusão	45
CAPÍTULO 5 Aplicações e Análises dos Resultados	46
5.1 - Introdução.....	46
5.2 - Sistemas Computacionais	46
5.3 - Sistemas Teste	47
5.4 - Avaliação dos Índices de Confiabilidade	48
5.4.1 - Resultados para o Sistema RTS79.....	48
5.4.2 - Resultados para o Sistema RTS96.....	49
5.4.3 - Resultados para o Sistema SUL92	51
5.5 - Avaliação de Desempenho do Programa Paralelo	53
5.5.1 - Método para Análise do Desempenho Computacional.....	54
5.5.2 - Resultados de Desempenho Computacional.....	55

5.6 - Conclusão	59
CAPÍTULO 6 Conclusões Gerais e Sugestões para Trabalhos Futuros	60
6.1 - Conclusões Gerais	60
6.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros	63
APÊNDICE A Dados do Sistema IEEE RTS79.....	65
A.1 - Introdução.....	65
A.2 - Diagrama Unifilar.....	65
A.3 - Dados dos Geradores.....	67
A.4 - Dados da Rede.....	67
A.5 - Dados da Carga.....	69
A.6 - Análise de Adequação do Sistema RTS79	69
APÊNDICE B Dados do Sistema IEEE RTS96.....	71
B.1 - Introdução	71
B.2 - Dados Adicionais de Transmissão	71
B.3 - Diagrama Unifilar.....	72
B.4 - Análise de Adequação do Sistema RTS96	73
APÊNDICE C Dados do Sistema SUL92	74
C.1 - Introdução	74
C.2 - Dados dos Geradores	74
C.3 - Análise de Adequação do Sistema SUL92	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo de Markov a dois estados

Figura 2.2 – Modelo a três estados

Figura 2.3 – Modelo para N tipos de falta

Figura 3.1 – Modelo de Markov a dois estados

Figura 3.2 – Modelo 1 para elementos da rede

Figura 3.3 – Modelo 2 para elementos da rede

Figura 3.4 – Modelo 3 para elementos da rede

Figura 3.5 – Análise das Transições - (a) Modelo 1, (b) Modelo 2

Figura 3.6 – Análise das Transições - Modelo 3

Figura 4.1 – Paradigma da Computação Paralela – Paralelismo de Dados

Figura 4.2 – Fluxogramas dos Processos - (a) Mestre, (b) Escravo

Figura 4.3 – Configuração para Distribuição dos Números Aleatórios

Figura 5.1 – Participação dos Elementos nas Ocorrências de Instabilidade – RTS96

Figura 5.2 – Participação dos Elementos nas Ocorrências de Instabilidade – SUL92

Figura 5.3 – Tempos Computacionais para o Sistema RTS79

Figura 5.4 – Tempos Computacionais para o Sistema RTS96

Figura 5.5 – Tempos Computacionais para o Sistema SUL92

Figura 5.6 – Curva de *Speedup*

Figura 5.7 – Curva de Eficiência

Figura A.1 – Diagrama Unifilar – RTS79

Figura B.1 – Diagrama Unifilar – RTS96

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultados IEEE-RTS79.....	35
Tabela 3.2 – Linhas com maior influência - IEEE-RTS79.....	36
Tabela 3.3 – Resultados IEEE-RTS79 com duplicação da LT 7-8.....	36
Tabela 3.4 – Linhas com maior influência - IEEE-RTS79 com LT 7-8 duplicada.....	37
Tabela 5.1 – Parâmetros dos SEE utilizados nas simulações.....	48
Tabela 5.2 – Resultados para o sistema IEEE-RTS79 com sobrecarga de 15%.....	49
Tabela 5.3 – Resultados do sistema IEEE-RTS96.....	50
Tabela 5.4 – Resultados do Sistema SUL92.....	52
Tabela 5.5 – Resultados Análise Determinística do Sistema SUL92.....	52
Tabela 5.6 – Simulação com Processamento Distribuído e Seqüencial - RTS79.....	54
Tabela 5.7 – Tempos Computacionais das Simulações.....	56
Tabela 5.8 – Número de AET Realizadas.....	56
Tabela 5.9 – Resultados de <i>Speedup</i> e Eficiência.....	57
Tabela A.1 – Dados dos Geradores do sistema IEEE-RTS79.....	67
Tabela A.2 – Dados do Compensador Síncrono do sistema IEEE-RTS79.....	67
Tabela A.3 – Dados de transmissão e transformadores.....	68
Tabela A.4 – Dados da carga.....	69
Tabela A.5 – Resultados da Análise de Adequação do Sistema RTS96.....	70
Tabela B.1 – Dados dos Elementos de rede Adicionais do Sistema IEEE-RTS79.....	71
Tabela B.2 – Resultados da Análise de Adequação do Sistema RTS96.....	73
Tabela C.1 – Dados dos Geradores da região Sul.....	75
Tabela C.2 – Dados dos Geradores equivalentes externos à região Sul.....	75
Tabela C.3 – Resultados da Análise de Adequação do Sistema SUL92.....	76

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 - Considerações Gerais

A confiabilidade de Sistemas de Energia Elétrica (SEE) pode ser avaliada através de índices de desempenho relacionados a dois aspectos: adequação e segurança. Na análise de adequação é avaliado se os consumidores estão sendo atendidos de acordo com os padrões de qualidade adotados e se os componentes do sistema estão operando dentro de seus limites. Na análise de segurança estuda-se a capacidade de o sistema em continuar operando mesmo após a ocorrência de distúrbios [19, 26].

Atualmente, a maioria das propostas de metodologias de avaliação da confiabilidade composta de SEE tem levado em consideração apenas os aspectos relacionados com a análise de adequação [12, 14, 17, 38]. Neste tipo de análise considera-se que, após a falha de qualquer um dos componentes, o sistema sempre alcançará um novo ponto de operação, o que não necessariamente ocorrerá devido a uma eventual perda de estabilidade durante a transição entre estados.

A avaliação de segurança envolve dois aspectos distintos: o primeiro diz respeito ao comportamento transitório do sistema frente a um distúrbio, ou seja, sob este aspecto a análise de segurança determinará a capacidade de o sistema se manter estável quando na presença de falhas. O segundo aspecto está relacionado a melhoria da segurança e, nestes estudos, objetiva-se a determinação de ações preventivas que eliminem ou diminuam as probabilidades do SEE tornar-se instável para um conjunto selecionado de contingências [27].

Tipicamente, a análise do comportamento dinâmico frente a grandes perturbações, que inclui basicamente a Análise da Estabilidade Transitória (AET), é realizada após a análise de adequação e utilizando-se métodos determinísticos.

A análise determinística, contudo, considera apenas um conjunto muito pequeno de estados e ignora outros igualmente importantes, tanto do ponto de vista da probabilidade de ocorrência, quanto do impacto causado ao sistema. É importante destacar que os métodos determinísticos apresentam características conservativas em certos aspectos, como considerar somente faltas causadas por curtos-circuitos trifásicos, e otimistas em outros, como considerar a operação de todos os geradores do sistema.

O presente trabalho apresenta uma metodologia que utiliza a AET para a avaliação da segurança nos estudos de confiabilidade. Para medida do desempenho dos sistemas utilizou-se dois índices: tempo médio para instabilidade e probabilidade de ocorrência de instabilidade. A avaliação da confiabilidade composta é realizada utilizando-se Simulação Monte Carlo Seqüencial. Para diminuir o tempo computacional necessário à convergência do processo e permitir a aplicação da metodologia em sistemas reais de grande porte, foram utilizadas técnicas de processamento paralelo.

1.2 - Revisão Bibliográfica

A aplicação da confiabilidade composta em sistemas de potência é realizada, atualmente, considerando-se somente os aspectos de adequação. Para a inclusão da análise de segurança, em particular a AET, na avaliação da confiabilidade composta vários aspectos devem ser ainda tratados para permitir a aplicação a sistemas reais de grande porte.

O primeiro trabalho a realizar a AET por modelos probabilísticos, apresentado por Billinton e Kuruganty em 1980 [3], propõe como mérito de desempenho o índice de Probabilidade de Estabilidade. O índice, determinado por métodos analíticos, considera vários aspectos probabilísticos associados às linhas de transmissão e que influenciam a AET, entre eles o tipo e localização da falta e a operação do sistemas de proteção. A metodologia é aplicada à um sistema simples consistindo apenas de uma máquina ligada à uma barra infinita e a AET é realizada pelo método de áreas iguais e considera-se o gerador sempre em operação. Os autores apresentam ainda [4] os aspectos da modelagem do sistema de proteção na determinação probabilística da estabilidade transitória.

Em outro artigo [5] os mesmos autores determinam o índice de “Probabilidade de Estabilidade” para um pequeno sistema multimáquina aplicando-se a mesma metodologia, porém as AET são realizadas através de simulação dinâmica no tempo. São obtidos índices

para cada uma das linhas de transmissão do sistema e um índice global é calculado ponderando-se os índices individuais pelas respectivas taxas de falha das linhas. Contudo, a metodologia utilizada não considera os aspectos estocásticos associados aos geradores e cargas do sistema o que caracteriza uma análise otimista do sistema. Por utilizar métodos analíticos, a metodologia torna-se inviável computacionalmente para análises de sistemas de grande porte.

As referências [6] e [7] apresentam uma modelagem probabilística de distúrbios em sistemas de potência. O modelo estocástico dos distúrbios inclui variações de geração, tipo e localização das faltas e elaborados esquemas de proteção. Os distúrbios são selecionados através de simulação Monte Carlo e são analisados através de métodos diretos.

A avaliação conjunta dos problemas de adequação e segurança, com aplicação em um sistema real, são, pela primeira vez, abordados por Dodu e Merlin [9]. Neste trabalho, classificam-se os cortes de carga em estáticos e dinâmicos. Os cortes de carga são determinados pelas regras adotadas pelo controle da operação do sistema e não incluem regras de atuação para estabilidade transitória.

Um estudo de estabilidade transitória probabilística é proposto por Hsu e Chang. O estudo considera a modelagem probabilística da carga e também da falta (tipo e localização). O índice "Probabilidade de Instabilidade" é calculado para uma determinada configuração de rede com base na distribuição do tempo crítico de eliminação da falta, que é obtida após a análise de todos os casos possíveis. A metodologia, que utiliza uma metodologia analítica, foi aplicada a um sistema real de pequeno porte.

Em Porreta et al. [15] é realizado um estudo integrado de adequação e segurança baseado em um lista de contingências pré-definidas, para as quais são determinados limites de segurança. A metodologia é , então, aplicada ao sistema IEEE RTS79.

Leite da Silva et al. [19] propõem, para os elementos série do sistema, modelos de Markov a múltiplos estados que consideram aspectos probabilísticos que afetam a estabilidade transitória. A confiabilidade dos SEE é determinada através dos índices usuais utilizados nos estudo de adequação (LOLP, etc.), porém, separando-se os cortes de carga causados por problemas estáticos e dinâmicos. Dois outros índices são também utilizados: primeiro impacto e tempo médio para instabilidade. Os estados a serem avaliados são selecionados por enumeração das contingências simples e os cálculos dos índices são obtidos por métodos analíticos o que dificulta a aplicação em sistemas de grande porte.

As referências [34] e [40] apresentam uma metodologia para avaliação estática e dinâmica da confiabilidade de SEE. Índices relacionados à adequação e segurança são determinados de forma integrada utilizando-se Simulação Monte Carlo Seqüencial e os modelos de estados propostos por Leite da Silva et al. Os índices tradicionalmente utilizados em estudos de confiabilidade são separados para os problemas estáticos e dinâmicos. São calculados ainda o tempo médio para instabilidade (MTTI – *Mean Time To Instability*) e a Probabilidade de Instabilidade. Os índices relacionados à dinâmica dos sistemas apresentaram convergência bem mais lenta comparados com os índices de adequação, como a avaliação dos índices é realizada de forma integrada isto elevou consideravelmente o tempo necessário para convergência das simulações.

1.3 - Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto por seis capítulos, os quais são descritos, em linhas gerais, a seguir.

No presente capítulo é realizada uma breve abordagem dos aspectos relacionados a adequação e segurança nos estudos de confiabilidade composta. Neste mesmo capítulo é apresentado também uma descrição sucinta dos principais trabalhos relativos à análise de segurança nos estudos de confiabilidade.

No Capítulo 2 são descritos os aspectos principais da avaliação da confiabilidade composta em sistemas de potência, considerando a análise de adequação e de segurança. Para a análise de adequação são abordados as diferentes modelagens utilizadas tais como: representação por espaço de estados e cronológica. A representação por espaço de estados inclui os seguintes métodos de seleção de estados: enumeração e simulação Monte Carlo não-seqüencial. A representação cronológica inclui a simulação Monte Carlo seqüencial. Para a análise de segurança apresentam-se os principais aspectos probabilísticos que influenciam a AET, bem como, modelos e índices de confiabilidade associados.

O Capítulo 3 aborda a metodologia desenvolvida neste trabalho para inclusão da AET nos estudos de confiabilidade composta. A metodologia utiliza uma representação cronológica através da Simulação Monte Carlo Seqüencial. Os algoritmos e fluxogramas utilizados para a simulação e análise dos estados são apresentados. Descreve-se também os

modelos e simplificações adotadas para os elementos do sistema. A metodologia é, então, aplicada ao sistema IEEE RTS79.

No Capítulo 4 encontram-se descritos os aspectos relacionados à implementação da metodologia desenvolvida utilizando-se técnicas de processamento paralelo. O capítulo apresenta uma sucinta descrição do sistema PVM (*Parallel Virtual Machine*) utilizado no desenvolvimento e execução do programa paralelo. O paradigma da computação paralela e o modelo de programação utilizados são descritos, incluindo-se os fluxogramas utilizados. O capítulo aborda, ainda, as técnicas utilizadas para balanceamento da carga de processamento e o problema da distribuição de números aleatórios entre os processadores.

Os resultados da aplicação da metodologia a três SEE são apresentados no Capítulo 5. São utilizados dois sistemas teste do IEEE RTS79 e RTS96, e de um sistema equivalente da região Sul do Brasil (SUL92). Apresenta-se também, neste capítulo, os resultados de desempenho e eficiência do programa paralelo implementado.

No sexto e último capítulo são descritas as principais conclusões relacionadas a este trabalho e as sugestões para trabalhos futuros na continuidade desta linha de pesquisa.

Nos apêndices A, B e C apresentam-se os dados referentes aos sistemas teste utilizados neste trabalho.

CAPÍTULO 2

Avaliação da Confiabilidade Composta de SEE

2.1 - Introdução

A avaliação da confiabilidade composta de SEE compreende a análise do sistema segundo dois aspectos: adequação e segurança. Na análise de adequação é avaliado se o suprimento de energia elétrica requerida pelos consumidores está sendo realizado, se está dentro dos padrões de qualidade adotados e se os componentes do sistema estão operando dentro de seus limites. Na análise de segurança estuda-se a habilidade do sistema em suportar distúrbios como por exemplo a perda de um dos componentes do sistema devido a ocorrência de um curto-circuito.

Os estudos de adequação fazem uso basicamente de análises de regime permanente para a determinação de índices de desempenho do sistema. Para a análise de segurança, entretanto, necessita-se estudar também o comportamento dinâmico do sistema para que se possa avaliar a capacidade deste sistema em suportar distúrbios. A seguir serão apresentados os conceitos e técnicas básicas utilizadas nas análises de adequação e segurança que compõem a avaliação da confiabilidade de sistemas compostos por geração e transmissão.

2.2 - Análise de Adequação

Um sistema de potência é formado por vários componentes, sendo que os principais tipos de componentes são: geradores, linhas de transmissão, transformadores e carga. A caracterização do estado operativo de um sistema é dada pelos estados operativos de cada componente do sistema. A avaliação da confiabilidade composta sob o aspecto da adequação determina índices de desempenho (índices de confiabilidade) que medem a capacidade do sistema, em seus vários estados operativos, atender a carga dos consumidores.

Estes índices de confiabilidade composta são usualmente calculados utilizando duas representações distintas: espaço de estados e cronológica. Na primeira representação os estados avaliados não possuem nenhuma relação de cronologia entre si, ou seja, um estado analisado não mantém nenhuma relação com os estados previamente avaliados ou que ainda serão avaliados [22]. Na representação cronológica, entretanto, os estados são avaliados seqüencialmente no tempo, simulando, desta forma, um histórico da operação do sistema [22].

2.2.1 - Representação por Espaço de Estados

Um estado do sistema pode ser representado por $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)$, onde x_i representa o estado do i -ésimo componente e m é o total de componentes do sistema. Cada componente do sistema é usualmente representado por modelos de Markov. Para uma linha de transmissão, por exemplo, pode-se representá-la por um modelo de Markov a dois estados visto que este componente pode estar em operação normal ou encontrar-se desligado devido, possivelmente, à ocorrência de alguma falha (curto-circuito, falha mecânicas na estrutura, falha humana, etc.).

O modelo de Markov a dois estados pode ser visualizado na Figura 2.1, onde λ e μ representam, respectivamente, as taxas de falha e de reparo do componente e são calculados a partir dos tempos de residência do componente em cada estado.

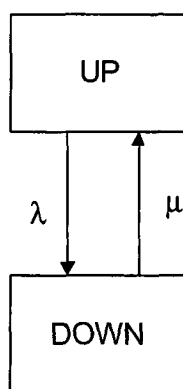


Figura 2.1 – Modelo de Markov a dois estados

Com o objetivo de aprimorar a modelagem dos componentes pode-se, também, utilizar uma modelagem multiestados. Para unidades geradoras esta modelagem possibilita

definir estados intermediários entre a geração mínima e máxima deixando os modelos, principalmente de usinas térmicas, mais próximos da realidade. Também para a carga esta modelagem traz significativa melhoria permitindo a representação de vários patamares de carga.

O conjunto de todos os possíveis estados de um sistema, que é formado pela combinação de todos os estados dos componentes, é chamado de espaço de estados do sistema e é denotado por X . Para cada estado x do sistema pode-se calcular a sua probabilidade de ocorrência $P(x)$ a partir das probabilidades de ocorrência de cada componente $P(x_i)$.

A avaliação de desempenho de cada estado x é feita através de funções teste $F(x)$. Como x é um vetor aleatório, $F(x)$ também será aleatório e seu valor esperado é dado por:

$$E(F) = \sum_{x \in X} F(x) \cdot P(x) \quad (2.1)$$

Para um índice de confiabilidade como por exemplo a Probabilidade de Corte de Carga (LOLP – *Loss Of Load Probability*) pode-se definir uma função $F(x)$ tal que:

$$F(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ se } x \text{ é um estado de falha (há corte de carga)} \\ 0 & , \text{ se } x \text{ é um estado de sucesso (não há corte de carga)} \end{cases} \quad (2.2)$$

Os índices de adequação são determinados a partir de uma escolha conveniente para $F(x)$ e utilizando-se a equação acima para calcular o seu valor esperado.

De uma forma geral, a avaliação da confiabilidade composta de SEE pode ser realizada seguindo as seguintes etapas:

1. Seleção do estado do sistema;
2. Análise do estado selecionado;
3. Cálculo dos índices de desempenho;
4. Verificação da convergência – Precisão da estimativa.

As metodologias atualmente existentes para a avaliação da confiabilidade composta diferem basicamente no método de seleção dos estados a serem analisados e em consequência disto nos cálculos dos índices de desempenho. Na representação por espaço de

CAPÍTULO 2 -

estados a seleção dos estados pode ser feita seguindo duas metodologias: enumeração e simulação Monte Carlo não-sequencial.

2.2.1.1 - Seleção de Estados por Enumeração

O processo de seleção de estados por enumeração consiste em avaliar cada estado x pertencente a X . Deve-se ressaltar, entretanto, que o número de estados do espaço de estados X cresce exponencialmente com o número de componentes do vetor x . Para um sistema com 50 componentes e utilizando-se o modelo de Markov a dois estados, o espaço de estados X é formado por 2^{50} estados. Para sistemas reais de grande porte o número de estados a serem avaliados é extremamente elevado o que inviabiliza, do ponto de vista computacional, a utilização desta metodologia de seleção de estados.

Analisando a equação (2.1) observa-se que estados com pouca probabilidade de ocorrência terão pouca influência no cálculo das estimativas. Desta forma, para viabilizar a utilização desta metodologia em sistemas de grande porte, pode-se reduzir o espaço de estados a ser avaliado de forma que este espaço contenha os estados com as maiores probabilidades de ocorrência. Avaliando-se um subespaço X' que está contido em X pode-se calcular os limites mínimos e máximos das estimativas através das equações (2.3) e (2.4).

$$E(F)_{\min} = \sum_{x \in X'} F(x) \cdot P(x) + F_{\min}(x \notin X') \quad (2.3)$$

$$E(F)_{\max} = \sum_{x \in X'} F(x) \cdot P(x) + F_{\max}(x \notin X') \quad (2.4)$$

A diferença entre o limite máximo e mínimo para uma estimativa representa a incerteza desta estimativa. Se esta incerteza for pequena isto significa que os estados x pertencentes a X' possuem grandes probabilidades de ocorrência. Se X' possui poucos estados pode-se obter boas estimativas a partir de esforços computacionais aceitáveis.

Particularmente, quando se faz a avaliação isolada da confiabilidade de sistemas de transmissão, o método de enumeração se torna bastante atrativo pois elementos de transmissão possuem, normalmente, taxas de indisponibilidade baixas, bem como baixas probabilidades de ocorrência de contingências múltiplas. Assim, analisando apenas as con-

tingências de primeira ordem, é possível obter boas estimativas para os índices de desempenho.

Por outro lado, as unidades geradoras, geralmente, não possuem taxas de indisponibilidade tão baixas quanto as dos elementos de transmissão, nem são tão raras as ocorrências de contingências múltiplas. Desta forma, o método de seleção de estados por enumeração torna-se pouco atrativo quando se realiza a avaliação da confiabilidade composta de sistemas de energia elétrica (SEE).

2.2.1.2 - Seleção de Estados por Simulação Monte Carlo Não-seqüencial

Na simulação Monte Carlo não-seqüencial o processo de seleção de estados é realizado por sorteios. Os estados são sorteados de acordo com suas funções de Distribuição de Probabilidade $P(x)$. A avaliação da confiabilidade composta utilizando-se a simulação Monte Carlo não-seqüencial pode ser realizada seguindo os seguintes passos [22]:

1. Inicialize o número de estados $NS=1$;
2. Sorteie um vetor $x \in X$ a partir de sua distribuição de probabilidade $P(x)$;
3. Calcule $F(x)$ para o estado sorteado;
4. Faça a estimação de $E(F)$ como a média dos valores encontrados utilizando a equação abaixo:

$$\tilde{E}(F) = \frac{1}{NS} \sum_{j=1}^{NS} F(x_j); \quad (2.5)$$

5. Verifique a convergência do processo. Em caso de convergência a simulação estará terminada. Caso contrário, atualize o número de estados analisados, $NS=NS+1$, e volte ao passo (2).

O critério de convergência do processo é baseado na variância do estimador

$$V(\tilde{E}(F)) = \frac{V(F)}{NS}, \quad (2.6)$$

onde $V(F)$ é a variância da função teste $F(x)$ que pode ser estimada por:

$$\tilde{V}(F) = \frac{1}{NS-1} \sum_{j=1}^{NS} (F(x_j) - \tilde{E}(F))^2 \quad (2.7)$$

A incerteza do estimador é usualmente representada como o coeficiente de variação que pode ser calculada pela equação:

$$\beta = \frac{\sqrt{V(\tilde{E}(F))}}{\tilde{E}(F)} \quad (2.8)$$

A partir das equações (2.6) e (2.8) pode-se obter a equação (2.9) que fornece uma estimativa do número de estados a serem sorteados para uma dada incerteza β .

$$NS = \frac{V(F)}{[\tilde{E}(F)\beta]^2} \quad (2.9)$$

A equação (2.9) mostra que o esforço computacional, dado pelo número de estados sorteados NS , é inversamente proporcional ao quadrado da precisão desejada β , ou seja, o tamanho da amostra deve quadruplicar para reduzir β pela metade. Observa-se, também, que para uma mesma incerteza relativa β o esforço computacional tende a ser menor para estimar um valor elevado de um índice de desempenho.

2.2.2 - Representação Cronológica

Na representação cronológica os estados do sistemas são analisados de forma sequencial no tempo. Em decorrência disso, estados consecutivos do sistema diferem entre si apenas no estado de um dos componentes do sistema, ou seja, a representação cronológica faz uma simulação de um histórico da operação do sistema elétrico.

Deve-se ressaltar que a principal diferença desta representação em relação a representação por espaço de estado reside na forma de seleção dos estados a serem analisados e, em virtude disso, na forma em que os índices de desempenho são estimados.

Para a representação cronológica a estimativa de um índice de desempenho pode ser calculada por:

$$E(G) = \frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt \quad (.10)$$

Sendo T o período de simulação e G(t) a função teste que avalia em cada instante t o desempenho do sistema.

A forma mais usual de implementação da representação cronológica é a denominada Simulação Monte Carlo Seqüencial (SMCS). Nesta metodologia, simula-se o processo estocástico da operação do sistema através da análise de séries (seqüências) sintéticas de estados que, por sua vez, são determinadas a partir das probabilidades das durações de cada componente e da curva de carga.

Adotando-se o período anual como base para o cálculo dos índices de confiabilidade pode-se dividir o período de análise T em NA anos. Desta forma, pode-se gerar NA séries anuais e a equação (.10) pode ser rescrita como:

$$\tilde{E}(G) = \frac{1}{NA} \sum_{k=1}^{NA} G(y_k) \quad (.11)$$

onde:

NA é o número de séries anuais;

y_k é a série sintética de estados no ano k;

G(y_k) é a função para cálculo dos índices anuais da seqüência y_k .

A função de cálculo G(y_k) é determinada analisando-se cada estado da seqüência anual y_k . Embora não exista nenhuma restrição ao uso de períodos diferentes do anual, bases de tempo menores podem comprometer o cálculo dos índices devido ao truncamento ao final de cada período, e bases de tempo maiores podem onerar desnecessariamente a determinação dos índices.

De forma resumida, a SMCS pode ser realizada através dos seguintes passos [3]

1. Gere uma série sintética anual dos estados do sistema (y_k);
2. Analise cronologicamente cada estado x da seqüência y_k e acumule os resultados;
3. Calcule $G(y_k)$ a partir dos valores acumulados no passo anterior;
4. Estime o valor esperado dos índices anuais pela equação (2.11);
5. Verifique a convergência do processo. Se a precisão da estimativa for satisfatória pare, caso contrário, volte ao primeiro passo.

Para gerar uma seqüência anual dos estados do sistema (passo 1) é necessário que se conheça o tempo de residência de cada componente em um determinado estado operativo.

Modelos de Markov utilizam taxas de transição constantes o que implica em funções de distribuição de probabilidade exponenciais. Sendo assim, para um determinado componente i do sistema, sua respectiva função de distribuição de probabilidade de falha $F(t)$ pode ser determinada por:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda_i t} \quad (2.12)$$

onde: λ_i é a taxa de falha do componente i .

A função de distribuição de probabilidade de o componente estar operando $R(t)$ pode ser obtida por:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.13)$$

logo,

$$R(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (2.14)$$

Colocando t em evidência, temos:

$$t = -\frac{1}{\lambda_i} \ln R(t) \quad (2.15)$$

Desta forma, dado um valor para a probabilidade do componente estar em operação podemos determinar o tempo que o componente residirá neste estado (UP). O valor desta probabilidade pode, então, pode ser um número aleatório obtido a partir de uma função de distribuição uniforme. Desta forma, podemos determinar o tempo de residência de um componente em seu estado de operação por:

$$t_i^{UP} = \frac{1}{\lambda_i} (-\ln U) \quad (2.16)$$

onde U é um número amostrado de uma distribuição uniforme [0,1].

Analogamente, podemos definir o tempo de residência em que o componente permanecerá em falha através da equação:

$$t_i^{DN} = \frac{1}{\mu_i} (-\ln U) \quad (2.17)$$

onde: μ_i é a taxa de reparo do componente i;

Aplicando-se alternadamente as equações (2.16) e (2.17) pode-se determinar a seqüência de operação de cada componente num dado período. Ressalta-se que a representação cronológica permite o uso também de tempos de residência não exponenciais, bem como modelos de Markov multiestados para os componentes, o que representa uma maior flexibilidade na modelagem em relação à representação por espaço de estados.

Na determinação de uma série sintética, além dos tempos de residência dos estados dos componentes, é necessário que se especifique também a curva de carga do sistema. Uma das vantagens da simulação seqüencial é que esta permite a utilização de qualquer modelo cronológico de carga. O modelo da curva de carga pode ter, então, discretização mensal, semanal, diária ou horária e ainda representação por sistema, área ou barra.

Para obter o histórico da operação do sistema é necessário agregar os históricos individuais de todos os componentes e o modelo cronológico da carga. Esta tarefa pode ser realizada seguindo as etapas listadas a seguir:

1. Inicializar o tempo de simulação $t=0$ e o número de estados do sistema $n=1$;

2. Definir o estado inicial do sistema x_0 (através, por exemplo, de simulação não-seqüencial), sortear os tempos de residência T_i , $i=1,2,\dots,m$ de todos os componentes do estado x_0 e determinar o instante T_L de transição da carga;
3. Determinar o instante da transição do estado n , que corresponde ao mínimo entre os tempos de residência dos componentes e da transição da carga;
4. Calcular a duração do estado x_n ;
5. Avançar o tempo de simulação $t = t_n$;
6. Se a transição em t_n for devido a um componente i do sistema, sorteie um novo tempo de residência para este componente, de acordo com seu novo estado operativo. Caso a transição seja devido a carga, atualizar T_L com a próxima transição do modelo cronológico da carga;
7. Se o tempo de simulação atingiu o final do ano, esta série está terminada. Caso contrário incremente o contador de estados $n=n+1$ e volte ao passo (3).

O critério de convergência da SMCS é obtido da mesma forma que na simulação não-seqüencial, ou seja, ele é baseado na incerteza relativa do estimador que pode ser calculado por:

$$\beta = \frac{\sqrt{V(\tilde{E}(G))}}{\tilde{E}(G)} \quad (2.18)$$

2.2.3 - Índices de Confiabilidade

Nos estudos de adequação os índices devem refletir a capacidade do sistema em atender a carga dos consumidores. Os principais índices de adequação utilizados atualmente são:

- ◆ Probabilidade de Corte de Carga (Loss of Load Probability – LOLP);
- ◆ Valor Esperado da Frequência de Corte de Carga (Loss of Load Frequency – LOLF);
- ◆ Valor Esperado da Duração dos Cortes de Carga (Loss of Load Duration – LOLD);
- ◆ Valor Esperado da Potência Não Suprida (Expected Power Not Supplied – EPNS);
- ◆ Valor Esperado da Energia Não Suprida (Expected Energy Not Supplied – EENS).

Os índices de adequação são determinados a partir de uma escolha conveniente para $F(x)$ e utilizando-se uma das metodologias descritas anteriormente para o cálculo de seu valor esperado. Para o índice EPNS, por exemplo, define-se $F(x)$ da seguinte forma:

$$F(x) = \begin{cases} P_c & , \text{ se } x \text{ é um estado de falha (há corte de carga)} \\ 0 & , \text{ se } x \text{ é um estado de sucesso (não há corte de carga)} \end{cases} \quad (2.19)$$

onde P_c é o total de carga ativa cortado par o estado x .

2.2.4 - Avaliação dos Estados

A análise de cada estado, nos estudos de adequação, é realizada através do cálculo de fluxo de potência do sistema. O cálculo de fluxo de potência podem ser realizados utilizando-se uma modelagem linear para o sistema (fluxo DC) ou uma modelagem não-linear (fluxo não-linear). A principal vantagem da modelagem linearizada é que esta é bem mais rápida computacionalmente e simples em comparação à modelagem não-linear, entretanto, sua principal desvantagem é não permitir a avaliação do perfil de tensão e dos fluxos de potências reativas do sistema.

Concluído o cálculo do fluxo de potência deve-se verificar se há a violação de alguma restrição operativa do sistema. Em caso afirmativo deve-se determinar medidas corretivas para se eliminar a violação. A modelagem das medidas corretivas deve ser baseada em algoritmos de otimização e deve realizar o redespacho de potência dos geradores, ajustes dos taps dos transformadores e, como última alternativa, efetuar corte de carga. Para os casos em que se faz necessário o corte de carga o estado é dito um estado de falha e é a partir da contabilização desses estados que se determina os índices de adequação do sistema. Para os estados de falha, o algoritmo de medidas corretivas deve determinar também o montante mínimo de carga a ser cortado para que se possa determinar índices como a EPNS e EENS.

2.3 - Análise de Segurança

A análise de segurança verifica a capacidade do sistema em suportar distúrbios. Esta análise envolve dois aspectos distintos. O primeiro diz respeito ao comportamento

transitório do sistema frente a um distúrbio, ou seja, sob este aspecto a análise de segurança determinará a capacidade do sistema em se manter estável quando falhas ocorrerem. O segundo aspecto diz respeito às reservas de transmissão e geração do sistema. Sob este aspecto deseja-se determinar se a quantidade e o tempo de resposta das reservas do sistema são suficientes para evitar conseqüências indesejáveis, como o corte excessivo de carga, após a ocorrência de uma falha.

Observando-se os dois aspectos mencionados acima pode-se concluir que a principal diferença entre a análise de segurança e a análise de adequação está em que a segurança depende do comportamento dinâmico do sistema e adequação se restringe ao comportamento estático do sistema. Nos estudos de adequação determina-se a condição de operação em regime permanente após a ocorrência de uma falta, nos estudos de segurança, por outro lado, verifica-se se é possível atingir, após um distúrbio, este estado de operação em regime permanente.

As técnicas e modelos a serem utilizados na análise de segurança ainda não estão completamente definidas, contudo, recentes trabalhos apresentam algumas propostas para a inclusão da análise de segurança na avaliação da confiabilidade composta [19, 34 e 40]. O presente trabalho abordará somente os aspectos referentes ao comportamento dinâmico dos sistemas frente a grandes perturbações, que inclui basicamente a análise da estabilidade transitória (AET).

2.3.1 - Análise Probabilística da Estabilidade Transitória

A análise determinística da estabilidade transitória considera um conjunto de estados reduzidos, desconsiderando estados com probabilidades elevadas pois admite que os geradores do sistema estão sempre em operação. Ao fazer tal consideração obtêm-se uma situação pouco real. Portanto, a inclusão de aspectos probabilísticos na AET para os estudos de planejamento de SEE é de suma importância.

Uma pequena revisão dos trabalhos publicados referentes à análise probabilística da estabilidade transitória é apresentado em [30]. Os principais aspectos probabilísticos que influenciam na AET são [3]:

- ◆ Tipo de falta;
- ◆ Localização da falta;
- ◆ Processo de eliminação da falta;
- ◆ Condições de operação do sistema (estado pré-falta).

Deve-se ressaltar que entende-se como falta em um equipamento ou elemento do sistema a ocorrência de um curto-circuito no mesmo, diferentemente de falha, que representa a indisponibilidade de um elemento por quaisquer motivos, inclusive por ocorrência de curto-circuito.

Os principais tipos de falta que afetam a estabilidade transitória podem ser divididos em quatro categorias:

- ◆ Falta trifásica;
- ◆ Falta bifásica;
- ◆ Falta bifásica-terra;
- ◆ Falta fase-terra.

A maioria dos estudos de estabilidade transitória levam em consideração apenas as faltas trifásicas pois estas ocasionam, no sistema, um impacto maior do que os demais tipos de falta, entretanto, as faltas trifásicas possuem probabilidades de ocorrência bem menores do que os demais tipos de faltas e existe ainda o fato de que algumas falhas, mesmo sem a ocorrência de curto-circuito, podem levar o sistema à instabilidade.

As faltas localizadas mais próximas às fontes geradoras tendem a ser mais severas do ponto de vista da estabilidade transitória. O conhecimento da correta localização da falta terá maior influência quando as faltas ocorrerem ao longo de uma linha de transmissão, principalmente se esta for longa.

O processo de eliminação da falta tem bastante influência em estudos de estabilidade transitória pois este determinará o tempo para a eliminação da falta e sabe-se que quanto maior este tempo pior para a estabilidade do sistema. O processo de eliminação da falta é determinado pelo esquema de proteção adotado para o elemento em falta e os aspectos probabilísticos relacionados a estes esquemas são influenciados pela confiabilidade dos dispositivos de proteção primária, secundária e de religamento automático.

As condições de operação do sistema antes da ocorrência da falta afetam sobremaneira a estabilidade dos SEE. Parâmetros como o carregamento dos geradores e os ângulos das tensões nas barras afetam sensivelmente a estabilidade dos sistemas.

Desta forma, assim como nos estudos de adequação, deve-se, então, escolher uma metodologia para seleção dos estados do sistema a serem analisados. Para estudos de estabilidade transitória, entretanto, o conhecimento da seqüência cronológica dos estados operativos é de suma importância o que inviabiliza a utilização da representação por espaço de estados e coloca a SMCS como a melhor opção.

2.3.2 - Modelagem dos Componentes

Ao contrário da análise de adequação a análise de segurança está interessada no comportamento do sistema durante a transição de estados, particularmente nas transições caracterizadas por falhas nos componentes. Na adequação avalia-se o sistema nos estados anteriores e posteriores a ocorrência das transições e geralmente utiliza-se o modelo de Markov a dois estados, conforme Figura 2.1, para representar os componentes dos sistema. Para a análise de segurança, contudo, esta modelagem impossibilitará a representação de aspectos que influenciam na AET como, por exemplo, o tipo da falta e o processo de eliminação da falta.

O principal parâmetro para a análise da estabilidade transitória de SEE é o tempo crítico para eliminação da falta (*Critical Clearing Time* – CCT). Se a falta for eliminada em um tempo superior ao CCT então o sistema irá perder a estabilidade. Baseado no valor do CCT, Leite da Silva et al. [19] propuseram uma modificação na modelagem a dois estados de forma a poder diferenciar os estados de falha do componente que afetam ou não a estabilidade do sistema.

Neste modelo (Figura 2.2), existem dois estados de falha, um em que a falha causa instabilidade (*Down Unstable* - DU) e outro onde a estabilidade está garantida (*Down Stable* - DS). A caracterização dos estados de falha dependerá do conhecimento do valor do CCT.

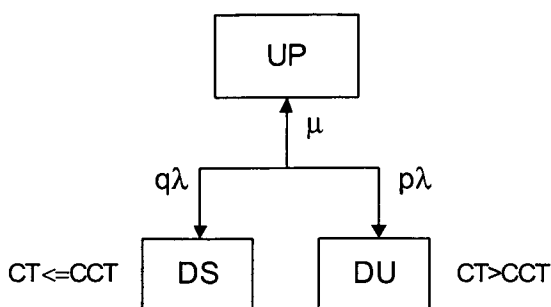


Figura 2.2 – Modelo a três estados

O tempo de eliminação da falta (*fault clearing time* – CT) é uma variável aleatória cuja função de distribuição, $F_{CT}(t)$, depende das distribuições de probabilidades dos tempos de atuação do sistema de proteção para o elemento em falta. A partir da função de distribuição $F_{CT}(t)$, pode-se determinar a probabilidade de sucesso (q) ou falha ($p = 1 - q$) na eliminação da falta através da equação (2.20). Deve-se ressaltar que apesar de normalmente a literatura usar a letra q para representar a probabilidade de falha e a letra p para a probabilidade de sucesso, este trabalho usa essa notação de forma inversa para ficar coerente com a notação usada na referência 19.

$$q = F_{CT}(CCT) = P[CT \leq CCT] \tag{2.20}$$

Como mencionado, outro fator de influência na análise da estabilidade transitória é o tipo de falta que pode ocasionar a falha do elemento do sistema. Diferentes taxas de falha e reparo podem ser obtidas para os diferentes tipos de falta e desta forma o modelo representado na Figura 2.2 pode ser ampliado para a inclusão deste aspecto.

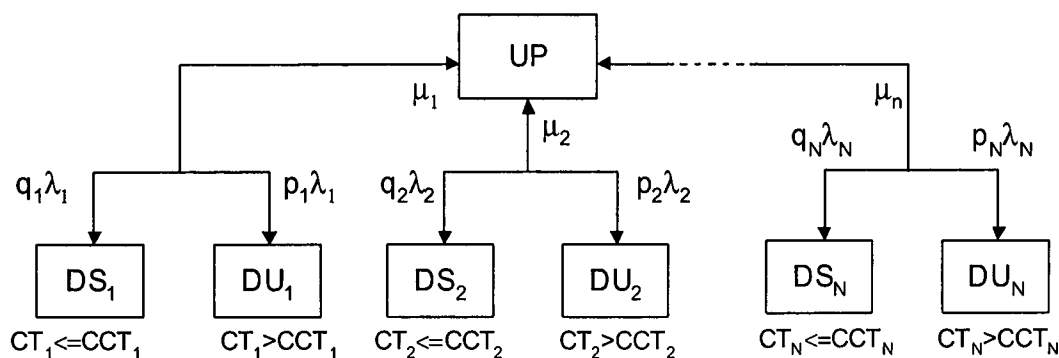


Figura 2.3 – Modelo para N tipos de falta

A Figura 2.3 apresenta, então, o modelo que permite a representação dos vários tipos de faltas. Entretanto, deve-se lembrar que quanto maior a complexidade dos modelos a serem utilizados maior será o esforço computacional requerido na avaliação da confiabilidade.

2.3.3 - Índices de Confiabilidade

Para a determinação de índices de confiabilidade relacionados à análise de segurança pode-se utilizar as mesmas etapas básicas usadas nos estudos de adequação, quais sejam:

1. Seleção do estado do sistema;
2. Análise do estado selecionado;
3. Cálculo dos índices de desempenho;
4. Verificação da convergência – Precisão da estimativa.

Conforme mencionado, a representação cronológica dos estados a serem analisados apresenta-se como a melhor alternativa em relação à representação por espaço de estados tendo em vista a influência da seqüência dos eventos para os estudos de estabilidade transitória.

A avaliação dos estados na análise de segurança é, na verdade, a avaliação das transições entre os estados e é realizada utilizando-se algoritmos de análise de estabilidade transitória. Entretanto, para se determinar corretamente o ponto de operação anterior ao distúrbio, ou seja, caracterizar o estado de operação pré-falta é necessário utilizar um algoritmo de fluxo de potência não-linear.

A AET, que determinará o CCT, pode ser realizada através de algoritmos de simulação no tempo (métodos de integração numérica) ou através de métodos de função energia.

Na análise de adequação observa-se que os principais índices calculados estão relacionados ao montante de carga a ser cortado nos estados de falha (inadequados). O corte de carga deve ser utilizado sempre como última alternativa dentro das opções de ações

corretivas disponíveis e o montante de carga a ser cortado deverá ser o menor possível de modo a propiciar resultados confiáveis. Na análise de segurança, por sua vez, nos estados onde há instabilidade (estados de falha), ainda não se dispõe de uma metodologia eficiente que determine o mínimo corte de carga necessário para restaurar o sistema, comprometendo, assim, a determinação de índices como LOLP nas análises de segurança.

Entretanto, outros índices, que não dependem do montante de carga a ser cortada para os estados de falha, podem ser determinados, como por exemplo:

- Probabilidade de Ocorrência de Instabilidade (*Probability of Instability* – POI);
- Tempo Médio Entre Ocorrências de Instabilidade (*Mean Time To Instability* – MTTI).

Estes são os índices utilizados neste trabalho e a metodologia para determinação desses índices são apresentada no próximo capítulo.

2.4 - Conclusões

Atualmente, existem várias metodologias utilizadas pelas empresas na avaliação da confiabilidade composta de SEE, entretanto, a maioria destas metodologias considera somente a análise de adequação dos sistemas. A análise da segurança é geralmente realizada após a análise de adequação e utilizando-se métodos determinísticos. Os métodos determinísticos, contudo, apresentam características conservativas em certos aspectos, como no tipo de falta a serem analisadas, e otimistas, como em relação a operação de todos os geradores dos sistema.

As metodologias de análise de adequação diferem entre si principalmente na forma de seleção dos estados a serem analisados. Existem duas formas distintas de representação: por espaço de estados e cronológica. A representação por espaço de estados pode ser implementada através da seleção dos componentes por enumeração ou por simulação Monte Carlo não-sequencial, enquanto a representação cronológica tem como principal implementação a Simulação Monte Carlo Sequencial (SMCS).

A representação por espaço de estados analisa os estados como se estes fossem “fotografias” da operação do sistema, ou seja, os estados analisados não tem qualquer dependência de ordem cronológica entre si.

O processo de seleção de estados por enumeração é conceitualmente atrativo pois se apresenta como uma extensão direta da análise de contingências determinística, ou critério “N-1”, que tem sido vastamente utilizado pelas empresas de energia elétrica. Entretanto, a utilização do processo de enumeração torna-se inviável do ponto de vista computacional quando utilizado na avaliação conjunta das falhas de transmissão e geração devido ao grande número de estados a serem analisados. Por outro lado, na SMCS o número de sorteios necessários para a convergência do processo não depende do espaço de estados a ser analisado, entretanto, há uma grande dependência entre a precisão desejada e o esforço computacional necessário.

A SMCS tem como principal vantagem a representação cronológica da operação do sistema, além da flexibilidade de modelagem dos componentes e maior abrangência para avaliação das características do sistema. Todavia, a SMCS implica num esforço computacional substancialmente maior do que em outras metodologias pois a simulação cronológica requer que os estados amostrados consecutivamente variem apenas em um dos seus componentes, o que torna a convergência dos índices mais lenta.

As avaliações da confiabilidade composta envolvendo análises de segurança exigem uma representação mais detalhada na modelagem dos componentes, além do fato da cronologia dos eventos ser crucial para a análise do desempenho dinâmico dos estados. Desta forma, a SMCS apresenta-se como a melhor opção para a análise de segurança, apesar do esforço computacional maior desta metodologia.

A inclusão de análises dos impactos dos distúrbios sobre o comportamento dinâmico dos sistemas exigem alterações nos algoritmos utilizados nas análise de adequação. Os algoritmos utilizados neste trabalho, bem como as simplificações adotadas devido a alta complexidade do problema, serão apresentados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 3

Confiabilidade Composta Considerando Aspectos Dinâmicos

3.1 - Introdução

Neste trabalho, para a determinação de índices de confiabilidade composta, considerando a AET, utilizam-se as mesmas etapas básicas usadas nos estudos tradicionais de adequação:

- Seleção de estados;
- Análise dos estados selecionados;
- Cálculo dos índices de desempenho;
- Verificação da convergência.

Contudo, a inclusão da análise da AET no processo de simulação requer a implementação de algoritmos e modelos que levem em consideração certas características (descritas no capítulo anterior) desprezadas nos estudos de adequação. As subseções seguintes descrevem os algoritmos e modelos, para cada etapa da avaliação da confiabilidade composta, utilizados neste trabalho.

3.2 - Seleção dos Estados

Tendo em vista a influência da sequência de eventos para a AET, a Simulação Monte Carlo Sequencial (SMCS), que é uma forma de implementação da representação cronológica, apresenta-se como o melhor método para seleção dos estados. Uma outra vantagem da SMCS é a sua flexibilidade na modelagem dos componentes e maior abrangência para avaliação das características do SEE.

Na SMCS, simula-se o processo estocástico da operação do SEE através da análise de séries (seqüências) sintéticas de estados que, por sua vez, são determinadas a partir das probabilidades das durações dos estados de cada componente e da curva de carga.

As principais etapas para a implementação da SMCS, já descritas no capítulo anterior, são novamente apresentadas a seguir:

1. Gere uma série sintética anual dos estados do sistema;
2. Analise cronologicamente cada estado da seqüência gerada no passo anterior e acumule os resultados;
3. Determine o valor para a função de cálculo dos índices anuais a partir dos valores acumulados no passo anterior;
4. Estime o valor esperado dos índices anuais;
5. Verifique a convergência do processo. Se a precisão da estimativa for satisfatória pare, caso contrário, volte ao primeiro passo.

3.3 - Modelagem dos Componentes

Para incluir os aspectos probabilísticos que influenciam a AET, algumas alterações nos modelos dos componentes devem ser efetuadas em relação aos modelos usados na avaliação de adequação. Essas alterações, descritas no capítulo anterior, são aplicadas aos componentes do SEE. Esta subseção descreve os modelos e simplificações utilizados neste trabalho.

3.3.1 - Geradores

Considera-se que as falhas nos geradores não resultam em instabilidade nos SEE. Isto porque a probabilidade de ocorrência de falhas em gerador que causam instabilidade é baixa devido, principalmente, ao fato dessas falhas, na maioria das vezes, não serem ocasionadas por ocorrências de curto-circuito e não resultarem em distúrbios no sistema. Desta forma, para os geradores, pode-se utilizar o modelo de Markov a dois estados, conforme Figura 3.1.

Deve-se destacar, que a metodologia desenvolvida não faz nenhuma restrição quanto ao uso de modelos de Markov multiestados para os geradores, entretanto somente o modelo a dois estados é utilizado para simplificar a metodologia e reduzir os tempos computacionais requeridos para a simulação.

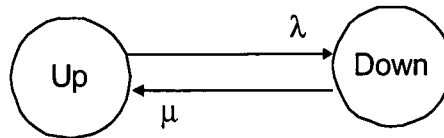


Figura 3.1 – Modelo de Markov a dois estados

3.3.2 - Carga

A carga será considerada constante em seu valor de pico durante todo o período de estudo do SEE. Desta forma, está se caracterizando a carga de forma pessimista e para estudos mais realísticos deve-se utilizar modelos mais detalhados. Novamente, a metodologia não faz qualquer restrição à esse detalhamento, sendo este ponto, inclusive, uma das vantagens da SMCS.

3.3.3 - Linhas de Transmissão e Transformadores

Nesta metodologia, a AET é realizada quando ocorrerem faltas nestes componentes, isto é, quando estes componentes são submetidos a curtos-circuitos. Desta forma, para incluir os aspectos mencionados no capítulo anterior são utilizados três modelos diferentes para estes componentes. Os modelos utilizados são baseados na modelagem apresentada no capítulo anterior e que foram propostos por Leite da Silva et al. [19]

No primeiro modelo utilizado (Figura 3.2) existem dois estados de falha: um em que a falha causa instabilidade (DU) e outro onde a estabilidade está garantida (DS). Neste modelo considera-se que todas as falhas são ocasionadas por curtos-circuitos trifásicos. O tempo de eliminação da falta (*fault clearing time* – CT) é uma variável aleatória cuja função de distribuição, $F_{CT}(t)$, depende das distribuições de probabilidades para os tempos de atuação do sistema de proteção do elemento em falta. A partir da função de distribuição

$F_{CT}(t)$, pode-se determinar a probabilidade de sucesso (q) ou falha ($p = 1 - q$) na eliminação da falta.

Conforme mencionado anteriormente, as faltas trifásicas têm menor probabilidade de ocorrência dos que os demais tipos de faltas. Sendo assim, os dois outros modelos utilizados fazem uma diferenciação entre os tipos de falta.

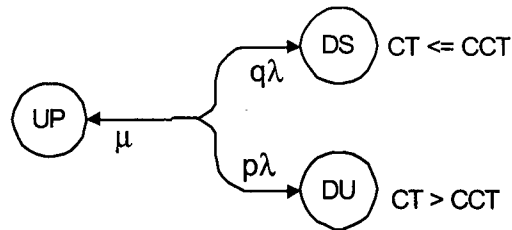


Figura 3.2 – Modelo 1 para elementos da rede

O segundo modelo (Figura 3.3) separa as faltas trifásicas das demais, proporcionando três estados de falha. Para as faltas trifásicas, existem dois estados de falha possíveis: DS_1 quando o sistema não perde a estabilidade e DU_1 quando perde. Neste modelo admite-se que somente as faltas trifásicas podem ocasionar a instabilidade do SEE. Sendo assim, a transição para os estados de falha ocasionados por estes tipos de falta (DS_0) não levam o sistema à instabilidade.

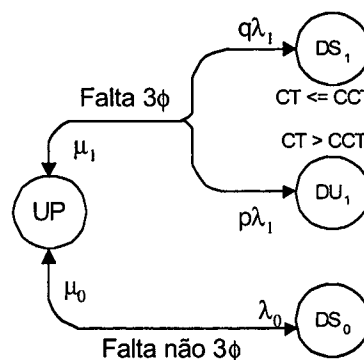


Figura 3.3 – Modelo 2 para elementos da rede

No Modelo 3 (Figura 3.4) também se separa as faltas entre dois tipos: trifásicas e não-trifásicas. Contudo, neste modelo considera-se que também as faltas não-trifásicas po-

dem levar o SEE à instabilidade. Para essas faltas a AET considera a ocorrência de um curto-circuito monofásico.

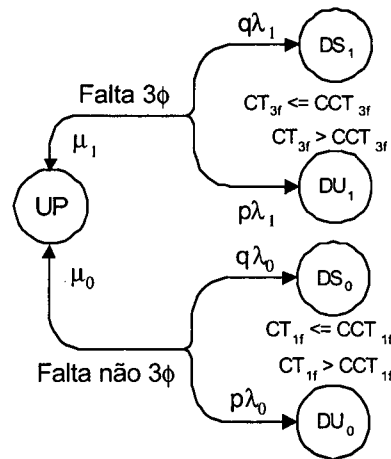


Figura 3.4 – Modelo 3 para elementos da rede

Dos três modelos utilizados, o primeiro apresenta-se com o mais pessimista pois, para qualquer falha nos componentes da rede considera-se como causa da mesma um curto-circuito trifásico. O Modelo 2 procura diferenciar as causas da falha em curtos-circuitos trifásicos e não-trifásicos. Este modelo, entretanto, não considera a possibilidade de um curto-circuito não-trifásico levar o SEE à instabilidade. Por outro lado, o Modelo 3 considera esta possibilidade e realiza a AET para as faltas não-trifásicas assumindo a ocorrência de curto-circuito monofásico.

3.3.4 - Sistema de Proteção

A metodologia adotada permite a modelagem do sistema de proteção considerando seus aspectos estocásticos. Para uma correta modelagem deste sistema deve-se considerar os aspectos relacionados ao tempo de atuação da proteção local e remota dos equipamentos, entretanto, para simplificar são utilizados neste trabalho apenas um sistema de proteção local e com tempo de atuação determinístico, ou seja, atuação em um tempo fixo.

3.4 - Análise dos Estados

A análise dos estados nos estudos de segurança é, na verdade, uma análise das transições entre os estados e que é realizada utilizando-se algoritmos de AET. Entretanto, para se determinar o ponto de operação pré-falta é necessário utilizar um algoritmo de fluxo de potência não-linear. As análise das transições entre os estados, utilizando-se os três modelos citados anteriormente, estão representados nos fluxogramas que se seguem.

O ponto de operação pré-falta é obtido através de um Fluxo de Potência Ótimo (FPO) não-linear de modo a garantir que o mesmo atenda os requisitos de adequação (limites operativos respeitados). Para a solução do FPO utiliza-se a função correspondente do programa NH2 do CEPEL que utiliza a metodologia de pontos interiores [38].

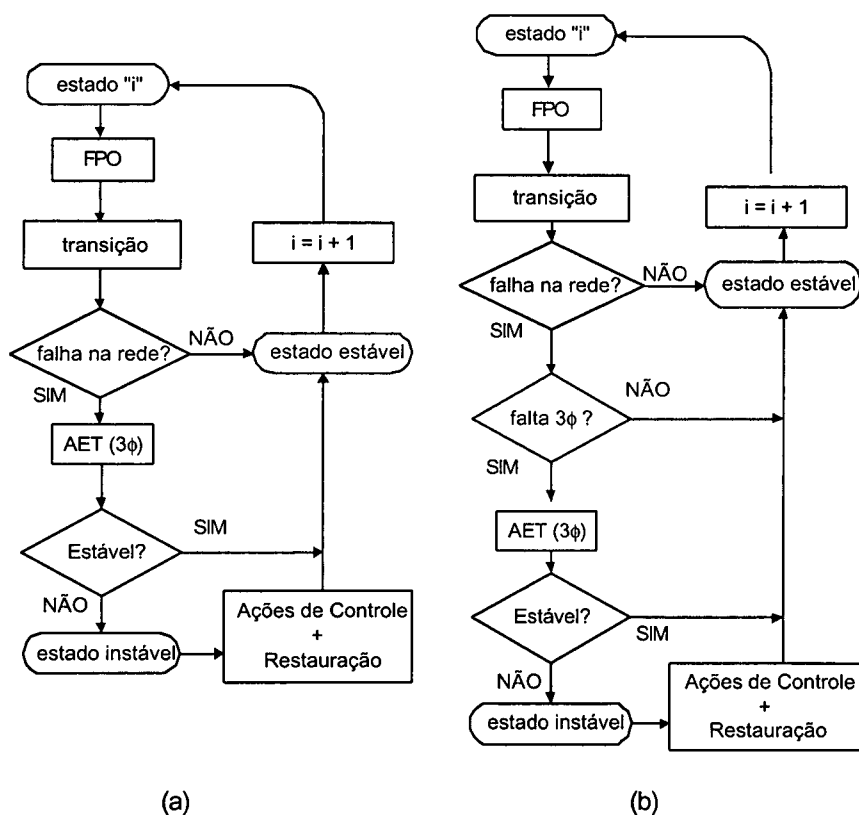


Figura 3.5 – Análise das Transições - (a) Modelo 1, (b) Modelo 2

Nos fluxogramas apresentados, deve-se ressaltar, que as análises de FPO serão realizadas somente para os estados em que forem realizados o estudo de estabilidade. Com isso evita-se a execução desnecessária de FPO, reduzindo o tempo computacional. Nos

fluxogramas a execução do FPO é colocada antes da transição para ficar bem caracterizado que esta operação será realizada para o estado anterior à transição. Na implementação computacional, entretanto, primeiro determina-se qual a transição será efetuada e se será necessária uma análise de estabilidade, em caso positivo realiza-se o FPO e só então efetua-se a transição do elemento. Com este artifício de implementação, consegue-se reduzir o número de FPO realizados.

Para a AET utiliza-se o programa SLEP que usa o método SLEP Iterativo [8]. O método SLEP Iterativo é um método híbrido, baseado na associação do segundo método de Liapunov e Conjuntos Invariantes, que fornece tempos críticos e margens de energia de sistemas multimáquinas. Especificamente, é utilizado o modelo dinâmico clássico, preservando a estrutura da rede elétrica, a Função Energia Transitória como função de Liapunov, e o conceito de Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP).

Tendo em vista que o programa SLEP fornece tempos críticos aproximados devido à utilização da modelagem clássica para máquinas síncronas, o presente trabalho considera um sistema de proteção com tempo de atuação fixo, desprezando-se, assim, os aspectos estocásticos da proteção.

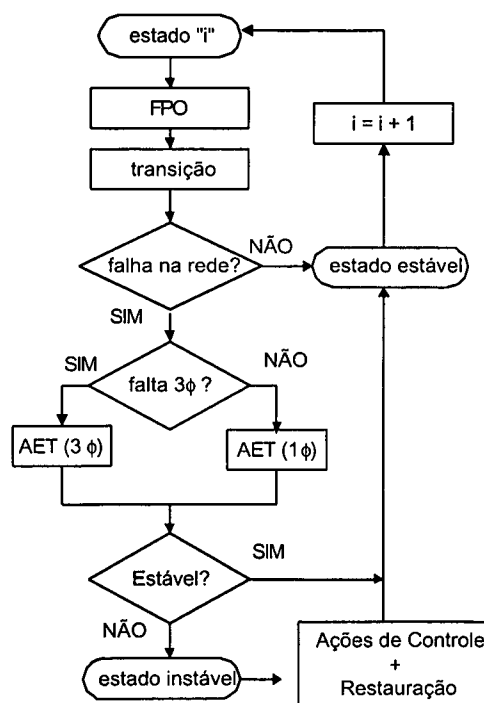


Figura 3.6 – Análise das Transições - Modelo 3

Em relação à localização da falta, analisam-se as situações mais severas, considerando-se, então, que os curtos-circuitos tenham ocorrido nas barras terminais das linhas de transmissão e transformadores.

Para os estados em que ocorre instabilidade, deve-se proceder ao uso de ações de controle que visem eliminar a instabilidade e, em seguida, restaurar o sistema. Atualmente, ainda não se dispõe de uma metodologia eficiente que otimize essas ações de controle e restauração. Nesta aplicação, estas ações de controle não foram consideradas.

Neste trabalho, todavia, os índices de confiabilidade utilizados não necessitam do conhecimento das ações de controle a serem tomadas, portanto, utiliza-se como medida para restaurar o sistema apenas a reparação do elemento em falta baseando-se em seu tempo médio para reparo.

3.5 - Geração e Análise das Séries Sintéticas

Para que se possa contemplar a utilização de medidas corretivas e de restauração na SMCS é necessário que se realize a geração das séries sintéticas em conjunto com as análises dos estados pois essas medidas terão influência direta na operação dos componentes do sistema. Para a geração das séries sintéticas anuais é necessário agregar os estados de operação dos componentes do sistema. Os tempos de residência dos estados operativos de cada componente do sistema são determinados de acordo com os modelos adotados. O algoritmo descrito a seguir apresenta um maior detalhamento para considerar os três modelos para os elementos da rede e considera-se carga constante durante todo o período.

1. Inicializar o tempo de simulação $t=0$ e o número de estados do sistema $n=1$;
2. Definir o estado inicial do sistema x_0 (através de simulação Monte Carlo Não-sequencial),
3. Determinar os tempos de residência T_i , $i=1,2,\dots,m$ de todos os componentes do estado x_0 de acordo com os seguintes critérios:
 - 3.1. Para os geradores (modelo a dois estados), caso o seu estado operativo seja UP ou DOWN, utilize as equações 3.1 e 3.2, respectivamente:

$$t_i^{UP} = \frac{1}{\lambda_i} (-\ln U) \quad (3.1)$$

$$t_i^{DN} = \frac{1}{\mu_i} (-\ln U) \quad (3.2)$$

onde:

λ_i é a taxa de falha do componente i ;

μ_i é a taxa de reparo do componente i ;

U é um número amostrado de uma distribuição uniforme $[0, 1]$.

3.2. Componente da rede em Falha

$$t_i^{DN} = \frac{1}{\mu_i} (-\ln U) \quad (3.3)$$

3.3. Componente da rede em Operação (UP)

Para determinar o tempo que o componente i ficará em operação deve-se saber se o seu próximo estado de falha será causado por falta trifásica ou não. Para tanto sorteia-se um número pseudo-aleatório a partir de uma distribuição uniforme $[0, 1]$ e compara-se esse número com a probabilidade de ocorrência de falta trifásica; Se P for maior ou igual a U o próximo estado de falha será causado por falta trifásica, caso contrario a falta será não-trifásica.

3.3.1. Se a próxima falha for devido a falta trifásica

$$t_i^{UP} = \frac{1}{P \cdot \lambda_i} (-\ln U) \quad (3.4)$$

onde: P é a probabilidade de ocorrência de falta trifásica;

3.3.2. Se a próxima falha for devido a falta não-trifásica

$$t_i^{UP} = \frac{1}{(1-P) \cdot \lambda_i} (-\ln U) \quad (3.5)$$

4. Determinar o instante da transição t_n do estado n , que corresponde ao mínimo entre os tempos de residência dos componentes;
5. Realizar a avaliação da transição do estado n para $n+1$ segundo os fluxogramas apresentados nas figuras 3.5 e 3.6;
6. Calcular a duração do estado X_n :

$$d_n = t_n - t \quad (3.6)$$

7. Avançar o tempo de simulação $t = t_n$;
8. Se a transição em t_n for devido a um componente i do sistema sorteie um novo tempo de residência para este componente de acordo com seu novo estado operativo e utilizando os mesmos critérios descritos no passo (3);
9. Se o tempo de simulação atingiu o final da série anual, a geração e análise desta série terminou. Caso contrário incremente o contador de estados $n=n+1$ e volte ao passo (4).

3.6 - Índices de Desempenho

Os índices utilizados neste trabalho são:

- Probabilidade de Ocorrência de Instabilidade (Probability of Instability – POI);
- Tempo Médio para Instabilidade (Mean Time To Instability – MTTI).

A função para cálculo do POI, para cada série anual é:

$$POI(y_k) = \frac{1}{NT(y_k)} \sum_{i=1}^{NT(y_k)} F(tr_i) \quad (3.7)$$

onde,

$NT(y_k)$ = número de transições para a série y_k ;

tr_i = i -ésima transição da seqüência y_k ;

$$F(tr_i) = \begin{cases} 1 & \text{se instável} \\ 0 & \text{se estável} \end{cases}$$

O valor estimado, em bases anuais, pode então ser calculado por:

$$\tilde{E}(\text{POI}) = \frac{1}{NY} \sum_{k=1}^{NY} \text{POI}(y_k) \quad (3.8)$$

onde,

NY = número de séries anuais.

O Tempo Médio para Instabilidade (MTTI) pode, então, ser calculado por:

$$\text{MTTI} = \frac{T}{NI} \quad (3.9)$$

onde,

T = tempo total de simulação;

NI = número de instabilidades ocorridas durante toda a simulação.

3.7 - Aplicação da Metodologia

A metodologia desenvolvida é inicialmente aplicada ao sistema teste IEEE-RTS79 [2]. Os parâmetros para a modelagem clássica dos geradores, bem como outras características deste sistema, são apresentados no Apêndice A. Para os modelos 2 e 3 é adotado uma probabilidade de ocorrência de faltas trifásicas com valor de trinta por cento para ambos os sistemas.

Os tempos computacionais apresentados foram obtidos usando-se uma estação de trabalho IBM/RS6000 que utiliza processador PowerPC de 200 MHz e 64 Mbytes de memória RAM.

3.7.1 - Resultados para o Sistema IEEE-RTS79

A Tabela 3.1 mostra os resultados da avaliação de segurança considerando-se os três modelos de estados descritos anteriormente. Como já se esperava, a simulação utilizando-se o Modelo 1 apresentou índices mais severos em relação aos demais modelos com instabilidades ocorrendo aproximadamente a cada 22 meses. Este modelo, porém, é pouco realístico pois nele todas as falhas na rede são consideradas como ocasionadas por curtos-circuitos trifásicos.

Na Tabela 3.2 apresenta-se os três elementos da rede que mais contribuem na determinação dos índices, indicando-se o correspondente percentual do total de instabilidades ocorridas durante a simulação.

Tabela 3.1 – Resultados IEEE-RTS79

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Anos de Simulação	753	7.598	2.048
No. Transições	369.460	3.645.892	979.190
No. de AET	9.768	9.363	15.285
POI (%)	0,1098	0,0108	0,041
β (%)	5,0	5,0	5,0
MTTI (h)	16.207	170.226	45.419
T. Computacional	1h 23m	1h 20m	2h 09m

Observa-se para este sistema, que a maioria das instabilidades acontecem devido ao ilhamento dos geradores localizados na barra 7. Esta barra está conectada ao resto do sistema apenas por uma única linha de transmissão ligada à barra 8 (vide diagrama unifilar no Apêndice A). Sendo assim, todas as vezes que acontece um curto-circuito nos terminais desta linha ocorre o ilhamento e, por conseqüência, também ocorre instabilidade.

Tabela 3.2 – Linhas com maior influência - IEEE-RTS79

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Total de Instabilidades	407	391	395
Elementos	Porcentagem		
7 – 8	52,6	58,1	88,6
21 – 22	30,0	24,8	7,6
17 – 22	7,1	10,0	2,3

Com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema RTS79 e evitar o ilha-mento da barra 7 propõem-se uma modificação no mesmo. Esta modificação consiste apenas da duplicação da linha que interliga as barras 7 e 8, mantendo-se os mesmo dados esto-cásticos originais para ambas as linhas. Os resultados, para esta nova configuração são apresentados na Tabela 3.3.

Os resultados apresentados por essa nova configuração confirmam a melhoria do desempenho do sistema. Comparando-se os resultados com os modelos 2 e 3 observa-se que os índices estão bem próximos mostrando uma pequena influência das análises de curtos-circuitos monofásicos.

Tabela 3.3 – Resultados IEEE-RTS79 com duplicação da LT 7-8

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Anos de Simulação	1.860	17.092	17.799
No. Transições	912.547	8.201.927	8.534.376
No. De AET	24.905	21.473	135.190
POI (%)	0,0467	0,0049	0,0046
β (%)	5,0	5,0	5,0
MTTI (h)	38.337	367.877	385.938
T. Computacional	3h 25m	2h 59m	17h 30m

A Tabela 3.4 apresenta as linhas de transmissão com maior influência na determi-nação dos índices. É interessante destacar que o estudo deste sistema utilizando a análise determinística mostrou que não há ocorrência de instabilidade para nenhuma contingência

na rede. Nos experimentos realizados, embora raro, há a ocorrência de instabilidades no sistema. Isto mostra que a análise determinística nem sempre analisa o pior caso, devido ao fato de considerar que todos os geradores estão sempre em operação, o que é incompatível com a realidade da operação de um SEE.

Tabela 3.4 – Linhas com maior influência - IEEE-RTS79 com LT 7-8 duplicada

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Total de Instabilidades	425	407	404
Elementos	Porcentagem		
21 – 22	62,1	62,4	61,39
17 – 22	18,6	19,2	21,54
1 – 3	5,4	4,7	3,47

3.8 - Conclusão

Neste capítulo apresentou-se a metodologia desenvolvida para a avaliação da confiabilidade composta considerando aspectos dinâmicos. A metodologia é, então, aplicada ao sistema teste IEEE RTS79.

A metodologia desenvolvida utiliza SMCS, pois para a AET é essencial que se conheça a seqüência dos eventos (transições de estados). Na SMCS as AET são realizadas quando ocorrerem falhas nas linhas de transmissão e transformadores.

São utilizados três modelos de estados para os elementos da rede de modo a diferenciar os tipos de faltas a que esses elementos estão sujeitos. No Modelo 1 todas as falhas nos elementos da rede são consideradas como ocasionadas por curto-circuito trifásicos. Enquanto nos outros dois modelos separam-se as falhas ocasionadas por curtos-circuitos trifásico e não-trifásicos.

Para que se possa incluir a AET durante a SMCS é necessário que as etapas de construção das séries sintéticas e análise das transições sejam realizadas de forma conjunta pois para as transições que levarem o sistema à instabilidade medidas de restauração devem ser tomadas, alterando-se, assim o histórico de simulação.

Embora a metodologia apresentada seja bastante abrangente no que se refere à modelagem dos componentes e também dos aspectos probabilísticos da AET, algumas simplificações foram necessárias para viabilizar computacionalmente a aplicação da metodologia.

Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia ao sistema RTS79 indicam, como se esperava, que o Modelo 1 apresenta resultados mais pessimistas em relação aos demais modelos. O sistema RTS79 possui um ponto de fragilidade na interligação das barras 7 e 8 pois os geradores conectados à Barra 7 ficam ilhados todas as vezes em que ocorre uma falha na linha 7-8, caracterizando-se, desta forma, um caso de instabilidade.

Nas simulações realizadas, embora com pouca frequência, existem transições que levam o sistema à instabilidade. Contudo, uma análise determinística do sistema não apresenta nenhum caso de instabilidade. Isto indica que a análise determinística não abrange estas situações tornando-se assim uma análise otimista para o sistema. A principal razão para que isso aconteça reside no fato da análise determinística considerar que todos os geradores estão sempre em operação, o que não corresponde com a realidade da operação de SEE.

CAPÍTULO 4

Aplicação de Processamento Paralelo

4.1 - Introdução

A aplicação de processamento paralelo na avaliação da confiabilidade composta é considerada uma das formas mais promissoras para se reduzir os tempos computacionais, permitindo-se avaliar sistemas de maior porte e aumentar o detalhamento das características dos sistemas [18 e 28]. A eficácia das técnicas de processamento paralelo em estudos de confiabilidade composta já puderam, inclusive, ser comprovadas quando aplicadas à simulação Monte Carlo na análise de adequação [33 e 37].

Os principais aspectos que necessitam ser considerados para implementação de uma avaliação da confiabilidade composta utilizando-se simulação Monte Carlo e processamento paralelo são apresentadas na referência [25], onde são testadas algumas alternativas de topologia para paralelização e aborda-se também o uso de números aleatórios num ambiente de computação paralela.

Neste capítulo, apresentam-se as técnicas e modelos utilizados na implementação da metodologia em um ambiente de processamento de alto desempenho.

4.2 - Paradigma da Computação Paralela

O paradigma da computação paralela utilizado é o paralelismo de dados. Neste paradigma não se realiza a paralelização em termos de equações e/ou algoritmos, e sim realiza-se uma distribuição dos dados entre os processadores para que possam ser analisados em concomitância.

Aproveitando-se do fato de que as séries anuais da SMCS são independentes entre si, a divisão dos dados entre os processadores é feita de forma que cada processador faça a análise de um certa quantidade de seqüências anuais.

A Figura 4.1 apresenta uma ilustração deste processo de distribuição. Deve-se destacar que a determinação do número de séries para cada processador depende de como o problema de balanceamento de carga é abordado.

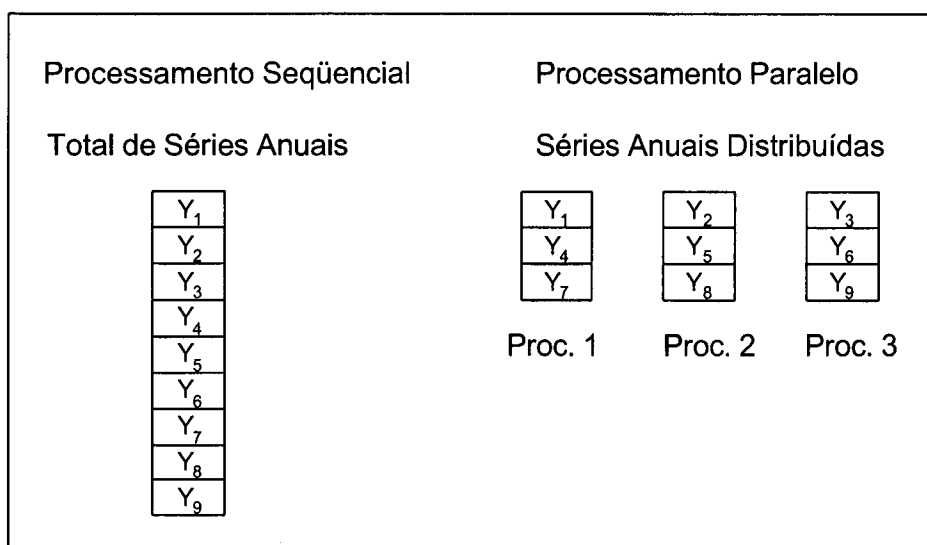


Figura 4.1 – Paradigma da Computação Paralela – Paralelismo de Dados

4.3 - Modelo de Programação

O modelo de programação paralelo utilizado é o chamado mestre-escravo. No modelo um processo chamado mestre é responsável pela leitura e envio dos dados aos escravos, pelo controle da convergência da SMCS e pela emissão dos relatórios. Os processos escravos, por sua vez, são responsáveis pelas análises das séries anuais da SMCS. Os fluxogramas dos processos mestre e escravo são apresentados na Figura 4.2.

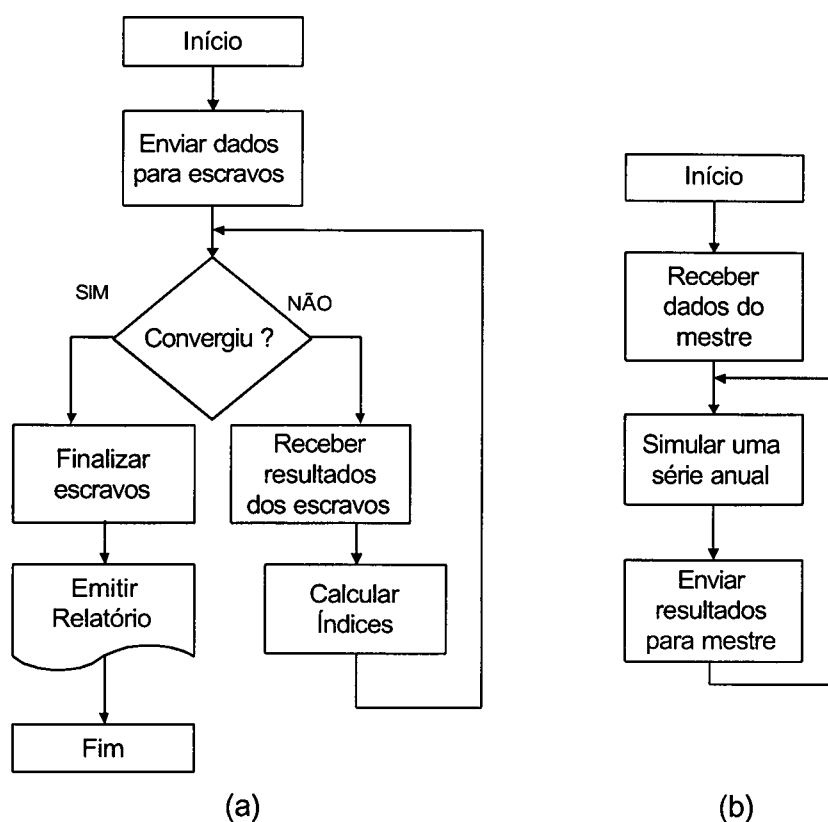


Figura 4.2 – Fluxogramas dos Processos - (a) Mestre, (b) Escravo

4.4 - Balanceamento da Carga

No balanceamento da carga entre os processadores deve-se procurar distribuir as tarefas de maneira equilibrada, evitando-se que algum processador fique ocioso aguardando que outro termine a execução de outra tarefa.

Vários aspectos devem ser considerados para a obtenção de um bom balanceamento, dentre os quais destacam-se:

- a diferença de capacidade computacional dos processadores;
- sobrecarga de processamento devido ao compartilhamento de recursos (processador, memória, disco rígido) com outros usuários.

- execução de tarefas semelhantes em tempos de processamento diferentes, como na SMCS onde os tempos para a análise de cada série anual são diferentes pois dependem das transições sorteadas.

No modelo de programação utilizado, o processo mestre, após enviar para os escravos os dados do SEE fica aguardando os resultados dos escravos e a cada resultado de uma série anual recebido calcula os índices e testa a convergência da SMCS. Os processos escravos recebem os dados, realizam a análise de uma série anual, enviam os resultados desta série para o mestre e imediatamente começam a analisar outra série anual. Desta forma, os processadores mais ociosos e/ou com maior capacidade de processamento analisam um maior número de séries e como as séries anuais são independentes entre si o processo de convergência não é prejudicado.

Outro ponto positivo do modelo adotado é o fato dos processadores escravos não terem que esperar uma resposta do mestre sobre a convergência ou não da simulação, evitando-se assim várias comunicações entre os processadores. Os processadores escravos realizam as análises das séries anuais ininterruptamente. Quando a convergência é alcançada o mestre finaliza remotamente todos os escravos. Apesar dos processos escravos não receberem nenhuma informação do processo mestre sobre a situação de convergência da simulação o modelo adotado deve garantir que as séries anuais analisadas pelos processadores sejam diferentes. Essa garantia é obtida fazendo-se uso de uma distribuição adequada de números aleatórios para geração das séries sintéticas entre os processos escravos. A configuração utilizada na distribuição dos números aleatórios é apresentada na próxima seção.

4.5 - Distribuição de Números Aleatórios

As séries anuais analisadas pelos escravos devem ser diferentes entre si, pois caso contrário os resultados dos escravos serão redundantes e não contribuirão para a convergência da SMCS [25]. Como as séries sintéticas são produzidas a partir de números aleatórios que determinam os tempos de residência dos estados dos componentes deve-se garantir que os números aleatórios utilizados pelos processos escravos sejam diferentes.

Para garantir a independência entre as séries analisadas pelos processos escravos, cada escravo utilizará um vetor de números aleatórios gerado com a mesma semente, pois sementes diferentes podem gerar vetores que sejam iguais a partir de determinada posição. Entretanto, cada escravo usará um conjunto de números aleatórios diferentes dentro do mesmo vetor. Supondo que o número de processadores seja 3, então o processador 1 utilizará as posições 1, 4, 7,... do vetor de números aleatórios, o processador 2 usará as posições 2, 5, 8, ..., e assim por diante. Essa distribuição é ilustrada na Figura 4.3.

Com essa configuração, entretanto, o número de séries anuais necessárias para se obter a convergência dependerá do número de processadores utilizados, pois para cada quantidade de processadores utilizados ter-se-á um conjunto diferente de números aleatórios utilizados pelos processos escravos. Além do número de processadores, o processo de convergência dependerá também do desempenho individual desses pois processadores mais desocupados e/ou mais eficientes analisarão mais séries modificando o conjunto de números aleatórios utilizados. Estas dependências, contudo, não influenciam nos valores obtidos para os índices, pois espera-se que para qualquer conjunto de números aleatórios utilizados os índices estejam dentro da tolerância estipulada.

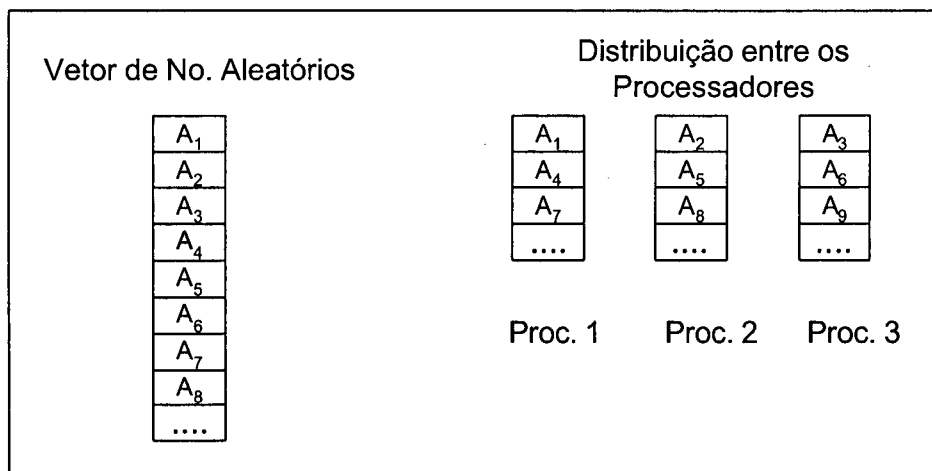


Figura 4.3 – Configuração para Distribuição dos Números Aleatórios

4.6 - Sistema PVM

O PVM (*Parallel Virtual Machine*) é um sistema que permite que uma rede de computadores seja utilizada como se fosse um único grande computador paralelo [24]. Dentre as características que definiram a escolha do sistema PVM para a implantação do programa de avaliação da confiabilidade composta considerando aspectos dinâmicos pode-se destacar as seguintes:

- sistema de domínio público;
- facilidade de instalação e uso;
- grande aceitação e utilização;
- suporta uma ampla variedade de arquiteturas de processadores e sistemas operacionais;
- facilidade na definição e alteração da máquina virtual.
- ambiente gráfico (XPVM), que permite um melhor acompanhamento da execução do programa paralelo.

O sistema PVM é composto de duas partes principais. A primeira é um programa *daemon*, que é executado em todos os computadores que formam a máquina virtual, cuja principal função é controlar as requisições de comunicação entre os processadores. A segunda é formada pelas bibliotecas de rotinas de trocas de mensagem (dados) que deve ser anexadas junto aos códigos fontes das aplicações paralelas, possibilitando, entre outras funções, iniciar, terminar e sincronizar processos, codificar, enviar e receber mensagens.

Antes de se poder executar uma programa paralelo deve-se, então, definir a máquina virtual paralela. Para executar esta tarefa existem duas ferramentas: uma em modo texto (PVM *console*) e outra gráfica (XPVM). No PVM *console* pode-se criar, monitorar e executar um programa paralelo utilizando-se um ambiente em modo texto. O XPVM é uma ferramenta gráfica que permite uma visualização da execução de um programa paralelo. Neste ambiente pode-se observar as comunicações entre os processos e depurar o acesso e funcionamento das rotinas PVM, fornecendo, inclusive um monitoramento do desempenho

em tempo real. Este ambiente gráfico facilita bastante todo o processo de desenvolvimento do programa paralelo.

4.7 - Conclusão

A utilização de técnicas de processamento paralelo para a implementação de um programa de avaliação da confiabilidade composta considerando aspectos dinâmicos tem como objetivo a redução dos tempos computacionais requeridos para a convergência da simulação. A redução nesses tempos possibilitará a aplicação da metodologia em SEE reais de grande porte.

O programa implementado utiliza o paradigma de paralelismo de dados em um modelo de programação mestre-escravo. No programa paralelo desenvolvido os processos escravos ficam responsáveis pela análise das séries anuais enquanto o mestre, basicamente, controla a comunicação entre os processadores e testa a convergência da simulação.

De modo a obter um bom balanceamento de carga entre os processadores, cada processo escravo faz a análise de uma série anual completa e envia os resultados para o mestre. Desta forma os processadores com maior capacidade de processamento analisam uma quantidade maior de séries.

A fim de garantir a não correlação entre as séries anuais a serem distribuídas entre os processadores propõem-se uma divisão de um vetor de números aleatório. Essa divisão, contudo, acarreta o inconveniente do processo de convergência da simulação ficar dependente da quantidade e carregamento dos processadores.

O sistema PVM é adotado para a implementação do programa paralelo devido a suas excelentes características entre elas o baixo custo, facilidade de desenvolvimento e acompanhamento do programa paralelo.

As avaliações de desempenho e eficiência do programa paralelo desenvolvido são apresentadas no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

Aplicações e Análises dos Resultados

5.1 - Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados das simulações computacionais realizadas, objetivando-se validar e avaliar as potencialidades da metodologia e dos algoritmos descritos anteriormente.

Foram realizadas simulações utilizando-se o ambiente de computação científica da UFSC, e três sistemas de energia elétrica: IEEE RTS79, IEEE RTS96 e um sistema equivalente da região Sul do Brasil (SUL92). Um resumo dos dados destes sistemas podem ser encontrados nos Apêndices A, B e C.

A apresentação dos resultados está organizada em 2 etapas. Na primeira parte apresentam-se os resultados das simulações para os três sistemas citados, objetivando-se avaliar os índices de confiabilidade desses sistemas utilizando-se a metodologia desenvolvida. Na segunda etapa apresentam-se os resultados de desempenho do programa paralelo desenvolvido, cujos algoritmos são apresentados no capítulo anterior.

5.2 - Sistemas Computacionais

Os avanços tecnológicos na área de informática, ocorridos nas últimas décadas, possibilitam a utilização de ambientes de trabalho integrando diferentes arquiteturas de computadores, desde microcomputadores, estações de trabalho até supercomputadores conectados por sistemas de comunicação. Devido a este fato, aumentam as potencialidades para reduzir o tempo das simulações.

Os testes computacionais foram realizados utilizando-se um *cluster* de estações de trabalho num total de 8 máquinas, além de uma estação de trabalho atuando como servidor.

As estações de trabalho utilizadas estão interligadas por uma rede padrão ethernet de 10 Mbps. As principais características das estações de trabalho utilizadas são apresentadas a seguir:

- IBM Risc/6000 43P;
- processador PowerPC 604e - 200 MHz;
- 64 MBytes de memória RAM;
- 2,1 GBytes de disco rígido.

Deve-se destacar que as implementações realizadas utilizam os programas computacionais NH2 do CEPEL e o SLEP desenvolvido no LabPlan para as análises das transições, conforme mencionado no Capítulo 3. A troca de informações entre os programas implementados e esses dois programas são realizadas através de arquivos de entrada/saída em modo texto e binário (*Savecase* do NH2). Com isso a execução dos programas desenvolvidos exigem uma grande quantidade de acessos aos discos rígidos, fazendo com que o desempenho desses seja fundamental para o desempenho dos programas.

5.3 - Sistemas Teste

Os SEE utilizados nas simulações são assim denominados:

- RTS79 – IEEE *Reliability Test System 79* – Sistema para testes e estudos de confiabilidade proposto pelo IEEE em 1979 [2];
- RTS96 – IEEE *Reliability Test System 96* – Sistema para testes e estudos de confiabilidade proposto pelo IEEE em 1996 [39];
- SUL92 – Equivalente do sistema sul brasileiro.

A Tabela 5.1 apresenta um resumo das características gerais dos sistemas teste utilizados. As informações fornecidas são: número total de barras; número total de linhas de transmissão, transformadores e outros elementos série; número de geradores representados através de modelos dinâmicos.

Tabela 5.1 – Parâmetros dos SEE utilizados nas simulações

Denominação dos SEE	Nº de Barras	Nº de linhas	Nº de geradores
RTS79	24	38	32
RTS96	73	120	96
SUL92	660	1072	77

5.4 - Avaliação dos Índices de Confiabilidade

5.4.1 - Resultados para o Sistema RTS79

O sistema RTS79 tem sido utilizado por diversos pesquisadores em estudos de adequação de SEE, já tendo sido testado, inclusive, com os principais programas computacionais de Avaliação de Confiabilidade. Entretanto, para aplicá-lo em estudos de segurança é necessário acrescentar, em seu conjunto de dados, informações a respeito das características dinâmicas de seus geradores. Para tanto, adotou-se uma modelagem clássica de geradores a partir de dados típicos de geradores com as mesmas características de potência, tipo de turbina e combustível apresentados na referência [1]. As reatâncias transitórias ($X'd$), resistências de armadura (R_a) e inércia (H) utilizadas para os geradores e compensadores síncronos, bem como outras informações deste sistema são apresentados no Apêndice A.

Uma avaliação básica deste sistema é apresentada no Capítulo 3. Nesta primeira avaliação observa-se que o sistema possui um ponto de fragilidade na linha de transmissão que une as barras 7 e 8, pois qualquer desligamento desta linha, para eliminação de faltas, resulta no ilhamento dos geradores conectados à Barra 7, caracterizando-se, assim uma instabilidade no sistema. Para melhorar a confiabilidade do sistema propôs-se a duplicação da LT 7-8. Os resultados obtidos com essa nova configuração mostram uma melhora nos índices de confiabilidade em relação ao sistema RTS79 original.

Como uma última análise deste sistema propõe-se avaliá-lo em sua configuração de rede original, porém com uma sobrecarga de 15%, e também diminuir a tolerância para

convergência. Os resultados obtidos com esse novo ponto de operação base é apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados para o sistema IEEE-RTS79 com sobrecarga de 15%

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Anos de Simulação	1248	14.325	5.254
No. Transições	645.632	7.239.308	2.655.869
No. de AET	16.333	17.506	38.868
POI (%)	0,1659	0,0153	0,0426
β (%)	3,0	3,0	3,0
MTTI (h)	10.207	113.665	40.838

Como era de se esperar, o sistema RTS79 com a sobrecarga de 15% apresenta índices de confiabilidade mais elevados em relação ao sistema original, ou seja, esta nova configuração apresenta uma maior probabilidade de perda de estabilidade. Com o Modelo 1, por exemplo, nesta configuração temos a ocorrência de uma instabilidade a cada 13 meses, enquanto que no sistema RTS79 original obteve-se uma ocorrência a cada 22 meses.

Com a sobrecarga de 15% o sistema apresentou maior ocorrência de instabilidades devido a faltas na linha 21-22 do que em qualquer outro elemento série, inclusive linha 7-8, exceto para o Modelo 3.

5.4.2 - Resultados para o Sistema RTS96

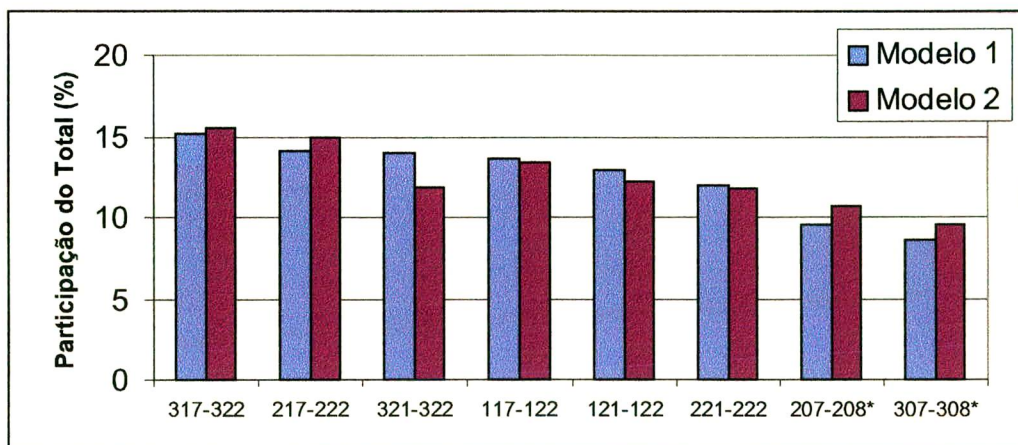
O sistema RTS96, proposto em 1996, nada mais é do que uma ampliação do sistema RTS79. O sistema RTS96 é formado por três subsistemas, interligados, idênticos ao sistema RTS79. Para possibilitar a comparação deste com o RTS79 foram utilizados os mesmo dados (modelo clássico) de geradores apresentados no Apêndice A

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos com o sistema RTS96. Os tempos médios para instabilidade (MTTI) obtidos para este sistema são menores que os apresentados para o sistema RTS79, o que caracteriza uma situação pior para o RTS96.

Tabela 5.3 – Resultados do sistema IEEE-RTS96

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Anos de Simulação	391	3.490	1.847
No. Transições	605.811	5.287.644	2.803.484
No. de AET	15.964	13.480	43.489
POI (%)	0,2012	0,022	0,0397
β (%)	3,0	3,0	3,0
MTTI (h)	2.817	26.470	14.537

No Modelo 3, mais de 50% das instabilidades ocorridas são ocasionadas devido ao ilhamento de geradores das barras 207 ou 307. Isto acontece porque, independente da falha na linhas que interligam essas barras ao resto do sistema terem sido causadas por curto-circuito trifásico, ou não, a simples retirada dessas linhas caracterizam a perda de estabilidade. Nos modelos 1 e 2, entretanto, essas linhas de transmissão contribuem com aproximadamente 20% do total de instabilidades ocorridas. A Figura 5.1 apresenta o percentual de participação das linhas e/ou transformadores que levam o sistema à instabilidade.



(*) Linhas que ocasionam ilhamento de geradores

Figura 5.1 – Participação dos Elementos nas Ocorrências de Instabilidade – RTS96

5.4.3 - Resultados para o Sistema SUL92

O sistema SUL92, cujos principais parâmetros são apresentados na Tabela 5.1, representa um sistema equivalente ao sistema da região Sul com suas interligações aos demais sistemas do Brasil. O sistema SUL92 é geralmente utilizado nos estudos de confiabilidade composta, considerando somente a análise de adequação, do sistema Sul Brasileiro pois esta região está representada de forma completa no sistema SUL92. Desta forma, as ações de controle e distúrbios são simuladas somente nessa região de interesse.

Como o SUL92 é utilizado apenas em estudos de adequação o mesmo não contém informações a respeito da dinâmica dos geradores. Esta, inclusive, é uma grande dificuldade para a implantação de estudos de segurança na avaliação da confiabilidade composta, pois atualmente ainda não se dispõe de um sistema real que englobe dados estocásticos e dinâmicos.

Para solucionar este problema utilizou-se os dados, com algumas adaptações, de máquinas do sistema equivalente de todo o Brasil e que é geralmente utilizado nos estudos determinísticos de estabilidade. O dados dos geradores deste sistema podem ser encontrados no Apêndice C.

O sistema SUL92 é analisado utilizando-se os três modelos de estados apresentados no Capítulo 3 e adotando-se um tempo de atuação da proteção de 0,1 segundos. Somente na região de interesse (Sul) são simulados distúrbios. As ações de controle para a determinação dos estados pré-falta são efetuadas na região Sul e no sistema de interligação à Itaipu.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos nas simulações utilizando-se os modelos 1, 2 e 3. Como se trata de um sistema relativamente grande (vide Tabela 5.1) a aplicação da metodologia utilizando-se apenas um único processador torna-se inviável do ponto de vista computacional. Sendo assim, os tempos apresentados na tabela foram obtidos utilizando-se a versão paralela do programa.

Analisando o sistema SUL92 por método determinístico observa-se que apenas nove contingências causam instabilidade. A Tabela 5.5 apresenta o resultado da análise

determinística para essas contingências onde é apresentado o Tempo Crítico para Eliminação da Falta determinado pelo programa SLEP.

Tabela 5.4 – Resultados do Sistema SUL92

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Anos de Simulação	744	7.406	4.911
No. Transições	1.383.244	13.029.819	8.640.249
No. de AET	89.354	87.018	340.783
POI (%)	0,028	0,0031	0,0047
β (%)	5,0	5,0	5,0
MTTI (h)	16.885	163.006	106.486
T. Computacional	3 h 31 m	3 h 53 m	11 h 53 m
No. Processadores	9	8	10

Tabela 5.5 – Resultados Análise Determinística do Sistema SUL92

Barra em Curto	Linha ou Transformador			Tempo Crítico
	Barra de Origem	Barra de Destino	Circ.	
181	182 (PREAL 138)	181 (PREAL 230)	1	0,0 (*)
182	182 (PREAL 138)	181 (PREAL 230)	1	0,0 (*)
172	35 (CAMAQUA 230)	172 (PMEDICI 230)	1	0,0681
172	176 (PMEDICEB-13A)	172 (PMEDICI 230)	1	0,0681
176	176 (PMEDICEB-13A)	172 (PMEDICI 230)	1	0,0681
172	176 (PMEDICEB-13A)	172 (PMEDICI 230)	2	0,0681
176	176 (PMEDICEB-13A)	172 (PMEDICI 230)	2	0,0681
172	172 (PMEDICI 230)	186 (QUINTA 230)	1	0,0731
172	45 (CANDIOT3 230)	172 (PMEDICI 230)	1	0,0794
45	9 (BAGE2 230)	45 (CANDIOT3 230)	1	0,0856
45	45 (CANDIOT3 230)	172 (PMEDICI 230)	1	0,0856

(*) Ocorre instabilidade com a simples retirada da LT, mesmo sem curto-circuito.

Comparando-se a análise determinística com os resultado da metodologia desenvolvida observa-se que são os mesmos elementos que causam instabilidades no sistema. Sendo assim, neste exemplo não pôde-se constatar o caracter conservativo da análise de-

terminística observado no sistema RTS79. A Figura 5.2 apresenta a participação dos elementos no total de instabilidades ocorridas para as simulações com cada modelo.

No Modelo 3 observa-se que o elemento 182-181 é que mais ocasiona instabilidade no sistema (44%). Isto ocorre devido ao fato da simples retirada desse elemento ocasionar instabilidade. Sendo assim, tanto a análise de curto-circuito monofásico quanto trifásico desse elemento resulta em instabilidade.

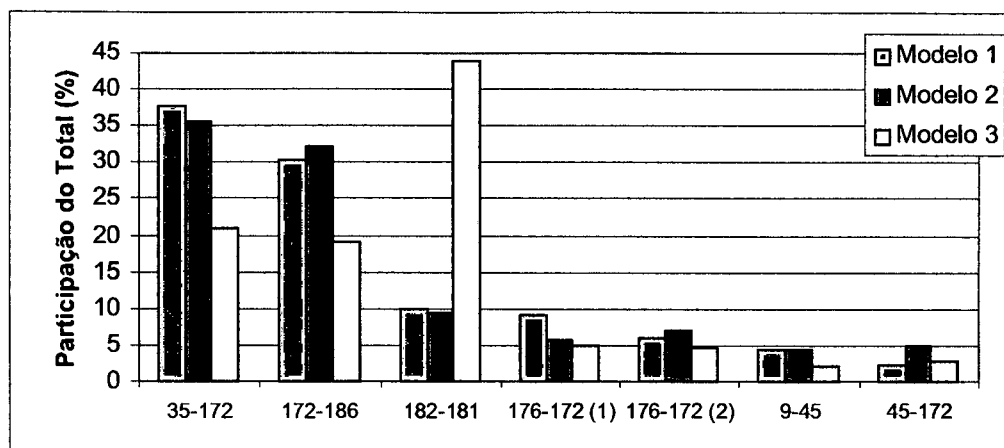


Figura 5.2 – Participação dos Elementos nas Ocorrências de Instabilidade – SUL92

5.5 - Avaliação de Desempenho do Programa Paralelo

Os sistemas de energia elétrica utilizados nas análises do desempenho computacional da implementação paralela são:

- RTS79 com sobrecarga de 15%;
- RTS96 original;
- SUL92 com a proteção atuando em 0,2 segundos.

Os resultados computacionais obtidos com o sistema SUL92 apresentados na seção anterior mostram que mesmo utilizando-se várias estações de trabalho o tempo para convergência é bem elevado. Para avaliar o desempenho computacional do programa paralelo é necessário executar o programa utilizando-se um único processador o que o que dificultaria a análise de desempenho. Desta forma, propõe-se adotar uma medida para di-

minuir a confiabilidade do sistema SUL92, fazendo com que os índices alcancem a convergência mais rapidamente. A medida adotada é o aumento do tempo de atuação da proteção para 0,2 segundos.

5.5.1 - Método para Análise do Desempenho Computacional

As figuras de mérito tradicionalmente utilizadas para análise de desempenho de implementações de processamento paralelo e/ou distribuído são: tempo real de processamento, *Speedup* e Eficiência. O *Speedup* é definido como a razão entre o tempo computacional utilizando-se um único processador e tempo obtido com mais processadores, enquanto que a Eficiência é dada pela razão entre o *Speedup* e o número de processadores utilizados.

Conforme apresentado no Capítulo 4, o número de séries anuais necessárias para a convergência da simulação depende do número de processadores utilizados e também da capacidade de processamento destes. Sendo assim, o cálculo dos *Speedup* e Eficiência podem ficar comprometidos pois a quantidade de operações numéricas realizadas com um e com mais processadores são diferentes. Como exemplo das distorções que podem ocorrer a Tabela 5.6 apresenta os dados das simulações do sistema RTS79 original com 1 e 8 processadores.

Tabela 5.6 – Simulação com Processamento Distribuído e Sequencial - RTS79

	1 Processador	8 Processadores
Anos de Simulação.	753	862
No. Transições	369.460	422.790
No. de AET	9.768	10.991
T. Computacional	74,2 min.	11,7 min.

Os valores de *Speedup* e Eficiência obtidos são 6,34 e 79,25%, respectivamente. O baixo desempenho obtido não corresponde à realidade pois a simulação utilizando 8 processadores necessitou de um maior número de AET para a convergência. Uma situação inversa também pode ocorrer, ou seja, uma situação em o número de AET seja maior na

simulação seqüencial. Neste caso pode-se obter valores de eficiência maiores que 100% o que seria absurdo.

Para solucionar este problema foi desenvolvido um programa seqüencial que para executar as mesmas operações numéricas do programa paralelo, permitindo a comparação de resultados. Basicamente, o que este programa seqüencial faz é utilizar o mesmo conjunto de números aleatórios usados na aplicação paralela.

Desta forma, a análise do desempenho computacional do programa paralelo pode ser efetuada com os seguintes passos:

1. Simulação usando o programa paralelo utilizando-se N processadores ($N > 1$);

Além dos índices de confiabilidade, o programa paralelo fornece também o número de séries anuais simuladas em cada processador.

2. Executar o programa seqüencial com os dados fornecidos no passo anterior;
3. Determinar os valores de *Speedup* e Eficiência.

$$\text{Speedup} = \frac{\text{tempo computacio nal da versão seqüencial}}{\text{tempo computacio nal da versão paralela}} \quad (5.1)$$

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{speedup}}{\text{número de processadores utilizados}} \times 100 \quad (5.2)$$

5.5.2 - Resultados de Desempenho Computacional

Na Tabela 5.7 apresentam-se os tempos computacionais despendidos nas simulações do programa paralelo, utilizando-se processamento distribuído com 2, 4 e 8 processadores. Essa tabela inclui também os tempos obtidos com a execução do programa seqüencial correspondente.

A Tabela 5.8 apresenta o número de AET realizadas nas simulações cujos tempos computacionais são mostrados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Tempos Computacionais das Simulações

Nº Proc.	RTS79		RTS96		SUL92	
	P. Dist.	P. Seq.	P. Dist.	P. Seq.	P. Dist.	P. Seq.
2	58,27	116,4	61,37	122,65	4,51	9,05
4	33,3	119,78	37,63	139,07	2,27	8,61
8	18,22	130,23	16,88	124,3	1,39	10,73

Sistemas RTS79 e RTS96 tempos em minutos. Sistema SUL92 tempos em horas.

Tabela 5.8 – Número de AET Realizadas

Nº Proc.	RTS79	RTS96	SUL92
2	16.333	14.098	26.723
4	16.944	15.964	25.706
8	18.314	14.252	30.482

As figuras 5.2 a 5.4 apresentam os gráficos dos tempos computacionais obtidos para cada um dos sistemas avaliados.

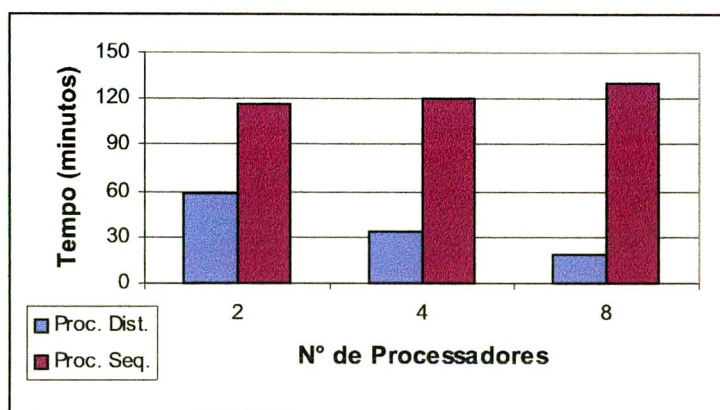


Figura 5.3 – Tempos Computacionais para o Sistema RTS79

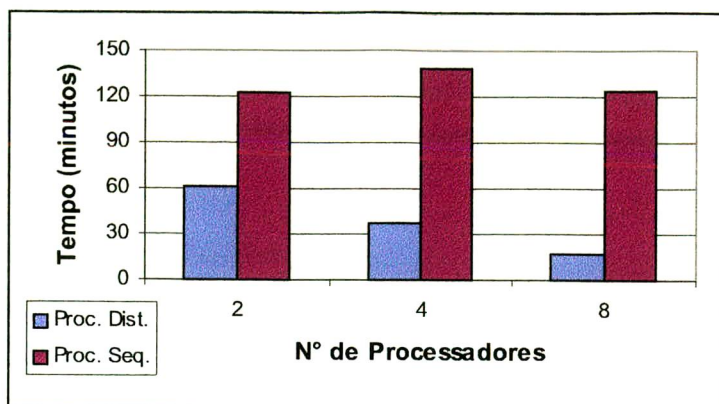


Figura 5.4 – Tempos Computacionais para o Sistema RTS96

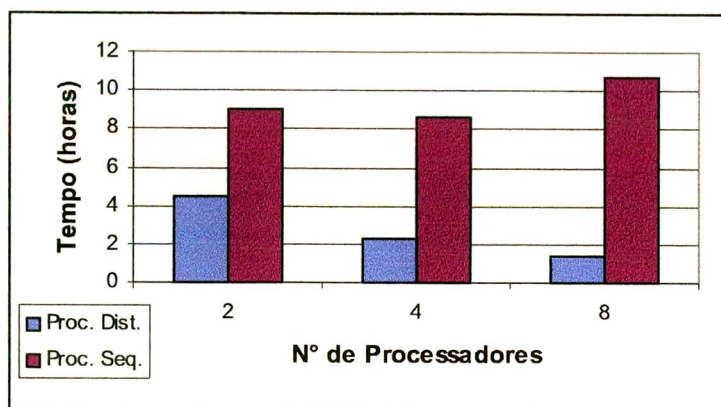


Figura 5.5 – Tempos Computacionais para o Sistema SUL92

Os resultados de *Speedup* e Eficiência são apresentados na Tabela 5.9. Vale ressaltar, entretanto, que os resultados das simulações sofrem grande influência do carregamento das máquinas, principalmente pelo fato da enorme quantidade de acessos a disco.

Tabela 5.9 – Resultados de *Speedup* e Eficiência

N° Proc.	RTS79		RTS96		SUL92	
	Speedup	Eficiência	Speedup	Eficiência	Speedup	Eficiência
2	1,99	99,5	2,0	100,0	2,0	100,0
4	3,6	90,0	3,7	92,5	3,79	94,75
8	7,15	89,4	7,36	92,0	7,72	96,5

Eficiência em porcentagem.

Foram realizadas várias simulações com o intuito de se conseguir evitar erros devido ao compartilhamento dos processadores com outros usuários. Os resultados obtidos nas várias simulações indicam uma variação de aproximadamente 3% nos tempos computacionais. Sendo assim, os resultados obtidos para os *Speedup* e Eficiência podem sofrer pequenas alterações nos valores apresentados.

As figuras 5.5 e 5.6 apresentam os gráficos de *Speedup* e Eficiência para os três sistemas considerados. Os valores obtido para *Speedup* e Eficiência indicam que a forma de paralelização dos algoritmos é adequada.

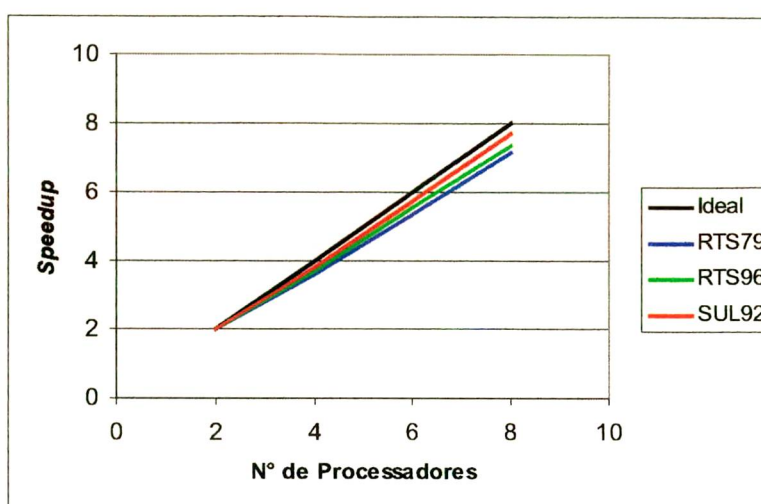


Figura 5.6 – Curva de *Speedup*

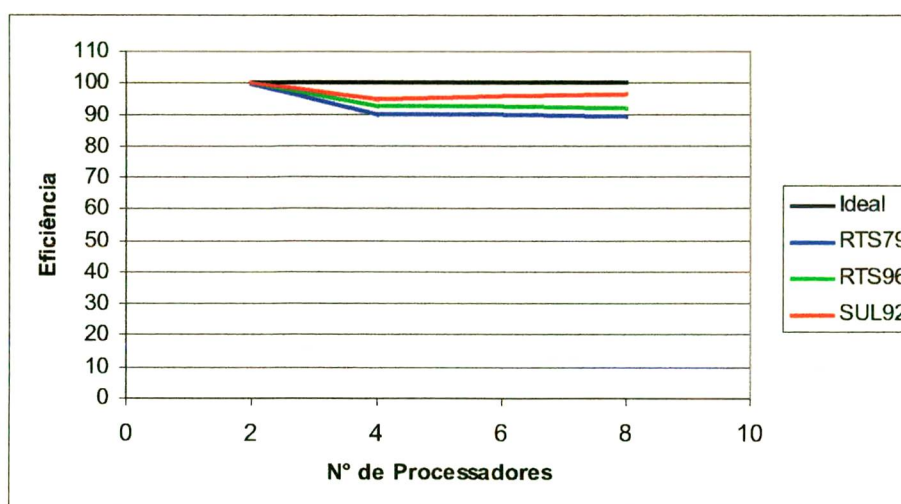


Figura 5.7 – Curva de Eficiência

5.6 - Conclusão

Neste capítulo foram descritos os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida aos sistemas teste IEEE RTS79, RTS96 e ao sistema equivalente da região Sul brasileira. Apresenta-se, também, os resultados de desempenho computacional do programa paralelo desenvolvido em um *cluster* de estações de trabalho IBM/RS6000.

Como já se esperava, a simulação utilizando-se o Modelo 1 apresentou índices mais severos em relação aos demais modelos. Este modelo, porém, é pouco realista pois nele todas as falhas na rede são consideradas como ocasionadas por curtos-circuitos trifásicos.

Comparando-se os resultados dos modelos 2 e 3 observa-se que a diferença nos índices encontrados é devido principalmente à ocorrência, no Modelo 3, de instabilidades ocasionadas por isolamento de geradores e/ou situações onde a instabilidade ocorre com a simples retirada do elemento de transmissão ou trafo, pois para estes casos não importa o tipo de falta.

O elevado tempo computacional requerido na simulação com Modelo 3 indica a dificuldade da aplicação deste modelo em sistemas de grande porte. Deve-se, então estudar uma outra forma de se considerar que faltas não-trifásicas possam levar o sistema à instabilidade.

Os resultados de desempenho da implementação paralela num ambiente de processamento distribuído indicam o alto grau de paralelismo obtido com os modelos e paradigmas adotados e necessidade do uso desses recursos computacionais para tornar viáveis estudos. Entretanto, para a aplicação em sistemas reais de grande porte deve-se utilizar um número maior de processadores.

CAPÍTULO 6

Conclusões Gerais e Sugestões para Trabalhos Futuros

6.1 - Conclusões Gerais

As avaliações de confiabilidade composta atualmente utilizadas no planejamento dos sistemas de energia elétrica fornecem informações acerca da capacidade dos sistemas de geração e transmissão em atender a demanda requerida pelos consumidores obedecendo a critérios, ou restrições, estáticos, como capacidade de geração, níveis de tensão e carregamento da transmissão. Este estudo é denominado análise de adequação.

Com o objetivo de ampliar as informações obtidas das avaliações atualmente realizadas nos estudos de Confiabilidade Composta, esta dissertação apresenta uma metodologia para avaliação da Confiabilidade Composta de Sistemas de Energia Elétrica considerando os aspectos dinâmicos dos mesmos. Para a análise do comportamento dinâmico utiliza-se a Análise de Estabilidade Transitória das falhas nos elementos de transmissão.

Os principais aspectos da metodologia desenvolvida são descritos a seguir:

- Utiliza-se uma representação cronológica, através de Simulação Monte Carlo Seqüencial, para os sistemas. A SMCS permite flexibilizar a modelagem dos componentes dos SEE possibilitando a inclusão de aspectos probabilísticos que influenciam a estabilidade transitória de sistemas de potência, como o tipo e localização das faltas.
- Na modelagem dos elementos de transmissão utiliza-se três modelos de fãlha/reparo de forma a distinguir as falhas quanto ao tipo de falta que as ocasionam. No primeiro todas as falhas são consideradas como resultado da ocorrência de curtos-circuitos trifásicos. No segundo modelo distingue-se

entre falhas ocasionadas por curtos trifásicos e não-trifásico, considerando que apenas as faltas trifásicas podem levar o sistema à instabilidade. O terceiro modelo é uma extensão do Modelo 2 onde também as faltas não-trifásicas podem ocasionar instabilidades nos sistemas. As faltas não-trifásicas são analisadas considerando-se a ocorrência de curto-circuito monofásico.

- Para os geradores do sistema utiliza-se o usual modelo de Markov a dois estados. A metodologia, contudo, pode ser estendida, para permitir adoção de modelos multiestados.
- A SMCS permite a utilização de qualquer modelo cronológico para a carga do sistema, sendo que nos estudos apresentados nesta dissertação considera-se a carga constante em seu valor de pico durante todo o período de análise.
- Para a determinação do ponto de operação pré-falta utiliza-se um fluxo de potência ótimo com função objetivo minimizar o corte de carga de forma que o estado seja considerado adequado (sem violações de restrições e limites operacionais). Para a execução desta análise é utilizada a função correspondente do programa NH2 do CEPEL que realiza um FPO não-linear pelo método de pontos interiores.
- Após obtido o estado pré-falta realiza-se a AET. As ferramentas convencionais de simulação no tempo para a análise da estabilidade transitória não se mostram convenientes por exigirem grande esforço computacional, apesar de permitirem uma representação detalhada da dinâmica dos sistemas, fornecendo resultados bastante precisos. Além disso, tais ferramentas apresentam dificuldades para a análises automáticas. É utilizado, então, o método SLEP Iterativo, através do programa SLEP do LabPlan. Este método é baseado na utilização do modelo clássico para estudos de estabilidade, na função energia transitória como Função de Liapunov e fornece tempos críticos para eliminação das faltas.
- Com a inclusão dos aspectos dinâmicos necessita-se da modelagem dos sistemas de proteção, optou-se, então, por utilizar um modelo determinístico, ou seja, a proteção com tempo de atuação constante. Entretanto a metodologia desenvolvida suporta a utilização de outros modelos.

- Os índices calculados pelo programa desenvolvido são: Probabilidade de Ocorrência de Instabilidade (POI) e o Tempo Médio para Instabilidade (MTTI).
- Com o intuito viabilizar, do ponto de vista computacional, a aplicação da metodologia em sistemas de grande porte desenvolveu-se um programa utilizando-se técnicas de processamento paralelo.

As simplificações utilizadas na presente metodologia, tais como a utilização de modelos estocásticos para a proteção e modelagem com somente dois estados para os elementos de geração, tem o objetivo de reduzir o tempo computacional requerido para convergência da SMCS. As simplificações adotadas, portanto, não se devem a qualquer tipo de restrição de modelagem na metodologia utilizada.

Diferentemente de outros trabalho [19, 40], na metodologia apresentada somente a análise de segurança da avaliação da confiabilidade composta é realizada, ficando a análise de adequação para ser realizada de forma separada e independente. Separando-se as duas análises obtêm-se um melhor desempenho computacional pois as duas análises possuem características de convergência diferentes, além dos estudos de adequação obterem mais rapidamente a convergência usando a Simulação Monte Carlo não-seqüencial ao invés da seqüencial usada neste trabalho.

A metodologia foi aplicada aos sistemas testes IEEE RTS79 e RTS96 e ao sistema equivalente da região Sul do Brasil. Os resultados com o sistema RTS79 demonstram que a AET tradicional (determinística) pode não capturar situações que levam o sistema à instabilidade.

A aplicação da simulação utilizando-se o Modelo 3 torna-se pouco prática devido ao elevado tempo de processamento necessário, mesmo utilizando-se a implementação paralela. Os resultados obtidos com Modelo 1 devem ser analisados lembrando-se que trata-se de um modelo conservativo.

Os tempos computacionais obtidos com a aplicação da metodologia nos sistemas testes utilizados indicam uma grande vantagem em se utilizar o processamento paralelo. Os ganhos com essa implementação apresentaram-se bastante elevados indicando a qualidade dos métodos e paradigmas de paralelização adotados.

A inclusão da análise da estabilidade transitória nos estudos de confiabilidade de SEE pode fornecer informações complementares aos atuais métodos de estudo do planejamento da expansão, auxiliando na identificação das áreas e/ou elementos críticos determinando índices de desempenho para o sistema.

6.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros

No sentido de dar continuidade e possibilitar a melhoria do trabalho apresentado nesta dissertação, indicam-se as seguintes sugestões para futuros trabalhos, divididas em questões específicas e gerais.

Questões Específicas:

- Incluir na metodologia modelos estocásticos mais detalhados para os componentes do sistema, como por exemplo, modelo multiestados para a geração, curva cronológica de variação da carga e modelo do sistema de proteção mais abrangente (proteção local e remota);
- Realizar as etapas de simulação Monte Carlo, determinação do ponto de operação pré-falta e análise da estabilidade transitória em um único programa, evitando-se assim o intercâmbio de informações através de arquivo, o que diminuirá o tempo de computação;
- Estudar a conveniência da aplicação de FPO com outras funções objetivo na determinação do ponto de operação pré-falta;
- Estudar a viabilidade de analisar a estabilidade transitória utilizando simulação com modelos detalhados e determinação de tempos críticos de forma automática.
- Pesquisar a utilização de métodos de otimização na determinação de ações corretivas e restauração dos estados instáveis, possibilitando uso de índices de confiabilidade relacionados a eventuais cortes de carga;

Questões Gerais:

- Desenvolver metodologias de análise probabilística que inclua os aspectos dinâmicos nos estudos de planejamento de desligamentos para manutenção;
- Desenvolver metodologias visando quantificar economicamente os requisitos para a segurança dinâmica do sistema;
- Remodelar a estrutura do sistema computacional sob o enfoque da Programação Orientada a Objetos.

APÊNDICE A

Dados do Sistema IEEE RTS79

A.1 - Introdução

Neste apêndice apresenta-se um resumo dos dados referentes ao sistema IEEE RTS79 (Reliability Teste System – 1979). Este sistema, utilizado no presente trabalho para avaliar a metodologia desenvolvida, foi proposto em 1979 [2] com o objetivo de possibilitar comparações entre metodologias e estudos de confiabilidade de sistemas de SEE.

O sistema RTS79 originalmente proposto não possui informações a respeito do comportamento dinâmico dos geradores, sendo assim, sua aplicação restringe-se a estudos de adequação. Para possibilitar, entretanto, sua utilização em análise de segurança que é objeto deste trabalho são acrescentados os dados necessários à representação dos geradores pelo modelo clássico de máquina síncrona.

Com objetivo de caracterizar melhor o sistema RTS79 apresenta-se também neste apêndice os resultados de uma análise de adequação utilizando-se os principais índices de confiabilidade obtidos com o programa NH2 [38].

A.2 - Diagrama Unifilar

O sistema RTS79 possui 24 barras, 38 elementos de rede e 32 geradores. O diagrama unifilar para este sistema é apresentado na Figura A.1.

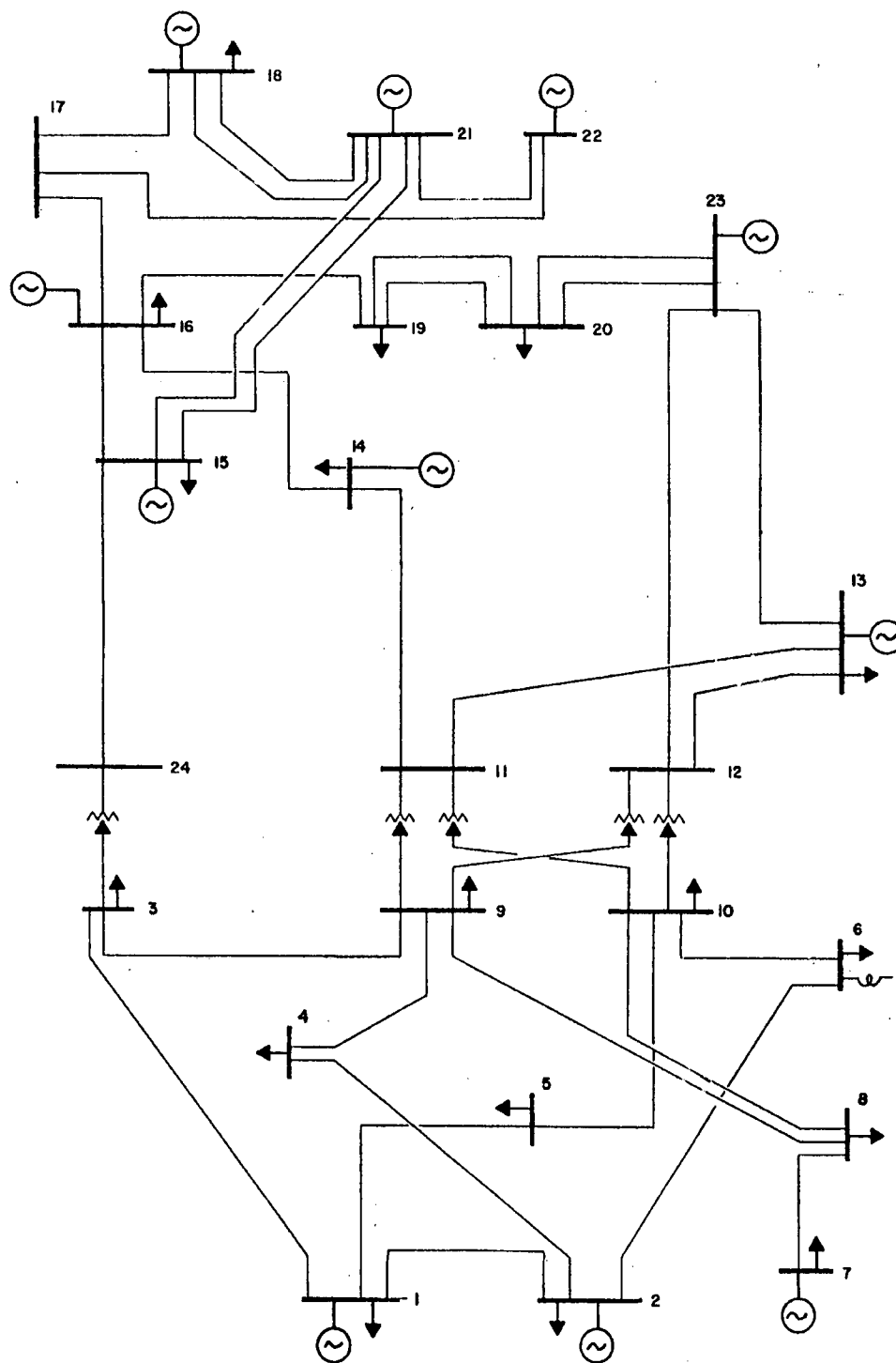


Figura A.1 – Diagrama Unifilar – RTS79

A.3 - Dados dos Geradores

A tabela abaixo mostra os dados referentes aos geradores deste sistema. Os dados de reatância transitória ($X'd$), Resistência de Armadura (R_a) e Inércia (H) foram obtidos a partir de características de geradores similares apresentados em [1].

Tabela A.1 – Dados dos Geradores do sistema IEEE-RTS79

Barra	Nº de unidades	Potência (MW)	$X'd$ (%)	R_a (%)	H (s)	Taxa Falha (falhas/ano)	Tempo Reparo (h)
15	5	0 - 12	92,8	0,56	1,244	2,9795	60,0
1	2	0 - 20	109,0	0,00	1,833	19,4667	50,0
2	2	0 - 20	109,0	0,00	1,833	19,4667	50,0
22	6	0 - 50	70,4	0,91	1,68	4,4242	20,0
1	2	0 - 76	24,7	0,41	4,64	4,4694	40,0
2	2	0 - 76	24,7	0,41	4,64	4,4694	40,0
7	3	0 - 100	13,9	0,32	5,96	7,3000	50,0
15	1	0 - 155	15,3	0,19	6,34	9,1250	40,0
16	1	0 - 155	15,3	0,19	6,34	9,1250	40,0
23	2	0 - 155	15,3	0,19	6,34	9,1250	40,0
13	3	0 - 197	13,9	0,07	9,605	9,2211	50,0
23	1	0 - 350	8,4	0,04	10,065	7,6174	100,0
18	1	0 - 400	8,9	0,08	19,9	7,9636	150,0
21	1	0 - 400	8,9	0,08	19,9	7,9636	150,0

Dados referentes à base de 100 MVA

Na Barra 14 há um Compensador Síncrono conectado cujas características dinâmicas são apresentadas na tabela abaixo.

Tabela A.2 – Dados do Compensador Síncrono do sistema IEEE-RTS79

Barra	$X'd$ (%)	R_a (%)	H (s)
14	42,7	0,23	0,8998

Dados referentes à base de 100 MVA

A.4 - Dados da Rede

Na Tabela A.3 encontram-se os dados relativos aos elementos de transmissão e transformadores do sistema IEEE RTS79.

Tabela A.3 – Dados de transmissão e transformadores

Barras terminais	R (%)	X (%)	B (MVA _r)	Taxa Falha (falhas/ano)	Tempo Reparo (h)
1-2	0,260	1,390	46,110	0,24	16,0
1-3	5,460	21,120	5,720	0,51	10,0
1-5	2,180	8,450	2,290	0,33	10,0
2-4	3,280	12,670	3,430	0,39	10,0
2-6	4,970	19,200	5,200	0,48	10,0
3-9	3,080	11,900	3,220	0,38	10,0
3-24	0,230	8,390	0,0	0,02	768,0
4-9	2,680	10,370	2,810	0,36	10,0
5-10	2,280	8,830	2,390	0,34	10,0
6-10	1,390	6,050	245,90	0,33	35,0
7-8	1,590	6,140	1,660	0,3	10,0
8-9	4,270	16,510	4,470	0,44	10,0
8-10	4,270	16,510	4,470	0,44	10,0
9-11	0,230	8,390	0,0	0,02	768,0
9-12	0,230	8,390	0,0	0,02	768,0
10-11	0,230	8,390	0,0	0,02	768,0
10-12	0,230	8,390	0,0	0,02	768,0
11-13	0,610	4,760	9,990	0,4	11,0
11-14	0,540	4,180	8,790	0,39	11,0
12-13	0,610	4,760	9,990	0,4	11,0
12-23	1,240	9,660	20,300	0,52	11,0
13-23	1,110	8,650	18,180	0,49	11,0
14-16	0,500	3,890	8,180	0,38	11,0
15-16	0,220	1,730	3,640	0,33	11,0
15-21	0,630	4,900	10,300	0,41	11,0
15-21	0,630	4,900	10,300	0,41	11,0
15-24	0,670	5,190	10,910	0,41	11,0
16-17	0,330	2,590	5,450	0,35	11,0
16-19	0,300	2,310	4,850	0,34	11,0
17-18	0,180	1,440	3,030	0,32	11,0
17-22	1,350	10,530	22,120	0,54	11,0
18-21	0,330	2,590	5,450	0,35	11,0
18-21	0,330	2,590	5,450	0,35	11,0
19-20	0,510	3,960	8,330	0,38	11,0
19-20	0,510	3,960	8,330	0,38	11,0
20-23	0,280	2,160	4,550	0,34	11,0
20-23	0,280	2,160	4,550	0,34	11,0
21-22	0,870	6,780	14,240	0,45	11,0

Dados referentes à base de 100 MVA

A.5 - Dados da Carga

A Tabela A.4 apresenta os valores da carga em cada barra de carga do sistema.

Tabela A.4 – Dados da carga

Barra	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)
1	108	22
2	97	20
3	180	37
4	74	15
5	71	14
6	136	28
7	125	25
8	171	35
9	175	36
10	195	40
13	265	54
14	194	39
15	317	64
16	100	20
18	333	68
19	181	37
20	128	26

A.6 - Análise de Adequação do Sistema RTS79

Os índices de adequação determinados através de Simulação Monte Carlo não-seqüencial com o programa NH2 foram os seguintes:

- LOLP – Probabilidade de Perda de Carga (*Loss of Load Probability*);
- EPNS – Valor Esperado da Potência não Suprida (*Expected Power Not Supplied*);
- EENS – Valor Esperado da Energia Não Suprida (*Expected Energy Not Supplied*);
- LOLF – Frequência de Perda de Carga (*Loss Of Load Frequency*);
- LOLD – Duração de Perda de Carga (*Loss Of Load Duration*).

Tabela A.5 – Resultados da Análise de Adequação do Sistema RTS96

	Estimativa	Coef. Variação (%)
LOLP	0,1189	3,5
EPNS (MW)	19,50	4,99
EENS (MWh/ano)	170.826,10	4,99
LOLF (/ano)	27,91	5,48
LOLD (horas)	36,32	4,19

APÊNDICE B

Dados do Sistema IEEE RTS96

B.1 - Introdução

O sistema IEEE RTS96 (Reliability Teste System – 1996) proposto em 1996 [39] é uma ampliação do sistema RTS79. O RTS96 é formado por três áreas que equivalem ao RTS79 e seus dados tanto de rede quanto de geradores são os mesmos do RTS79. Sendo assim, este apêndice apresenta apenas o diagrama unifilar deste sistema e os dados de transmissão adicionais que fazem a interligação das três áreas.

Na última seção deste apêndice apresentam-se os resultados de uma análise de adequação utilizando-se os principais índices de confiabilidade obtidos com o programa NH2 [38].

B.2 - Dados Adicionais de Transmissão

A tabela abaixo mostra os dados referentes às linhas de transmissão e transformadores cujos dados não constam no sistema IEEE RTS79.

Tabela B.1 – Dados dos Elementos de rede Adicionais do Sistema IEEE-RTS79

Barras terminais	R (%)	X (%)	B (MVA _r)	Taxa Falha (falhas/ano)	Tempo Reparo (h)
107-203	4,2	16,1	44,0	0,44	10,0
113-215	1,0	7,5	15,8	0,47	11,0
123-217	1,0	7,40	15,5	0,46	11,0
325-121	1,2	9,7	20,3	0,52	11,0
318-223	1,3	10,4	21,8	0,53	11,0
323-325	0,0	0,9	0,0	0,2	768,0

Dados referentes à base de 100 MVA

B.3 - Diagrama Unifilar

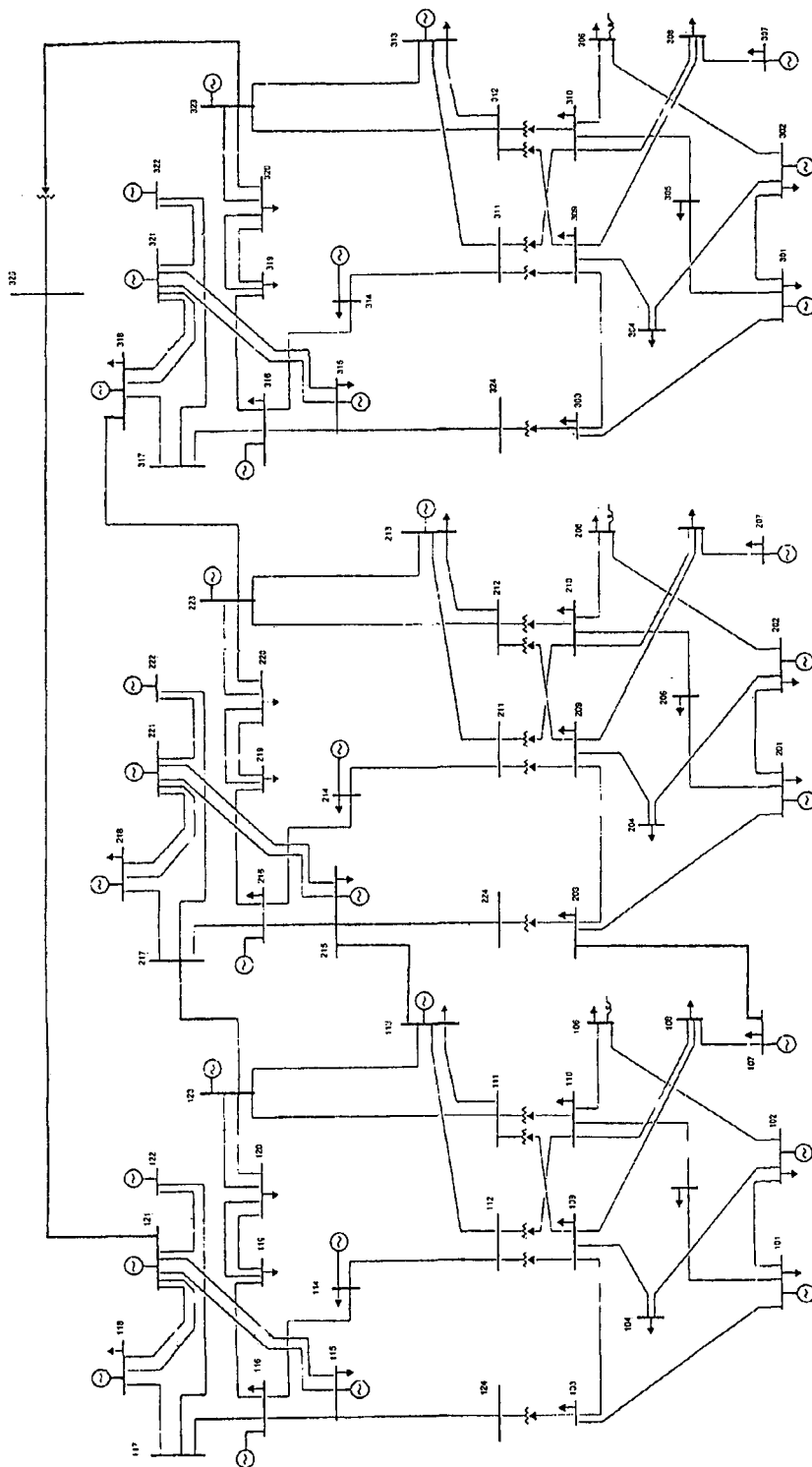


Figura B.1 - Diagrama Unifilar - RTS96

B.4 - Análise de Adequação do Sistema RTS96

O resultado da avaliação da confiabilidade composta considerando a análise de adequação são apresentados na tabela abaixo.

Tabela B.2 – Resultados da Análise de Adequação do Sistema RTS96

	Estimativa	Coef. Variação (%)
LOLP	0,1915	3,41
EPNS (MW)	25,51	4,99
EENS (MWh/ano)	223.486,30	4,99
LOLF (/ano)	45,88	7,80
LOLD (horas)	36,56	6,97

APÊNDICE C

Dados do Sistema SUL92

C.1 - Introdução

O sistema SUL92 representa um sistema equivalente das regiões Sul brasileira e inclui também suas conexões com o sistema da região Sudeste. Este sistema possui um total de 660 barras, 1072 elementos de rede e 77 geradores. Tendo em vista a pouca praticidade de se apresentar todos os dados deste sistema, este apêndice apresenta somente os dados dos geradores com suas respectivas taxas de falha, tempos de reparo e parâmetros do modelo clássico.

Para finalizar este apêndice, na última seção, são apresentados os resultados de uma análise de adequação utilizando-se os principais índices de confiabilidade obtidos com o programa NH2 desenvolvido pelo CEPTEL.

C.2 - Dados dos Geradores

A Tabela C.1 apresenta os dados dos geradores da região que são representados com o modelo clássico. Nesta tabela são apresentados, a reatância transitória ($X'd$), Inércia (H), a Potência Base para cálculo, a taxa de falha e tempo de reparo.

O sistema SUL92 é utilizado para estudos de confiabilidade composta da região Sul, sendo assim, somente falhas nesta região são consideradas nos estudos. Entretanto, outros geradores do sistema, mesmo não falhando, devem possuir modelos dinâmicos de representação. Os dados destes geradores são apresentado na Tabela C.2.

Tabela C.1 – Dados dos Geradores da região Sul

Barra	Usina	Nº de unidades	X'd (%)	H (s)	Base (MVA)	Taxa Falha (falhas/ano)	Tempo Reparo (h)
94	Itauba	4	30,6	3,659	139,0	7,6212	24,39024
101	Jacui	6	45,1	6,95	27,8	6,0444	12,68392
174	P Medici A	2	20,0	3,018	82,5	34,0764	41,58004
176	P. Medici B	2	21,0	3,206	82,5	21,2868	34,2818
183	Passo Real	2	30,2	3,093	73,0	7,6212	24,39024
567	G. B. M.	4	33,6	4,0	465,0	13,14	35,00175
573	G. P. Souza	4	25,0	2,35	68,6	7,6212	24,39024
674	S. Segredo	4	30,0	4,086	350,5	13,14	35,00175
704	J. Lacerda A	2	15,0	3,207	55,5	10,512	46,92633
705	J. Lacerda B	2	15,0	3,207	55,5	34,0764	41,58004
706	J. Lacerda C	2	31,5	3,097	156,3	16,4688	37,29952
707	J. Lacerda D	1	15,75	6,194	156,3	50,2824	36,17945
710	Passo Fundo	2	25,6	4,349	130,0	7,6212	24,39024
712	S. Osorio 1-4	4	31,0	3,875	170,0	7,6212	24,39024
712	S. Osorio 5-6	2	32,0	3,848	170,0	7,6212	24,39024
714	S. Santiago	4	30,0	4,086	350,5	13,14	35,00175
768	Jacui ELS	1	15,75	6,194	156,3	50,2824	36,17945
1017	Itaipu 60Hz	9	30,0	5,071	737,0	7,446	75,09763

Tabela C.2 – Dados dos Geradores equivalentes externos à região Sul

Barra	Usina	Nº de unidades	X'd (%)	H (s)	Base (MVA)
1183	A. Vermelha	1	4,333	26,52	250,0
1185	B. Bonita	1	7,475	11,6	34,0
1187	Caconde	1	14,55	6,25	40,0
1189	Capivara	1	7,5	22,47	178,0
1190	E. Cunha	1	8,75	11,38	29,6
1192	I. Solteira	1	1,637	73,15	170,0
1193	Ibitinga	1	11,33	11,04	42,4
1195	Jupia 440	1	2,25	54,0	112,0
1196	Jupia 138	1	13,5	9,0	112,0
1197	L. N. Garcez	1	8,75	11,38	29,6
1201	Rosana	1	8,0	12,86	80,0
1203	Três Irmãos	1	7,5	22,47	178,0
1204	Taquarucu	1	4,822	22,4	100,0
1205	Xavantés	1	10,43	16,92	115,0
1482	São Simão	1	5,0	31,14	283,0
1031	Itaipu 50Hz	1	3,95	49,95	823,6
1034	T. Preto	1	37,0	1,6	300,0
1191	Embuguaçu	1	37,6	2,34	250,0
1198	Malima	1	7,475	11,6	34,0
1202	S. Angelo	1	37,6	2,34	250,0

C.3 - Análise de Adequação do Sistema SUL92

Para o sistema SUL92 a Tabela C.3 apresenta os resultados da avaliação da confiabilidade composta considerando somente a análise de adequação.

Tabela C.3 – Resultados da Análise de Adequação do Sistema SUL92

	Estimativa	Coef. Variação (%)
LOLP	0,1213	3,71
EPNS (MW)	2,32	4,99
EENS (MWh/ano)	20360,54	4,99
LOLF (/ano)	55,81	5,68
LOLD (horas)	19,05	4,55

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P.M. Anderson. A.A. Fouad. Power System Stability and Control. 4. Ed. Ames: Iowa State University Press, 1977.
- [2] IEEE Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee, "IEEE Reliability Test System". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, New York, Vol. PAS-98, No. 6, Nov./Dec. 1979. pp. 2047-2054.
- [3] R. Billinton and P.R.S. Kuruganty, "Probabilistic Index for Transient Stability", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 1, Jan./Feb. 1980, pp. 195-206.
- [4] P.R.S. Kuruganty and R. Billinton, "Protection System Modelling in a Probabilistic Assessment of Transient Stability", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 5, May 1981, pp. 2163-2170.
- [5] R. Billinton and P.R.S. Kuruganty, "Probabilistic Assessment of Transient Stability in a Practical Multimachine System", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 7, Jul. 1981, pp. 3634-3640.
- [6] P.M. Anderson and A.A. Bose, "Probabilistic Approach to Power System Stability Analysis". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 8, Aug. 1983, pp. 2430-2437.
- [7] K.J. Timko, A.A. Bose, and P.M. Anderson, "Monte Carlo Simulation of Power System Stability", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 10, Oct. 1983, pp. 3453-3459.
- [8] L.G. Fonseca and I.C. Decker, "Iterative Algorithm for Critical Energy Deterhation in Transient Stability of Power Systems", Proc. of the IFAC Symp. Planning & Operation in Eletic Energy Systems, Rio de Janeiro, RJ, 1985.

- [9] J.C. Dodu and A. Merlin, "New Probabilistic Approach Taking into Account Reliability and Operation Security in EHV Power System Planning at EDF", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 3, Aug. 1986, pp. 175-181.
- [10] IEEE Task Force on Bulk Power Systems Reliability, "Bulk Power System Reliability Concepts and Applications", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 1, Feb. 1988, pp. 109-115.
- [11] M.P. Bhavaraju et al., "Requirements for Composite System Reliability Evaluation Models", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 1, Feb. 1988, pp. 149-155.
- [12] O. Bertoldi; L. Salvaderi, and S. Scalcino, "Monte Carlo Approach in Planning Studies: An Application to IEEE RTS", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 3, Aug. 1988, pp. 1146-1154.
- [13] Y.Y. Hsu and C.L. Chang, "Probabilistic Transient Stability Using the Conditional Probability Approach", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 4, Nov. 1988, pp. 1565-1572.
- [14] G.C. Oliveira, M.V.F. Pereira, and S.H.F. Cunha, "A Technique for Reducing Computational Effort in Monte-Carlo Based Composite Reliability Evaluation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 4, Oct. 1989, pp. 1309-1314.
- [15] B. Porreta et al., "A Comprehensive Approach for Adequacy and Security Evaluation of Bulk Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 2, May. 1991, pp. 1210-1217.
- [16] R. Billinton and E. Khan, "A Security Based Approach to Composite Power System Reliability Evaluation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, Feb. 1992, pp. 65-71.
- [17] M.V.F. Pereira and L.M.V.G. Pinto, "A New Computational Tool for Composite Reliability Evaluation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, Feb. 1992, pp. 258-264.

- [18] IEEE Task Force of the Computer and Analytical Methods Subcommittee, "Parallel Processing in Power Systems Computation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992, pp. 629-637.
- [19] A.M.L. Silva; J. Endrenyi, and L. Wang, "Integrated Treatment of Adequacy and Security in Bulk Power System Reliability Evaluations", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 1, Feb. 1993, pp. 275-282.
- [20] R. Billinton and W. Li, "A System Transition Sampling Method for Composite System Reliability Evaluation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, Aug. 1993, pp. 761-767.
- [21] IEEE Application of Probability Methods Task Force, "Bulk Power System Reliability Criteria and Indices: Trends and Future Needs", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, Feb. 1994, pp. 181-190.
- [22] J.C.O. Mello, Determinação do Valor da Confiabilidade em Sistemas Compostos de Geração e Transmissão, Tese de Doutorado, PUC-RJ, 1994.
- [23] J.C.O. Mello, M.V.F. Pereira, and A.M.L. Silva, "Evaluation of Reliability Worth in Composite Systems Based on Pseudo-Sequential Monte Carlo Simulation". IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 3, Aug. 1994, pp. 1318-1324.
- [24] A. Geist et al., PVM 3 - Users Guide and Reference Manual, Oak Ridge National Laboratory, 1994.
- [25] N. Gubbala and C. Singh, "Models and Considerations for Parallel Implementation of Monte Carlo Simulation Methods for Power System Reliability Evaluation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 779-786.
- [26] B. Porreta and E.G. Neudorf, "Conceptual Framework for Evaluation and Interpretation of the Reliability of the Composite Power System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 1094-1100.
- [27] I.C. Decker and J.E.G. Castro, "Melhoria da Segurança Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica Usando Otimização". Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática, São Paulo, SP, 1996. pp. 191-196.

- [28] D.M. Falcão, "High Performance Computing in Power System Applications", Presented at the 2nd International Meeting on Vector and Parallel Processing (Systems and Applications) – VECPAR'96, Porto, Portugal, 1996.
- [29] S. Aboreshaid, R. Billinton, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Probabilistic Transient Stability Studies Using the Method of Bisection", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 4, Nov. 1996, pp. 1990-1995.
- [30] J.D. Maccalley et al., "A Risk-Based Security Index for Determing Operating Limits in Stability-Limited Electric Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 3, Aug. 1997, pp. 1990-1995.
- [31] M.E. Khan, "Bulk Load Points Reliability Evaluation Using a Security Based Model", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998, pp. 456-461.
- [32] C.L.T. Borges et al., "Power Systems Composite Evaluation in a Parallel Processing Environment", Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, MG, 1998, pp. 2161-2166.
- [33] A.M. Rei et al., "Avaliação Estática e Dinâmica da Confiabilidade de Sistemas de Geração e Transmissão". Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, MG, 1998, pp. 2269-2275.
- [34] L. Wehenkel, "Emergency Control and Its Strategies", Proc. 13th Power Systems Computation Conference (PSCC), Trondheim, 1999, pp. 35-48.
- [35] C.L.C. Sá Jr. et al., "Key Issues in Energy and Electric Power Reliability Modeling", Proc. 13th Power Systems Computation Conference (PSCC), Trondheim, 1999, pp. 53-59.
- [36] C.L.T. Borges et al., "Parallel Composite Reliability Evaluation using Monte Carlo Simulation ", Proc. 13th Power Systems Computation Conference (PSCC), Trondheim, 1999, pp. 208-213.
- [37] A.C.G. Melo et al., "Combining Interior OPF and Monte Carlo Simulation in Probabilistic Analysis of Power Systems ", Proc. 13th Power Systems Computation Conference (PSCC), Trondheim, 1999, pp. 470-476.

- [38] A.C.G. Melo et al., "Combining Interior OPF and Monte Carlo Simulation in Probabilistic Analysis of Power Systems ", Proc. 13th Power Systems Computation Conference (PSCC), Trondheim, 1999, pp. 470-476.
- [39] IEEE Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee, "The IEEE Reliability Test System - 1996 ", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 3, Nov. 1999, pp. 1010-1018.
- [40] A.M. Rei et al., "Static and Dynamic Aspects in Bulk Power System Reliability Evaluations ", IEEE Trans. on Power Systems, a ser publicado.