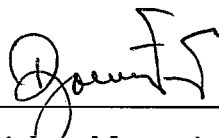


# AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE COMPOSTA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA EM AMBIENTES COMPUTACIONAIS PARALELOS E DISTRIBUÍDOS

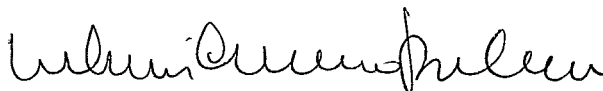
*Carmen Lucia Tancredo Borges*

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


Aprovada por:



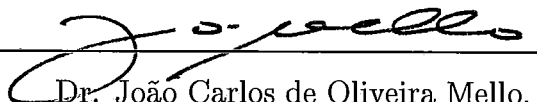
Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.



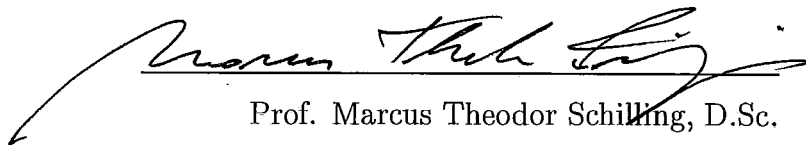
Prof. Valmir Carneiro Barbosa, Ph.D.



Dr. Albert Cordeiro Geber de Melo, D.Sc.



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



Prof. Marcus Theodor Schilling, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 1998

BORGES, CARMEN LUCIA TANCREDO

Avaliação da Confiabilidade Composta de  
Sistemas de Potência em Ambientes Com-  
putacionais Paralelos e Distribuídos [Rio de  
Janeiro] Dezembro de 1998

XIV, 158 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
D.Sc., Engenharia de Sistemas e Com-  
putação, 1998)

Tese - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Confiabilidade de Sistemas de Potência
2. Processamento Paralelo

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*Aos meus filhos,  
razão maior da minha existência*

# Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Djalma Falcão, pelo interesse e objetividade demonstrados durante o desenvolvimento desse trabalho e pelos inestimáveis ensinamentos transmitidos ao longo de vários anos de trabalho em comum;

Aos engenheiros Albert Melo e João Carlos Mello do CEPTEL, pelas valiosas contribuições a este trabalho e informações relativas a avaliação da confiabilidade composta;

Aos professores da COPPE – Sistemas, pelos conhecimentos adquiridos e em particular ao Prof. Valmir Barbosa, por suas aulas sobre Algoritmos Distribuídos;

Aos colegas do Departamento de Eletrotécnica da EE - UFRJ, pela compreensão da importância e dedicação requerida por este trabalho;

Aos colegas do NACAD - COPPE, pela ajuda na familiarização com o computador paralelo, e em particular, a Norberto Mangiavacchi, por sua grande paciência e colaboração espontânea;

À equipe do GEPAD - NCE, pela competente gerência do IBM RS/6000 SP, e muito especialmente ao amigo Sérgio Guedes;

Aos engenheiros Carlos Dornellas e Andrea Reis do CEPTEL, pelas informações relativas ao programa NH2;

A Deus, que me deu forças e determinação para concluir este trabalho.



Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciência (D.Sc.)

## AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE COMPOSTA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA EM AMBIENTES COMPUTACIONAIS PARALELOS E DISTRIBUÍDOS

Carmen Lucia Tancredo Borges

Dezembro de 1998

Orientador: Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Uma abordagem poderosa para a avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência é a utilização de métodos de simulação Monte Carlo (SMC). Essa abordagem oferece flexibilidade de modelagem e precisão, porém demanda elevado esforço computacional para modelos de sistema de grande porte. No entanto, a maior parte do tempo de processamento concentra-se na simulação dos estados operativos do sistema, a qual pode ser executada concorrentemente, sugerindo a utilização do processamento paralelo para redução do tempo total da simulação.

Existem dois enfoques distintos para a simulação Monte Carlo: SMC Não-Sequencial e SMC Sequencial. Na SMC não-sequencial, o espaço de estados é amostrado aleatoriamente baseado na distribuição de probabilidade dos estados operativos dos componentes. Já na SMC sequencial, o processo cronológico de operação do sistema é simulado através da amostragem sequencial dos estados do sistema por vários períodos de tempo, baseado na distribuição de probabilidade da duração dos estados.

Neste trabalho são propostas metodologias para avaliação da confiabilidade composta em paralelo, usando a SMC pelo enfoque não-sequencial e sequencial. As

metodologias são assíncronas com paralelismo de granularidade grossa. Para cada enfoque são propostas duas metodologias distintas: na SMC não-sequencial, as metodologias variam sobre o critério de controle da convergência paralela, e na SMC sequencial, sobre a estratégia de distribuição de carga entre processadores.

As metodologias foram implementadas em ambientes computacionais paralelos e distribuídos, compostos pelo computador paralelo de memória distribuída IBM RS/6000 SP, uma rede de estações de trabalho e uma rede de microcomputadores PCs. Os resultados obtidos em testes com modelos reais de sistemas de potência apresentam considerável redução do tempo de simulação e alta eficiência das metodologias paralelas nas plataformas computacionais.

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

POWER SYSTEMS COMPOSITE RELIABILITY EVALUATION ON  
PARALLEL AND DISTRIBUTED PROCESSING ENVIRONMENTS

Carmen Lucia Tancredo Borges

December 1998

Advisor: Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.

Department: Computer Systems Engineering

A powerful approach for composite reliability evaluation is Monte Carlo simulation (MCS) methods. This approach offers modeling flexibility and accuracy, although requiring large computational effort for large-scale models. However, most of the computational effort is concentrated on the simulation of the system operating states that can be performed concurrently, what suggests the use of parallel processing for reduction of the overall simulation time.

There are two approaches to Monte Carlo simulation: non-sequential MCS and sequential MCS. In non-sequential MCS, the system states are sampled randomly based on the probability distribution of the components operating states. In sequential MCS, the chronological behavior of the system is simulated by sampling sequences of system operating states for several time periods, based on the probability distribution of the states duration.

This work presents methodologies for parallel composite reliability evaluation, using both the non-sequential and sequential MCS approaches. The methodologies are based on a coarse grain asynchronous parallelism. Two different methodologies are proposed for each approach: in non-sequential MCS, the methodologies differ on the parallel convergence control strategy, and in sequential MCS, they differ on the load distribution strategy.

The methodologies were implemented on parallel and distributed processing environments, composed of an IBM RS/6000 SP distributed memory parallel computer, a network of workstations and a network of personal microcomputers. The results obtained in tests with actual power system models showed considerable reduction of the simulation time and high efficiency of the parallel methodology on the computing platforms.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Estado da Arte . . . . .	5
1.2 Estrutura da Tese . . . . .	6
<b>2 Confiabilidade de Sistemas de Potência</b>	<b>8</b>
2.1 Introdução . . . . .	8
2.1.1 Níveis Hierárquicos . . . . .	9
2.1.2 Adequação e Segurança . . . . .	9
2.1.3 Métodos de Avaliação . . . . .	10
2.1.4 Índices de Confiabilidade . . . . .	11
2.2 Confiabilidade Composta usando Simulação Monte Carlo . . . . .	14
2.2.1 Simulação Monte Carlo Não-Sequencial . . . . .	15
2.2.1.1 Modelos Estocáticos . . . . .	16
2.2.1.2 Amostragem de Estados . . . . .	19
2.2.1.3 Cálculo dos Índices de Confiabilidade . . . . .	23
2.2.2 Simulação Monte Carlo Sequencial . . . . .	24
2.2.2.1 Amostragem da Duração dos Estados dos Compo- nentes . . . . .	26
2.2.2.2 Amostragem da Transição de Estados do Sistema . . . . .	30
2.2.2.3 Cálculo dos Índices de Confiabilidade . . . . .	35
2.2.3 Análise de Adequação dos Estados do Sistema . . . . .	36
2.2.3.1 Análise de Contingências . . . . .	37
2.2.3.2 Modelo de Otimização para Minimizar Corte de Carga . . . . .	40
2.2.4 Comparação entre as Simulações Monte Carlo Não-Sequencial e Sequencial . . . . .	42
<b>3 O Processamento Paralelo e a Avaliação da Confiabilidade</b>	<b>44</b>
3.1 Conceitos Básicos de Processamento Paralelo . . . . .	44
3.2 Tentativas de Paralelização da Avaliação de Confiabilidade . . . . .	53
<b>4 Confiabilidade Composta em Paralelo por SMC Não-Sequencial</b>	<b>57</b>
4.1 Introdução . . . . .	57

4.2	Paralelização do Problema . . . . .	58
4.3	Filosofia de Distribuição dos Estados do Sistema . . . . .	60
4.4	Metodologias Paralelas . . . . .	62
4.4.1	Metodologia A - Intervalo de Tempo Fixo . . . . .	62
4.4.2	Metodologia B - Função da Convergência . . . . .	66
4.5	Resultados . . . . .	74
4.5.1	Considerações Iniciais . . . . .	74
4.5.1.1	Ambientes Computacionais . . . . .	74
4.5.1.2	Sistema de Troca de Mensagens . . . . .	76
4.5.1.3	Sistemas Testes . . . . .	77
4.5.1.4	Estudos Realizados . . . . .	77
4.5.1.5	Resultados da Execução Sequencial . . . . .	78
4.5.2	Metodologia A - Intervalo de Tempo Fixo . . . . .	80
4.5.2.1	Ambiente Computacional Paralelo . . . . .	80
4.5.2.2	Ambiente Computacional Distribuído (NOW) . . . . .	87
4.5.2.3	Ambiente Computacional Distribuído (Rede de PCs) . . . . .	90
4.5.3	Metodologia B - Função da Convergência . . . . .	94
4.5.3.1	Ambiente Computacional Paralelo . . . . .	94
4.5.3.2	Ambiente Computacional Distribuído (NOW) . . . . .	98
4.6	Comparação entre Metodologias . . . . .	99
<b>5</b>	<b>Confiabilidade Composta em Paralelo por SMC Sequencial</b>	<b>102</b>
5.1	Introdução . . . . .	102
5.2	Metodologias Paralelas . . . . .	103
5.2.1	Metodologia I - Anos em Paralelo . . . . .	104
5.2.2	Metodologia II - Paralelização do Ano . . . . .	111
5.3	Resultados . . . . .	120
5.3.1	Considerações Iniciais . . . . .	120
5.3.1.1	Ambientes Computacionais . . . . .	120
5.3.1.2	Sistema de Troca de Mensagens . . . . .	120
5.3.1.3	Sistemas Testes . . . . .	120
5.3.1.4	Estudos Realizados . . . . .	129
5.3.1.5	Resultados da Execução Sequencial . . . . .	129
5.3.2	Metodologia I - Anos em Paralelo . . . . .	132
5.3.2.1	Configuração Básica . . . . .	132
5.3.2.2	Configuração com Curva de Carga . . . . .	136
5.3.3	Metodologia II - Paralelização do Ano . . . . .	138
5.3.3.1	Ambiente Computacional Paralelo . . . . .	138
5.3.3.2	Ambiente Computacional Distribuído (NOW) . . . . .	140
5.4	Comparação entre Metodologias . . . . .	145
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>148</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>155</b>
<b>A</b>	<b>Publicações Relativas a Tese</b>	<b>156</b>

# Lista de Figuras

2.1	Modelo a Dois Estados . . . . .	17
2.2	Modelo Multiestados . . . . .	18
2.3	Modelo de saídas dependentes para dois componentes . . . . .	19
2.4	Modelagem da Curva de Carga . . . . .	20
2.5	Amostragem da duração dos estados dos componentes . . . . .	29
2.6	Geração da Série Sintética Agregada . . . . .	31
2.7	Amostragem da transição de estados do sistema . . . . .	33
2.8	Transição de estados incluindo novos modelos estocásticos . . . . .	34
3.1	Sistema de Memória Compartilhada . . . . .	46
3.2	Sistema de Memória Distribuída . . . . .	47
3.3	Rede de Estações de Trabalho (NOW) . . . . .	48
4.1	Distribuição dos Estados entre Processadores . . . . .	62
4.2	Metodologia A - Grafo de Alocação de Tarefas . . . . .	64
4.3	Metodologia A - Grafo de Precedência . . . . .	65
4.4	Controle da Convergência da Metodologia B . . . . .	69
4.5	Metodologia B - Grafo de Alocação de Tarefas . . . . .	71
4.6	Metodologia B - Grafo de Precedência . . . . .	71
4.7	Trajetória de Convergência - Metodologia A - BR-S . . . . .	82
4.8	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia A - RS/6000 SP - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	84
4.9	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia A - RS/6000 SP - BR-NNE . . . . .	86
4.10	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia A - NOW - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	88
4.11	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia A - NOW - BR-NNE . . . . .	90
4.12	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia A - Rede de PCs - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	91
4.13	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia A - Rede de PCs - BR-NNE . . . . .	92
4.14	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia B - RS/6000 SP . . . . .	97
5.1	Alocação das Séries Sintéticas aos Processadores . . . . .	106
5.2	Metodologia I - Grafo de Alocação de Tarefas (Inicial) . . . . .	107
5.3	Metodologia I - Grafo de Precedência (Inicial) . . . . .	107
5.4	Metodologia I - Grafo de Alocação de Tarefas (Detalhado) . . . . .	109
5.5	Metodologia I - Grafo de Precedência (Detalhado) . . . . .	109
5.6	Exemplo de Alocação Inicial das Sub-Séries . . . . .	112
5.7	Estratégia de Alocação Cíclica de Sub-Séries . . . . .	114
5.8	Exemplo Fictício do Ganho de Tempo da Estratégia Cíclica . . . . .	115

5.9	Metodologia II - Grafo de Alocação de Tarefas . . . . .	115
5.10	Metodologia II - Grafo de Precedência . . . . .	116
5.11	Estratégia de Identificação da Transição entre Sub-Séries Consecutivas	117
5.12	Estratégia de Análise de Subsequência de Falha dividida em Sub-Séries Distintas . . . . .	119
5.13	Custo de Interrupção Unitário adotado no sistema RTS-SQ . . . . .	122
5.14	Custo de Interrupção Unitário adotado no sistema BR-S e BR-SE . .	124
5.15	Curva de Carga da Macro Área São Paulo - Sistema BR-SE . . . . .	125
5.16	Curva de Carga da Macro Área Rio - Sistema BR-SE . . . . .	127
5.17	Curva de Carga da Macro Área Minas - Sistema BR-SE . . . . .	127
5.18	Curva de Carga da Macro Área Centro - Sistema BR-SE . . . . .	128
5.19	Curva de Carga da Macro Área Sul - Sistema BR-SE . . . . .	128
5.20	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia I - RS/6000 SP - Configuração Básica	135
5.21	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia II - RS/6000 SP - Configuração Básica	139
5.22	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia II - NOW - Configuração Básica . .	142
5.23	Curvas de <i>Speedup</i> - Metodologia II - NOW - Configuração Maior Precisão . . . . .	144



# Lista de Tabelas

4.1	RS/6000 SP instalado no NACAD - COPPE/UFRJ . . . . .	74
4.2	RS/6000 SP instalado no GEPAD - NCE/UFRJ . . . . .	75
4.3	Estações de Trabalho IBM RS/6000 43P . . . . .	75
4.4	Dados dos Sistemas Testes . . . . .	78
4.5	Resultados da Execução Sequencial - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	79
4.6	Índices de Confiabilidade calculados na Execução Sequencial - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	79
4.7	Resultados da Execução Sequencial - $\alpha \leq 1\%$ . . . . .	79
4.8	Índices de Confiabilidade calculados na Execução Sequencial - $\alpha \leq 1\%$ . . . . .	79
4.9	Número de Estados Analisados - Metodologia A . . . . .	81
4.10	Tempos de Execução - Metodologia A - RS/6000 SP - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	82
4.11	Eficiências - Metodologia A - RS/6000 SP - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	83
4.12	Número de Mensagens - Metodologia A . . . . .	84
4.13	Índices de Confiabilidade - Metodologia A - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	85
4.14	Tempos e Eficiências - Metodologia A - RS/6000 SP - $\alpha \leq 1\%$ . . . . .	86
4.15	Tempos de Execução - Metodologia A - NOW - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	87
4.16	Eficiências - Metodologia A - NOW - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	87
4.17	Tempos de Execução e Eficiências - Metodologia A - NOW - $\alpha \leq 1\%$ . . . . .	89
4.18	Tempos e Eficiências - Metodologia A - Rede de PCs - $\alpha \leq 5\%$ . . . . .	90
4.19	Tempos e Eficiências - Metodologia A - Rede de PCs - $\alpha \leq 1\%$ . . . . .	91
4.20	Tempos e Eficiência - Rede de PCs - BR-SE com $\alpha \leq 8\%$ . . . . .	93
4.21	Número de Mensagens Trocadas - Metodologia B . . . . .	94
4.22	Número de Estados Analisados - Metodologia B . . . . .	95
4.23	Tempos de Execução - Metodologia B - RS/6000 SP . . . . .	96
4.24	Eficiências - Metodologia B - RS/6000 SP . . . . .	96
4.25	Tempos de Execução - Metodologia B - NOW (p=8) . . . . .	98
4.26	Eficiências - Metodologia B - NOW (p=8) . . . . .	98
5.1	Dados do Sistema RTS-SQ . . . . .	121
5.2	Composição das Cargas por Barra para o Sistema RTS-SQ (em relação às barras do sistema IEEE-RTS) . . . . .	123
5.3	Composição das Cargas por Área para o Sistema BR-S . . . . .	125
5.4	Composição das Cargas por Área para o Sistema BR-SE . . . . .	126
5.5	Resultados da Execução Sequencial - Configuração Básica . . . . .	130
5.6	Índices de Confiabilidade calculados na Execução Sequencial - Configuração Básica . . . . .	130

5.7	Resultados da Execução Sequencial - Configuração Maior Precisão - NOW . . . . .	130
5.8	Índices de Confiabilidade calculados na Execução Sequencial - Configuração Configuração Maior Precisão - NOW . . . . .	131
5.9	Resultados da Execução Sequencial - Configuração Curva de Carga - RS/6000 SP . . . . .	131
5.10	Índices de Confiabilidade calculados na Execução Sequencial - Configuração Curva de Carga - RS/6000 SP . . . . .	131
5.11	Número de Anos e Estados Analisados - Metodologia I - Configuração Básica . . . . .	132
5.12	Tempos de Execução - Metodologia I - RS/6000 SP - Configuração Básica . . . . .	133
5.13	Eficiências - Metodologia I - RS/6000 SP - Configuração Básica . . .	133
5.14	Índices de Confiabilidade - Metodologia I - Configuração Básica . . .	136
5.15	Percentagem de Tempo de Amostragem das Séries Sintéticas . . . . .	136
5.16	Número de Anos e Estados Analisados - Metodologia I - Configuração Curva de Carga . . . . .	137
5.17	Tempo de Execução e Eficiência - Metodologia I - RS/6000 SP - Configuração Curva de Carga . . . . .	137
5.18	Índices de Confiabilidade - Metodologia I - Configuração Curva de Carga ( $p=10$ ) . . . . .	137
5.19	Tempos de Execução - Metodologia II - RS/6000 SP - Configuração Básica . . . . .	138
5.20	Eficiências - Metodologia II - RS/6000 SP - Configuração Básica . . .	139
5.21	Ganho Provocado pela Estratégia de Alocação Cíclica de Sub-Séries .	140
5.22	Tempos de Execução - Metodologia II - NOW - Configuração Básica .	141
5.23	Eficiências - Metodologia II - NOW - Configuração Básica . . . . .	141
5.24	Tempos de Execução - Metodologia II - NOW - Configuração Maior Precisão . . . . .	143
5.25	Eficiências - Metodologia II - NOW - Configuração Maior Precisão . .	143

# Capítulo 1

## Introdução

Os sistemas de potência constituem elemento básico no desenvolvimento econômico e social das sociedades modernas. Por razões técnicas e econômicas, esses sistemas evoluíram de um conjunto de pequenos sistemas isolados para grandes e complexos sistemas interligados com dimensões nacionais ou, até mesmo, continentais. Pode-se dizer que sistemas elétricos de potência estão entre os maiores sistemas já desenvolvidos pelo homem. O elevado número de componentes, geograficamente distribuídos por todo um país ou continente, associado com as incertezas na demanda de potência e disponibilidade de recursos energéticos, tornam o projeto e operação destes sistemas uma tarefa altamente complexa.

A função básica dos sistemas de potência é atender à demanda de energia dos consumidores da maneira mais econômica possível, dentro de padrões de continuidade, qualidade e segurança aceitáveis. O ideal seria que o fornecimento de energia aos consumidores fosse ininterrupto. No entanto, a ocorrência de falhas em determinados componentes do sistema pode desencadear perturbações capazes de afetar um grande número de consumidores, podendo levar à interrupção do fornecimento de energia elétrica. A fim de reduzir a probabilidade, frequência e duração desses eventos de falha e reduzir seus efeitos, é necessário realizar investimentos financeiros no sentido de aumentar a confiabilidade do sistema. Por outro lado, devido à sofisticação dos equipamentos elétricos e eletrônicos utilizados pelos consumidores, a exigência em termos da confiabilidade do suprimento de energia elétrica tem aumentado consideravelmente. É evidente que os requisitos econômicos e de confiabilidade

podem conflitar e levar a decisões gerenciais difíceis. A falta de investimentos no setor elétrico força a operação de tais sistemas mais próximo de seus limites, aumentando a necessidade de avaliar de forma mais precisa os riscos de interrupção ou degradação da qualidade do suprimento de energia elétrica.

Mais recentemente, mudanças institucionais no setor elétrico, tais como aquelas provocadas por políticas de desregulamentação, privatizações, entre outras, vem criando um ambiente competitivo no mercado de energia elétrica onde a avaliação da confiabilidade do serviço a ser prestado pelas empresas é de fundamental importância no fechamento de contratos com grandes consumidores. Aliado a isso, a definição dos custos associados com a interrupção de energia vem merecendo especial atenção de especialistas do setor, para que se possa avaliar o quanto é interessante investir na confiabilidade do sistema em função do custo do investimento em si e do custo da interrupção para o consumidor e para as empresas fornecedoras de energia elétrica. A reestruturação do setor elétrico introduz também novas preocupações a respeito da confiabilidade do sistema. Novos conceitos como mercado de energia, acesso aberto ao sistema de transmissão, co-geração, produtores independentes, etc., levam a condições operativas não verificadas anteriormente. Esse novo cenário requer a avaliação da confiabilidade de partes maiores do sistema interligado e pode demandar uma modelagem do sistema a nível nacional. Neste contexto, torna-se uma necessidade o desenvolvimento de ferramentas computacionais capazes de modelar e analisar sistemas de potência de dimensões muito elevadas.

Modelos probabilísticos vêm sendo cada vez mais utilizados na avaliação do desempenho de sistemas de potência. A partir de informações relativas a falhas dos componentes do sistema, esses modelos permitem estabelecer índices de desempenho do sistema os quais podem ser utilizados para auxiliar a tomada de decisões relativas a novos investimentos, políticas operativas e para balizar transações no mercado de energia elétrica. Esse tipo de estudo recebe o nome genérico de Avaliação da Confiabilidade [1] e pode ser realizado nos níveis de geração, transmissão, distribuição ou ainda, combinando os vários níveis. Neste último caso teríamos os estudos de confiabilidade composta dos quais o mais utilizado na prática é a avaliação da confiabilidade de sistemas compostos de geração e transmissão, abordada neste trabalho.

O objetivo básico da avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência é avaliar a capacidade do mesmo em satisfazer a demanda de energia elétrica nos seus principais pontos de consumo de energia. Para tanto, considera-se a possibilidade de falhas em componentes do sistema de geração e de transmissão e avalia-se o impacto dessas falhas no suprimento de energia. Dentro do modelo probabilístico, a avaliação da confiabilidade pode ser realizada utilizando técnicas analíticas ou simulação estocástica. A simulação Monte Carlo (SMC) [2, 3] é largamente utilizada na avaliação da confiabilidade composta, devido a flexibilidade de utilização de modelos precisos de componentes e condições operativas do sistema, aliado à possibilidade de representar fenômenos complexos e um grande número de eventos severos.

Existem duas abordagens distintas para a simulação Monte Carlo na avaliação da confiabilidade composta: SMC Não-Sequencial e SMC Sequencial. Na SMC não-sequencial, o espaço de estados é amostrado aleatoriamente sem preocupação com a cronologia do processo de operação do sistema. Já na SMC sequencial, os estados do sistema são sequencialmente amostrados por vários períodos de tempo, simulando uma realização do processo estocástico de operação do sistema. Os valores esperados dos principais índices de confiabilidade, incluindo os índices de frequência e duração (F&D), podem ser calculados pelas duas abordagens [4]. No entanto, estimativas da duração específica de interrupções do fornecimento de energia e a distribuição de probabilidade dos índices relacionados à duração só podem ser obtidos pela SMC sequencial [5]. Por outro lado, a SMC sequencial demanda um esforço computacional muito maior, o que pode tornar inviável a análise de sistemas de grande porte em plataformas computacionais convencionais [6].

Para as duas abordagens possíveis, a avaliação da confiabilidade baseada em SMC exige a análise da adequação de uma quantidade muito elevada de estados operativos do sistema, para diferentes configurações do sistema e níveis de carga. Cada uma dessas análises simula a operação do sistema no estado amostrado, a fim de determinar se a demanda de energia pode ser atendida sem violação de restrições operativas e de segurança. Isso requer a solução de um problema de análise de contingências e, em alguns casos, de um problema de otimização de grande porte para determinar o corte de carga mínimo. A avaliação da confiabilidade composta por SMC de sistemas de grande porte pode demandar horas de processamento

em estações de trabalho de alto desempenho. Dependendo do tamanho do sistema e nível de modelagem, os requisitos computacionais podem se tornar inaceitáveis nas plataformas convencionais, especialmente para a SMC sequencial. Felizmente, a característica naturalmente desacoplada da computação realizada na SMC oferece grandes possibilidades para o uso eficiente de processamento paralelo e distribuído [7, 8]. Aliado a isso, a evolução de processadores e redes de comunicação já atingiram um estágio de desenvolvimento no qual tanto o processamento paralelo como o distribuído são econômica e operacionalmente maduros para aplicações em engenharia.

O objetivo deste trabalho é desenvolver metodologias para avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência usando SMC em ambientes computacionais paralelos e distribuídos. Para tanto, é necessário a definição da metodologia adequada, o estabelecimento da estratégia de paralelização do problema, considerações quanto à arquitetura do ambiente paralelo, entre outros aspectos. A motivação para o desenvolvimento do trabalho é a tentativa de reduzir significativamente o tempo de processamento associado com a avaliação de confiabilidade composta de sistemas de grande porte. O fato da análise de confiabilidade composta demandar elevado esforço computacional tem forçado a utilização de modelos e métodos de solução aproximados em ambientes computacionais convencionais. A redução no tempo de processamento provocada pela utilização do processamento paralelo propicia a incorporação de uma melhor modelagem dos componentes e fenômenos elétricos, bem como a utilização de métodos de solução mais precisos. Isso vem a permitir a realização de uma análise mais acurada da confiabilidade do sistema, bem como dos riscos de interrupção ou degradação da qualidade do suprimento de energia, dentro de tempos de resposta aceitáveis e condizentes com as necessidades atuais do mercado de energia elétrica.

Neste trabalho, são propostas metodologias para avaliação da confiabilidade composta em paralelo, usando a SMC pelo enfoque não-sequencial e sequencial. As metodologias são assíncronas com paralelismo de granularidade grossa e foram implementadas e testadas em ambientes computacionais paralelos e distribuídos. Os resultados obtidos em testes com modelos reais de sistemas de potência apresentam elevada redução do tempo de simulação e alta eficiência em ambas as plataformas

computacionais.

## 1.1 Estado da Arte

Relativamente poucos trabalhos foram relatados sobre o desenvolvimento de métodos paralelos para avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência. Uma das primeiras tentativas de paralelizar um método de avaliação da confiabilidade composta é o trabalho descrito em [9]. Neste trabalho, o pacote computacional denominado SYREL desenvolvido para o EPRI, baseado no método de enumeração de estados, foi adaptado para rodar em multicomputadores com topologia hipercúbica. Os testes relatados com modelos de sistema de porte médio apresentam eficiência moderada em máquinas com 16 processadores.

No trabalho [10], uma versão paralela de um algoritmo de SMC foi implementada em um protótipo de sistema multiprocessador, composto por 16 nós com arquitetura de memória compartilhada baseada em barramento comum. Testes realizados com um modelo real de um sistema de grande porte atingiram alta eficiência.

No trabalho [11], é relatada uma investigação sobre topologias para escalonamento de processos que melhor se adaptem à paralelização da avaliação da confiabilidade multi-área usando SMC sequencial com passagem de tempo por intervalos fixos. O modelo de sistema de potência utilizado nos testes é uma rede sintética composta por três áreas interligadas, onde cada uma das áreas é um sistema IEEE Reliability Test System [12]. Foram obtidas altas eficiências numa máquina de memória compartilhada e eficiências menores numa máquina de memória distribuída com topologia hipercúbica.

No trabalho [13], está relatada uma adaptação do pacote computacional denominado MEXICO para execução em paralelo num supercomputador Cray YMP composto por 4 processadores. Os resultados obtidos em testes com modelos de sistema de porte médio apresentam eficiência moderada.

Nenhum dos trabalhos, no entanto, trata do desenvolvimento de metodologias para avaliação em paralelo da confiabilidade composta utilizando simulação Monte Carlo, explorando os enfoques de SMC não-sequencial e sequencial conforme será visto neste trabalho. Além disso, a análise da adequação dos estados amostrados e

o cálculo dos índices de confiabilidade não são tratados com a mesma complexidade mostrada neste trabalho. E finalmente, este trabalho visa levantar o desempenho das metodologias propostas em ambientes computacionais paralelos e distribuídos de uma forma geral, e não apenas relatar o resultado da implementação em uma plataforma computacional específica.

## 1.2 Estrutura da Tese

Esta tese é dividida em 6 capítulos cujos conteúdos serão resumidos a seguir.

Neste primeiro capítulo foi feita uma breve introdução ao problema de avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência frente ao modelo atual do setor elétrico e foram abordadas as vantagens e o alto custo computacional associado a utilização da simulação Monte Carlo. Foram colocados o objetivo e a finalidade desta tese, bem como uma descrição do estado da arte da aplicação de processamento paralelo na avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência.

No Capítulo 2 são descritos os principais conceitos relativos a avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência. São analisadas as duas abordagens da simulação Monte Carlo: SMC Não-Sequencial e SMC Sequencial. Para cada uma delas são descritos os processos de amostragem e o cálculo dos índices de confiabilidade. É descrito o processo de análise da adequação dos estados do sistema, que requer a solução de um problema de análise de contingências e de um problema de otimização de grande porte. Ao final, é feita uma comparação entre as duas abordagens apresentadas no tocante a capacidades e desempenho computacional.

No Capítulo 3 são apresentados os conceitos de processamento paralelo relacionados ao desenvolvimento de uma aplicação paralela. São caracterizados os sistemas de memória compartilhada, os sistemas de memória distribuída e as redes de estações de trabalho, esses dois últimos explorados neste trabalho. São apresentadas medidas de desempenho de implementações paralelas, tais como *Speedup* e Eficiência. Ao final, é apresentada uma revisão bibliográfica relativa a trabalhos já publicados que mostram tentativas de paralelização da avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência.

No Capítulo 4 são apresentadas as metodologias para avaliação da confiabilidade



composta em paralelo usando SMC Não-Sequencial. São apresentadas duas metodologias assíncronas de granularidade grossa. Na primeira metodologia, a convergência paralela é checada a intervalos de tempo pré-fixados. Na segunda metodologia, a convergência é checada em função da evolução da convergência do processo paralelo. Ambas as metodologias são implementadas em ambientes computacionais paralelos e distribuídos e testadas para modelos reais de sistemas de potência. Ao final, é apresentada uma comparação entre as duas metodologias.

No Capítulo 5 são apresentadas as metodologias para avaliação da confiabilidade composta em paralelo usando SMC Sequencial. São apresentadas duas metodologias assíncronas de granularidade grossa. Na primeira metodologia, cada série sintética anual é analisada em um único processador e as várias séries necessárias à convergência são analisadas em paralelo. Na segunda metodologia, a análise de cada série sintética é paralelizada, com partes de uma mesma série sendo analisadas em processadores diferentes, e os resultados são sequencialmente combinados ao final da análise de toda a série anual. Ambas as metodologias são implementadas em ambientes computacionais paralelos e distribuídos e testadas para modelos reais de sistemas de potência. Ao final, é apresentada uma comparação entre as duas metodologias.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões tiradas a partir deste trabalho e são também colocadas algumas propostas de continuação desta linha de pesquisa.

# Capítulo 2

## Confiabilidade de Sistemas de Potência

### 2.1 Introdução

Um dos principais objetivos do projeto e operação de sistemas de potência é atingir um certo grau de confiabilidade no suprimento de energia elétrica aos consumidores. A fim de atingir este objetivo, planos de investimento e estratégias de operação precisam prever a possibilidade de ocorrência de falhas dos componentes e outros distúrbios no sistema, para estimar se a qualidade e continuidade do suprimento, medidas por vários índices de confiabilidade, permanecerão dentro de níveis satisfatórios.

A avaliação da confiabilidade de sistemas de potência consiste no cálculo de vários índices de desempenho, que são indicadores da adequação do sistema às demandas de energia, levando em consideração a possibilidade de ocorrência de falhas nos equipamentos. Em particular, a avaliação da confiabilidade composta considera a possibilidade de ocorrência de falhas tanto no sistema de geração como de transmissão.

Um abordagem amplamente utilizada para a avaliação da confiabilidade composta é a simulação Monte Carlo, devido à flexibilidade de modelagem dos componentes e condições de operação. A SMC, por sua vez, pode ser tratada sob dois enfoques distintos: SMC Não-Sequencial e SMC Sequencial. Todos esses aspectos relativos à

avaliação da confiabilidade composta usando SMC serão abordados neste capítulo.

### 2.1.1 Níveis Hierárquicos

Um sistema de potência pode ser dividido em três zonas funcionais para fins de planejamento, operação e análise: geração, transmissão e distribuição. Essas zonas funcionais podem ser combinadas para formar os níveis hierárquicos que são usados nos estudos de confiabilidade. O nível hierárquico 1 (NH1) diz respeito apenas à geração. O nível hierárquico 2 (NH2) inclui tanto a geração como a transmissão, enquanto o nível hierárquico 3 (NH3) inclui todas as três zonas funcionais.

Na avaliação de confiabilidade de geração (NH1), toda a carga e toda a geração são concentradas em uma única barra e as limitações da rede de transmissão são ignoradas. A determinação dos índices se dá através de técnica analítica que requer reduzido esforço computacional.

Na avaliação de confiabilidade de sistemas compostos geração-transmissão ou simplesmente confiabilidade composta (NH2), o sistema de transmissão é incluído e são analisados os efeitos de falhas de geração, transmissão e composição de ambas. A avaliação da confiabilidade composta é muito mais trabalhosa do que a de geração, pois a inclusão da rede de transmissão aumenta sobremaneira o número de variáveis aleatórias envolvidas e a complexidade da avaliação do desempenho dos estados do sistema.

Estudos do NH3 não são normalmente executados diretamente devido à elevada dimensão do problema em um sistema real. A avaliação de confiabilidade do sistema de distribuição tem sido desenvolvida separadamente dos sistemas de geração e transmissão.

### 2.1.2 Adequação e Segurança

A confiabilidade de sistemas de potência pode ser determinada em relação a dois aspectos: de adequação do sistema e de segurança do sistema. O aspecto de adequação está relacionado com a existência de recursos suficientes dentro do sistema para satisfazer a demanda de carga do consumidor e os requisitos operacionais do sistema. Isso inclui os recursos de geração, transmissão e distribuição necessárias para

transportar a energia aos pontos de consumo. A avaliação em relação à adequação está associada com condições estáticas que não incluem a dinâmica do sistema e a resposta a distúrbios transitórios. Os diferentes estados do sistema são analisados sem levar em consideração possíveis instabilidades que podem ser introduzidas pelas falhas dos componentes do sistema.

A segurança está relacionado com a habilidade do sistema de responder a distúrbios dinâmicos ou transitórios que possam ocorrer no sistema. A avaliação em relação à segurança está associada com a resposta do sistema a qualquer perturbação a que ele esteja sujeito. Isso inclui perda abrupta de geração e/ou transmissão que podem levar a instabilidade dinâmica, transitória ou de tensão.

A maioria das técnicas disponíveis atualmente para avaliação da confiabilidade estão no domínio da avaliação quanto a adequação. A habilidade para avaliar a segurança é ainda muito limitada devido principalmente à complexidade associada com a modelagem do comportamento dinâmico do sistema [14]. A maioria dos índices calculados são, na realidade, índices de adequação e não índices de confiabilidade numa forma geral, apesar de serem assim designados.

### **2.1.3 Métodos de Avaliação**

A avaliação da confiabilidade de sistemas de potência foi inicialmente e ainda hoje pode ser, realizada utilizando-se métodos determinísticos. Um exemplo é o critério (N-1), que estabelece que o sistema deve ter um desempenho adequado para uma situação na qual qualquer um dos componentes esteja fora de operação. O problema em relação a métodos determinísticos é que eles não refletem a natureza estocástica do comportamento do sistema. Uma análise determinística pode identificar um estado de falha com consequências desastrosas para o sistema, mas que no entanto possua uma baixa probabilidade de ocorrência. Alternativas de investimento baseadas nesta análise levariam a um superinvestimento. Por outro lado, para o caso de falhas menos severas mas com alta probabilidade de ocorrência, uma análise determinística pode levar a uma confiabilidade insuficiente para o sistema. A avaliação probabilística do sistema pode identificar não só a severidade de um estado e seu impacto no comportamento e na operação do sistema, mas também a probabilidade

de sua ocorrência. A combinação apropriada de severidade e probabilidade geram índices que realmente representam situações de riscos e são mais adequados para utilização na determinação de novos investimentos.

Os métodos probabilísticos podem empregar duas técnicas distintas de avaliação: técnicas analíticas e simulação estocástica. Técnicas analíticas representam o sistema por modelos analíticos e avaliam os índices a partir destes modelos usando soluções matemáticas. Simulações estocásticas, em particular a simulação Monte Carlo [2, 3], estimam os índices através da simulação do comportamento estocástico do sistema. No entanto, a avaliação da confiabilidade baseada na simulação Monte Carlo exige a análise de uma quantidade muito elevada de estados operativos do sistema.

Para sistemas de grande porte, com condições operativas complexas e grande número de eventos severos, a simulação Monte Carlo é preferível, tendo em vista que permitem a inclusão de fenômenos e processos do sistema que podem precisar ser aproximados em métodos analíticos. Aliado a isso, o número de sorteios necessários para dado nível de precisão é independente do tamanho do sistema, o que torna a simulação Monte Carlo adequada para avaliação da confiabilidade de sistemas de grande porte. Outro ponto a considerar é a possibilidade de simular diferentes distribuições de probabilidade associadas com falhas e reparos dos componentes, bem como calcular as distribuições dos índices de confiabilidade além de seus valores esperados, o que métodos analíticos geralmente não podem.

#### 2.1.4 Índices de Confiabilidade

Os índices de confiabilidade podem ser calculados a nível de barras ou de sistema. As barras ou nós da rede elétrica são pontos de interconexão de elementos da rede. Em geral, correspondem a estações geradoras, subestações ou pontos de consumo. Os índices de barras fornecem uma indicação dos efeitos nas barras individuais, e os índices do sistema fornecem a avaliação da adequação do sistema como um todo. Tanto os índices de barras como os de sistema podem ser classificados como índices anualizados e anuais. Índices anualizados são calculados considerando um único nível de carga e expresso numa base anual. Índices anuais são calculados considerando a

variação detalhada da carga ao longo do ano, fornecendo uma avaliação mais realista do sistema.

A maioria dos índices de confiabilidade são valores esperados de uma variável aleatória e, em alguns casos, suas distribuições de probabilidade podem ser calculadas. Valores esperados não são parâmetros determinísticos e sim uma média a longo prazo do fenômeno em análise. Os índices básicos na avaliação da confiabilidade de sistemas compostos (NH2) são:

1. LOLP (Loss of Load Probability) - Probabilidade de perda de carga

$$LOLP = \sum_{i \in S} p_i \quad (2.1)$$

onde  $p_i$  é a probabilidade do estado  $i$  do sistema e  $S$  é o conjunto de todos os estados do sistema associados com corte de carga.

2. LOLE (Loss of Load Expectation) - Número esperado de horas de déficit de potência

$$LOLE = \sum_{i \in S} p_i T = T \sum_{i \in S} p_i \quad (2.2)$$

A LOLE é o número de horas médio em um dado período  $T$  (normalmente um ano) no qual espera-se que o pico de carga horário excede a capacidade de geração disponível. Se o período  $T$  considerado for um ano ( $T=8760$  horas), a LOLE é dada em [horas/ano] e corresponde a:

$$LOLE = 8760 \times LOLP \quad (2.3)$$

3. LOLF (Loss of Load Frequency) - Frequência de perda de carga [ocorrências /ano]

$$LOLF = \sum_{i \in S} (F_i - f_i) \quad (2.4)$$

onde  $F_i$  é a frequência de saída do estado  $i$  do sistema e  $f_i$  é a porção de  $F_i$  que corresponde a não ultrapassar a barreira entre o conjunto de estados com perda de carga e o conjunto de estados sem perda de carga.

Para sistemas compostos, é difícil calcular o índice LOLF, porque implica em que, para cada estado  $i$  do sistema com corte de carga, é necessário identificar todos os estado sem corte de carga que podem ser atingidos a partir de  $i$  em uma transição.

A frequência do  $i$ -ésimo estado do sistema  $F_i$  pode ser calculada como:

$$F_i = p_i \sum_{j \in M} \lambda_j \quad (2.5)$$

onde  $\lambda_j$  é a taxa de saída associada ao estado do  $j$ -ésimo componente no estado  $i$  do sistema e  $M$  é o conjunto de todos os componentes do sistema.

4. LOLD ( Loss of Load Duration) - Duração média de perda de carga [horas]

$$LOLD = \frac{8760 \times LOLP}{LOLF} = \frac{LOLE}{LOLF} \quad (2.6)$$

5. EPNS (Expected Power Not Supplied) - Valor esperado de potência não suprida [MW]

$$EPNS = \sum_{i \in S} C_i p_i \quad (2.7)$$

onde  $C_i$  é o corte de carga no estado  $i$  do sistema.

6. EENS (Expected Energy Not Supplied) - Valor esperado de energia não suprida[MWh]

$$EENS = \sum_{i \in S} C_i F_i D_i = 8760 \times \sum_{i \in S} C_i p_i \quad (2.8)$$

onde  $D_i$  é a duração do estado  $i$  do sistema. Ou seja:

$$EENS = 8760 \times EPNS \quad (2.9)$$

7. IS - Índice de Severidade [minutos do sistema]

$$IS = \frac{60 \times EEENS}{L} \quad (2.10)$$

onde  $L$  é o pico de carga anual do sistema em MW.

Este índice pode ser interpretado como a duração equivalente (em minutos) da perda de toda a carga do sistema sob condições de pico de carga.

## 8. ICE - Índice de Confiabilidade de Energia

O valor complementar da energia não suprida, isto é, a energia realmente suprida pode ser dividida pela energia total demandada para fornecer um índice normalizado. Este índice é utilizado para comparar a adequação de sistemas que diferem consideravelmente em tamanho.

$$ICE = 1 - \frac{EPNS}{L} \quad (2.11)$$

## 2.2 Confiabilidade Composta usando Simulação Monte Carlo

A avaliação da confiabilidade composta usando SMC consiste na determinação de vários índices de confiabilidade, baseado no modelo estocástico de operação do sistema. De uma forma geral, o problema pode ser dividido em três funções principais: amostragem dos estados do sistema, análise da adequação dos estados amostrados e cálculo dos índices de confiabilidade.

Os índices de confiabilidade composta podem ser obtidos utilizando-se duas representações distintas: espaço de estados e representação cronológica. Essas representações influem no método de amostragem dos estados e no cálculo dos índices de confiabilidade. A análise da adequação dos estados amostrados pode ser feita da mesma forma para as duas representações.

Uma das abordagens para a representação por espaço de estados é a utilização da SMC não-sequencial, também chamada de SMC por amostragem de estados. Na SMC não-sequencial, o espaço de estados do sistema é amostrado de maneira aleatória, baseado na distribuição de probabilidade dos estados operativos dos



componentes. As amostras correspondem a “fotografias” dos estados das variáveis aleatórias do sistema.

Na representação cronológica, os estados do sistema são amostrados sequencialmente no tempo. Uma forma de implementação da representação cronológica é a utilização da SMC sequencial. Na SMC sequencial, o processo estocástico de operação do sistema é simulado pela amostragem de seqüências de estados operativos do sistema baseado na distribuição de probabilidade da duração dos estados dos componentes. Essas seqüências são amostradas por vários períodos pré-determinados, usualmente anos, e são referenciadas como séries sintéticas anuais [15]. Nas seções seguintes, serão discutidos os aspectos relativos à avaliação de confiabilidade por estas duas categorias de simulação Monte Carlo.

### 2.2.1 Simulação Monte Carlo Não-Sequencial

Na simulação Monte Carlo não-sequencial, os estados do sistema são selecionados por amostragem do espaço de estados. Cada estado do sistema é obtido pela amostragem dos estados dos componentes, com base nos seus modelos estocásticos de falha, sem nenhuma preocupação com a cronologia do processo de operação do sistema. O conjunto de todos os possíveis estados  $\underline{x}$ , obtido para todas as combinações possíveis de estados dos componentes, é chamado de Espaço de Estados e denotado por  $X$ . Um algoritmo conceitual para esta simulação é dado a seguir [3].

#### Algoritmo Conceitual da SMC Não-Sequencial (Alg-1)

1. *Selecione um estado do sistema  $\underline{x} \in X$  correspondente a um nível de carga, disponibilidade de componentes, condições de operação, etc.*
2. *Calcule o valor de uma função de avaliação  $F(\underline{x})$  a qual quantifica o efeito de violações nos limites operativos neste estado específico. O efeito de ações corretivas tais como reprogramação da geração, correção do perfil de tensão e em último caso, corte de carga, pode ser incluído nesta avaliação.*
3. *Atualize a estimativa  $\bar{E}(F)$ , ou seja, atualize o valor esperado dos índices de confiabilidade baseado no resultado obtido no passo (2).*

4. Se a precisão das estimativas é aceitável, o processo é dito convergido. Caso contrário, retorne ao passo (1).

O passo (1) do algoritmo anterior consiste na obtenção do vetor aleatório  $\underline{x}$  pela amostragem da distribuição de probabilidade das variáveis aleatórias correspondentes aos estados dos componentes, utilizando um algoritmo de geração de números pseudo-aleatórios.

No passo (2) é necessário simular as condições de operação do sistema no estado amostrado, a fim de verificar a possibilidade de atendimento à demanda de potência sem violação dos limites operativos. Essa simulação, chamada de análise de adequação do estado, requer a solução de um problema de análise de contingência e, em alguns casos, de um problema de otimização de grande porte para simular o redespacho de geração e minimizar o corte de carga.

Os índices calculados no passo (3) correspondem a estimativas da expectância de diferentes funções de avaliação, obtidas para uma amostra cujo tamanho é o número de estados analisados. O algoritmo da SMC não-sequencial apresentado é baseado na técnica de amostragem de estados, que será descrita em seção subsequente.

### 2.2.1.1 Modelos Estocásticos

Um sistema elétrico de potência é composto por vários elementos, tais como geradores, linhas de transmissão, transformadores e cargas. Cada um desses elementos pode estar em um estado de um conjunto de possíveis estados, conjunto este determinado pelo tipo do componente e pelo seu comportamento frente a falhas. Na especificação dos modelos estocásticos de falhas dos componentes do sistema, geralmente consideram-se distribuições exponenciais para as durações dos eventos do sistema, o que resulta em ter-se taxas de transição entre estados constantes. Neste caso, o processo estocástico que descreve o comportamento do sistema é um processo de Markov homogêneo e as probabilidades limites deste processo, calculadas a partir das taxas de transição, são utilizadas para caracterizar as probabilidades de residência em cada estado [16]. Outras distribuições não exponenciais podem ser consideradas, o que leva a uma maior complexidade na modelagem do comportamento do sistema [17].

Saídas Forçadas Independentes A saída de um conjunto de componentes é dita independente quando a saída de um não afeta a probabilidade de saída dos demais, isto é, a probabilidade de saída do conjunto é o produto das probabilidades de saída de cada componente [18].

1. Modelo de Markov a 2 Estados: Utilizado para modelar a saída simples de circuitos e geradores, onde apenas dois estados são possíveis: operativo e falho, conforme mostrado na figura 2.1.

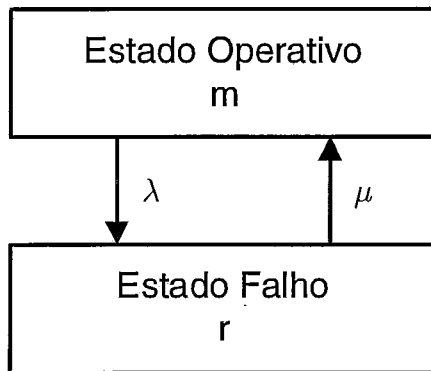


FIGURA 2.1: Modelo a Dois Estados

$$p_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{m}{r + m} \quad (2.12)$$

$$p_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{r}{r + m} \quad (2.13)$$

onde:

$\lambda$  — taxa de falha [ocorrências/hora]

$\mu$  — taxa de reparo [ocorrências/hora]

$m = 1/\lambda$  — tempo médio de operação [horas]

$r = 1/\mu$  — tempo médio de reparo [horas]

$p_0$  — probabilidade limite de residência no estado operativo

$p_1$  — probabilidade limite de residência no estado falho (TIF - Taxa de Indisponibilidade Forçada)

2. Modelo Multiestados: Utilizado para modelar unidades geradoras, em geral termoeletricas, na qual a falha de determinados componentes não leva à saída da unidade, mas sim a uma condição de operação com potência reduzida, conforme mostrado na figura 2.2.

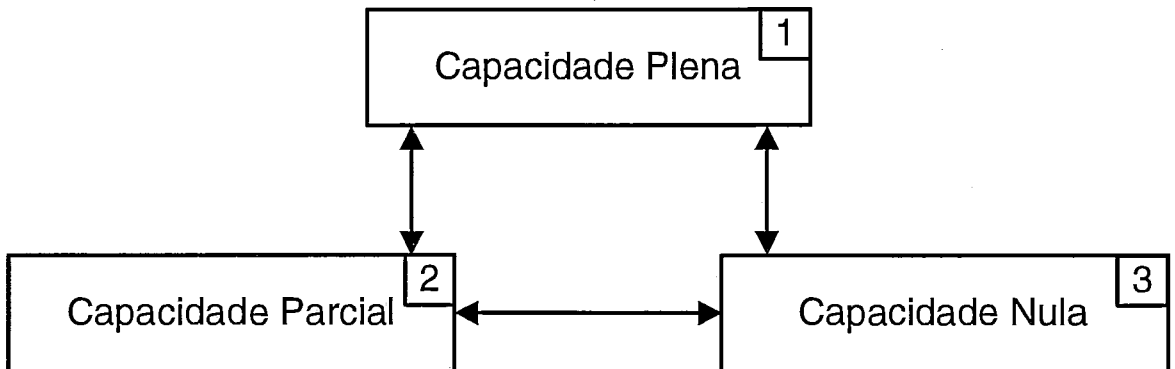


FIGURA 2.2: Modelo Multiestados

**Saídas Forçadas Dependentes** Podem ser classificadas em saídas de modo comum e saídas originadas em subestações. As saídas de modo comum são originadas por uma única causa externa, onde as saídas individuais não são consequência uma das outras, como no caso da queda de uma torre de transmissão que provoca o desligamento de mais de um circuito. As saídas originadas em subestações são consequência da atuação de dispositivos de proteção que levam ao desligamento de vários componentes.

Para a representação de saídas dependentes envolvendo dois elementos, utiliza-se o modelo de Markov no qual, além das transições provocadas pela falha de um dos componentes, são acrescentadas as transições provocadas pela falha dos dois componentes juntos. As transições provocadas pelo reparo dos componentes deve considerar a possibilidade de ser simultâneo ou não. Esse modelo pode ser facilmente expandido para representar saídas dependentes envolvendo mais de dois componentes. A figura 2.3 mostra um modelo de saídas dependentes para dois componentes do sistema.

**Modelagem da Carga** A modelagem adequada da carga do sistema com vistas ao cálculo de índices de confiabilidade requer uma série de considerações e discussões.

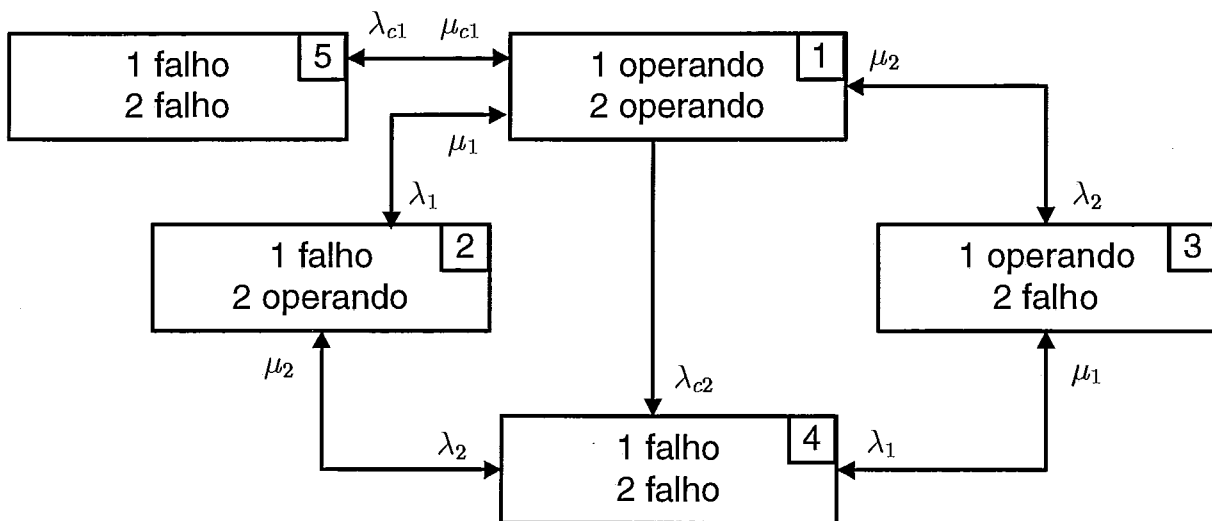


FIGURA 2.3: Modelo de saídas dependentes para dois componentes

Índices de confiabilidade mais realistas são calculados quando se consideram as variações nos níveis de carga ao longo do período. A influência da variação da carga se dá através do magnitude do corte de carga e dos valores de frequência e duração das interrupções de suprimento. Considerações quanto a incertezas nos níveis de carga e a existência de correlações entre as cargas das barras do sistema devem ser levadas em conta. As incertezas nos níveis de carga podem ser modeladas através de variável aleatória com distribuição normal. Correlações entre cargas nas barras podem ser expressas através de matrizes de coeficientes de correlação [16].

Uma abordagem possível é tratar a curva de carga como um modelo markoviano a nível do sistema e fazer uso de fatores de participação para distribuir as cargas pelas barras, o que implica em considerar que as cargas nas barras estão totalmente correlacionadas entre si. Nesta abordagem, o ciclo de carga passa a ser representado por um modelo a múltiplos estados individualizados, mostrado na figura 2.4, possibilitando a obtenção de informações quanto à probabilidade, frequência e duração de cada nível de carga e às taxas de transição para os outros níveis [19].

### 2.2.1.2 Amostragem de Estados

O estado do sistema depende da combinação dos estados de todos os seus componentes e o estado de cada componente pode ser determinado pelo sorteio da

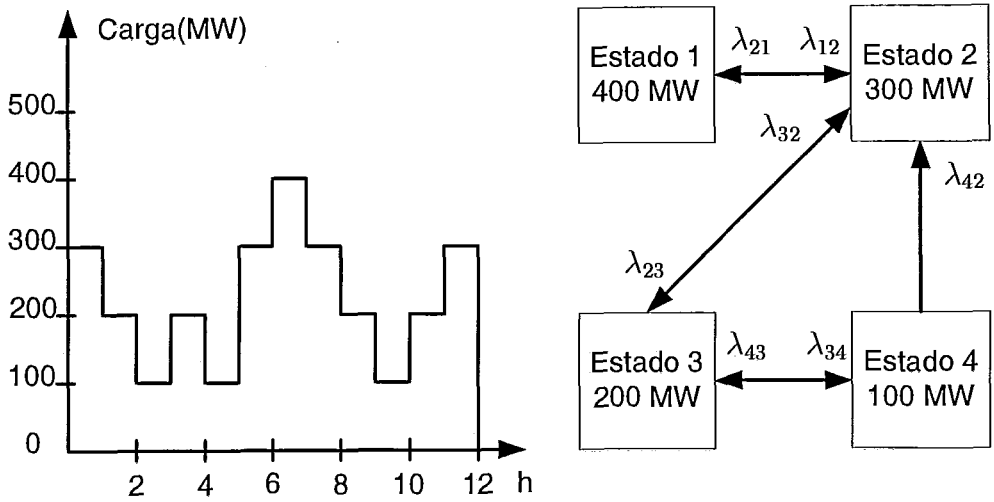


FIGURA 2.4: Modelagem da Curva de Carga

probabilidade do componente aparecer naquele estado.

Assuma, a princípio, que cada componente possua 2 estados, falha e sucesso, e que falhas de componentes são eventos independentes. O comportamento de cada componente pode ser descrito pelo sorteio de uma variável aleatória com distribuição uniforme no intervalo  $[0,1]$ , aplicando-se em seguida a transformação inversa na distribuição de probabilidade acumulada da variável aleatória (estado do componente) [2].

Seja  $x_j$  o estado do  $j$ -ésimo componente e  $TIF_j$  a sua probabilidade de falha. Sorteie um número aleatório  $U_j$  distribuído uniformemente entre  $[0,1]$  e considere:

$$x_j = \begin{cases} 0 & \text{(sucesso) se } U_j \geq TIF_j \\ 1 & \text{(falha) se } 0 \leq U_j < TIF_j \end{cases} \quad (2.14)$$

Para componentes que possuam múltiplos estados, o mesmo processo pode ser aplicado na determinação do estado do componente. A diferença está em que a distribuição de probabilidade acumulada possui múltiplos valores de probabilidade, o que se traduzirá na possibilidade de sorteio dos múltiplos estados. Para eventos dependentes, como saída de modo comum, procedimento específico que se utiliza da distribuição marginal e da distribuição de probabilidade condicional, possibilita a determinação dos estados das variáveis aleatórias dependentes. Para saídas dependentes envolvendo 2 componentes a 5 estados (figura 2.3), isso implica em ter-se uma

distribuição conjunta de probabilidade com 5 valores possíveis de probabilidade.

Seja o estado do sistema contendo  $m$  componentes representado pelo vetor  $\underline{x}$ :

$$\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (2.15)$$

onde  $x_j$  é o estado do  $j$ -ésimo componente. Para cada estado  $\underline{x} \in X$  pode-se associar uma probabilidade  $P(\underline{x})$ . Partindo-se dos modelos estocásticos dos componentes do sistema descritos na seção 2.2.1.1, pode-se calcular a probabilidade associada a cada estado do componente. Se, por exemplo, as falhas dos componentes são estatisticamente independentes, a probabilidade do estado  $P(\underline{x})$  é o produto das probabilidades associadas ao estado de cada componente  $x_j$  no estado do sistema  $\underline{x}$ , ou seja:

$$P(\underline{x}) = \prod_{j=1}^m P(x_j) \quad (2.16)$$

Seja  $F(\underline{x})$  uma função teste aplicada ao estado  $\underline{x}$ , cujo objetivo é avaliar se este estado é capaz de suprir uma demanda de carga específica. A expectância da função de avaliação para todos os estados do sistema é:

$$E(F) = \sum_{\underline{x} \in X} F(\underline{x}) P(\underline{x}) \quad (2.17)$$

Substituindo  $P(\underline{x})$  pela frequência de sorteio do estado  $\underline{x}$ :

$$E(F) = \sum_{\underline{x} \in X} F(\underline{x}) \frac{n(\underline{x})}{N} \quad (2.18)$$

onde  $N$  é o número de sorteios e  $n(\underline{x})$  é o número de ocorrências do estado  $\underline{x}$ . O valor de  $F(\underline{x})$  pode ser determinado pela análise da adequação do estado do sistema.

Uma estimativa da expectância  $\bar{E}(F)$  obtida a partir de uma amostra aleatória de  $N$  estados do sistema pode ser expressa pela equação abaixo:

$$\bar{E}(F) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(\underline{x}_i) \quad (2.19)$$

É importante notar que a equação (2.19) fornece apenas uma estimativa da expectância da função  $F(\underline{x})$ , que se traduz em um índice de confiabilidade do sistema

$\bar{Q} = \bar{E}(F)$ . A incerteza em torno da estimativa pode ser medida pela variância da estimativa da expectância:

$$V(\bar{Q}) = \frac{1}{N}V(F) \quad (2.20)$$

sendo  $V(F)$  a variância da função teste  $F(\underline{x})$ . Essa variância, quando o tamanho da amostra é grande o suficiente, pode ser expressa por:

$$V(F) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F(\underline{x}_i) - \bar{Q})^2 \quad (2.21)$$

A precisão da simulação Monte Carlo pode ser expressa pelo coeficiente de variação, que é definido como a relação entre o desvio padrão e a média. O coeficiente de variação da estimativa é uma medida da sua incerteza relativa e vale:

$$\alpha = \frac{\sqrt{V(\bar{Q})}}{\bar{Q}} \quad (2.22)$$

Substituindo a equação (2.20) na (2.22) e re-ordenando para ficar em termos de  $N$  chega-se a:

$$N = \frac{V(F)}{(\alpha\bar{Q})^2} \quad (2.23)$$

Esta equação mostra que para um nível de precisão desejado  $\alpha$ , o número de sorteios necessários  $N$  depende do nível de confiabilidade do sistema, mas é independente do tamanho e da complexidade do mesmo. Por essa razão, métodos de simulação Monte Carlo são adequados para a avaliação da confiabilidade de sistemas de grande porte e complexidade.

No caso específico do índice LOLP, pode-se mostrar que a equação (2.23) se reduz a:

$$N \approx \frac{1}{\alpha^2\bar{Q}} \quad (2.24)$$

uma vez que  $V(F) = \bar{Q} - \bar{Q}^2$  e a LOLP= $\bar{Q}$  é normalmente muito menor do que 1.0 em sistemas reais. Isso significa que o número de sorteios  $N$  é inversamente proporcional ao valor do índice de confiabilidade do sistema. Em outras palavras, para um sistema muito confiável, um grande número de sorteios e, conseqüentemente, um



grande esforço computacional, são necessários para satisfazer a precisão desejada. A expressão também mostra que o esforço computacional varia de forma inversamente proporcional ao quadrado da precisão desejada  $\alpha$ . Por exemplo, para reduzir a precisão à metade, o tamanho da amostra precisa quadruplicar.

O coeficiente de variação mostrado na equação (2.22) é frequentemente usado como critério de convergência na simulação Monte Carlo. Na avaliação de confiabilidade de sistemas de potência observou-se que o coeficiente de variação do índice EPNS apresenta a menor taxa de convergência, devendo ser o utilizado como critério de convergência, a fim de garantir precisão aceitável em estudos com vários índices.

Na comparação da eficiência relativa entre dois métodos Monte Carlo usados para solucionar o mesmo problema, deve-se levar em consideração não só os tempos de computação como também a precisão das soluções obtidas. Sejam  $t_1$  e  $t_2$  os tempos de computação e  $\sigma_1^2$  e  $\sigma_2^2$  as variâncias dos índices para os dois métodos. Se a relação

$$\eta = \frac{t_1 \sigma_1^2}{t_2 \sigma_2^2} < 1 \quad (2.25)$$

então o primeiro método pode ser considerado mais eficiente do que o segundo. A eficiência do método Monte Carlo depende do tempo de computação multiplicado pela variância da estimativa, mas não simplesmente no número de sorteios necessários.

### 2.2.1.3 Cálculo dos Índices de Confiabilidade

O valor estimado da expectância  $\bar{E}(F)$  definida na equação (2.19) pode representar qualquer índice de confiabilidade do sistema, bastando apenas definir convenientemente a função teste  $F(\underline{x})$ .

Para determinação do índice LOLP, equação (2.1),  $F(\underline{x})$  é a seguinte função binária:

$$F(\underline{x}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \underline{x} \text{ é uma estado de falha, isto é,} \\ & \text{se existe corte de carga associado ao estado } \underline{x} \\ 0 & \text{se } \underline{x} \text{ é um estado de sucesso} \end{cases} \quad (2.26)$$

Para determinação do índice EPNS, equação (2.7), a função teste passa a ser:

$$F(\underline{x}) = \begin{cases} \text{valor do corte de carga associado ao estado } \underline{x}, \\ \text{se } \underline{x} \text{ é um estado de falha} \\ 0 \quad \text{se } \underline{x} \text{ é um estado de sucesso} \end{cases} \quad (2.27)$$

A determinação do índice LOLF, equação (2.4), requer a identificação da fronteira que separa os estados do sistema de falha e de sucesso e, a seguir, calcular a frequência com que os estados cruzam a fronteira em apenas uma transição. Assim, a função teste  $F(\underline{x})$  para cálculo da LOLF é:

$$F(\underline{x}) = \begin{cases} \text{somatório das taxas de transição de cada componente} \\ \text{através da fronteira, se } \underline{x} \text{ é um estado de falha} \\ 0 \quad \text{se } \underline{x} \text{ é um estado de sucesso} \end{cases} \quad (2.28)$$

Uma vez definida uma função teste que possibilite o cálculo da LOLF usando SMC não-sequencial, a complexidade está em definir um método eficiente para identificar a fronteira. Inicialmente, acreditava-se que índices de frequência e duração (F&D) não podiam ser calculados usando-se amostragem do espaço de estados. Atualmente, já existem metodologias que permitem o cálculo de índices F&D usando simulação não-sequencial [4, 20].

A partir destes três índices básicos, todos os demais índices podem ser calculados, como verificado na seção 2.1.4.

### 2.2.2 Simulação Monte Carlo Sequencial

Na simulação Monte Carlo sequencial existe a preocupação com a cronologia do processo estocástico de operação do sistema e com as transições entre estados consecutivos do sistema. Os estados do sistema são sequencialmente amostrados por períodos pré-determinados, baseado na distribuição de probabilidade da duração dos estados dos componentes e no modelo da curva de carga. O período base normalmente adotado é o ano, por ser adequado à dinâmica do comportamento dos equipamentos e às variações na curva de carga do sistema. Outros períodos, no entanto, podem ser considerados. A sequência de estados amostrados dentro do

período de um ano é chamada de série sintética anual.

O cálculo dos índices de confiabilidade usando SMC sequencial pode ser expresso pela avaliação da seguinte expressão:

$$\bar{E}(G) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N G(y_k) \quad (2.29)$$

onde:

**N** — Número de séries sintéticas anuais simuladas

$y_k$  — Série sintética anual composta pelos estados amostrados sequencialmente dentro do ano  $k$

**G** — Função para cálculo dos índices de confiabilidade anuais para a série  $y_k$

$\bar{E}(G)$  — Estimativa dos índices de confiabilidade do processo calculado sobre todas as séries sintéticas simuladas

O algoritmo conceitual para avaliação da confiabilidade composta usando SMC sequencial é dado a seguir [21].

### Algoritmo Conceitual da SMC Sequencial (Alg-2)

- 1. Gere uma série sintética anual de estados do sistema  $y_k$ , isto é, amostre sequencialmente no tempo estados do sistema pela aplicação dos modelos estocásticos dos equipamentos e do modelo cronológico da carga.*
- 2. Analise a adequação dos estados  $\underline{x}$  da série  $y_k$  gerada, através do cálculo do valor de uma função de avaliação  $F(\underline{x})$ , a qual quantifica o efeito de violações nos limites operativos para cada estado. O efeito de ações corretivas pode ser incluído nesta avaliação. Acumule os resultados relativos ao ano  $k$ .*
- 3. Calcule os índices de confiabilidade anuais relativos ao ano  $k$  pela avaliação da função  $G(y_k)$  sobre os valores acumulados em (2).*
- 4. Atualize a estimativa de  $\bar{E}(G)$ , ou seja, atualize o valor esperado dos índices de confiabilidade do processo baseado no resultado obtido no passo (3).*

5. Se a precisão das estimativas é aceitável, o processo é dito convergido. Caso contrário, retorne ao passo (1).

Como pode-se observar pela comparação dos algoritmos conceituais (Alg-1) e (Alg-2), a diferença fundamental entre as SMC não-sequencial e sequencial está na amostragem dos estados do sistema (passo (1) dos algoritmos), que é feita aleatoriamente na primeira e sequencialmente no tempo na segunda. Outra diferença é a necessidade do processo de simulação ser repetido para vários anos na SMC sequencial, o que permite o cálculo dos índices para cada ano simulado e para todo o processo. O fato da SMC sequencial amostrar os estados sequencialmente no tempo implica em alterações na definição dos índices de confiabilidade em relação à SMC não-sequencial. A análise de adequação dos estados selecionados (passo (2) dos algoritmos) é idêntica para ambas as simulações. O processo de convergência também é baseado na incerteza relativa das estimativas dada pelo coeficiente de variação  $\alpha$  definido na equação (2.22), que é calculado sobre a função  $G$  para uma amostra de  $N$  anos simulados.

A série sintética anual do passo (1) do algoritmo anterior é gerada pela combinação dos processos de transição de estados dos componentes do sistema e a variação cronológica do modelo de carga na mesma base de tempo. O processo de transição de estados dos componentes é obtido pela amostragem sequencial da distribuição de probabilidade da duração dos estados, que pode seguir uma distribuição exponencial ou outra qualquer. Essa abordagem é chamada amostragem da duração dos estados dos componentes e será detalhada na seção seguinte. Existe uma outra abordagem para geração do processo cronológico de transição de estados, chamada amostragem da transição de estados do sistema, que no entanto só é aplicável a sistemas em que o tempo de residência nos estados segue uma distribuição exponencial. Esta abordagem será descrita em seção posterior.

### 2.2.2.1 Amostragem da Duração dos Estados dos Componentes

O processo de amostragem baseia-se na distribuição de probabilidade da duração dos estado dos componentes do sistema. O processo de transição cronológica dos estados do sistema é obtido pela combinação dos processos de transição dos estados

dos componentes.

É bastante frequente, em estudos de confiabilidade composta, considerar-se distribuições de probabilidade exponenciais para a duração dos estados dos componentes. Este processo de amostragem, no entanto, permite que outras distribuições não-exponenciais sejam consideradas.

Considere um processo estocástico com distribuição de probabilidade exponencial com parâmetro  $\lambda$  para a duração dos estados. A função de probabilidade acumulada é descrita por:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.30)$$

A duração do estado  $i$  pode ser amostrada aplicando-se o método da transformação inversa [2], que fornece:

$$t_i = -\frac{1}{\lambda_i} \ln U \quad (2.31)$$

onde:

$U$  — variável aleatória distribuída uniformemente no intervalo  $[0,1]$

$\lambda_i$  — taxa de transição do estado  $i$

$t_i$  — duração do estado  $i$

O processo de amostragem consiste, então, em sortear um número aleatório  $U$ , utilizando um algoritmo de geração de números pseudo-aleatórios, e substituir na equação (2.31) para obter uma amostra da duração do estado.

Aplicado a componentes modelados a dois estados (operação e reparo), o processo consiste em amostrar alternadamente os dois estados, de modo a obter:

$$t_0 = -\frac{1}{\lambda} \ln U \quad t_1 = -\frac{1}{\mu} \ln U \quad (2.32)$$

onde:

$t_0$  — tempo de operação

$t_1$  — tempo de reparo

$\lambda$  — taxa de falha

$\mu$  — taxa de reparo

Para componentes modelados a múltiplos estados, é necessário determinar a duração de cada estado possível. Para tanto, deve-se calcular

$$t_i = -\frac{1}{\sum_{s \in S} \lambda_{is}} \ln U \quad (2.33)$$

onde:

$S$  — conjunto de estados para os quais o estado  $i$  pode transitar

$\lambda_{is}$  — taxa de transição do estado  $i$  para o estado  $s$

Repetindo-se os processos descritos para todos os componentes do sistema, é possível obter uma sequência de operação de cada componente durante um período de tempo pré-especificado. Combinando-se as realizações individuais dos componentes contrói-se uma sequência de operação do sistema conforme mostrado na figura 2.5. Essa combinação é feita considerando-se que um novo estado do sistema é estabelecido quando pelo menos um componente mudar de estado.

A amostragem da duração dos estados dos componentes pode ser resumida pelo algoritmo abaixo.

### **Algoritmo de Amostragem da Duração dos Estados dos Componentes (Alg-2.1)**

1. *Determine o estado inicial do sistema  $\underline{x}_0$  pela combinação do estado inicial de todos os componentes (este estado pode ser o normal ou um outro determinado por amostragem de estados).*
2. *Amostre a duração da residência no estado atual  $\underline{x}_i$  de cada componente  $j$  do sistema por:*

$$t_i^j = -\frac{1}{\lambda_i^j} \ln U_j \quad (2.34)$$

onde  $U_j$  é um número aleatório com distribuição uniforme entre  $[0,1]$ .

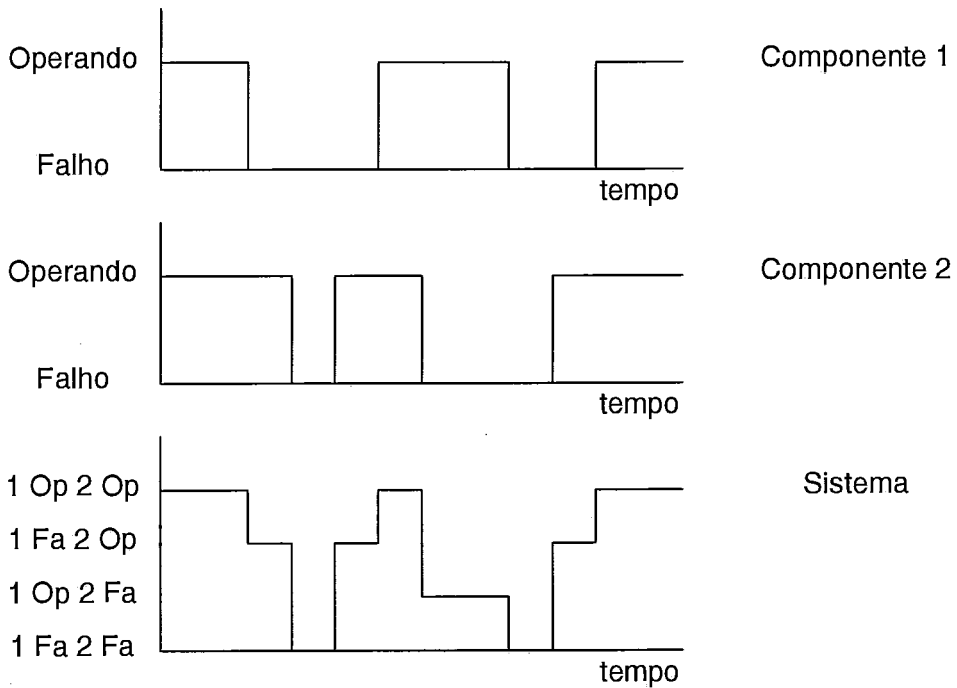


FIGURA 2.5: Amostragem da duração dos estados dos componentes

3. *Repita o passo anterior por um período de tempo determinado (normalmente, um ano) e armazene a sequência de operação de todos os componentes. Por esse procedimento, obtém-se o processo de transição cronológica de estado dos componentes.*
4. *Obtenha o processo de transição cronológica de estado do sistema pela combinação dos processos de transição dos estados dos componentes. Essa combinação é feita considerando que um novo estado é determinado quando pelo menos um componente muda de estado.*

O modelo cronológico de variação da carga pode ser combinado com o processo de transição de estados dos componentes a fim de formar uma realização agregada a nível de sistema. O modelo da carga pode ser representado para diferentes discretizações (minuto, hora, semana, mês) e níveis de representação (sistema, área, barra), flexibilidade essa que se constitui numa das grandes vantagens da SMC sequencial sobre a não-sequencial. O modelo normalmente adotado é a curva de carga horária do sistema.

Na obtenção da série sintética agregada a nível de sistema, o instante de tempo

em que ocorre uma transição de estados  $t_i$  é obtido por:

$$t_i = \min(t_c, t_l) \quad (2.35)$$

onde

$t_c$  — instante da transição do estado atual devido à transição dos componentes

$t_l$  — instante da transição do estado atual devido à transição da curva de carga

A duração de cada estado  $i$  do sistema é calculada por:

$$d_i = t_i - t_{i-1} \quad (2.36)$$

Esse método pode ser ilustrado pela figura 2.6, que corresponde a combinação da terceira curva da figura 2.5 com uma curva de variação de carga.

Quando a curva de carga do sistema não está disponível, a série sintética de operação do sistema é a mostrada na figura 2.5, obtida pelo algoritmo Alg-2.1.

O processo de amostragem descrito é executado para perfazer o passo (1) do algoritmo de avaliação da confiabilidade composta por SMC sequencial (algoritmo Alg-2). Cada estado do sistema é, então, analisado quanto à adequação (passo (2) do algoritmo Alg-2), seguindo a cronologia do processo determinada pela série sintética amostrada.

### 2.2.2.2 Amostragem da Transição de Estados do Sistema

Uma forma alternativa de gerar a sequência de estados na SMC sequencial é através da amostragem da transição de estados do sistema. Esta abordagem enfoca a transição de estados do sistema como um todo, ao invés da transição de estados dos componentes adotada na amostragem de duração. A sequência de transição de estados do sistema é criada sem a necessidade de amostrar os ciclos de transição dos componentes. O princípio básico envolvido é que a transição do estado do sistema é ditada pela transição do estado do componente que parte mais cedo do estado atual.

Este método apresenta a limitação de só poder ser aplicado a processos nos quais a duração de residência nos estados segue uma distribuição de probabilidade exponencial.



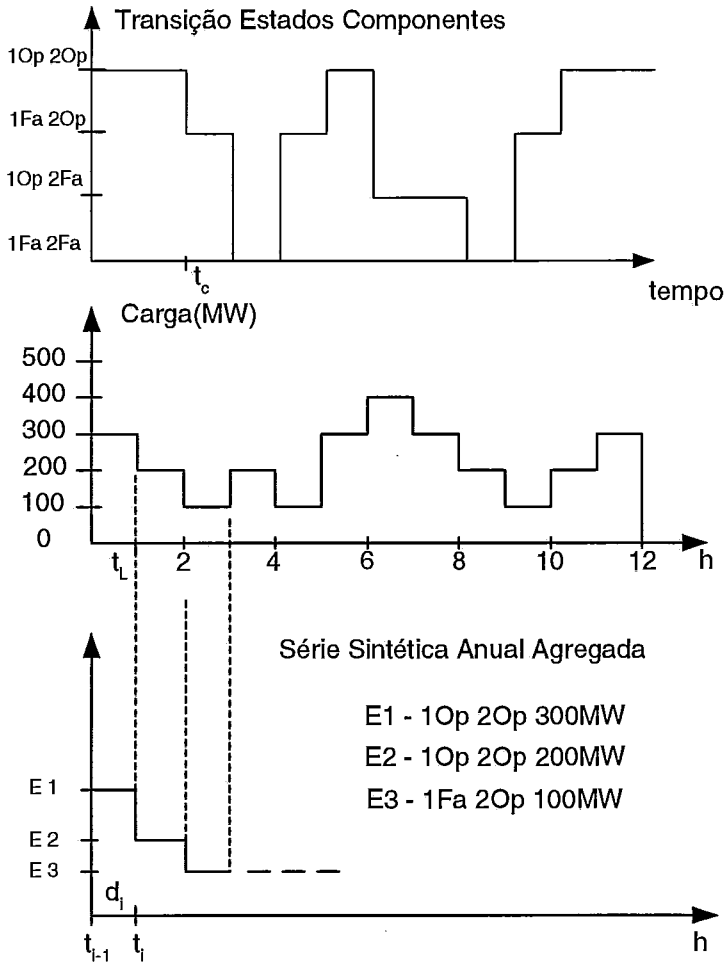


FIGURA 2.6: Geração da Série Sintética Agregada

Considere um sistema com  $m$  componentes modelados a dois estados e que a duração dos estados de cada componente  $j$  é descrita por uma distribuição exponencial com parâmetro  $\lambda_j$ . A função densidade de probabilidade é descrita por:

$$f_j(t) = \lambda_j e^{-\lambda_j t} \quad (2.37)$$

Pode-se mostrar que, se este for o caso, a duração do estado do sistema também segue uma distribuição exponencial cujo parâmetro  $\lambda$  vale [2]:

$$\lambda = \sum_{j=1}^m \lambda_j \quad (2.38)$$

de modo que

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = \left(\sum \lambda_j\right) e^{-(\sum \lambda_j)t} \quad (2.39)$$

Suponha que o sistema se encontre no estado  $\underline{x}_i$  e que a taxa de transição de cada componente em relação ao estado  $i$  é  $\lambda_j$ ,  $j = 1 \dots m$ . A transição do estado do sistema será determinada pela transição do estado do componente que possui menor tempo de residência no estado  $i$ , ou seja, a duração  $t_i$  do estado  $i$  do sistema é uma variável aleatória que pode ser expressa por  $t_i = \min(t_j)$ .

Supondo que o sistema transite do estado  $\underline{x}_i$  para  $\underline{x}_{i+1}$  no tempo  $t$ . A probabilidade que esta transição seja causada pela saída do  $j$ -ésimo componente do seu estado atual é a seguinte probabilidade condicional:

$$P_j = P(t_j = t | t_i = t) = \frac{\lambda_j}{\lambda} \quad (2.40)$$

A transição de qualquer componente pode levar à transição do estado do sistema. Conseqüentemente, partindo do estado  $\underline{x}_i$ , o sistema com  $m$  componentes a dois estados, possui  $m$  possíveis estados alcançáveis. A probabilidade do sistema atingir um destes estados é dada pela equação anterior e obviamente:

$$\sum_{j=1}^m P_j = 1 \quad (2.41)$$

Dessa forma, a determinação do estado para o qual o sistema transitará pode

ser feita por um processo bastante simples de amostragem. As probabilidades dos  $m$  possíveis estados alcançáveis a partir do estado  $i$ , calculadas por (2.40) são sucessivamente dispostas no intervalo  $[0,1]$ . Gera-se, em seguida, um número aleatório  $U$  uniformemente distribuído no intervalo  $[0,1]$ . Se o sorteio indicar o segmento correspondente ao componente  $j$  significa que a transição do estado do sistema será devido à transição de estado do componente  $j$ . A figura 2.7 ilustra o processo descrito.

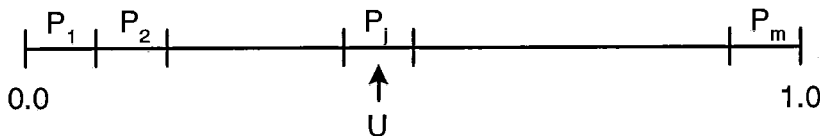


FIGURA 2.7: Amostragem da transição de estados do sistema

A metodologia de amostragem da transição de estados do sistema apresentada até então pressupõe que os componentes são modelados a dois estados. Na realidade, essa metodologia pode ser ampliada para incluir os modelos dos componentes a múltiplos estados e os eventos dependentes (saídas de modo comum).

Suponha que no sistema existam  $n_1$  componentes modelados a múltiplos estados e que a partir do estado atual, existam no máximo  $n_2$  estados para os quais cada um destes componentes pode transitar. Então, em uma única transição a partir do estado atual, existem mais, no máximo,  $n_1 \times n_2$  estados alcançáveis além dos  $m$  descritos anteriormente.

Para consideração de saídas de modo comum de dois componentes, modeladas a cinco estados (figura 2.3), deve-se incluir apenas as transições nas quais os dois componentes falham simultaneamente, se no estado atual os dois estiverem operando, ou a transição na qual os dois são reparados simultaneamente, se estiverem ambos falhos no estado atual. Isso se deve ao fato de que as transições onde apenas um dos componentes com saída de modo comum altera seu estado já estão contempladas nos  $m$  estados descritos anteriormente. Suponhamos que o total de estados a serem acrescentados para o sistema devido ao exposto seja  $n_{mc}$ .

Dessa forma, a partir de um estado  $\underline{x}_i$ , existem na realidade no máximo  $m'$

estados alcançáveis, onde

$$m' = m + n_1 \times n_2 + n_{mc} \quad (2.42)$$

Ou seja, a disposição das probabilidades dos estados alcançáveis no intervalo  $[0,1]$  passa a conter  $m'$  parcelas, conforme ilustrado na figura 2.8.

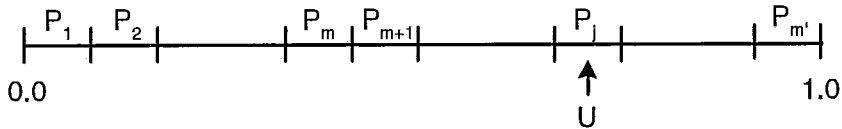


FIGURA 2.8: Transição de estados incluindo novos modelos estocásticos

A amostragem da transição de estados do sistema pode ser resumida pelo algoritmo abaixo.

#### Algoritmo de Amostragem da Transição de Estados do Sistema (Alg-2.2)

1. *Determine o estado inicial do sistema  $\underline{x}_0$  (este estado pode ser o normal ou um outro determinado por amostragem de estados).*
2. *Amostre a duração  $t_i$  do estado atual. Como a duração do estado do sistema segue uma distribuição exponencial com parâmetro  $\lambda$ , a duração do estado atual pode ser obtida pelo método da transformação inversa por:*

$$t_i = -\frac{1}{\lambda} \ln U' \quad (2.43)$$

onde  $U'$  é um número aleatório com distribuição uniforme entre  $[0,1]$ .

3. *Calcule a probabilidade de transição do estado do sistema devido a transição de cada componente  $j$  por:*

$$P_j = \frac{\lambda_j}{\lambda} \quad (2.44)$$

4. *Sorteie o componente que provoca a transição do estado do sistema, aplicando um outro número aleatório  $U$  com distribuição uniforme entre  $[0,1]$  na distribuição das probabilidades de transição (figura 2.8). Volte ao passo (2).*

Cada estado do sistema determinado pelo algoritmo acima é avaliado quanto à adequação e os índices de confiabilidade atualizados, da mesma forma que é realizado na SMC sequencial por amostragem da duração dos estados. A diferença entre os dois enfoques de amostragem da SMC sequencial está na maneira de obter o processo de transição cronológica de estados do sistema e no fato da amostragem da transição de estados do sistema só ser aplicável à sistemas onde o tempo de residência nos estados segue uma distribuição exponencial.

Neste trabalho foi adotada a amostragem da duração dos estados dos componentes na geração das séries sintéticas anuais da SMC sequencial por apresentar a flexibilidade de representação de diferentes distribuições de probabilidade.

### 2.2.2.3 Cálculo dos Índices de Confiabilidade

Todos os índices de confiabilidade apresentados anteriormente podem ser calculados na SMC sequencial pela avaliação da equação (2.29). Para tanto, é preciso que sejam utilizadas funções  $G(y_k)$  específicas para cada índice a ser calculado.

Para o índice LOLE, a função  $G(y_k)$  é definida como:

$$G(y_k) = \text{Somatório da duração de todos os estados de falha} \quad (2.45)$$

dentro do ano  $k$

Para o índice EENS,

$$G(y_k) = \text{Somatório da energia não suprida em todos os estados} \quad (2.46)$$

de falha dentro do ano  $k$

Para o índice LOLF,

$$G(y_k) = \text{Número de subsequências de falha dentro do ano } k \quad (2.47)$$

Uma subsequência de falha está relacionada a uma sequência de estados de falha, que corresponde a uma interrupção no fornecimento de energia de duração igual à soma das durações de todos os estados de falha da subsequência.

Os índices LOLP e EPNS são obtidos pela divisão da LOLE e da EENS, respectivamente, pelo número de horas do período anual, ou seja:

$$LOLP = \frac{LOLE}{8760} \qquad EPNS = \frac{EENS}{8760} \qquad (2.48)$$

O índice LOLD é obtido pela divisão da LOLE pela LOLF, ou seja:

$$LOLD = \frac{LOLE}{LOLF} \qquad (2.49)$$

Um outro índice, denominado LOLC - *Loss of Load Cost* ou Custo da Perda de Carga, pode ser calculado pela SMC sequencial. Esse índice está relacionado à avaliação do custo da confiabilidade e é função do custo unitário de interrupção das diferentes classes de consumidores. Este índice é dependente da duração da interrupção de energia no sistema e por isso só pode ser calculado pela SMC sequencial [21].

### 2.2.3 Análise de Adequação dos Estados do Sistema

A maior parte do esforço computacional demandado pela avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência concentra-se na análise de adequação dos estados do sistema. O objetivo da análise é identificar se o sistema no estado amostrado é capaz de atender a demanda de energia sem violar os limites operativos, do ponto de vista estático. A análise de adequação dos estados é realizada de maneira idêntica, independentemente se a seleção dos estados se dá por amostragem do espaço de estados, como na simulação não-sequencial, ou por amostragem da duração ou transição dos estados, como na simulação sequencial.

Considere o espaço de estados do sistema  $X$ . Inicialmente, é necessário identificar se o estado selecionado  $\underline{x} \in X$  é um estado normal, no qual todos os componentes estão operando, ou um estado em contingência. Se for um estado em contingência, é necessário determinar se as condições operativas do sistema estão sendo atendidas sem necessidade de haver corte de carga. Isso demanda a execução de uma análise de contingência, que requer a solução de um problema de fluxo de potência seguido

da monitoração de algumas variáveis do sistema. Se esta análise identificar a necessidade de corte de carga para satisfazer as restrições operativas, medidas corretivas são acionadas com o objetivo de evitar ou ao menos minimizar o corte de carga necessário. Estas medidas corretivas requerem a solução de um problema de otimização, que simulam o redespacho de geração e determinam o corte de carga mínimo. É importante salientar que somente os estados que apresentem corte de carga após a solução do problema de otimização contribuem para os índices de confiabilidade.

### 2.2.3.1 Análise de Contingências

O objetivo da análise de contingências é determinar se o sistema elétrico, quando submetido a determinada contingência, é capaz de atender a demanda de energia sem violar restrições operativas. Essas restrições são ditadas pela capacidade máxima de fornecimento de energia das unidades geradoras, os limites de carregamento dos circuitos de transmissão, os níveis de tensão especificados para as barras do sistema, etc.

A ferramenta básica para análise de contingências é o fluxo de potência. O problema de fluxo de potência consiste essencialmente na determinação das tensões nodais da rede, da distribuição de fluxos e dos valores de geração de potência, para uma dada condição de carga-geração, sob regime permanente senoidal. Dependendo da aplicação, pode-se empregar o fluxo de potência não-linear (AC) ou o fluxo de potência linearizado (DC).

O problema de fluxo de potência não-linear (AC) é formulado como um sistema de equações algébricas não-lineares, que correspondem às primeira e segunda leis de Kirchhoff. As equações básicas do fluxo de potência impõem a conservação das potências ativa e reativa em cada nó da rede, isto é, a potência líquida injetada deve ser igual à soma das potências que fluem pelo componentes que têm esse nó como um dos terminais (Primeira Lei de Kirchhoff). A Segunda Lei de Kirchhoff é utilizada para expressar os fluxos de potência nos componentes como funções das tensões em seus nós terminais. Na solução do fluxo de potência não-linear pode-se utilizar diferentes métodos, entre eles destacando-se o método de Newton-Raphson, empregado neste trabalho para avaliação dos estados na SMC não-sequencial, e o método Desacoplado Rápido [22].

Na solução do fluxo de potência AC pelo método de Newton-Raphson, as equações algébricas não-lineares características da formulação do fluxo de potência:

$$\begin{cases} \underline{\Delta P} = \underline{P}^{esp} - \underline{P} = 0 & , \text{ para as barras de carga} \\ & \text{e geração (tensão controlada)} \\ \underline{\Delta Q} = \underline{Q}^{esp} - \underline{Q} = 0 & , \text{ para as barras de carga} \end{cases} \quad (2.50)$$

são resolvidas pelo processo iterativo de solução do sistema linearizado (2.51) abaixo, a cada iteração  $k$ , seguido da atualização dos valores dos módulos e ângulos das tensões nas barras pela equação (2.52) a seguir:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta P}^k \\ \underline{\Delta Q}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\Delta \theta}^k \\ \underline{\Delta V}^k \\ \underline{V}^k \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{\theta}^{k+1} \\ \underline{V}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\theta}^k \\ \underline{V}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{\Delta \theta}^k \\ \underline{\Delta V}^k \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

onde:

$P^{esp}$  — injeção especificada de potência ativa na barra

$Q^{esp}$  — injeção especificada de potência reativa na barra

$P$  — injeção calculada de potência ativa na barra

$Q$  — injeção calculada de potência reativa na barra

$\Delta P$  — erro no valor da injeção de potência ativa

$\Delta Q$  — erro no valor da injeção de potência reativa

$V$  — módulo da tensão da barra

$\theta$  — ângulo da tensão da barra

$\Delta \theta$  — correção no ângulo da tensão da barra

$\Delta V$  — correção no módulo da tensão da barra



$J$  — matriz Jacobiana

Já a formulação DC do fluxo de potência enfoca apenas a parcela ativa da potência, podendo ser descrita por um modelo linearizado. Esta formulação foi adotada neste trabalho para avaliação dos estados na SMC sequencial e pode ser solucionada pelo modelo descrito em (2.53):

$$\underline{P} = [B] \cdot \underline{\theta} \quad (2.53)$$

onde:

$B$  — matriz de susceptâncias do sistema

Na análise de contingências, é calculada a solução do fluxo de potência para cada estado do sistema amostrado e efetuada a monitoração do perfil operativo do sistema. Para tanto, parte-se da solução do fluxo de potência do sistema no estado normal, que constitui o caso base. Sobre este caso base são aplicadas as alterações nos estados dos componentes sorteadas na SMC (contingências), o que se constitui na configuração dos estados.

As contingências podem ser basicamente de dois tipos: contingências de unidades geradoras e contingências de saída de circuitos de transmissão, ou ainda combinações entre elas. As contingências de geração são de mais fácil solução, pois implicam somente na alteração das injeções nodais de potência e, conseqüentemente, no vetor de termos independentes das equações de fluxo de potência. Após a alteração, resolve-se o fluxo de potência nesta nova condição, partindo do ponto do caso base como inicialização. Em linhas gerais, isso significa analisar se a folga na capacidade de geração disponível em cada barra de geração pode compensar pela indisponibilidade de geração naquela barra provocada pela degeneração do estado de uma ou mais unidades geradoras. Se isso ocorrer, não há necessidade de corte de carga.

As contingências de circuitos de transmissão, por sua vez, envolvem a modificação da matriz de solução das equações da rede do fluxo de potência. Quando as equações da formulação AC são solucionadas pelo método de Newton-Raphson, isso não implica em grande problema, uma vez que a matriz Jacobiana já é recalculada a cada iteração. No entanto, no modelo linearizado, a matriz de coeficientes é constante. A modificação dessas matrizes provocada pelas contingências de transmissão

pode ser tratada refatorando-as, o que precisará ser feito a cada contingência, ou utilizando-se técnicas que dispensem a refatoração, como o método da compensação [23]. De qualquer forma, após a alteração da matriz, um fluxo de potência precisa ser solucionado para calcular os fluxos nas linhas sob as novas condições. Se a redistribuição do fluxo de potência devido a perda de linhas não criarem violações nas grandezas do sistema, estão o estado em contingência não requer corte de carga.

### 2.2.3.2 Modelo de Otimização para Minimizar Corte de Carga

Se como resultado da análise de contingências forem detectadas violações operativas, um problema de otimização precisa ser solucionado para determinar mudanças no ponto de operação do sistema. Estas mudanças podem levar um estado com restrições violadas (corte de carga potencial) a um estado de sucesso, onde as cargas são atendidas sem violação nos limites de tensão das barras e carregamento dos circuitos. Isso é realizado através da atuação de um conjunto de controles, tais como redespacho de geração ativa, para a formulação DC, e redespacho de potências ativa e reativa, alteração das tensões dos geradores e taps dos transformadores, chaveamento de componentes do sistema, etc, para a formulação AC. Se ainda assim um ponto de operação sem violações não for atingido, o modelo de otimização deve calcular o valor do corte de carga mínimo capaz de reconduzir o sistema a uma condição aceitável. Somente os estados em que for necessário este corte de carga serão considerados no computo dos índices de confiabilidade e o valor do corte de carga mínimo calculado será usado na determinação da EPNS (valor esperado de Potência Não Suprida).

Na formulação não-linear, o problema de otimização de grande porte apresentado é denominado Fluxo de Potência Ótimo (FPO). O problema de FPO determina um ponto de operação do sistema de potência que otimiza uma determinada função objetivo e satisfaz um conjunto de restrições físicas e de operação [24]. Pode ser matematicamente modelado como:

$$\text{Min } f(\underline{x}) \tag{2.54}$$

sujeito a

$$\underline{g}(\underline{x}) = 0$$

$$\underline{h}(\underline{x}) \leq 0$$

onde

$$\underline{g}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} g_1(\underline{x}) \\ g_2(\underline{x}) \\ \dots \\ g_n(\underline{x}) \end{bmatrix} \quad \underline{h}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} h_1(\underline{x}) \\ h_2(\underline{x}) \\ \dots \\ h_m(\underline{x}) \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

A função objetivo a ser minimizada neste caso é o corte de carga do sistema. As restrições de igualdade correspondem à modelagem estática da rede e as restrições de desigualdade, aos limites físicos dos equipamentos e critérios de operação e segurança. O FPO é um problema de programação não-linear (PPNL) de grande porte, com até milhares de restrições não-lineares, cuja solução demanda elevado esforço computacional. A utilização de técnica de linearizações sucessivas é uma tentativa de reduzir o tempo de processamento e a complexidade envolvidos na solução de um PPNL [25]. Essa técnica parte da linearização do modelo em torno de um ponto de operação através de uma aproximação de primeira ordem das restrições não-lineares, recaindo-se em um modelo linearizado. Esse modelo pertence à classe de problemas de programação linear (PPL) e pode ser solucionado usando um algoritmo tipo Dual-Simplex, por exemplo. Após a solução do PPL, as variáveis de controle são atualizadas e um novo fluxo de potência não-linear é solucionado. Esse processo é repetido até que não mais ocorram violações operativas. Esse método é adotado neste trabalho no esquema de medidas corretivas da SMC não-sequencial.

O problema de otimização solucionado no caso da modelagem linear do sistema corresponde a um problema de programação linear (PPL) da mesma forma mostrada nas equações (2.54) e (2.55). No entanto, as restrições de igualdade e desigualdade estão relacionadas apenas às equações lineares da rede e ao fluxo e geração de potência ativa. Esse PPL pode ser resolvido pelo método Dual-Simplex, modificado para explorar a esparsidade das equações do sistema elétrico. Esse foi o método

adotado neste trabalho no esquema de medidas corretivas da SMC sequencial.

Na avaliação da confiabilidade composta por SMC, um número muito elevado (da ordem de dezenas ou centenas de milhares) de estados operativos do sistema precisam ser analisados, o que pode levar a necessidade de solucionar milhares de problemas de otimização de grande porte. Isso ilustra o grande esforço computacional demandado pela avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência, bem como a concentração na fase de análise da adequação dos estados da maioria deste esforço.

#### **2.2.4 Comparação entre as Simulações Monte Carlo Não-Sequencial e Sequencial**

A simulação Monte Carlo não-sequencial, que utiliza a amostragem de estados como técnica de seleção de estados, amostra cada estado aleatoriamente no espaço de estados e considera cada estado como uma “fotografia” dos estados dos componentes do sistema. Não existe a preocupação com a cronologia do processo estocástico de operação do sistema, o que implica dizer que as transições entre estados do sistema são ignoradas.

Essa metodologia permite calcular todos os índices usuais de confiabilidade, inclusive aqueles relacionados com informações cronológicas, como a duração média da perda de carga (LOLD). No entanto, como não são consideradas as transições entre os estados, não é possível calcular valores específicos da duração das interrupções de energia, uma vez que as interrupções estão associadas a uma sequência de ocorrência de estados de falha do sistema. Estudos do custo da confiabilidade, nos quais o custo da interrupção de energia precisa ser calculado, dependem fortemente das durações das interrupções [26].

A simulação Monte Carlo sequencial representa todo aspecto cronológico de transição de estados do sistema. Uma realização do processo estocástico de operação do sistema é simulado, o que permite a identificação precisa de transições entre estados de falha e sucesso e o cálculo de valores específicos da duração das interrupções de energia. Além disso, permite a obtenção da distribuição de probabilidade dos índices relacionados à duração em adição aos valores esperados desses índices, o que não é

possível com a SMC não-sequencial. Se for utilizada a amostragem da duração dos estados dos componentes, distribuições não-exponenciais podem ser consideradas para os tempos de residência nos estados.

No entanto, a SMC sequencial requer um esforço computacional muitas vezes superior ao da simulação não-sequencial. Na simulação sequencial, os estados do sistema amostrados consecutivamente só podem variar em relação ao estado de um único componente, o que torna a convergência dos índices mais lenta. Além disso, é necessário simular toda uma realização anual (8760 horas) para se ter uma estimativa do índice desejado, não sendo correto extrapolar o índice anual a partir de valores intermediários. Essas características fazem com que o esforço computacional demandado pela análise de confiabilidade composta por SMC sequencial muitas vezes se torne proibitivo em ambientes computacionais convencionais.

Como conclusão, pode-se dizer que, em estudos de avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência onde apenas os valores esperados dos índices são necessários, a simulação não-sequencial é preferível, haja vista a possibilidade de calcular todos os índices usuais com menor esforço computacional. Esses estudos constituem a grande maioria dos casos de avaliação da confiabilidade atualmente.

Por outro lado, para os estudos nos quais existe a necessidade de identificar as durações das interrupções de fornecimento de energia no sistema, bem como a distribuição de probabilidade das durações, a simulação sequencial precisa ser adotada, apesar de sua alta demanda computacional. Um exemplo desse tipo de estudo é a avaliação do custo da confiabilidade, que envolve o cálculo do custo das interrupções de energia, tanto para o consumidor como para as concessionárias de energia elétrica e fornecedores independentes. Uma formulação alternativa, denominada pseudo-sequencial, foi proposta em [21] para reduzir o esforço computacional sem grande perda de precisão e aplicabilidade.

# Capítulo 3

## O Processamento Paralelo e a Avaliação da Confiabilidade

Este capítulo apresenta os conceitos básicos de processamento paralelo e distribuído relacionados com o desenvolvimento de uma aplicação paralela. São apresentadas apenas as questões diretamente relacionadas com este trabalho, sem a pretensão de cobrir de forma exaustiva todos os aspectos relativos à computação e sistemas paralelos. Ao final do capítulo são apresentadas as tentativas de paralelização da avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência já publicadas na literatura.

### 3.1 Conceitos Básicos de Processamento Paralelo

Nos dias de hoje, a demanda por recursos computacionais em algumas áreas de ciências e engenharia já não consegue ser atendida pela capacidade de processamento de um único processador. Apesar da significativa evolução no desenvolvimento de novas arquiteturas de processadores, existem limitações físicas no desempenho máximo que um processador pode atingir.

Uma alternativa para tentar atender a este aumento de demanda que vem se verificando ao longo dos anos é a utilização de processamento paralelo. A idéia básica do processamento paralelo é que um grupo de processadores trabalhando em cooperação sobre uma mesma tarefa consegue realizá-la em menos tempo do que um

único processador. Para se tentar conseguir, utilizando um único processador, o desempenho que pode ser atingido hoje com o processamento paralelo, seria necessário esperar alguns anos até que a tecnologia de processadores alcançasse o estágio de desenvolvimento necessário.

Para que a computação paralela possa ser empregada na redução do tempo de processamento de aplicações computacionais, é necessário identificar os graus de paralelismo inerentes aos problemas a serem solucionados. Em outras palavras, é necessário explorar tarefas concorrentes existentes nos programas que podem ser executadas em paralelo em sistemas computacionais com múltiplos processadores.

Historicamente, os sistemas de processamento paralelo evoluíram por dois caminhos: arquiteturas SIMD (Single Instruction Multiple Data) e MIMD (Multiple Instruction Multiple Data). Máquinas SIMD são geralmente construídas com um grande número de elementos de processamento simples dirigidos por um processador central de controle. Os dados da aplicação são distribuídos entre os processadores e o processador central dispatcha instruções que são condicionalmente executadas por cada processador, que opera no seu próprio subconjunto dos dados distribuídos (paralelismo de dados). Em contraste, em sistemas MIMD, cada processador executa seu próprio conjunto de instruções sobre seu próprio conjunto de dados [27, 28].

Máquinas MIMD evoluíram em duas direções principais: sistemas que fisicamente compartilham uma memória global (sistemas de memória compartilhada) e aqueles que distribuem a memória pelos processadores (sistemas de memória distribuída).

**Sistemas de Memória Compartilhada** São máquinas compostas por vários processadores que se comunicam através de uma memória global, compartilhada por todos os processadores. Um exemplo de sistema de memória compartilhada é aquele que conecta tanto a memória global como os múltiplos processadores a um barramento comum, existindo, no entanto, outros mecanismos de interconexão mais eficientes. Sistemas de memória compartilhada estão limitados em tamanho (aproximadamente 32 processadores) porque o aumento no número de processadores tende a aumentar o custo dos acessos à memória. Alguns exemplos de computadores comerciais disponíveis atualmente que se baseiam nesse sistema são SUN HPC 10000 e DEC

AlphaServer 8000. A figura 3.1 mostra um diagrama esquemático desse sistema, onde **P** representa o processador, **M** a memória e **I/O** os dispositivos de entrada e saída.

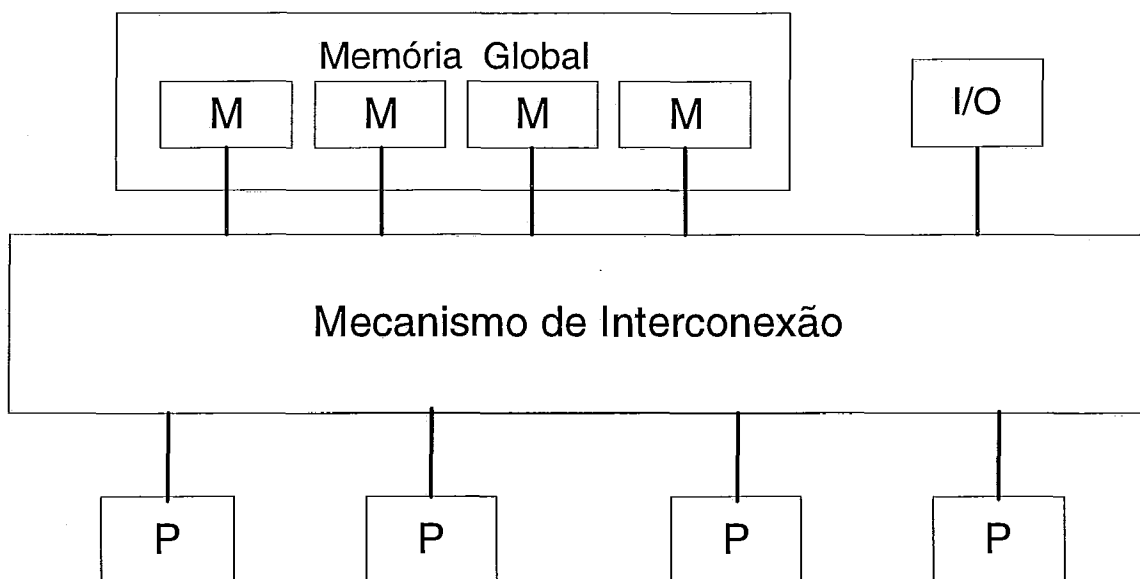


FIGURA 3.1: Sistema de Memória Compartilhada

**Sistemas de Memória Distribuída** Sistemas MIMD de memória distribuída conseguem melhorar o desempenho dos processadores mantendo partes da memória total do sistema diretamente conectada a cada processador. Os acessos às instruções são sempre locais, assim como são a maioria dos acessos aos dados. Comunicações com outros processadores ou acesso às memórias remotas, são realizados através da rede de interconexão. Máquinas de memória distribuída que se comunicam basicamente através da troca de mensagens sobre a rede de interconexão são chamadas multicomputadores. O número de processadores em um multicomputador pode ser elevado (da ordem de milhares), o que provoca referências a estes sistemas como Processamento Massivamente Paralelo (MPP). O ponto chave dos sistemas de multicomputadores é a rede de interconexão, que deve permitir comunicação rápida e eficiente entre os processadores. No passado, para sistemas com um pequeno número de processadores, a rede de interconexão era um arranjo baseado em barramento de comunicação. Nos multicomputadores atuais, as redes de interconexão têm sido implementadas de diferentes maneiras, buscando maior velocidade e eficiência para



lidar com o grande volume de tráfego de mensagens. Um exemplo de computador comercial que se baseia nesse sistema é o IBM RS/6000 SP, utilizado neste trabalho. A figura 3.2 mostra um diagrama esquemático desse sistema.

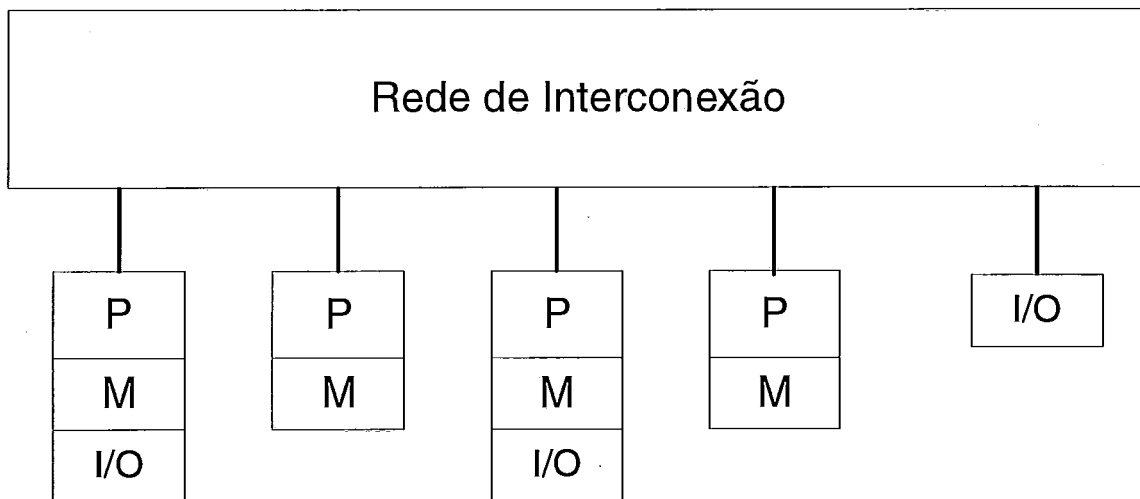


FIGURA 3.2: Sistema de Memória Distribuída

**Redes de Estações de Trabalho (NOW)** Uma rede de estações de trabalho pode ser configurada como uma máquina paralela virtual, através da utilização de *softwares* especiais para a troca de mensagens, como PVM e MPI, que serão discutidos mais adiante. As redes de estações de trabalho se assemelham aos multicomputadores de memória distribuída do ponto de vista de desenvolvimento de aplicações. A diferença básica está na maior eficiência e confiabilidade da rede de interconexão dos multicomputadores, que possuem maior velocidade e largura de banda do que as redes que interligam estações de trabalho. A vantagem apresentada pela NOW é o mais baixo custo, aliado à frequente disponibilidade dessas plataformas em centros de pesquisa e desenvolvimento de *software* e nas empresas em geral. A figura 3.3 mostra um diagrama esquemático de uma rede de estações de trabalho.

Os processadores empregados nas máquinas paralelas podem, por sua vez, ser escalares, superescalares — capazes de executar mais do que uma instrução por ciclo do relógio, ou vetoriais — utilizam o processamento *pipeline* para otimizar operações sobre vetores longos. Diferentes combinações do tipo dos processadores e da rede de interconexão que compõem a máquina paralela, sem falar em outros aspectos

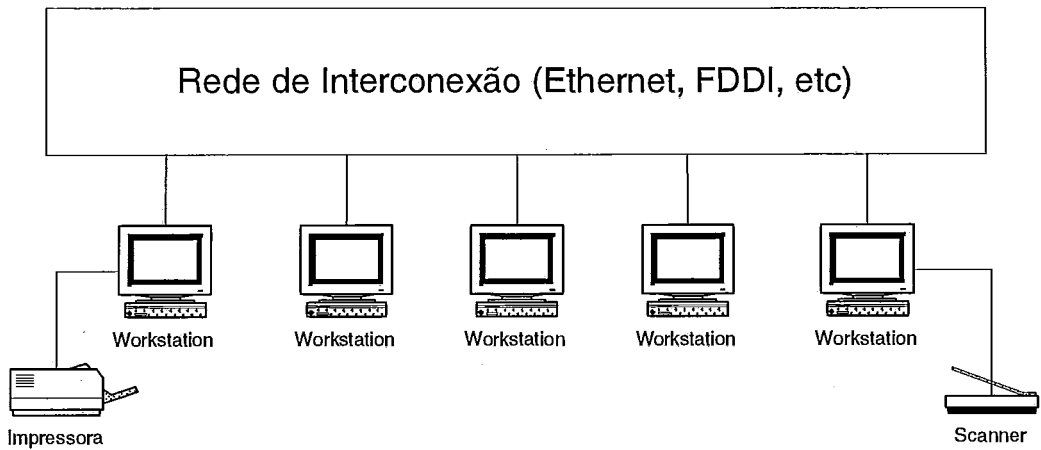


FIGURA 3.3: Rede de Estações de Trabalho (NOW)

arquiteturais, determinam as múltiplas opções disponíveis no mercado.

Os variados graus de paralelismo existentes nas aplicações vão determinar os níveis de granularidade da implementação paralela. Essa granularidade pode variar desde o paralelismo a nível de instrução (granularidade fina) até o paralelismo a nível de subrotinas ou conjunto de subrotinas (granularidade grossa). As máquinas MIMD, em especial os multicomputadores e redes de estações de trabalho, adaptam-se melhor ao paralelismo de granularidade grossa.

No desenvolvimento de aplicações para máquinas paralelas, o paradigma de programação a ser adotado é função da forma como os processadores se comunicam. Em arquiteturas com memória compartilhada, a troca de informações entre processadores se faz através da memória. A nível de programação implica em definir variáveis locais e compartilhadas e utilizar-se semáforos para controlar o acesso às regiões críticas. Em sistemas de memória distribuída, os processadores se comunicam através da troca de mensagens. Cada processador armazena dados na sua memória local e o acesso aos dados da memória de outro processador se faz pela troca de mensagens que resultarão no dado sendo transferido para a memória do processador que o solicitou. O fluxo de mensagens é estabelecido na implementação paralela através de diretivas de *send* e *receive* para efetuar a comunicação entre processadores.

Em geral, o desenvolvimento de programas para sistemas com memória compar-

tilhada é mais fácil e de mais fácil manutenção do que aqueles para sistemas com memória distribuída. Por outro lado, sistemas com memória distribuída são em geral mais baratos e escaláveis do que os de memória compartilhada. Em função desses fatos, pesquisas recentes têm se baseado em DSM (Distributed Shared Memory), sistemas de memória fisicamente distribuída mas logicamente compartilhada, que visam conciliar as vantagens dos dois modelos [29]. Alguns exemplos de computadores comerciais disponíveis atualmente que se baseiam em DSM são Cray T3E e SGI Origin Server.

Programação por troca de mensagens é o paradigma de programação utilizado em computadores escaláveis com memória distribuída e em rede de estações de trabalho. Hoje existem vários sistemas de troca de mensagens que permitem ao usuário o desenvolvimento de aplicações paralelas. Entre os sistemas de troca de mensagens mais utilizados podemos citar o PVM (Parallel Virtual Machine), amplamente utilizado em todo o mundo, e o MPI (Message Passing Interface), um sistema padrão e eficiente.

**PVM - Parallel Virtual Machine** PVM [30] é um *software* que permite a execução de programas paralelos em ambientes computacionais heterogêneos. Esse *software* atua interligando várias máquinas e formando uma plataforma paralela virtual. Do ponto de vista do usuário, as diferentes máquinas são tratadas como nós de processamento de uma arquitetura paralela, que se comunicam através da troca de mensagens, independente da arquitetura, sistema operacional e/ou do fabricante das máquinas que compõem este ambiente. O sistema PVM é composto por duas partes. A primeira parte é um *daemon* que fica residente em todos os processadores que formam a máquina virtual e que provêem o ambiente paralelo onde as aplicações irão executar. A segunda parte é uma biblioteca de subrotinas de comunicação e funções de interface e manipulação de processos do PVM, que devem ser *link*-editadas com as aplicações dos usuários.

**MPI - Message Passing Interface** O padrão MPI [31] foi desenvolvido com o objetivo de permitir que bibliotecas eficientes e programas de aplicação possam ser desenvolvidos e portados para um amplo domínio de multicomputadores e redes

heterogêneas de computadores. MPI é um sistema de troca de mensagens padrão e portátil, que define a sintaxe e a semântica de um conjunto de subrotinas que integram a biblioteca. Os principais objetivos do *Forum* de desenvolvimento do MPI é a sua confiabilidade e facilidade de uso, aliado à eficiência. Existe atualmente uma grande variedade de implementações eficientes de MPI por diferentes fabricantes de computadores, entre elas as que foram utilizadas neste trabalho.

O conceito básico da troca de mensagens consiste em processos alocados de forma distribuída comunicarem-se através de mensagens a fim de cooperarem na realização da computação. O mecanismo elementar de comunicação do MPI é a transmissão de dados entre um par de processos, um lado enviando e o outro recebendo, o que é chamado de comunicação ponto a ponto. Existem dois tipos de comunicação possíveis: bloqueante e não-bloqueante [32]. Um *send* bloqueante implica em um bloqueio do processo emissor até que o *buffer* de emissão possa ser reutilizado pelo programa. Analogamente, um *receive* bloqueante bloqueia o processo receptor até que o *buffer* de recepção realmente contenha a mensagem recebida. Na comunicação não-bloqueante, é possível sobrepor a transmissão da mensagem com a computação ou mesmo sobrepor a transmissão de múltiplas mensagens entre si, aumentando o desempenho do sistema. Operações não-bloqueantes são compostas de duas partes: a função de postagem, que inicia a operação e a função de teste por término, que permite à aplicação verificar se a operação foi completada. Com hardware adequado, a transferência de dados do emissor pode ocorrer concorrentemente com outra computação executada no emissor, após o *send* ter iniciado e antes de ter terminado.

Dois aspectos que merecem especial atenção são a semântica das primitivas de comunicação e o protocolo que as implementa. Questões de semântica do tipo : “Quando um *send* completou, pode-se garantir que o *receive* correspondente completou ou até mesmo se já iniciou?”, estão relacionadas com o protocolo que implementa estas operações. O padrão MPI oferece quatro modos para comunicação ponto a ponto, tanto bloqueante como não-bloqueante, que permite escolher a semântica da operação de *send* e, com efeito, influenciar no protocolo de transferência de dados.

1. Modo *Buffered*: Uma operação de *send* pode ser iniciada quer o *receive* correspondente tenha sido postado ou não. Pode até mesmo completar antes que

o *receive* seja postado. Desta forma, possui semântica de término local, pois seu término não depende da ocorrência do *receive* correspondente em outro processo. Um certo espaço de *buffer* está disponível, sendo necessário que o programa de aplicação o defina explicitamente. Na semântica que usa *buffer*, o protocolo bloqueia o processo pelo tempo mínimo, porém necessita efetuar mais cópias de dados.

2. Modo *Synchronous*: Um *send* pode ser iniciado quer o *receive* correspondente tenha sido postado ou não. No entanto, ele só termina se o *receive* tiver sido postado e a operação de recebimento da mensagem iniciada. A semântica *rendezvous* entre emissor e receptor é usada, ou seja, o término do *send* implica que o *receive* no mínimo já começou. A semântica de término é não local. Neste modo, a cópia de dados é minimizada, porém bloqueia o processo por um tempo maior.
3. Modo *Standard*: O término do *send* não significa necessariamente que o *receive* correspondente já começou e nenhuma consideração pode ser feita no programa de aplicação sobre se a mensagem a ser enviada será colocada no *buffer* pelo MPI. Ou seja, cabe ao MPI decidir se as mensagens enviadas usarão *buffer* ou não, baseado em otimização de espaço e/ou desempenho. A semântica de término é então não local.
4. Modo *Ready*: Um *send* só pode ser iniciado se o *receive* correspondente tiver sido postado, cabendo ao usuário assegurar que isso ocorra no programa. Esse modo permite ao usuário explorar o conhecimento que tem da aplicação para simplificar o protocolo e potencialmente melhorar o seu desempenho. A semântica de término é não local.

**Medidas de Desempenho** O ganho obtido ao adaptar-se uma aplicação para processamento paralelo é medido em termos de aceleração (*Speedup*) e eficiência da implementação paralela quando comparado com a melhor implementação sequencial existente. *Speedup* ( $S$ ) é definido como a razão entre o tempo de execução do melhor código sequencial em um processador da máquina paralela ( $t_1$ ) e o tempo de execução do código paralelo em  $p$  processadores ( $t_p$ ). Eficiência ( $\eta$ ) é definida como

a razão entre o *Speedup* conseguido em  $p$  processadores e  $p$ , e fornecida na forma de percentagem, conforme mostrado a seguir:

$$S = \frac{t_1}{t_p} \quad (3.1)$$

$$\eta = \frac{S}{p} \times 100 [\%] \quad (3.2)$$

Outras medidas de desempenho podem ser consideradas na avaliação da qualidade de uma implementação paralela, tais como complexidade de mensagens envolvida e a relação custo/benefício do processo de desenvolvimento da aplicação paralela.

Em linhas gerais, uma estratégia de paralelização eficiente deve minimizar a comunicação entre processadores necessária à solução do problema em paralelo. Além disso, duas outras considerações básicas devem ser perseguidas para obter elevado desempenho: um bom balanceamento de carga e um baixo tempo de sincronização.

1. **Balanceamento de Carga:** Uma distribuição de carga entre os processadores é dita balanceada se não implicar em processadores ociosos aguardando que os demais terminem o seu processamento. A distribuição de carga entre processadores deve considerar os graus de complexidade da computação em cada processador, bem como a capacidade de processamento dos mesmos.
2. **Tempo de Sincronização:** O tempo de sincronização, que é o tempo gasto pelos processadores enquanto esperam os outros completarem as suas tarefas [33], pode ser elevado se o balanceamento de carga for ruim. Se no tratamento de sua carga computacional, um processador acabar bem antes dos demais, ou por ser de maior capacidade de processamento ou por ter recebido menor carga, ele ficará ocioso, esperando pelos demais.

Um outro ponto a ser levado em consideração no desenvolvimento de uma aplicação paralela é a existência de dependência entre tarefas. Quando tarefas dependem de outras tarefas, torna-se necessário uma coordenação. No paralelismo síncrono, a coordenação se dá em *locksteps*, o que requer que todos os processadores se comuniquem em determinado instante de tempo a fim de sincronizarem-se. Já no paralelismo assíncrono, os processadores trabalham livremente em suas tarefas, in-

dependente do estágio de processamento em que os outros se encontram. Não há necessidade de sincronização para obter a solução correta da computação paralela.

## 3.2 Tentativas de Paralelização da Avaliação de Confiabilidade

São encontradas na literatura especializada algumas poucas tentativas de paralelização de métodos de avaliação da confiabilidade de sistemas compostos de geração e transmissão. Resumos de cada um destes trabalhos serão apresentados a seguir.

O trabalho [9], datado de 1989, apresenta a adaptação de um programa sequencial para execução em computadores com topologia hipercúbica. O programa denominado SYREL, desenvolvido para o EPRI - Electrical Power Research Institute (Palo Alto, USA), calcula os limites superiores e inferiores dos índices de confiabilidade para um sistema elétrico. SYREL utiliza o método de enumeração para selecionar os estados do sistema que serão analisados para avaliar a confiabilidade do sistema. Para tanto, o programa percorre uma lista de contingências ordenadas por probabilidade de ocorrência e para cada contingência, testa por violações nos carregamentos das linhas e limites de tensão das barras. Em seguida, utiliza o resultado destes testes para calcular os índices de confiabilidade por uma busca em árvore.

Na paralelização deste programa, a análise dos estados, realizada utilizando o fluxo de potência DC, e a busca em árvore foram modificadas para execução nos computadores paralelos Intel iPSC/1 e iPSC/2, ambos com 16 processadores. Foram realizados testes com sistemas elétricos de tamanho médio (25, 101 e 140 barras) e verificada a escalabilidade para 2, 4, 8 e 16 nós. Os resultados reportados mostram eficiências em torno de 70% para os sistemas testes de maior porte, apresentando alguns problemas de escalabilidade.

Na conclusão do trabalho, os autores colocam como uma das maiores dificuldades encontradas, a conversão de um programa de grande dimensão e complexidade, desenvolvido sem preocupação com programação concorrente, para ambiente computacional paralelo. Por outro lado, constatam que aplicações de granularidade

grossa, como o programa SYREL e a avaliação da confiabilidade de um modo geral, são muito bem adaptadas ao processamento distribuído/paralelo.

O trabalho [10], datado de 1990, mostra uma implementação paralela da avaliação de confiabilidade multi-área utilizando simulação Monte Carlo. O sistema multi-área é modelado como um grafo, onde os nós representam gerações e cargas das áreas e os arcos representam os elos de interligação entre as áreas. As capacidades das unidades geradoras são modeladas como variáveis aleatórias e a capacidade de geração da área é totalizada pela soma das capacidades dos geradores. As capacidades de transmissão dos elos de interligação também são modeladas como variáveis aleatórias para simular as falhas na interligação. A análise dos estados selecionados por amostragem é realizada usando o fluxo em redes. Os índices de confiabilidade mencionados são LOLP e EPNS.

Na implementação paralela, a seleção e a análise dos estados são executadas concorrentemente e a comunicação só se faz para a atualização dos índices e do número de sorteios realizados. O número de sorteios a serem realizados é pré-especificado e não há controle de convergência antes de este número ser atingido.

A plataforma computacional utilizada foi um multiprocessador protótipo composto por 16 nós baseados no processador iAPX286/287 e uma arquitetura de memória compartilhada utilizando barramento comum, denominada Preferential Processor (PP). O sistema operacional empregado foi o MS/DOS estendido com algumas facilidades para processamento concorrente. Os testes realizados com um sistema composto por cinco áreas interligadas e 10.000 estados amostrados alcançaram eficiências próximas ao máximo teórico.

O trabalho [11], datado de 1995, apresenta um estudo de topologias de escalonamento de processos que melhor se adaptem a avaliação da confiabilidade multi-área utilizando simulação Monte Carlo. A aplicação paralelizada se baseia na simulação Monte Carlo associada à passagem do tempo pelo método de intervalos fixos. Neste método, o tempo é avançado em passos de tamanho fixo para a atualização do estado do sistema. A aplicação utiliza, então, o método de intervalos fixos (1 hora) para a passagem do tempo e amostragem de estados para a seleção dos estados dos componentes no intervalo de tempo em questão. A avaliação se o estado selecionado é de falha ou sucesso é realizada utilizando o algoritmo de fluxo máximo [34]. Os



índices de confiabilidade calculados são a LOLE e a EENS. Os índices são calculados para um número de anos até que a convergência seja alcançada, sendo esta checada ao final de cada ano.

O trabalho propõe três topologias de paralelização do problema, sendo a primeira síncrona e as outras duas assíncronas, variando sobre a alocação do processo de controle a um processador dedicado ou a um que participe da simulação paralela. As topologias foram implementadas em dois computadores paralelos: um nCUBE com 64 processadores, que possui arquitetura MIMD de memória distribuída, e um Sequent Balance com 10 processadores, uma arquitetura de memória compartilhada. Foi utilizado como caso teste um sistema sintético interligando três áreas, onde cada área é um sistema IEEE-RTS [12]. Os resultados apresentados mostram, para a melhor topologia implementada, eficiência de 96% para 2 processadores, 92% para 8 processadores, caindo para 56% em 32 processadores no nCUBE. Já no Sequent Balance, as eficiências variam de 99% em 2 processadores até 96% em 9 processadores. Em relação a estas eficiências, é observado que devido à baixa capacidade de processamento dos processadores no Sequent Balance, a análise de confiabilidade (ou parte dela) realizada em um único processador desta máquina demanda um tempo extremamente longo, o que tende a fornecer altas eficiências no processamento paralelo devido a elevada relação tempo de processamento/tempo de comunicação.

O trabalho [13], datado de 1996, apresenta a paralelização de uma ferramenta sequencial para cálculo de confiabilidade composta numa máquina de memória compartilhada. O programa MEXICO avalia a confiabilidade de sistemas de potência usando simulação Monte Carlo não-sequencial. O modelo determina um perfil de geração ótimo para minimizar o corte de carga, satisfazendo o balanço carga/geração e as capacidades de transmissão dos circuitos, tanto em condição normal como de emergência. Para isso, usa método de programação linear com relaxação das restrições e as análises dos sistemas são realizadas pelo modelo aproximado DC.

A implementação paralela foi realizada na máquina com arquitetura vetorial-paralela CRAY YMP 4128 com 4 processadores. Numa análise inicial, os autores observaram que a exploração da vetorização e paralelização automáticas que a máquina oferece não propiciariam ganho considerável de desempenho.

No modelo de paralelização adotado, a amostragem dos estados é realizada se-

quencialmente e os estados a serem analisados são distribuídos em partes iguais entre os processadores. O número de estados amostrados é pré-especificado e também não há controle de convergência anterior a este número. Os testes realizados com quatro sistemas testes de médio porte para uma amostra com 1.000 estados apresentaram eficiências em torno de 94% para 2 processadores e 85% para 4 processadores.

# Capítulo 4

## Confiabilidade Composta em Paralelo por SMC Não-Sequencial

### 4.1 Introdução

A avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência usando SMC consiste na obtenção de vários índices de desempenho baseado no modelo estocástico de operação do sistema. Na abordagem não-sequencial, os estados do sistema são amostrados aleatoriamente baseado na distribuição de probabilidade dos estados dos componentes e não há preocupação com a cronologia do processo de transição dos estados. Cada estado do sistema amostrado corresponde a uma “fotografia” dos estados dos componentes e os índices de confiabilidade são calculados como a média dos valores de funções de avaliação dos estados da amostra analisada. Essa abordagem permite estimar índices de confiabilidade relacionados a valores de potência não suprida, bem como aqueles relacionados à frequência e duração das falhas.

Para avaliação da confiabilidade composta por SMC não-sequencial é necessário analisar a adequação de um número muito elevado de estados do sistema. Cada uma dessas análises requer a solução de um fluxo de potência e, eventualmente, de um fluxo de potência ótimo. Para modelos de sistema de grande porte, esta avaliação pode demandar horas de computação em estações de trabalho de alto desempenho. Felizmente, as análises de adequação dos estados podem ser feitas concorrentemente, o que sugere a aplicação de processamento paralelo a fim de reduzir o tempo total

da simulação.

Neste capítulo são apresentadas duas metodologias desenvolvidas para avaliação da confiabilidade composta usando SMC não-sequencial em ambientes computacionais paralelos e distribuídos. As metodologias foram desenvolvidas usando como elemento de referência um programa de análise de confiabilidade composta utilizado por empresas de energia elétrica no Brasil e no exterior chamado *NH2*, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) [35], na versão 3.5.

O método de avaliação da confiabilidade composta adotado calcula índices de confiabilidade sob o enfoque estático, ou seja, de adequação. Os índices calculados são todos aqueles descritos na seção 2.1.4, inclusive os índices de F&D. Para tanto, utiliza uma abordagem baseada em probabilidade condicional [4] que permite o cálculo de índices de frequência e duração utilizando simulação Monte Carlo não-sequencial. Os índices de confiabilidade calculados podem ser referentes ao sistema como um todo e podem ser desagregados em vários níveis, como modos de falha (sobrecarga, violação de tensão, ilhamento, etc), origem das falhas (geração, transmissão ou compostas), e ainda podem ser desagregados a nível de barras. Os modelos estocásticos de falhas dos componentes do sistema são aqueles apresentados na seção 2.2.1.1. Para a análise da adequação dos estados do sistema é utilizada a formulação AC do fluxo de potência, que é solucionada pelo método de Newton-Raphson. O modelo de otimização para minimizar o corte de carga considera a representação AC do sistema e é solucionado por técnica de linearizações sucessivas.

Algumas considerações iniciais relativas ao processo de paralelização e distribuição da carga entre processadores que são válidas para as duas metodologias desenvolvidas serão apresentadas a seguir.

## 4.2 Paralelização do Problema

Um algoritmo conceitual para a avaliação da confiabilidade de sistemas compostos de geração e transmissão usando simulação Monte Carlo não-sequencial é apresentado na seção 2.2.1 (Alg-1).

O passo 2 do algoritmo (Alg-1) exige a simulação da condição de operação do sistema nos respectivos estados operativos. Esta simulação requer a solução de

um problema de fluxo de potência e, eventualmente, de um problema de fluxo de potência ótimo para simular o redespacho de geração e/ou o corte de carga mínimo. No caso de sistemas de grande porte, essas simulações exigem esforço computacional elevado em relação àquele necessário nos demais passos do algoritmo [36].

A análise de confiabilidade pode, então, ser resumida em três grandes módulos: seleção de estados, análise da adequação dos estados selecionados e o cálculo dos índices de confiabilidade. Conforme descrito no capítulo 2, para cada estado selecionado por sorteio na simulação Monte Carlo não-sequencial, é feita a análise de sua adequação, ou seja, é verificada a possibilidade de atendimento à demanda de potência sem violação dos limites operativos através da simulação do seu comportamento estático. O algoritmo é inerentemente paralelo com um elevado grau de desacoplamento. As análises de adequação dos estados são independentes entre si e, numa estratégia de paralelização de granularidade grossa, a comunicação só se faz necessário em três situações distintas:

1. Para a distribuição inicial dos dados de entrada do problema, idênticos para todos os processadores e executado uma vez durante todo o processamento;
2. Para o agrupamento final dos resultados parciais calculados em cada processador, também executado uma única vez; e
3. Para o controle da convergência paralela, que necessita ser executado várias vezes durante o processo de simulação, com frequência que obedeça a algum critério de controle. Esse controle pode ser baseado no tempo de simulação, no número de estados analisados, na evolução da convergência ou em outros indicadores.

A configuração básica para paralelização deste problema é a mestre-escravos, onde um processo, denominado mestre, é responsável por adquirir os dados de entrada, distribuí-los para os escravos, controlar a convergência paralela, receber os resultados parciais de cada escravo, calcular os índices de confiabilidade e gerar relatórios. Os processos escravos, por sua vez, são responsáveis por analisar os estados do sistema alocados a eles, enviar para o mestre os dados necessários para que este verifique a convergência e, ao final do processo de simulação, enviar também os seus

resultados parciais. É importante salientar que, em arquiteturas onde os processadores têm capacidades de processamento equivalentes, o processo mestre também deve analisar a adequação de estados a fim de melhorar o desempenho da computação paralela. Para fins deste trabalho, cada processo é alocado a um processador diferente, passando daqui por diante a ser referenciado diretamente por processador.

O principais pontos que necessitam ser solucionados na paralelização do problema são:

1. Identificação dos dados que serão enviados como mensagens entre mestre e escravos, bem como das variáveis que deverão ser replicadas em todos os processadores e mantidas como locais;
2. Estabelecimento da filosofia de distribuição dos estados do sistema entre os processadores de forma a obter um bom balanceamento de carga;
3. Estabelecimento do critério de controle da convergência paralela de forma a obter um bom desempenho da metodologia paralela;
4. Cálculo dos índices de confiabilidade globais do sistema a partir dos índices parciais calculados em cada processador.

O primeiro e quarto pontos são solucionados através da análise detalhada da metodologia utilizada para processamento sequencial. Para solução dos demais pontos, no entanto, são necessárias maiores considerações.

### **4.3 Filosofia de Distribuição dos Estados do Sistema**

Na implementação de métodos de simulação Monte Carlo em paralelo, o problema principal a ser evitado é a existência de correlações entre as sequências de números pseudo-aleatórios gerados em processadores diferentes. Se as sequências forem correlatas entre si, as informações produzidas por diferentes processadores serão redundantes, podendo resultar nos mesmos estados sendo analisados várias vezes em mais de um processador, o que introduz algum *bias* nas estimativas dos índices devido

ao aumento da probabilidade de sorteio desses estados. Além disso, a repetição da análise dos estados tende a piorar o desempenho do algoritmo. Dessa forma, inicializar o gerador de números pseudo-aleatórios com sementes diferentes para cada processador não é boa técnica, pois pode gerar sequências correlatas entre si [37].

Em ambiente sequencial o problema da correlação também existe e não é trivial, porém já é bem estudado e conhecido. Assim, reduzir o problema paralelo a algo equivalente ao problema sequencial seria interessante. Um enfoque prático é desenvolver um método de geração de números pseudo-aleatórios em paralelo que imite exatamente o comportamento do algoritmo sequencial, já que os resultados dependem fortemente da sequência de números pseudo-aleatórios gerados. Isso torna a solução paralela menos dependente do número de processadores envolvidos e possui a vantagem adicional de facilitar a depuração de códigos paralelos complexos.

Na filosofia de distribuição de estados adotada, cada estado do sistema é amostrado diretamente no processador no qual ele será analisado. Para tanto, todos os processadores recebem a mesma semente e executam o sorteio da mesma sequência de números pseudo-aleatórios, gerando os mesmos estados do sistema. Cada processador, no entanto, começa a analisar o estado de número igual ao seu *rank* na computação paralela e passa a analisar os próximos estados em passo igual ao número de processadores envolvidos na computação. Supondo que o número de processadores disponíveis seja 4, o processador 1 analisa os estados 1, 5, 9, ..., o processador 2 os estados 2, 6, 10, ... e assim sucessivamente. Desta forma, os mesmos estados que são analisadas sequencialmente também o são em paralelo, o que viabiliza a comparação entre resultados calculados nos dois ambientes. A filosofia de distribuição de estados entre processadores está ilustrada na figura 4.1 para o caso de 4 processadores.

Uma outra abordagem para o problema seria paralelizar o algoritmo de geração de números pseudo-aleatórios, com vistas a eliminar o desperdício de tempo na amostragem de estados que não são analisados pelo processador. No entanto, como a percentagem de tempo gasto na amostragem de estados em relação ao tempo total da simulação é insignificante, consideramos que o benefício da paralelização desse algoritmo também seria insignificante e envolveria um esforço implementacional. Dessa forma, optamos por manter o algoritmo de geração de números pseudo-aleatórios na formulação sequencial, o que não prejudicará os resultados, conforme será visto

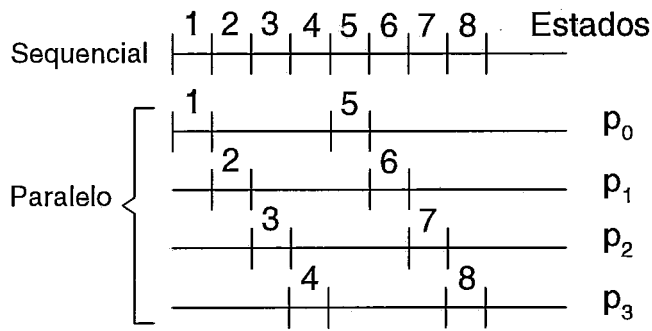


FIGURA 4.1: Distribuição dos Estados entre Processadores

nas próximas seções.

## 4.4 Metodologias Paralelas

Duas metodologias paralelas para avaliação da confiabilidade composta usando SMC não-sequencial foram desenvolvidas. Ambas as metodologias são assíncronas e de granularidade grossa, onde o grão de processamento é composto pela análise de adequação de um conjunto de estados do sistema. A diferença básica entre as duas metodologias está no critério de controle da convergência paralela. Na primeira metodologia, a convergência é checada baseada em intervalos de tempo fixos e por isso é denominada Intervalo de Tempo Fixo. Na segunda metodologia, a convergência é checada em função da evolução da convergência do processo paralelo, sendo por isso denominada Função da Convergência.

### 4.4.1 Metodologia A - Intervalo de Tempo Fixo

A idéia central desta metodologia assíncrona está na verificação da convergência paralela da SMC em intervalos de tempo pré-fixados, a partir das informações enviadas pelos processadores escravos. A inicialização do problema, que consiste na aquisição dos dados de entrada e alguma computação inicial, é executada pelo processador mestre, seguida de um *broadcast* desses dados para todos os escravos. Todos os processadores, mestre e escravos, amostram os estados do sistema e identificam qual o primeiro estado a ser analisado por cada um deles. Terminada a análise de cada



estado, os processadores amostram os próximos estados de acordo com a filosofia de distribuição de estados descrita anteriormente. Os escravos permanecem na fase de análise da adequação de estados por um intervalo de tempo pré-fixado  $\Delta t$ , baseado no seu próprio relógio local. Após decorrido este intervalo, enviam para o mestre os dados necessários à verificação da convergência paralela, independente do número de estados analisados até então e, imediatamente a seguir, voltam a analisar novos estados. Ao final de outro intervalo de tempo  $\Delta t$ , nova mensagem é enviada pelo escravo para o mestre e este processo é periodicamente repetido. Ou seja, enquanto o mestre verifica a convergência, os escravos estão executando trabalho útil. O mestre, por sua vez, está continuamente checando a chegada de mensagem enviada por algum escravo. Ao receber uma mensagem, interrompe a análise da adequação de estados e verifica a convergência do processo paralelo. Se esta não ocorrer, volta a analisar outros estados até receber nova mensagem, quando verifica novamente a convergência paralela. Quando o mestre identifica que a convergência foi atingida ou o tamanho máximo da amostra foi alcançado, ele envia uma mensagem para cada escravo ordenando a interrupção da análise de estados. Cada escravo, então, envia ao mestre seus resultados parciais calculados e termina seu processamento. O mestre, após receber todos os resultados parciais, calcula os índices de confiabilidade, gera relatórios e termina.

A metodologia A é assíncrona. Não há sincronização entre os processadores durante o processo de convergência e cada um se baseia no seu relógio local para enviar as mensagens ao mestre. Dessa forma, o balanceamento de carga durante a simulação é estabelecido pela capacidade de processamento dos processadores e pela complexidade da análise dos diferentes estados do sistema. O grafo de alocação de tarefas está mostrado na figura 4.2, onde  $p$  é o número de processadores alocados para a execução. Cada processador possui um *rank* na computação paralela, variando de 0 a  $(p-1)$ . O processador 0 é o mestre e os demais processadores (1 a  $p-1$ ) são os escravos. Nos grafos de tarefas apresentados, cada círculo representa uma tarefa executada por um processador. As tarefas necessárias para a solução deste problema podem ser classificadas em 5 tipos: **I** - Inicialização, **A** - Análise da adequação de estados, **C** - Verificação da convergência, **P** - Parada do processo de simulação e **F** - Finalização (cálculo dos índices e geração de relatórios). Um subíndice  $i$  associado

a uma tarefa  $T$  significa que ela está alocada ao processador  $i$ . Um superíndice  $j$  associado à  $T_i$  significa a  $j$ -ésima execução da tarefa  $T$  pelo processador  $i$ .

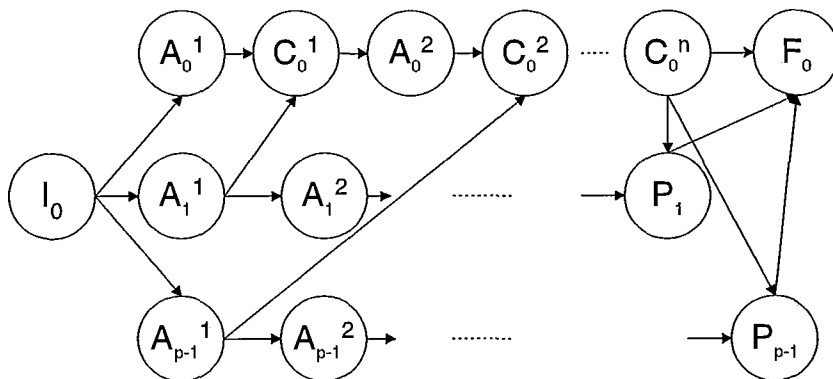


FIGURA 4.2: Metodologia A - Grafo de Alocação de Tarefas

Uma consideração adicional introduzida devido ao assincronismo da metodologia é a simulação redundante. Durante o último estágio do processo de convergência, os processadores escravos executam algumas análises que estão além do mínimo necessário para atingir a convergência. A convergência é detectada baseado nos valores das últimas mensagens enviadas pelos escravos e, entre o envio da última mensagem e o recebimento da mensagem informando da convergência, os processadores escravos estão analisando outros estados. Isso, no entanto, não implica em perda de tempo para a computação como um todo, já que nenhum processador se torna ocioso durante o processo. Essa simulação redundante é aproveitada no cálculo final dos índices de confiabilidade, o que pode gerar índices com menor grau de incerteza do que os calculados na execução sequencial, já que na simulação Monte Carlo a incerteza da estimativa é inversamente proporcional ao número de estados analisados. Esse comportamento pode ser identificado pela análise do grafo de precedência da metodologia A mostrado na figura 4.3. No grafo de precedência de eventos [38], as linhas horizontais são os eixos de tempo locais dos processadores, aqui representados apenas o mestre e um escravo. Os arcos horizontais representam os estados sucessivos por que passa um mesmo processador. Os nós representam os eventos de envio e recebimento de mensagens. As mensagens são representadas pelos arcos ligando linhas horizontais associadas a processadores distintos. Esse grafo deixa claro também a ausência de tempo ocioso nos processadores durante o processo de

simulação.

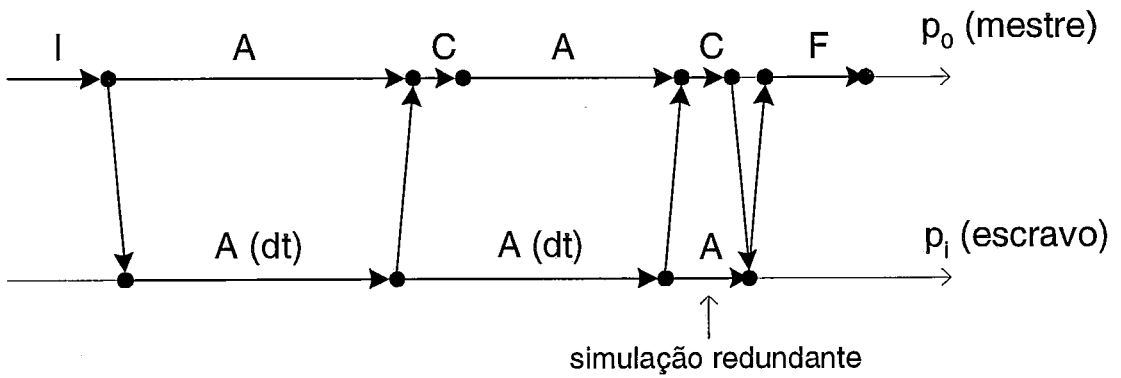


FIGURA 4.3: Metodologia A - Grafo de Precedência

### Pseudo-Código da Metodologia A

Especifica  $interv$

$j = 0$

$prox = my\_rank$

(1)  $j = j + 1$

Amostra o estado  $j$  do sistema

Se ( $j = prox$ ) então

    Analisa a adequação do estado  $j$

    Atualiza a estimativa dos índices

$prox = prox + num\_procs$

Fim-Se

Se (escravo) então

    Se (decorrido  $interv$  desde a última mensagem enviada) então

        Envia para mestre valores para verificar a convergência

    Fim-Se

    Testa se chegou mensagem de término

    Se (chegou) então

        Envia para mestre últimos resultados calculados

    Senão

```

        Volte ao passo (1)
Fim-Se

Senão    {Mestre}

        Testa se chegou valores calculados por escravo
        Se (chegou) então
            Verifica convergência do processo
            Se (convergiu) ou (tamanho máximo da amostra atingido) então
                Envia mensagem de término para todos os escravos
                Recebe dos escravos os resultados parciais calculados
                Calcula os índices de confiabilidade
                Imprime relatórios
            Senão
                Volte ao passo (1)
        Fim-Se
    Senão
        Volte ao passo (1)
    Fim-Se
Fim-Se

```

#### 4.4.2 Metodologia B - Função da Convergência

A segunda metodologia desenvolvida para avaliação em paralelo da confiabilidade composta usando SMC não-sequencial baseia-se na evolução da convergência do processo paralelo para controlar o número de estados analisados e reduzir o fluxo de mensagens. A inicialização do problema, distribuição dos dados de entrada e filosofia de alocação da análise dos estados aos processadores são idênticas àquelas da metodologia A. A diferença está no critério de controle da convergência paralela, que aqui não se baseia no envio de mensagens a intervalos de tempo fixo. A troca de informações é determinada em função do valor do coeficiente de variação dos índices que controlam a convergência, baseado no conhecimento “a priori” da característica de convergência do processo.

Foi mostrado na seção 2.2.1.2 que o tamanho da amostra necessária à convergência da SMC com uma incerteza relativa  $\alpha$  em torno da estimativa  $\bar{Q}$  vale:

$$N = \frac{V(F)}{(\alpha\bar{Q})^2} \quad (4.1)$$

Para o caso particular da LOLP, esta expressão pode ser re-escrita como:

$$N = \frac{1 - \bar{Q}}{\alpha^2 \bar{Q}} \quad (4.2)$$

Entre outras coisas, a expressão (4.2) mostra que o número de estados a serem analisadas e, conseqüentemente, o esforço computacional, varia com o inverso do quadrado da precisão desejada. Baseado nesta característica, foi desenvolvida a metodologia B, que se utiliza do valor de  $\alpha$  calculado para sub-amostras de estados analisados para prever o número de estados total que devem ser analisados para atingir a precisão especificada  $\alpha_{esp}$ .

O valor de  $\alpha_{esp}$  é especificado no início do processo de simulação como sendo a incerteza relativa desejada para os índices de confiabilidade, ou seja, é a tolerância para convergência do processo. Re-escrevendo a equação (4.2), sabemos que  $\alpha_{esp}$  é atingido após a análise de  $N$  estados por:

$$\alpha_{esp}^2 = \frac{1 - \bar{Q}}{N\bar{Q}} \quad (4.3)$$

Considerando uma arquitetura paralela com  $p$  processadores e supondo que, a título de simplificação, os  $N$  estados são igualmente distribuídas entre os processadores, cada um deles ficaria encarregado da análise de  $N/p$  estados. Nesta condição, para o cálculo de um mesmo valor de  $\bar{Q}$  em todos os processadores, o valor de  $\alpha_{local}$  em cada processador vale:

$$\alpha_{local}^2 = \frac{1 - \bar{Q}}{\left(\frac{N}{p}\right)\bar{Q}} \quad (4.4)$$

$$\alpha_{local}^2 = \left(\frac{1 - \bar{Q}}{N\bar{Q}}\right) p \quad \rightarrow \quad \alpha_{local}^2 = \alpha_{esp}^2 p \quad (4.5)$$

$$\alpha_{local} = \alpha_{esp} \sqrt{p} \quad (4.6)$$

Ou seja, é possível fazer uma estimativa da convergência do processo paralelo como um todo baseado no valor de  $\alpha_{local}$  calculado em um processador. Numa esti-

mativa inicial da evolução da convergência paralela, supõe-se que quando a precisão do processo paralelo atingir  $\alpha_{esp}$ , a precisão local deve ser  $\alpha_{local}$ . A metodologia B estabelece, então, a primeira troca de informações entre processadores quando a precisão local do mestre for inferior ao dobro da estimativa inicial  $\alpha_{local}$ , ou seja,  $\alpha \leq 2 \alpha_{local}$ . Essa margem do dobro é adotada porque a estimativa inicial é ainda muito grosseira e deseja-se evitar que em ambientes paralelos heterogêneos, os processadores de maior capacidade tenham executado a análise de muito mais do que  $N/p$  estados e ultrapassado  $\alpha_{esp}$  antes mesmo da primeira comunicação.

Baseado nas informações coletadas na primeira comunicação, uma melhor estimativa da evolução da convergência pode ser realizada. A estratégia para determinação do momento da próxima troca de informações é baseada na observação de como está a convergência paralela no instante atual e prever quanto tempo mais de computação é necessário para convergir o processo. Para isso, é feita uma correspondência entre número de estados analisados e tempo de simulação. Sabemos que:

$$N = \left( \frac{1 - \bar{Q}}{\bar{Q}} \right) \frac{1}{\alpha^2} = k_1 \frac{1}{\alpha^2} \quad \text{e} \quad t = k_2 N \quad (4.7)$$

Então:

$$t = k_1 k_2 \frac{1}{\alpha^2} \quad \rightarrow \quad t = k \frac{1}{\alpha^2} \quad (4.8)$$

No instante atual temos que, decorrido o intervalo de tempo  $t_{at}$  desde o início da simulação, a convergência do processo paralelo está em  $\alpha_{at}$ . Ou seja:

$$t_{at} = k \frac{1}{\alpha_{at}^2} \quad \rightarrow \quad k = t_{at} \alpha_{at}^2 \quad (4.9)$$

Para atingir a convergência especificada  $\alpha_{esp}$  é necessário simular por um intervalo de tempo igual a  $t_{esp}$  que vale:

$$t_{esp} = k \frac{1}{\alpha_{esp}^2} = \frac{t_{at} \alpha_{at}^2}{\alpha_{esp}^2} \quad (4.10)$$

Ou seja, a partir do instante atual, ainda é necessário simular por um intervalo de tempo  $\Delta t = t_{esp} - t_{at}$  para atingir a convergência com  $\alpha_{esp}$ , onde:

$$\Delta t = t_{at} \left( \frac{\alpha_{at}^2}{\alpha_{esp}^2} - 1 \right) \quad (4.11)$$

O momento da próxima troca de mensagens e consequente atualização da convergência do processo,  $t_{com}$ , é estabelecido como sendo após decorrido metade do intervalo de tempo estimado para convergência ( $\Delta t/2$ ), ou seja:

$$t_{com} = t_{at} + \frac{\Delta t}{2} \quad (4.12)$$

$$t_{com} = t_{at} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_{at}^2}{\alpha_{esp}^2} - 1 \right) \right] \quad (4.13)$$

$$t_{com} = \frac{t_{at}}{2} \left( 1 + \frac{\alpha_{at}^2}{\alpha_{esp}^2} \right) \quad (4.14)$$

O acompanhamento da evolução da convergência do processo é repetido a cada novo instante de comunicação estabelecido pela equação 4.14, tendendo paulatinamente para a convergência do processo paralelo com um reduzido número de mensagens trocadas. Uma característica importante deste critério de controle da convergência é que o número de mensagens não aumenta linearmente com o tempo de simulação como ocorre na metodologia A. O número de mensagens trocadas é função da característica de convergência de cada modelo de sistema elétrico testado e do número de processadores do ambiente paralelo. A figura 4.4 ilustra os instantes de troca de mensagens e a tendência para a convergência da simulação.

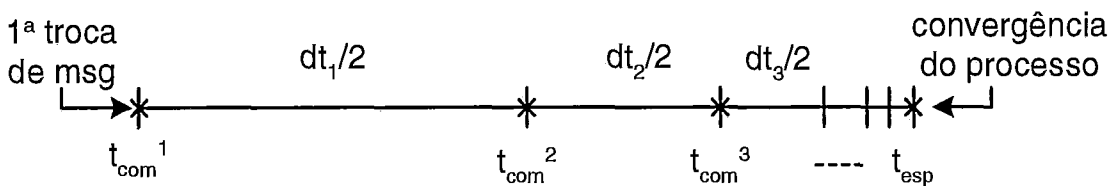


FIGURA 4.4: Controle da Convergência da Metodologia B

Na metodologia B, o controle da convergência é feito somente pelo processo mestre. Os processos escravos apenas realizam a análise da adequação dos estados e enviam para o mestre as suas convergências locais no momento especificado. Após

o *broadcast* inicial dos dados do problema, o mestre calcula o valor do  $\alpha_{local}$  para a primeira troca de informações em função do número de processadores disponíveis e passa a analisar a adequação dos estados do sistema, segundo a filosofia de distribuição de estados descrita anteriormente. Quando o coeficiente de variação dos índices é menor do que  $\alpha_{local}$ , o mestre envia para todos os escravos um pedido dos dados relativos às suas convergências locais. Cada escravo, por sua vez, está desde o início do processo avaliando a adequação de diferentes estados do sistema. Quando recebe o pedido do mestre, cada escravo envia seus dados de convergência e retorna à análise de novos estados. Ou seja, os escravos estão continuamente analisando estados e só são interrompidos para enviar ao mestre suas convergências locais. O mestre, a cada mensagem recebida, atualiza as variáveis totalizadoras dos resultados parciais e controla quem enviou. Quando detecta que todos os escravos já enviaram os resultados relativos a um determinado  $t_{com}$ , o mestre verifica a convergência paralela. Se esta não tiver sido atingida, o mestre calcula o instante da próxima comunicação  $t_{com}$  pela equação 4.14 e o envia para todos os escravos, retornando em seguida para a tarefa de análise de estados. Cada escravo guarda o  $t_{com}$  recebido e envia a próxima mensagem após decorrido este intervalo de tempo, controlado com base no seu relógio local. Quando a convergência é detectada, o mestre envia para todos os escravos um pedido dos resultados parciais calculados, o que faz com que os escravos terminem o processo de simulação e retornem as informações solicitadas. O mestre, então, calcula os índices de confiabilidade, gera os relatórios e termina o processamento.

O grafo de alocação de tarefas está mostrado na figura 4.5, onde as tarefas são as mesmas descritas para a metodologia A, acrescidas de duas novas tarefas: **E** - Estimativa inicial do  $\alpha_{local}$  para primeira comunicação, **R** - Recepção do instante da próxima comunicação.

Conforme pode ser verificado, a metodologia B também é assíncrona. Não existe estágio de sincronização durante o processo de convergência e nenhum processador precisa aguardar pelos demais durante o processo de simulação. Além disso, devido ao critério de controle da convergência paralela, é de se esperar que a simulação paralela apresente reduzida complexidade de mensagens. A frequência da troca de mensagens vai aumentando com a evolução da computação a medida que a simulação



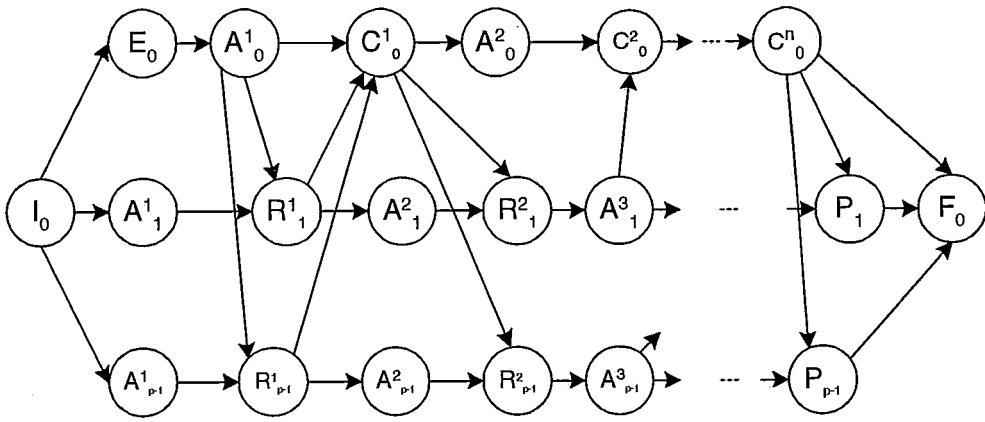


FIGURA 4.5: Metodologia B - Grafo de Alocação de Tarefas

se aproxima da convergência. Ou seja, o padrão de fluxo de mensagens não é o mesmo ao longo de toda o processamento, conforme ocorre com a metodologia A. Por outro lado, a complexidade do controle da convergência paralela é muito maior para esta metodologia.

O gráfico de precedência está mostrado na figura 4.6.

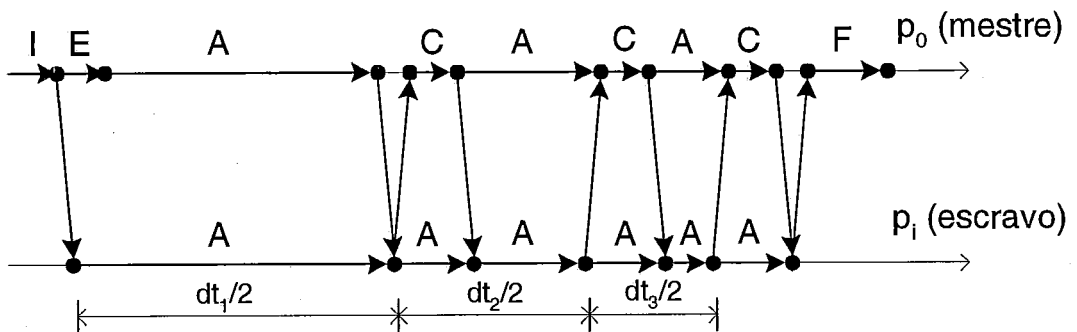


FIGURA 4.6: Metodologia B - Grafo de Precedência

### Pseudo-Código da Metodologia B

```

Se (mestre) então
    Calcula alfa_local
    prim_com = true
Fim-Se

```

```
j = 0
prox = my_rank
```

```
(1) j = j + 1
```

```
Amostra o estado j do sistema
```

```
Se (j = prox) então
```

```
    Analisa a adequação do estado j
```

```
    Atualiza a estimativa dos índices
```

```
    prox = prox + num_procs
```

```
Fim-Se
```

```
Se (escravo) então
```

```
    Testa se chegou t_com enviado pelo mestre
```

```
    Se (chegou) então
```

```
        Armazena t_com
```

```
    Fim-Se
```

```
    Se (hora_atual >= t_com) então
```

```
        Envia convergência local para mestre
```

```
    Fim-Se
```

```
    Testa se chegou mensagem de término
```

```
    Se (chegou) então
```

```
        Envia para mestre últimos resultados calculados
```

```
    Senão
```

```
        Volte ao passo (1)
```

```
    Fim-Se
```

```
Senão    {Mestre}
```

```
    Se (prim_com) e (alfa <= alfa_local) então
```

```
        Envia t_com = 0 para todos os escravos
```

```
        prim_com = false
```

```
    Fim-Se
```

```
    Testa se chegou convergência local enviada por escravo
```

```
    Se (chegou) então
```

```
        Acumula valores recebidos
```

```
        Verifica se todos escravos enviaram convergência relativa a t_com
```

```
Se (todos enviaram) então
    Verifica convergência do processo
    Se (convergiu) ou (tamanho máximo da amostra atingido) então
        Envia mensagem de término para todos os escravos
        Recebe dos escravos os resultados parciais calculados
        Calcula os índices de confiabilidade
        Imprime relatórios
    Senão
        Calcula novo instante de comunicação t_com
        Envia t_com para todos os escravos
        Volta ao passo (1)
    Fim-Se
Senão
    Volte ao passo (1)
Fim-Se
Senão
    Volte ao passo (1)
Fim-Se
Fim-Se
```

Nó	Tipo	MHz	Memória	Disco
spn1	wide 66	66.7	1024 MB	8 GB
spn2	wide 66	66.7	512 MB	8 GB
spn3	thin 66	66.7	128 MB	2 GB
spn4	thin 66	66.7	128 MB	2 GB

TABELA 4.1: RS/6000 SP instalado no NACAD - COPPE/UFRJ

## 4.5 Resultados

### 4.5.1 Considerações Iniciais

#### 4.5.1.1 Ambientes Computacionais

As metodologias A e B descritas na seção 4.4 foram implementadas em ambientes computacionais paralelos e distribuídos. O ambiente computacional paralelo utilizado é o computador paralelo de memória distribuída IBM RS/6000 SP [39], também conhecido como SP2. Cada nó desta máquina paralela é uma estação de trabalho completa, com sua própria CPU, memória RAM, disco e interface de rede. A CPU é um processador RISC POWER2. Os nós são interligados por um *switch* de alta velocidade, dedicado exclusivamente para a execução de programas paralelos. Este *switch* pode estabelecer conexões diretas entre quaisquer pares de nós, podendo existir simultaneamente até uma conexão *full-duplex* por nó. O sistema pode escalar até 16 nós por gabinete e quando interligados, esses gabinetes formam um sistema de até 512 nós. O sistema operacional desta máquina é o AIX 4.1.4, a versão IBM do Unix.

Foram utilizados dois computadores RS/6000 SP para implementação e teste deste trabalho. O primeiro, instalado no NACAD - COPPE/UFRJ, é composto por 4 processadores interligados por um switch com largura de banda de pico de 40 MB/s *full-duplex* e 50 $\mu$ s de latência. Esta máquina foi utilizada durante as fases de desenvolvimento, depuração e para os testes iniciais com pequeno número de processadores. A especificação de cada nó componente da máquina está contida na tabela 4.1.

O segundo RS/6000 SP utilizado, instalado no GEPAD - NCE/UFRJ, é composto por 12 processadores interligados por um switch de alto desempenho com as mesmas características descritas anteriormente. Do total de processadores, 10 são

Nó	Tipo	MHz	Memória	Disco
no1	wide 66	66.7	512 MB	8 GB
no2	wide 66	66.7	512 MB	8 GB
no5	thin 66	66.7	256 MB	9 GB
no6	thin 66	66.7	256 MB	9 GB
no7	thin II	66.7	256 MB	9 GB
no8	thin II	66.7	256 MB	9 GB
no9	thin II	66.7	256 MB	9 GB
no10	thin II	66.7	256 MB	9 GB
no11	thin II	66.7	256 MB	9 GB
no12	thin II	66.7	256 MB	9 GB

TABELA 4.2: RS/6000 SP instalado no GEPAD - NCE/UFRJ

MHz	Memória	Disco
200	64 MB	4.5 GB

TABELA 4.3: Estações de Trabalho IBM RS/6000 43P

alocáveis para execução de programas paralelos em modo exclusivo. Esta máquina foi utilizada para levantamento do desempenho das metodologias desenvolvidas e da curva de *speedup* para os modelos de sistemas de potência testados. A especificação de cada nó componente desta máquina, que pode ser alocado para processamento paralelo, está contida na tabela 4.2.

Dois ambientes computacionais distribuídos distintos foram usados como plataforma de implementação e testes das metodologias propostas: uma rede de estações de trabalho (Network of Workstations - NOW) baseada em Unix e uma rede de microcomputadores PCs baseada em Windows NT. A rede de estações de trabalho utilizada, instalada no GEPAD - NCE/UFRJ, é composta por 8 estações IBM RS/6000 43P interconectadas por uma rede Ethernet (10Base-T). A largura de banda de pico de uma rede Ethernet é 10 Mbits/s unidirecional. As estações que compõem a rede são baseadas no processador POWER PC 604e de 200 MHz. O sistema operacional é o *unix-like* da IBM, AIX 4.1.4. A tabela 4.3 contém as especificações dessas estações de trabalho.

A rede de microcomputadores é composta por 3 PCs baseados no microprocessador Pentium 133 MHz da Intel, controlados pelo sistema operacional Windows NT 4.0 da Microsoft. Um dos micros roda a versão *Server* do NT 4.0 e os outros dois, a versão *Workstation*. O servidor possui 128 MB de memória RAM e 2.1 GB de

disco padrão Ultra SCSI. Os clientes possuem 64 MB de memória RAM e 1.2 GB de disco padrão SCSI. Esses microcomputadores estão interligados através de uma rede Fast Ethernet (100 Base-T) via *hub* de 8 portas de 100 Mbits/s. A largura de banda de pico desta rede é 100 Mbits/s unidirecional compartilhado entre as máquinas conectadas à rede. A latência medida para a rede é de 500 $\mu$ s.

#### 4.5.1.2 Sistema de Troca de Mensagens

O sistema de troca de mensagens usado tanto no computador paralelo como na NOW é a implementação do MPI desenvolvida pela IBM para o sistema operacional AIX. Esta implementação obedece à versão 1.1 do padrão MPI.

Na rede de microcomputadores, foi utilizado o sistema de troca de mensagens WMPI v0.9b [40], que é uma implementação do MPI desenvolvida pela Universidade de Coimbra - Portugal para plataformas Microsoft Win32. Isso significa que este sistema é compatível tanto com o Windows NT como com o Windows 95 e Windows 98. É baseado no MPICH 1.0.13 com o dispositivo ch-p4 do Argonne National Laboratory (ANL). O protocolo básico de comunicação é o TCP/IP. Para implementação das características internas de comunicação e mecanismos de inicialização que não estão especificados no padrão MPI, o WMPI está baseado no sistema de troca de mensagens p4 [41].

Nas implementações das metodologias A e B, foi utilizado o protocolo de transferência de dados estabelecido pelo modo "Standard" do MPI, no qual a decisão quanto a utilização ou não de *buffers* fica a cargo do próprio MPI. As decisões quanto a utilização de diretivas de comunicação bloqueantes ou não-bloqueantes foram tomadas baseado na possibilidade de superposição entre transmissão de mensagens e processamento. As mensagens trocadas durante o processo de convergência utilizam diretivas de comunicação não-bloqueantes devido ao próprio assincronismo do processo de convergência. Já as mensagens de distribuição dos dados iniciais do problema, bem como as de agrupamento dos resultados finais, usam diretivas de comunicação bloqueantes. A razão está em que a análise de adequação dos estados não pode ser iniciada antes que todos os dados do problema estejam disponíveis nas memórias dos processadores escravos, o que justifica a utilização de diretiva de comunicação bloqueante. Raciocínio equivalente é válido para o cálculo dos índices

de confiabilidade no final do processo, que não pode ser iniciado antes que todos os resultados parciais dos escravos tenham sido recebidos.

#### 4.5.1.3 Sistemas Testes

Cinco modelos de sistemas de potência foram utilizados para testar as metodologias desenvolvidas e para verificar seus desempenhos e escalabilidades.

- IEEE-RTS [12]

Sistema teste padrão do IEEE para estudos de avaliação da confiabilidade (Reliability Test System), também conhecido como RTS-79.

- CIGRÉ-NBPS [42]

A representação do sistema New Brunswick Power System foi proposto no âmbito da CIGRÉ como sistema teste para comparação de modelos de cálculo de confiabilidade composta.

- BR-NNE

O sistema BR-NNE é uma representação do sistema interligado brasileiro da região norte-nordeste do país, na configuração de 1993 do PO 1993/2002.

- BR-S

O sistema BR-S é um sistema equivalente do sistema interligado brasileiro da região sul-sudeste do país, onde o sistema da região sul está completamente representado, na configuração de 1992.

- BR-SE

O sistema BR-SE é uma representação do sistema interligado brasileiro da região sul-sudeste do país, na configuração planejada para 1997 no GTPD/92.

Os principais dados dos sistemas testes utilizados estão resumidos na tabela 4.4.

#### 4.5.1.4 Estudos Realizados

O critério de convergência adotado nos estudos realizados foi baseado nos coeficientes de variação dos índices EPNS e LOLP. A simulação é considerada convergida

Sistema	Barras	Circuitos	Geradores	Áreas
RTS	24	38	32	2
NBPS	89	126	39	4
BR-NNE	89	170	67	6
BR-S	660	1.072	78	18
BR-SE	1.389	2.295	259	48

TABELA 4.4: Dados dos Sistemas Testes

quando o maior entre os dois coeficientes de variação se torna inferior à tolerância especificada.

Foi adotado o valor de 5% como tolerância para convergência das simulações, devido a esse ser o valor frequentemente adotado na maioria dos trabalhos disponíveis na literatura. O objetivo é medir o ganho de tempo de computação propiciado pela utilização do processamento paralelo para os casos com precisão usualmente adotada em estudos de engenharia. No entanto, umas das razões que levam a adoção desse valor é o esforço computacional demandado por estudos com maior precisão. Com a utilização do processamento paralelo, no entanto, isso deve deixar de ser um problema. Na verdade, uma das grandes vantagens do uso da computação paralela em estudos de engenharia é propiciar uma melhor modelagem e uma análise mais precisa dos problemas, já que o custo computacional é dividido entre vários processadores. A fim de ilustrar essa capacidade, foram realizados testes com o sistema BR-NNE adotando-se 1% como tolerância para convergência e foram verificados os desempenhos das metodologias nas plataformas computacionais paralela e distribuídas.

#### 4.5.1.5 Resultados da Execução Sequencial

Os resultados obtidos na execução sequencial da avaliação da confiabilidade composta usando SMC não-sequencial estão resumidos na tabela 4.5 para todos os estudos realizados com tolerância de 5%. A tabela mostra o número total de estados analisados e o tempo de CPU em um processador de cada uma das plataformas utilizadas: RS/6000 SP, NOW e rede de PCs.

Os principais índices calculados, bem como o coeficiente de variação da EPNS, estão mostrados na tabela 4.6, onde a EPNS, LOLF e LOLD estão dados em MW,



Sistema	Estados	Tempos de CPU		
		RS/6000 SP	NOW	Rede PCs
RTS	4.770	35,03 s	17,98 s	41,74 s
NBPS	57.003	24,36 min	11,89 min	33,43 min
BR-NNE	27.450	17,14 min	8,56 min	23,08 min
BR-S	3.624	25,00 min	14,28 min	31,81 min
BR-SE	50.980	8,52 h	5,31 h	10,52 h

TABELA 4.5: Resultados da Execução Sequencial -  $\alpha \leq 5\%$

Sistema	LOLP	EPNS	LOLF	LOLD	$\alpha(\%)$
RTS	0,144	25,16	26,90	46,96	4,998
NBPS	0,014	2,10	10,89	11,34	4,999
BR-NNE	0,027	1,99	23,97	9,89	5,000
BR-S	0,188	3,82	69,76	23,70	4,994
BR-SE	0,037	1,75	114,22	2,88	5,000

TABELA 4.6: Índices de Confiabilidade calculados na Execução Sequencial -  $\alpha \leq 5\%$  ocorrências/ano e horas, respectivamente.

Os resultados obtidos na simulação do sistema BR-NNE adotando-se 1% como tolerância para convergência, bem como os índices de confiabilidade calculados, estão mostrados nas tabelas 4.7 e 4.8, respectivamente.

É interessante observar o efeito do aumento da precisão das estimativas no número de estados analisados e, conseqüentemente, no tempo de simulação. A adoção de uma precisão de 1% faz com que a avaliação da confiabilidade de um sistema de pequeno porte, como o BR-NNE, demande quase 3 horas de processamento em uma estação de trabalho moderna e quase 8 horas em um PC Pentium.

Sistema	Estados	Tempos de CPU		
		RS/6000 SP	NOW	Rede PCs
BR-NNE	548.232	5,82 h	2,90 h	7,68 h

TABELA 4.7: Resultados da Execução Sequencial -  $\alpha \leq 1\%$

Sistema	LOLP	EPNS	LOLF	LOLD	$\alpha(\%)$
BR-NNE	0,028	1,99	24,73	10,06	1,000

TABELA 4.8: Índices de Confiabilidade calculados na Execução Sequencial -  $\alpha \leq 1\%$

## 4.5.2 Metodologia A - Intervalo de Tempo Fixo

### 4.5.2.1 Ambiente Computacional Paralelo

O número de estados analisados na simulação paralela pode não ser exatamente o mesmo analisado sequencialmente para a mesma tolerância de convergência especificada. Isso se deve basicamente ao assincronismo da metodologia A. Como cada processador conhece a sequência de estados que deve analisar baseado na filosofia de distribuição de estados adotada, os processadores analisam seus próprios estados independentemente dos estados analisados pelos outros. As análises de adequação dos estados podem demandar tempos diferentes, dependendo da complexidade do estado e da capacidade de processamento dos processadores. Isso implica em que no intervalo de tempo especificado  $\Delta t$  entre mensagens sucessivas, os escravos podem ter analisados números distintos de estados. Dessa forma, o mestre pode receber os resultados relativos às análises de estados em uma ordem diferente daquela seguida no processamento sequencial. Por exemplo, suponhamos que a plataforma paralela possua 4 processadores e que o escravo de *rank* 1 está analisando estados numa taxa mais alta que os demais. Em um determinado momento de controle da convergência, o mestre pode ter recebido os resultados relativos ao seguinte número de estados analisados pelos processadores: 5 pelo escravo 1 e 3 pelos demais. Pela filosofia de distribuição de estados descrita na seção 4.3, os estados analisados até então seriam os seguintes:

Proc.	Estados	Total
$p_0$ -	1, 5, 9	3
$p_1$ -	2, 6, 10, 14, 18	5
$p_2$ -	3, 7, 11	3
$p_3$ -	4, 8, 12	3

Isso não implica em qualquer problema para a avaliação da confiabilidade, já que se utiliza de um método probabilístico baseado em SMC não-sequencial, onde os índices de confiabilidade são estimativas do valor esperado de funções de avaliação calculadas sobre amostras aleatórias de estados do sistema. A consequência deste fato é uma possível alteração da trajetória de convergência da simulação paralela em relação à sequencial. O coeficiente de variação do índice que controla a convergência é calculado sobre os estados analisados até o momento da verificação da convergência

Sistema	Estados	
	p=4	p=8
$\alpha = 5\%$		
RTS	5.071	5.271
NBPS	57.160	57.156
BR-NNE	27.468	27.500
BR-S	3.659	3.641
BR-SE	51.046	51.447
$\alpha = 1\%$		
BR-NNE	548.359	548.743

TABELA 4.9: Número de Estados Analisados - Metodologia A

paralela e pode resultar em valores diferentes se os estados analisados não forem exatamente os mesmos. No exemplo anterior, a convergência seria calculada sobre os estados analisados de número 1 a 12, mais os estados 14 e 18, o que nunca poderia acontecer na execução sequencial.

Outro fator que pode levar a um número de estados analisados diferente da execução sequencial é o controle da convergência paralela. Na execução sequencial, a convergência é checada a cada novo estado analisado. Na metodologia A, a convergência é checada em lotes de estados analisados pelos diferentes processadores dentro do intervalo de tempo especificado. Isso pode levar a um maior número de estados analisados quando a convergência paralela é detectada. Esse lote de estados analisados entre verificações sucessivas da convergência é tanto maior quanto maior for o intervalo de tempo especificado. Por outro lado, intervalos de tempo menores demandam maior número de mensagens trocadas para controlar a convergência do processo. Ou seja, deve existir uma solução de compromisso na especificação do intervalo de tempo utilizado.

O efeito desses dois fatores no número de estados analisados para convergência do processo varia com o número de processadores envolvidos e com a capacidade de processamento dos mesmos. Isso pode ser observado na tabela 4.9, onde são mostrados os número de estados analisados nas simulações em 4 e 8 processadores do RS/6000 SP para os estudos com tolerância de 5% e 1%.

Apesar deste fenômeno, todas as simulações são válidas e os índices de confiabilidade calculados apresentam incerteza relativa menor ou igual à especificada. A única consequência prática é a influência no tempo final da simulação.

Sistema	Tempo de Execução		
	p=4	p=8	p=10
RTS	10,51 s	9,28 s	9,39 s
NBPS	6,26 min	3,29 min	2,70 min
BR-NNE	4,40 min	2,29 min	1,88 min
BR-S	6,49 min	3,34 min	2,69 min
BR-SE	2,19 h	1,12 h	54,64 min

TABELA 4.10: Tempos de Execução - Metodologia A - RS/6000 SP -  $\alpha \leq 5\%$

A figura 4.7 mostra as trajetórias de convergência da execução sequencial e de uma execução paralela em 4 processadores para o sistema BR-S, a título de ilustração da ligeira alteração na trajetória de convergência provocada pela solução paralela assíncrona.

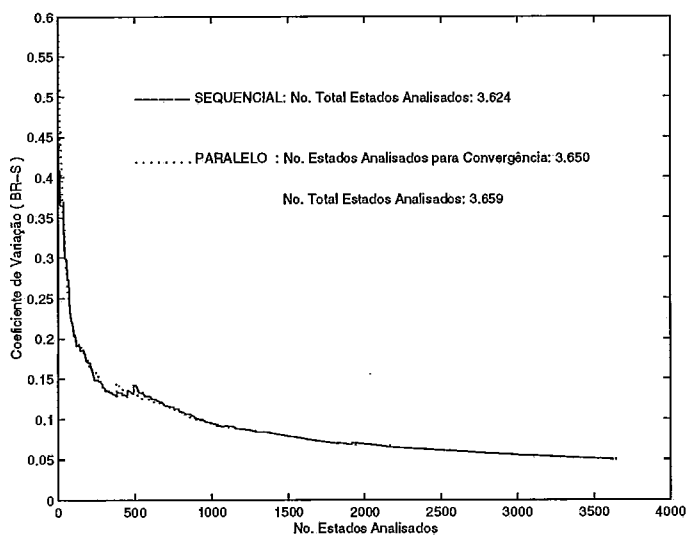


FIGURA 4.7: Trajetória de Convergência - Metodologia A - BR-S

Os tempos de execução do código paralelo para os sistemas testes com tolerância de 5%, calculados como a média entre os tempos de relógio de três execuções distintas, estão mostrados na tabela 4.10 para 4, 8 e 10 processadores do RS/6000 SP.

Conforme pode ser verificado pela comparação com a tabela 4.5, a avaliação da confiabilidade composta pela metodologia A sofre uma redução significativa no tempo de simulação em relação à execução sequencial. Essa redução é bastante expressiva nos sistemas de grande porte, como por exemplo o sistema BR-SE, onde

Sistema	Eficiência (%)		
	p=4	p=8	p=10
RTS	88,07	47,19	37,28
NBPS	97,28	92,53	90,32
BR-NNE	97,41	93,35	91,06
BR-S	96,28	93,49	93,00
BR-SE	97,04	94,91	93,55

TABELA 4.11: Eficiências - Metodologia A - RS/6000 SP -  $\alpha \leq 5\%$

foi conseguida uma redução de 6,32 horas em 4 processadores, 7,40 horas em 8 processadores e 7,61 horas em 10 processadores. Com a aplicação do processamento paralelo, tornou-se possível a realização do estudo de confiabilidade de um modelo de sistema de grande porte (1.389 barras) em menos de uma hora.

Os resultados em termos de eficiência da metodologia paralela estão apresentados na tabela 4.11.

As eficiências alcançadas podem ser consideradas excelentes, ficando acima de 90% em até 10 processadores para praticamente todos os sistemas testes. Para os sistemas de grande porte, a eficiência da metodologia supera 93%. A baixa eficiência alcançada para o sistema RTS é devido ao pequeno esforço computacional demandado para avaliação desse sistema já em ambiente sequencial, o que na realidade nem justifica a utilização de processamento paralelo. Esse sistema foi usado mais para fins de depuração dos códigos e por se tratar de um sistema padrão do IEEE.

A escalabilidade da metodologia também é muito boa, mostrando pouca redução da eficiência com o aumento do número de processadores, para diferentes dimensões dos sistemas testes. As curvas de *speedup* da metodologia A para as simulações com  $\alpha \leq 5\%$  estão mostradas na figura 4.8, onde uma característica quase linear pode ser observada para os sistemas de grande porte.

O tempo de amostragem de estados não analisados pelos processadores, devido à filosofia de distribuição de estados do sistema adotada, mostrou-se realmente insignificante em relação ao tempo total da simulação, o que pode ser comprovado pelas altas eficiências alcançadas. Em relação ao custo da comunicação, o tempo gasto na distribuição inicial dos dados e agrupamento final dos resultados parciais produzidos pelos diferentes processadores é praticamente desprezível em relação ao tempo total da simulação. O tempo de comunicação que tem influência no de-

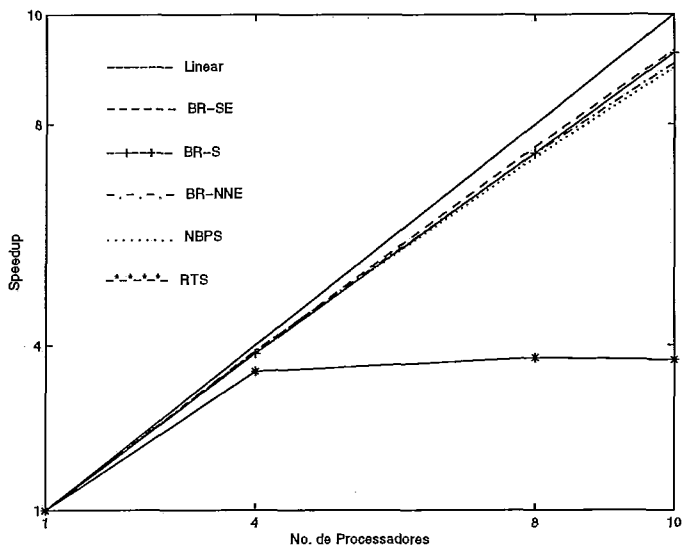


FIGURA 4.8: Curvas de *Speedup* - Metodologia A - RS/6000 SP -  $\alpha \leq 5\%$

Sistema	Mensagens		
	p=4	p=8	p=10
$\alpha = 5\%$			
RTS	32	54	65
NBPS	1.137	1.369	1.432
BR-NNE	775	961	987
BR-S	1.141	1.344	1.409
BR-SE	23.742	28.254	28.833
$\alpha = 1\%$			
BR-NNE	16.126	19.109	20.055

TABELA 4.12: Número de Mensagens - Metodologia A

sempenho da metodologia é aquela gasto na troca de mensagens para controle da convergência paralela. Nesta metodologia, o intervalo de tempo entre mensagens consecutivas enviadas pelos escravos para o mestre é fixo e especificado *a priori*, o que pode demandar um número de mensagens elevado dependendo do tempo total da simulação. A fim de ilustrar esta afirmação, estão mostrados na tabela 4.12 o número de mensagens envolvidas na simulação, adotando-se o mesmo intervalo  $\Delta t = 1\text{seg}$  para todos os casos testes.

O custo de comunicação no *switch* de alto desempenho do computador paralelo RS/6000 SP é baixo, o que favorece a obtenção de altas eficiências mesmo nos casos com grande número de mensagens. Em ambiente computacional distribuído,

Sistema	LOLP	EPNS	LOLF	LOLD	$\alpha(\%)$
p=4					
RTS	0,143	25,21	26,45	47,40	4,766
NBPS	0,014	2,10	10,86	11,35	4,990
BR-NNE	0,027	2,00	24,17	9,87	4,975
BR-S	0,189	3,84	70,19	23,66	4,974
BR-SE	0,037	1,74	114,84	2,85	4,997
p=10					
RTS	0,144	25,42	26,51	47,72	4,668
NBPS	0,014	2,11	10,87	11,39	4,990
BR-NNE	0,027	2,00	24,16	9,85	4,976
BR-S	0,186	3,76	68,66	23,79	4,998
BR-SE	0,037	1,76	115,26	2,85	5,000

TABELA 4.13: Índices de Confiabilidade - Metodologia A -  $\alpha \leq 5\%$

composto por uma rede de estações de trabalho interligadas por rede Ethernet, por exemplo, o custo da comunicação é muito superior. Assim, é de se esperar que uma metodologia que envolva um menor número de mensagens, como a metodologia B, apresente melhor eficiência do que a metodologia A em ambiente distribuído.

A comparação entre os índices de confiabilidade calculados na execução sequencial e aqueles calculados na execução paralela em 4 e 10 processadores pode ser feita baseada na tabela 4.13, onde as unidades dos índices são as mesmas descritas para a tabela 4.6.

As pequenas diferenças observadas nos índices se devem ao assincronismo da metodologia paralela, conforme explicado no início desta seção. No entanto, os índices calculados em paralelo são estatisticamente equivalentes aos calculados sequencialmente, apresentando o mesmo ou até menores graus de incerteza relativa. Outro fator que contribui para a maior precisão da solução paralela é a simulação redundante descrita na seção 4.4.1, que corresponde aos estados analisados além do mínimo necessário à convergência do processo devido ao controle paralelo da convergência.

Os testes realizados com o sistema BR-NNE, adotando-se 1% como tolerância para convergência da simulação, apresentaram os resultados mostrados na tabela 4.14 em termos de tempo de execução e eficiência em 4, 8 e 10 processadores.

A redução significativa do tempo de simulação propiciada pela metodologia paralela torna possível a realização de estudos de confiabilidade composta com alto grau

Sistema	p=4	p=8	p=10
	Tempo de Execução		
BR-NNE	1,46 h	45,51 min	37,18 min
	Eficiência (%)		
	99,44	95,91	93,61

TABELA 4.14: Tempos e Eficiências - Metodologia A - RS/6000 SP -  $\alpha \leq 1\%$

de precisão dentro de tempos de solução aceitáveis. Para um sistema de pequeno porte como este, o tempo de processamento passou de quase 6 horas em ambiente sequencial para menos de 40 minutos em 10 processadores. Reduções ainda mais drásticas devem ocorrer para sistemas de grande porte.

Em termos de escalabilidade da metodologia paralela, os resultados mostram que a metodologia é escalável também com a precisão da solução. A curva de *speedup* da metodologia A na avaliação do sistema BR-NNE com tolerância de 1% está mostrada na fig 4.9, onde é repetida a curva de *speedup* do mesmo sistema com tolerância de 5%, a título de comparação.

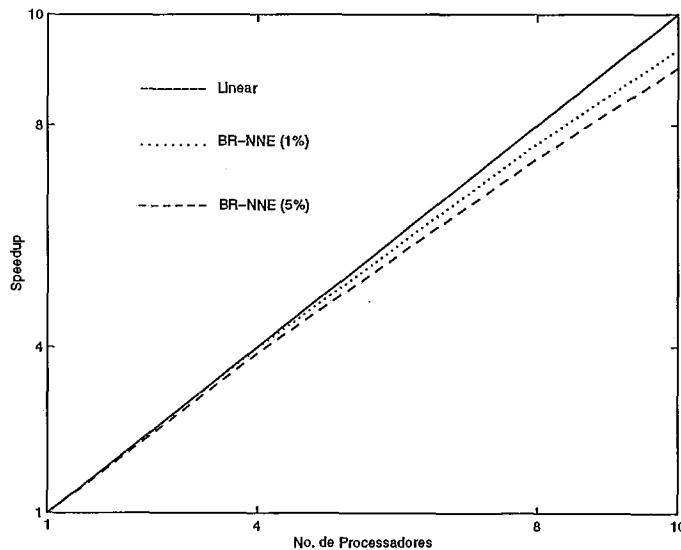


FIGURA 4.9: Curvas de *Speedup* - Metodologia A - RS/6000 SP - BR-NNE



Sistema	Tempo de Execução		
	p=4	p=6	p=8
RTS	14,32 s	23,97 s	34,84 s
NBPS	3,24 min	2,42 min	2,02 min
BR-NNE	2,34 min	1,82 min	96,95 s
BR-S	3,74 min	2,74 min	2,25 min
BR-SE	1,38 h	57,00 min	43,04 min

TABELA 4.15: Tempos de Execução - Metodologia A - NOW -  $\alpha \leq 5\%$

Sistema	Eficiência (%)		
	p=4	p=6	p=8
RTS	31,39	12,50	6,45
NBPS	91,85	81,93	73,65
BR-NNE	91,16	78,53	66,54
BR-S	95,43	87,00	79,17
BR-SE	96,23	93,16	92,53

TABELA 4.16: Eficiências - Metodologia A - NOW -  $\alpha \leq 5\%$

#### 4.5.2.2 Ambiente Computacional Distribuído (NOW)

A metodologia A foi também implementada no ambiente computacional distribuído composto por uma rede de estações de trabalho (NOW). O principal apelo desse ambiente é o seu menor custo em relação a um computador paralelo, aliado à maior disponibilidade dessas plataformas nas empresas, consultorias e centros de pesquisa de energia elétrica.

Os tempos de execução do código paralelo para os sistemas testes com tolerância de 5%, calculados como a média entre os tempos de relógio de três execuções distintas na NOW descrita na seção 4.5.1.1, estão mostrados na tabela 4.15 para 4, 6 e 8 estações de trabalho.

Conforme pode ser verificado pela comparação com a tabela 4.5, a redução de tempo de processamento conseguida na NOW é também bastante expressiva, especialmente para os sistemas de grande porte. O tempo de processamento para avaliação da confiabilidade do sistema BR-SE passou de 5,31 horas em uma estação de trabalho para aproximadamente 43 minutos numa rede de 8 estações de trabalho. Os resultados expressos em termos de eficiência da metodologia paralela estão mostrados na tabela 4.16.

Esses resultados mostram o comportamento esperado: menores eficiências no

ambiente distribuído devido ao maior custo da comunicação na rede Ethernet em relação ao *switch* de alto desempenho do RS/6000 SP. Apesar disso, as eficiências ainda são boas, ficando acima de 91% em 4 estações para praticamente todos os sistemas. Com o aumento do número de estações, as eficiências sofrem redução mais acentuada do que a que ocorre no computador paralelo, mas ainda assim mantêm-se acima de 66% em 8 estações para os sistemas médios. Para o sistema BR-SE, as eficiências podem ser consideradas muito boas, sempre superiores a 92% em até 8 estações. O elevado custo de comunicação leva a eficiências extremamente baixas para o sistema RTS, o que já era esperado dado o pouco esforço computacional demandado.

As curvas de *speedup* para os casos testes no ambiente distribuído composto pela NOW estão mostradas na figura 4.10.

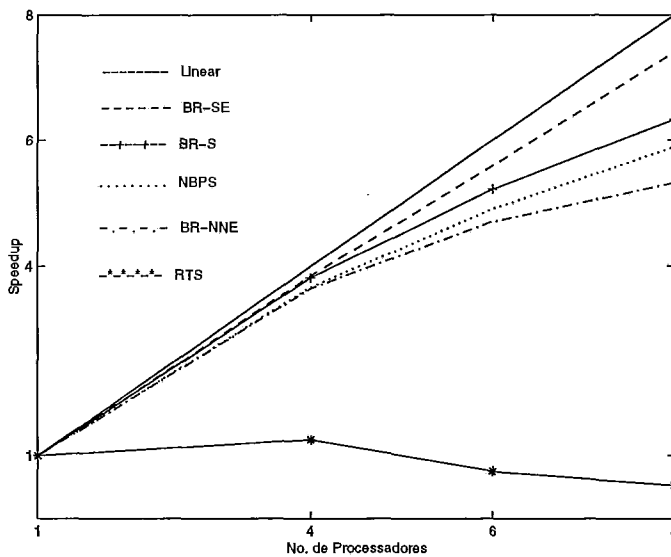


FIGURA 4.10: Curvas de *Speedup* - Metodologia A - NOW -  $\alpha \leq 5\%$

No entanto, um comportamento diferente do apresentado na execução no computador paralelo foi observado neste ambiente. A grande parte do tempo de comunicação está concentrada no *broadcast* inicial dos dados do problema. Como a diretiva de *broadcast* do MPI é bloqueante, o tempo de comunicação dos dados iniciais é tanto maior quanto mais estações forem alocadas. Como consequência, as eficiências são mais prejudicadas com o aumento do número de processadores, afetando em maior grau a escalabilidade da metodologia.

Sistema	p=4	p=6	p=8
BR-NNE	Tempo de Execução		
	45,16 min	30,72 min	23,63 min
	Eficiência (%)		
	96,43	94,50	92,14

TABELA 4.17: Tempos de Execução e Eficiências - Metodologia A - NOW -  $\alpha \leq 1\%$

Outro fator que colabora para que a eficiência na NOW utilizada seja menor do que no computador paralelo é o fato do código sequencial ser mais rápido quando executado em uma estação RS/6000 43P do que em 1 processador do computador paralelo.

Para o sistema BR-NNE adotando-se 1% como tolerância para convergência, os resultados obtidos em termos de tempo de processamento e as respectivas eficiências em 4, 6 e 8 estações de trabalho estão mostradas na tabela 4.17.

O aumento da eficiência obtida como consequência do aumento da precisão é bastante significativo, especialmente em 8 estações de trabalho, quando chega a aproximadamente 26% de aumento. A principal razão está no fato de que, neste ambiente, a maior parte do custo da comunicação está no *broadcast* dos dados iniciais. Como o tempo de *broadcast* desses dados é o mesmo independente da precisão adotada e as simulações com maior precisão requerem mais tempo de processamento, as eficiências tendem a ser mais altas para estes casos.

As curvas de *speedup* da metodologia A na avaliação do sistema BR-NNE com tolerância de 1% e 5% estão mostradas na figura 4.11 a título de ilustração da melhoria do desempenho apresentado na NOW com o aumento da precisão.

O custo da comunicação no ambiente distribuído é plenamente compensado na avaliação da confiabilidade dos sistemas de maior demanda computacional. Esse é o caso de sistemas de grande dimensões, como o BR-SE, e das simulações que requerem alta precisão, como o exemplo do sistema BR-NNE com  $\alpha = 1\%$ . Para esses casos, as eficiências mantiveram-se acima de 92% em 8 estações de trabalho, o que pode ser considerado como excelente para um ambiente computacional de mais baixo custo.

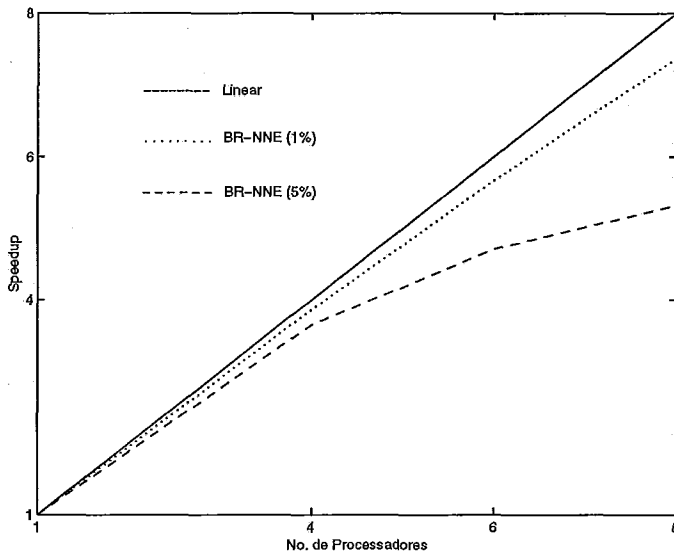


FIGURA 4.11: Curvas de *Speedup* - Metodologia A - NOW - BR-NNE

Sistema	Tempo de Execução	Eficiência (%)
RTS	20,27 s	68,62
NBPS	11,97 min	93,10
BR-NNE	8,19 min	93,90
BR-S	11,05 min	95,99

TABELA 4.18: Tempos e Eficiências - Metodologia A - Rede de PCs -  $\alpha \leq 5\%$

#### 4.5.2.3 Ambiente Computacional Distribuído (Rede de PCs)

O desempenho da metodologia A foi também verificado numa plataforma distribuída composta por uma rede de microcomputadores baseada em Windows NT. O grande apelo desta plataforma é o baixo custo dos equipamentos, associado à grande disponibilidade e flexibilidade de expansão da rede. Os tempos de execução do código paralelo, obtidos como a média entre três execuções distintas, e as respectivas eficiências alcançadas para as simulações nos 3 PCs da rede descrita na seção 4.5.1.1, estão mostrada na tabela 4.18.

As eficiências alcançadas são muito boas, mantendo-se acima de 93% para os sistemas de porte médio a grande. Infelizmente, dada a reduzida dimensão dessa rede, não foi possível levantar a escalabilidade da metodologia nesta plataforma. No entanto, comparando-se com as eficiências alcançadas na NOW usando 4 estações de trabalho, as eficiências alcançadas nesta rede são da ordem de 2% mais altas

Sistema	Tempo de Execução	Eficiência (%)
BR-NNE	2,67 h	95,83

TABELA 4.19: Tempos e Eficiências - Metodologia A - Rede de PCs -  $\alpha \leq 1\%$

para os casos de porte médio a grande. Tendo em mente a diferença de números de processadores nesta comparação, pode-se dizer que contribuem para estes resultados a maior largura de banda da rede Fast Ethernet em relação a Ethernet e a menor capacidade de processamento dos PCs utilizados em relação às estações de trabalho.

As curvas de *speedup* para os casos testes no ambiente distribuído composto pela rede de PCs estão mostradas na figura 4.12.

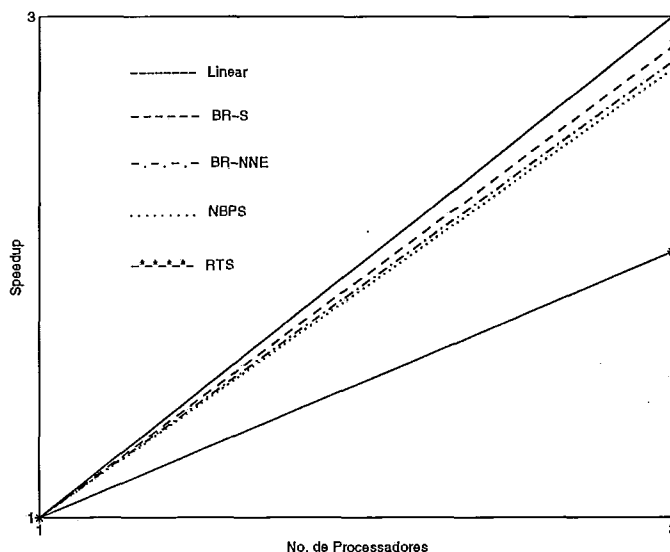


FIGURA 4.12: Curvas de *Speedup* - Metodologia A - Rede de PCs -  $\alpha \leq 5\%$

Para o sistema BR-NNE com 1% de tolerância, a redução do tempo de processamento foi bastante expressiva, atingindo uma eficiência superior a 95%, conforme pode ser visto na tabela 4.19.

Nesta plataforma, observa-se que a maior parte do tempo de comunicação está concentrada na troca de mensagens para controle da convergência. O tempo de *broadcast* dos dados do problema não se mostra tão elevado como na NOW devido a dois fatores: a maior largura de banda da rede Fast-Ethernet em relação à Ethernet e o reduzido número de computadores da rede. Como o número de mensagens trocadas na metodologia A aumenta com o tempo de simulação, a melhoria da

eficiência provocada pelo aumento da precisão não é tão expressivo como ocorre na NOW. A figura 4.13 mostra as curvas de *speedup* para a avaliação do sistema BR-NNE com tolerância de 1% e 5%, onde o ligeiro aumento da eficiência pode ser percebido.

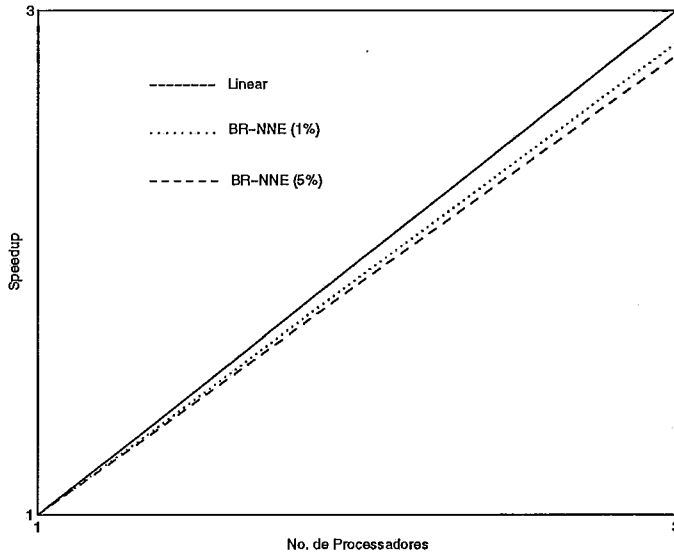


FIGURA 4.13: Curvas de *Speedup* - Metodologia A - Rede de PCs - BR-NNE

No entanto, esta plataforma apresentou problemas na avaliação do sistema BR-SE. A simulação com tolerância de 5% demandou 5,69 horas de processamento, o que leva a uma eficiência de apenas 61,58%. Foram realizados vários testes no sentido de identificar as possíveis causas desse fraco desempenho. As maiores suspeitas recaíram sobre o sistema operacional Windows NT, o compilador Fortran e a biblioteca de rotinas WMPI utilizados na implementação, ou mesmo alguma incompatibilidade entre eles. No entanto, nenhuma conclusão foi tirada a respeito da causa desse comportamento.

Foi feito um estudo da evolução do desempenho da avaliação do sistema BR-SE com o aumento da tolerância para convergência da simulação e verificou-se que o valor mínimo inteiro para o qual a eficiência fica da ordem esperada é 8%. Os resultados de tempo de execução sequencial ( $p=1$ ) e paralelo ( $p=3$ ) e a respectiva eficiência para este caso estão mostrados na tabela 4.20.

Algumas outras anomalias foram detectadas na troca de mensagens entre os microcomputadores desta plataforma usando diretivas de comunicação do MPI.

Sistema	Tempo de Execução		Eficiência (%)
	p=1	p=3	
BR-SE	4,95 h	1,71 h	96,63

TABELA 4.20: Tempos e Eficiência - Rede de PCs - BR-SE com  $\alpha \leq 8\%$

Constatou-se que o tamanho da mensagem não pode ser maior do que 248KBytes, porque caso contrário o sistema emite uma mensagem de erro do tipo “*net-send write error*”. Além disso, se forem usadas diretivas bidirecionais de comunicação, o sistema simplesmente trava para mensagens de tamanho maior que 24KBytes.

Devido a todas essas observações, consideramos que esta plataforma, em seu estado atual, ainda não está suficientemente estável e confiável para aplicação em processamento distribuído de grande porte.

Sistema	Mensagens	
	p=4	p=10
$\alpha = 5\%$		
RTS	59	117
NBPS	54	140
BR-NNE	56	173
BR-S	51	111
BR-SE	58	113
$\alpha = 1\%$		
BR-NNE	215	331

TABELA 4.21: Número de Mensagens Trocadas - Metodologia B

### 4.5.3 Metodologia B - Função da Convergência

#### 4.5.3.1 Ambiente Computacional Paralelo

A estimativa da frequência de troca de mensagens para controle da convergência paralela baseada na própria evolução da convergência do processo, adotada na metodologia B, apresenta como maior vantagem o reduzido número de mensagens trocadas com este objetivo. O número de mensagens trocadas durante a avaliação dos diferentes sistemas testes apresenta pouca variação para uma mesma tolerância especificada, independente das dimensões dos sistemas e tempo de simulação demandado. Esse número aumenta com o número de processadores alocados e com a precisão especificada. A fim de ilustrar este fato, estão mostrados na tabela 4.21 o número de mensagens trocadas na avaliação dos sistemas testes em 4 e 10 processadores do computador RS/6000 SP.

Observa-se uma grande redução no número de mensagens trocadas em relação à metodologia A, especialmente para os sistemas que demandam elevados esforços computacionais. Para o sistema BR-SE, este número passa de 23.742 na metodologia A para apenas 58 na metodologia B, enquanto para o sistema BR-NNE com 1% de tolerância, o número de mensagens reduz de 16.126 para 215 em 4 processadores. A comparação entre o número de mensagens trocadas na avaliação do sistema BR-NNE com 5% e 1% mostra a sua dependência em relação à precisão especificada para a simulação.

Os números de estados analisados na metodologia B pode também não ser o mesmo daquele da execução sequencial para uma mesma tolerância de convergência.



Sistema	Estados	
	p=4	p=10
$\alpha = 5\%$		
RTS	4.917	5.006
NBPS	57.131	58.133
BR-NNE	27.426	28.267
BR-S	3.657	3.731
BR-SE	51.332	51.650
$\alpha = 1\%$		
BR-NNE	548.238	548.127

TABELA 4.22: Número de Estados Analisados - Metodologia B

Como a metodologia é assíncrona, a trajetória de convergência pode não ser exatamente a mesma da execução sequencial, pela mesma razão descrita para a metodologia A. Em alguns casos, pode ocorrer até da diferença em relação ao número de estados analisados sequencialmente ser maior para a metodologia B do que para a metodologia A. Uma das razões é que o critério de controle da convergência paralela desenvolvido para a metodologia B é baseado na característica de convergência do índice LOLP e os sistemas acabam convergindo pelo coeficiente de variação do índice EPNS. Outra razão é que o controle de convergência pressupõe uma variação linear do tempo de simulação com o número de estados analisados. Apesar de ser possível identificar um demanda de tempo média para a análise dos estados, essas análises podem demandar tempos de processamento diferentes dependendo da complexidade do estado amostrado e da necessidade de acionar o modelo de medidas corretivas para cada estado. Isso pode levar a estimativas erradas do tempo que resta para a convergência do processo em função do tempo de processamento já decorrido até o momento da verificação. O número de estados analisados nas simulações em 4 e 10 processadores estão mostrados na tabela 4.22.

Os tempos de execução obtidos pela aplicação da metodologia B na avaliação da confiabilidade dos sistemas testes em 4 e 10 processadores, tomados como a média entre os tempos de relógio de três execuções distintas, estão mostrados na tabela 4.23.

Esses resultados podem ser expressos em termos de eficiência da metodologia paralela conforma mostrado na tabela 4.24.

A eficiência da metodologia B mostrou-se boa para os sistemas de médio e grande

Sistema	Tempo de Execução	
	p=4	p=10
$\alpha = 5\%$		
RTS	10,91 s	5,14 s
NBPS	6,34 min	27,58 min
BR-NNE	4,40 min	1,89 min
BR-S	6,34 min	2,70 min
BR-SE	2,20 h	54,27 min
$\alpha = 1\%$		
BR-NNE	1,49 h	37,30 min

TABELA 4.23: Tempos de Execução - Metodologia B - RS/6000 SP

Sistema	Eficiência (%)	
	p=4	p=10
$\alpha = 5\%$		
RTS	80,28	68,16
NBPS	96,09	88,33
BR-NNE	97,31	90,87
BR-S	98,70	92,69
BR-SE	96,87	94,21
$\alpha = 1\%$		
BR-NNE	97,70	93,61

TABELA 4.24: Eficiências - Metodologia B - RS/6000 SP

porte, mantendo-se acima de 96% em 4 processadores e 88% em 10 processadores. As simulações em 4 processadores, no entanto, apresentaram eficiências menores dos que as alcançadas pela metodologia A para a maioria dos casos testes. Como a maior vantagem desta metodologia é a redução do número de mensagens trocadas, foi verificado o desempenho diretamente sobre o número máximo de processadores disponíveis, que requer a maior quantidade de mensagens. Em 10 processadores, as eficiências também se mostraram inferiores às atingidas pela metodologia A para quase todos os sistemas, exceto para o sistema BR-SE, que sofre a maior redução no número de mensagens trocadas para controle da convergência. A redução de 23.068 mensagens em média no total de mensagens trocadas devido a aplicação da metodologia B provoca um aumento de apenas 1% na eficiência da computação paralela.

As curvas de *speedup* da metodologia B para os casos testes estão mostradas na figura 4.14.

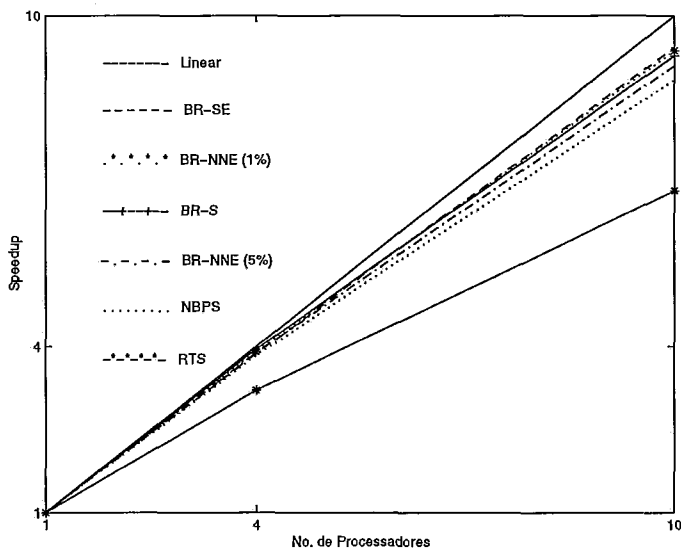


FIGURA 4.14: Curvas de *Speedup* - Metodologia B - RS/6000 SP

Uma das razões do desempenho observado para a metodologia B é o baixo custo de comunicação do *switch* de alto desempenho do computador RS/6000 SP. Como o controle de convergência paralela nesta metodologia é mais complexo do que na metodologia A, o aumento no tempo de processamento do código paralelo devido à maior complexidade desse controle não é compensado pela redução no tempo de

Sistema	Tempo
RTS	39,99 s
NBPS	2,08 min
BR-NNE	98,79 s
BR-S	2,28 min
BR-SE	43,19 min

TABELA 4.25: Tempos de Execução - Metodologia B - NOW (p=8)

Sistema	Eficiência (%)
RTS	5,62
NBPS	71,51
BR-NNE	64,96
BR-S	78,13
BR-SE	92,21

TABELA 4.26: Eficiências - Metodologia B - NOW (p=8 )

comunicação devido ao menor número de mensagens. Outro fator que prejudica a eficiência da metodologia B é a possibilidade de calcular estimativas imprecisas para o tempo restante para a convergência, conforme explicado anteriormente, o que resulta na análise de um número maior de estados e conseqüentemente, um tempo maior de simulação paralela.

#### 4.5.3.2 Ambiente Computacional Distribuído (NOW)

Na rede de estações de trabalho, onde o custo da comunicação é maior do que no computador paralelo, a redução no número de mensagens propiciado pela metodologia B deveria provocar aumento significativo da eficiência da computação paralela. No entanto, conforme já constatado para a metodologia A, a grande parte do tempo de comunicação neste ambiente está concentrada no *broadcast* inicial dos dados do problema, o que faz a estratégia de controle da convergência paralela não ser determinante para o desempenho da simulação paralela. As tabelas 4.25 e 4.26 mostram os tempos de execução da implementação da metodologia B na NOW e as respectivas eficiências alcançadas em 8 estações de trabalho.

Observa-se que as eficiências mostraram-se ainda menores do que as da metodologia A no ambiente NOW. A razão está em que, além da redução do número de mensagens para controle da convergência não ser determinante no tempo total de

comunicação, a maior complexidade da estratégia de controle aumenta o tempo de execução do código paralelo. Ou seja, o maior apelo da metodologia B, que seria o aumento da eficiência da simulação paralela em ambiente computacional distribuído com alto custo de comunicação, devido à redução do número de mensagens trocadas para controlar a convergência, não se verificou.

## 4.6 Comparação entre Metodologias

As metodologias paralelas para avaliação da confiabilidade composta por SMC não-sequencial propostas neste capítulo apresentam eficiências adequadas em ambientes computacionais paralelos e distribuídos. A metodologia B, no entanto, não apresenta melhor desempenho do que a metodologia A, o que era esperado devido ao menor número de mensagens trocadas para controle da convergência paralela. A principal causa está no baixo custo da comunicação no computador paralelo utilizado e no alto custo do *broadcast* inicial dos dados na rede de estações de trabalho, aliado ao excesso de estados analisados em virtude de imprecisão na estimativa do tempo de processamento para convergência.

A metodologia A, por sua vez, apresenta eficiências sempre superiores a 90% no ambiente computacional paralelo e boa característica de escalabilidade com o número de processadores. Em ambiente distribuído composto por NOW, as eficiências mantêm-se acima de 92% para os casos de grande porte e 66% para os casos de médio porte, sofrendo maior influência do número de estações de trabalho no desempenho da metodologia. Na pequena rede de PCs, o desempenho manteve-se acima de 93% para a maioria dos casos. Porém, esta plataforma apresentou comportamento inexplicável na avaliação do sistema BR-SE com 5% de tolerância, o que a torna ainda inadequada para estas simulações distribuídas.

Os resultados obtidos indicam que a avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência em paralelo pode ser seriamente considerada pelas empresas de energia elétrica e centros de pesquisa, como forma de reduzir o tempo de processamento demandado por essas simulações. O bom desempenho apresentado pela metodologia paralela é resultante da combinação de três aspectos importantes na aplicação do processamento paralelo:

- O alto grau de paralelismo inerente ao problema
- A estratégia de paralelização baseada no paralelismo de granularidade grossa
- A metodologia assíncrona desenvolvida que permite o balanceamento de carga de forma eficiente

Os bons resultados obtidos na rede de estações de trabalho é de grande interesse do ponto de vista econômico, pois alia a redução significativa do tempo de simulação com a utilização de uma plataforma computacional de mais baixo custo e maior flexibilidade de utilização. Além disso, permite que se utilize as redes já disponíveis nos centros de estudos como um ambiente distribuído para avaliação da confiabilidade em paralelo.

Algumas comparações podem ser feitas entre as metodologias propostas e os resultados apresentados neste trabalho e aqueles trabalhos publicados que apresentam propostas de avaliação da confiabilidade composta em paralelo usando SMC não-sequencial. No trabalho [10] é realizada a avaliação multi-área, onde o sistema é modelado como um grafo, em contraste com a modelagem estendida do sistema em usinas, geradores, linhas de transmissão, transformadores e cargas, adotada nestas metodologias. Não existe controle da convergência e o número de amostras a serem simuladas em paralelo é pré-estabelecido. O ambiente paralelo utilizado foi uma plataforma experimental composta por processadores interligados por um barramento comum à uma memória compartilhada, em contraste com ambientes paralelos e distribuídos comerciais e de múltiplos propósitos testados neste trabalho.

Já o trabalho [13] utiliza uma máquina comercial de memória compartilhada composta por apenas 4 processadores. O trabalho trata da paralelização de uma ferramenta sequencial, que utiliza a modelagem DC do fluxo de potência e método de programação linear para análise da adequação dos estados, em contraste com a modelagem AC do fluxo de potência e o modelo de medidas corretivas não-linear empregado neste trabalho. Não existe também controle da convergência e a distribuição do número de estados a serem analisados, especificado *a priori*, é feito em parcelas iguais para todos os processadores. Os testes foram realizados sobre sistemas de médio porte, atingindo uma eficiência máxima de 85% em 4 processadores,

em contraste com a avaliação de sistemas reais de grande porte e eficiências superiores a 90% em 10 processadores conseguidas com as metodologias apresentadas neste capítulo.

# Capítulo 5

## Confiabilidade Composta em Paralelo por SMC Sequencial

### 5.1 Introdução

A avaliação da confiabilidade por SMC sequencial simula uma realização do processo estocástico de operação do sistema. As transições entre estados sucessivos do sistema são consideradas, o que permite a determinação da duração das interrupções do fornecimento de energia e da distribuição de probabilidade dos índices relacionados à duração, o que não é possível usando a SMC não-sequencial. O cálculo de valores específicos da duração das interrupções, bem como outros aspectos relacionados à cronologia da operação, são fundamentais em estudos do custo da confiabilidade. Esses estudos tem recebido especial atenção no modelo competitivo do setor elétrico, haja visto auxiliarem na determinação do preço da energia suprida pelas concessionárias de energia e fornecedores independentes.

No entanto, a maior limitação do emprego da SMC sequencial em computadores convencionais é o elevado tempo de simulação demandado na avaliação da confiabilidade de modelos de sistema de grande porte. Dependendo da dimensão, complexidade do sistema e precisão desejada, essa simulação pode demandar dezenas de horas de processamento em estações de trabalho modernas. Atualmente, tem-se discutido a necessidade da avaliação da confiabilidade e de seu custo para o dia seguinte, o que pode ser impossível de ser determinado para sistemas de grande porte



usando as metodologias disponíveis em plataformas convencionais. A aplicação do processamento paralelo visa tornar viável a realização desses estudos, dentro de um tempo de solução compatível com os requisitos do novo ambiente competitivo do setor elétrico.

Neste capítulo são apresentadas duas metodologias desenvolvidas para a avaliação da confiabilidade composta usando SMC sequencial em ambientes computacionais paralelos e distribuídos. As metodologias foram desenvolvidas usando como elemento de referência uma adaptação do programa sequencial NH2 [19, 35], para representar os aspectos cronológicos de operação do sistema.

O processo de transição de estados do sistema, também chamado de série sintética anual, é obtido pela amostragem da duração dos estados dos componentes do sistema, conforme descrito na seção 2.2.2.1. Os índices calculados são todos aqueles calculados na abordagem por SMC não-sequencial, acrescido da LOLC e da distribuição dos índices ao longo dos meses do ano. São calculados os índices anuais para cada ano simulado e ao final, os índices de confiabilidade do processo. Como o período base adotado para cálculo dos índices é o período anual, a série sintética anual é algumas vezes referenciada diretamente por “ano” neste capítulo. A análise da adequação dos estados do sistema utiliza o fluxo de potência linearizado (formulação DC) e um modelo de otimização baseado em programação linear no esquema de medidas corretivas [43].

## 5.2 Metodologias Paralelas

Duas metodologias para avaliação em paralelo da confiabilidade composta usando SMC sequencial foram desenvolvidas. Ambas as metodologias são assíncronas e de granularidade grossa. Na metodologia I, chamada de Anos em Paralelo, cada série sintética anual é completamente analisada em um mesmo processador e as várias séries sintéticas necessárias à convergência são analisadas em paralelo em processadores diferentes. Isso implica em que o grão de processamento é a simulação de um ano completo. Na metodologia II, chamada de Paralelização do Ano, a análise de cada série sintética é paralelizada, com partes de uma mesma série sendo analisadas em processadores diferentes, e os resultados parciais são agrupados ao

final da análise de cada ano. Isso implica em um menor grão de processamento em relação à metodologia I.

Em ambas as metodologias, a configuração mestre-escravo é adotada, onde o processo mestre é responsável pela inicialização do problema, aquisição dos dados de entrada, controle do fluxo de mensagens e da convergência da simulação paralela e pela geração dos relatórios finais. Tanto os processos escravos como o mestre são responsáveis por analisar a adequação dos estados alocados a eles, que podem perfazer uma série sintética completa ou apenas parte dela, dependendo da metodologia. Cada processo é alocado a um processador diferente, sendo referenciado indistintamente por processador neste capítulo.

### 5.2.1 Metodologia I - Anos em Paralelo

A primeira abordagem para paralelizar a avaliação da confiabilidade usando SMC sequencial é analisar os vários anos necessários à convergência do processo em paralelo. Os estados de operação do sistema dentro de uma série sintética são gerados pela aplicação sequencial dos modelos estocásticos de falha dos componentes e do modelo cronológico da carga. No entanto, as séries sintéticas entre si não são sequencialmente geradas, ou seja, o primeiro estado do sistema em uma série sintética é independente do último estado do sistema da série anterior. Os índices de confiabilidade do processo são calculados como a média dos índices anuais calculados para as  $N$  séries sintéticas simuladas, de acordo com a equação (2.29).

Sendo assim, uma estratégia de paralelização imediata é atribuir-se a análise da adequação de todos os estados de cada série sintética a diferentes processadores e controlar a atualização dos índices do processo e a convergência paralela.

Na metodologia I, após a aquisição dos dados e inicialização do problema, o processador mestre faz um *broadcast* desses dados para todos os escravos. Cada processador, mestre ou escravo, analisa a adequação de todos os estados dentro do ano atribuído a ele. Ao final da análise de cada ano, os escravos enviam para o mestre os índices relativos ao ano analisado e passam imediatamente a analisar o próximo ano alocado a eles. O mestre, por sua vez, ao receber os índices anuais enviados pelos escravos, acumula os índices do processo e verifica a convergência, levando em

consideração o total de anos analisados em paralelo. Se esta não for atingida, o mestre retorna à tarefa de análise da adequação dos estados até que chegue uma nova mensagem. Quando a convergência é atingida, o mestre envia uma mensagem a todos os processadores determinando o término do processo de simulação, em função do que os escravos enviam de volta os últimos resultados calculados por eles. O mestre, então, calcula os índices de confiabilidade do processo, gera relatórios e termina o processamento.

A estratégia de alocação das análises das séries sintéticas aos processadores foi baseada na estratégia de distribuição de estados adotada nas metodologias que utilizam SMC não-sequencial, apresentada na seção 4.3. Como essas séries são obtidas pela utilização de um algoritmo de geração de números pseudo-aleatórios, o objetivo principal da estratégia é evitar correlações entre sequências de números pseudo-aleatórios geradas em processadores diferentes. Isso poderia ocorrer caso fossem fornecidas sementes diferentes para cada processador. Mais do isso, o objetivo é também imitar o comportamento do código sequencial, através da geração em paralelo da mesma sequência de números pseudo-aleatórios gerada sequencialmente. Dessa forma, o processo de depuração do código paralelo e comparação dos resultados se torna possível e os resultados paralelos ficam menos dependentes do número de processadores envolvidos na computação.

Como a percentagem de tempo gasto na amostragem das séries sintéticas em relação ao tempo total da simulação não é significativa, optamos, pela mesma razão descrita para as metodologias A e B, por não paralelizar o algoritmo de geração de números pseudo-aleatórios. Na estratégia de alocação adotada, todos os processadores recebem a mesma semente e geram exatamente a mesma sequência de números pseudo-aleatórios gerada no processamento sequencial. Isso implica nas mesmas séries sintéticas geradas em todos os processadores. Cada processador, no entanto, inicia a análise pelo ano de número igual ao seu *rank* na computação paralela e salta para analisar outros anos usando como passo de deslocamento o número de processadores envolvidos na computação.

O desperdício de tempo na amostragem de séries que não são analisadas pelo próprio processador é muito maior do que o desperdício que ocorre nas metodologias A e B, na amostragem de estados que não são analisados pelos processadores. No

entanto, a avaliação da confiabilidade por SMC sequencial também demanda muito mais tempo do que por SMC não-sequencial, haja visto que muito mais estados são amostrados e analisados. Assim, a percentagem do tempo desperdiçado em relação ao tempo total da simulação ainda se mantém muito baixa, conforme será verificado nos resultados apresentados adiante. A estratégia de alocação das séries sintéticas aos processadores está ilustrada na figura 5.1, supondo a execução em 4 processadores.

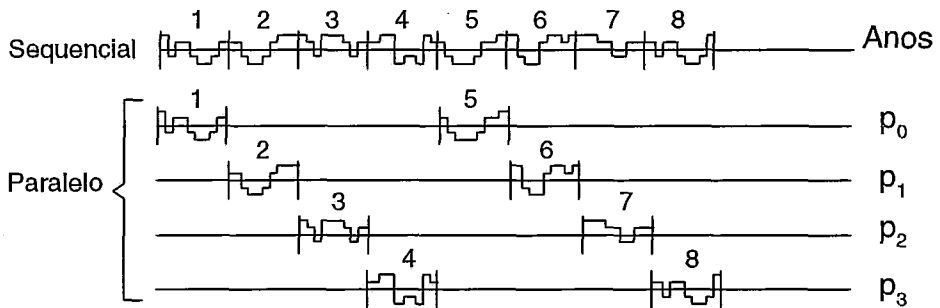


FIGURA 5.1: Alocação das Séries Sintéticas aos Processadores

A metodologia paralela I é assíncrona. Não há sincronização entre os processadores durante o processo de simulação e nenhum processador precisa esperar por outro para completar ou continuar sua tarefa. Esta metodologia é semelhante à metodologia A, sendo a principal diferença o tamanho do grão de processamento, correspondente à análise de todos os estados dentro de um ano, o que pode ser muitas vezes maior do que o grão daquela metodologia. O grafo de alocação de tarefas está mostrado na figura 5.2, onde as principais tarefas são as mesmas descritas na seção 4.4.1, a menos que A - Análise da adequação de todos os estados dentro do ano e um super-índice  $k$  associado a uma tarefa significa que ela é relativa ao ano  $k$ .

O grafo de precedência para a metodologia descrita está mostrado na figura 5.3, onde apenas 1 escravo está representado.

A análise da adequação de todos os estados dentro de um ano pode ser bastante demorada para sistemas de grande porte. Como pode ser visto no grafo de precedência da figura 5.3, um tempo ocioso considerável pode ocorrer se a troca de mensagens somente acontecer ao final da análise de um ano completo. Se os escravos esperarem o fim da análise dos anos para receber mensagens do mestre, ao final da

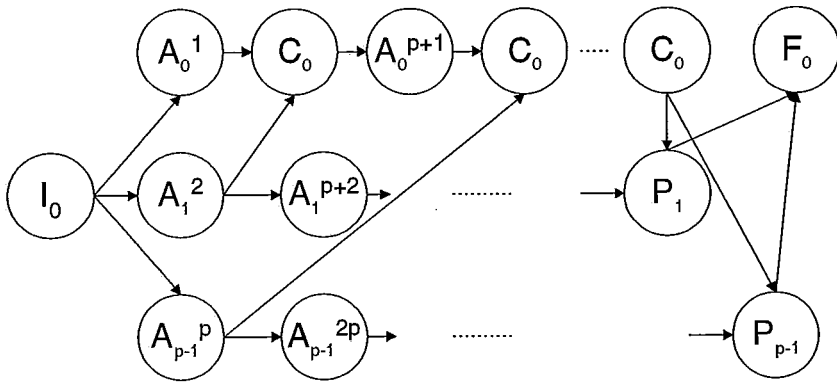


FIGURA 5.2: Metodologia I - Grafo de Alocação de Tarefas (Inicial)

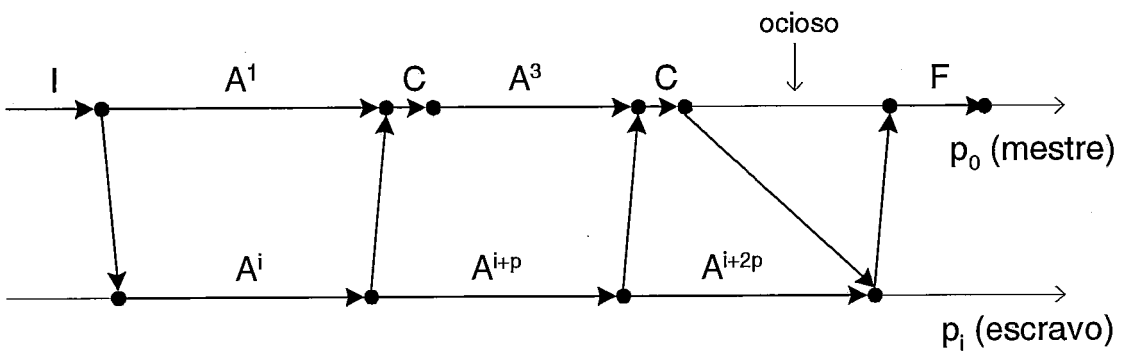


FIGURA 5.3: Metodologia I - Grafo de Precedência (Inicial)

simulação o mestre poderá ficar ocioso pelo período correspondente a análise de um ou mais anos até receber de volta os últimos resultados calculados pelos escravos. Se o mestre, por sua vez, também só receber mensagens dos escravos no final da análise dos anos, pode ocorrer o adiamento da recepção dos resultados que seriam suficientes para convergir o processo para depois do término da análise do ano corrente, que a rigor não seria necessário à convergência. A fim de reduzir o custo de lidar com um grão de processamento tão grande, algumas melhorias foram introduzidas na metodologia. Quando os escravos recebem a mensagem para terminar o processo de simulação, eles não aguardam o término da análise do ano corrente para enviar os resultados para o mestre. Eles desconsideram os resultados parciais relativos a este ano e enviam imediatamente os resultados acumulados até o ano analisado anteriormente. De forma análoga, quando o mestre recebe uma mensagem de algum escravo, ele também não espera o término da análise do ano corrente para verificar a convergência. Ele verifica a convergência assim que a mensagem chega e se o processo tiver convergido, os resultados relativos ao ano em análise são desprezados. Essas duas estratégias podem implicar em uma significativa economia de tempo de processamento, especialmente para os sistemas de grande porte onde as análises de todos os estados do sistema que compõem o ano são muito complexas e demoradas.

O grafo de alocação de tarefas mais detalhado, explicitando essas melhorias introduzidas, está mostrado na figura 5.4, onde E - Análise da adequação dos estados e um super-índice  $k,j$  associado a uma tarefa significa que ela é relativa ao estado  $j$  dentro do ano  $k$ .

O grafo de precedência passa, então, a ser o mostrado na figura 5.5, onde observa-se que o tempo ocioso foi eliminado.

## Pseudo-Código da Metodologia I

```
k = 1
prox = my_rank
```

- (1) Se ( $k = \text{prox}$ ) então  
     Para  $j=1, \text{num\_estados\_amostrados}$   
         Analisa a adequação do estado  $j$

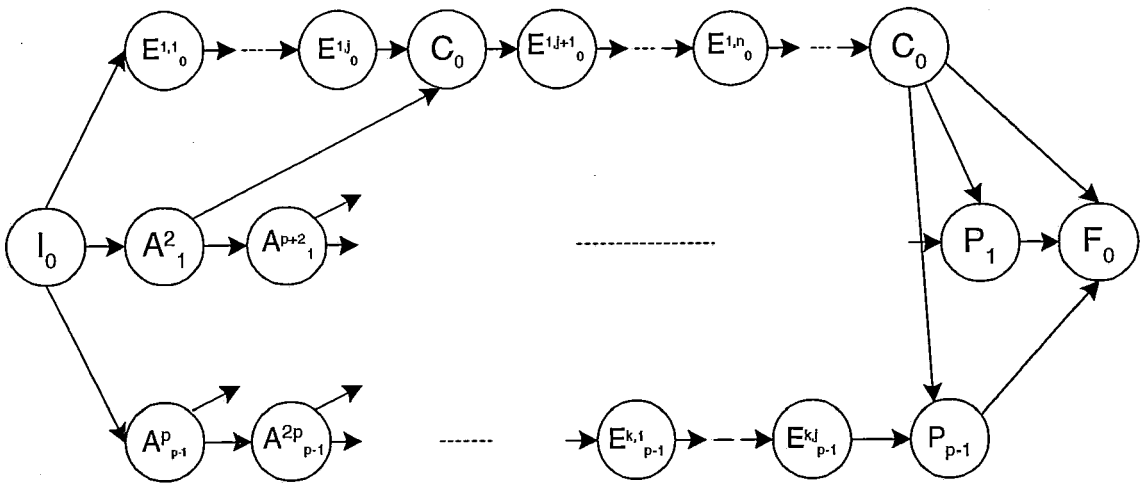


FIGURA 5.4: Metodologia I - Grafo de Alocação de Tarefas (Detalhado)

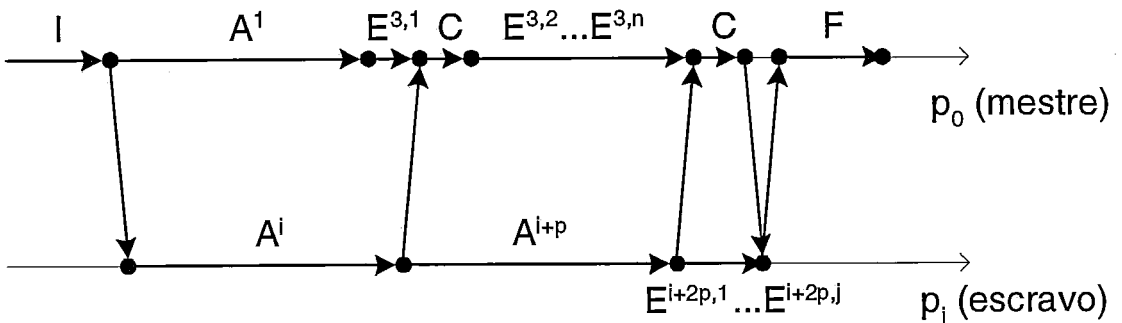


FIGURA 5.5: Metodologia I - Grafo de Precedência (Detalhado)

```

    Acumula os valores calculados
Fim-Para
    Calcula os índices relativos ao ano prox
    prox = prox + num_procs
Fim-Se
k = k + 1

Se (escravo) então

    Envia para mestre valores calculados
    Testa se chegou mensagem de término
    Se (chegou) então
        Envia para mestre valores calculados atualizados
    Senão
        Volte ao passo (1)
    Fim-Se

Senão    {Mestre}

    Testa se chegou valores calculados por escravo
    Se (chegou) então
        Acumula os valores do processo
        Verifica convergência do processo
        Se (convergiu) ou (número máximo de anos atingido) então
            Envia mensagem de término para todos os escravos
            Recebe dos escravos valores calculados atualizados
            Calcula os índices do processo
            Imprime relatórios
        Senão
            Volte ao passo (1)
        Fim-Se
    Senão
        Volte ao passo (1)
    Fim-Se

Fim-Se

```



## 5.2.2 Metodologia II - Paralelização do Ano

Uma outra abordagem para paralelizar a avaliação da confiabilidade usando SMC sequencial é analisar a adequação dos estados que compõem cada ano em paralelo. Para isso, cada série sintética anual precisa ser dividida em sub-séries para serem analisadas em processadores diferentes. Como, a princípio, os estados amostrados precisam ser sequencialmente analisados durante o período de simulação, esta metodologia requer uma análise mais cuidadosa do problema e o estabelecimento de uma solução mais complexa.

Algumas ponderações a respeito da representação cronológica da evolução de estados do sistema precisam ser feitas a fim de estabelecer a viabilidade desta metodologia. SMC sequencial é uma forma de implementação da representação cronológica que se baseia na análise de séries sintéticas de estados. As séries sintéticas são geradas pela aplicação sequencial dos modelos estocásticos de falha dos componentes do sistema e do modelo cronológico da carga. Cada novo estado do sistema amostrado depende do estado anterior, conforme foi descrito no capítulo 2. Conseqüentemente, a geração da série sintética anual, que estabelece as transições de estados dos componentes e o nível da carga dos estados do sistema, bem como suas durações, é um processo extritamente sequencial. No entanto, o grande consumo de tempo computacional não está na geração dessas séries, mas sim na análise da adequação dos estados componentes das séries. E essas análises não precisam ser realizadas sequencialmente para todo o período da simulação. Partindo-se de uma série previamente amostrada, a análise da adequação dos estados de sub-séries dessa série pode ser atribuída a diferentes processadores. Essas sub-séries podem ser geradas, por exemplo, pela divisão da série original pelo número de processadores disponíveis. Dentro de cada uma das sub-séries, os estados são sequencialmente analisados e cuidados especiais precisam ser tomados na combinação final dos resultados parciais, para o cálculo dos índices anuais. Além disso, é preciso que cada processador simule a evolução da configuração do sistema em decorrência da transição de estados dos componentes e da carga, ocorridas nas sub-séries anteriores àquela que está analisando. Essa evolução não implica em analisar a adequação desses estados anteriores, mas apenas as configurações dos estados em virtude de alterações topológicas, de

nível de geração e carga. Esse processo demanda um esforço computacional pequeno comparado com a análise de adequação dos estados.

Na metodologia II, todos os processadores geram a mesma série sintética anual através da recepção da mesma semente e sorteio da mesma sequência de números pseudo-aleatórios. O número de estados do sistema amostrados dentro da série sintética é igualmente dividido pelo número de processadores disponíveis, dando origem às sub-séries. Caso a divisão não seja exata, a última sub-série acumula o resto. A análise da adequação dos estados das sub-séries são inicialmente alocados aos processadores de acordo com o seu *rank* na computação paralela. A figura 5.6 ilustra o exemplo de uma série sintética composta por 102 estados sendo distribuída por 4 processadores.

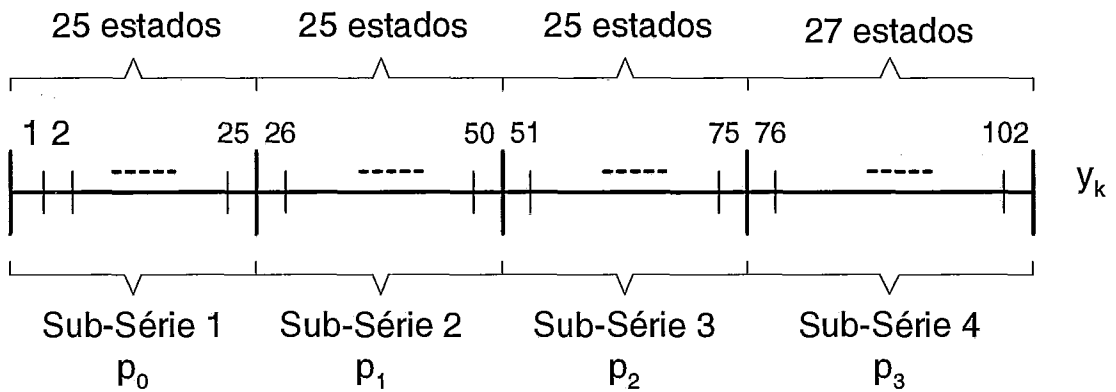


FIGURA 5.6: Exemplo de Alocação Inicial das Sub-Séries

Após a aquisição dos dados e inicialização do problema, o mestre faz um *broadcast* desses dados para todos os escravos. Todos os processadores geram, então, a mesma série sintética anual, configuram a evolução dos estados do sistema até o primeiro estado da sub-série alocada a eles e passam a analisar os estados desta sub-série. Após o término da análise de uma sub-série, os escravos enviam para o mestre os resultados parciais calculados e passam a analisar outra sub-série no ano seguinte. Essas tarefas são continuamente repetidas pelos escravos. O mestre, por sua vez, é responsável por combinar os resultados recebidos das várias sub-séries, sequencialmente no tempo, e montar um ano completo. Como o processo é assíncrono, o mestre precisa manter o controle de a qual série anual as sub-séries recebidas pertencem, a

fim de acumular os resultados no ano correto. Em caso de ambiente paralelo heterogêneo, pode ocorrer de processadores se atrasarem na análise da sub-série relativa a um determinado ano enquanto os outros já analisaram sub-séries em anos bem à frente. Como o cálculo dos índices anuais requer que todas as sub-séries relativas a cada ano tenham sido analisadas, uma estrutura de fila precisa ser prevista no processo mestre para guardar os resultados de sub-séries relativas a anos ainda não completados. A cada vez que o mestre detecta que um ano completo foi analisado, ele calcula os índices de confiabilidade daquele ano, acumula os valores do processo e verifica a convergência. Se esta não foi atingida, o mestre passa a analisar outra sub-série no ano seguinte ao último analisado. Essas tarefas são também continuamente repetidas pelo mestre até que a convergência seja verificada. Quando isso ocorre, o mestre envia mensagem para todos os escravos terminarem o processo de simulação, calcula os índices de confiabilidade do processo, gera relatórios e termina o processamento.

Conforme dito anteriormente, a análise da adequação dos estados de uma sub-série só pode ser realizada se a evolução da configuração do sistema até o primeiro estado da sub-série tiver sido realizada. Como essa evolução é um processo sequencial, se as alocações das sub-séries aos processadores fossem sempre feitas pelos seus *ranks*, implicaria em que os processadores de *ranks* superiores estariam sempre mais atrasados do que os de *ranks* inferiores no processo de evolução. Por exemplo, o processador 1 precisaria configurar todos os estados contidos na primeira sub-série. Já o processador 2 configuraria os estados da primeira e segunda sub-séries, o processador 3 os da primeira, segunda e terceira sub-séries e assim sucessivamente.

Com o objetivo de balancear este processo de evolução entre os processadores, uma estratégia de alocação cíclica de sub-séries aos processadores foi desenvolvida. A partir do segundo ano simulado, cada escravo analisa a sub-série seguinte à analisada no ano anterior até atingir a última sub-série do ano, quando retorna para analisar a segunda sub-série. A primeira sub-série dos anos é sempre analisada pelo processador mestre, que não participa do rodízio. Essa estratégia pode ser ilustrada pela figura 5.7, onde é considerado que 4 processadores estão alocados. A figura 5.8 mostra o ganho de tempo computacional no processo de evolução das configurações dos estados obtido com a estratégia cíclica. Nesta figura, a percentagem do tempo de

evolução da configuração está exagerada apenas para clareza de representação. Na realidade, o ganho poderá não ser tão acentuado quanto o mostrado.

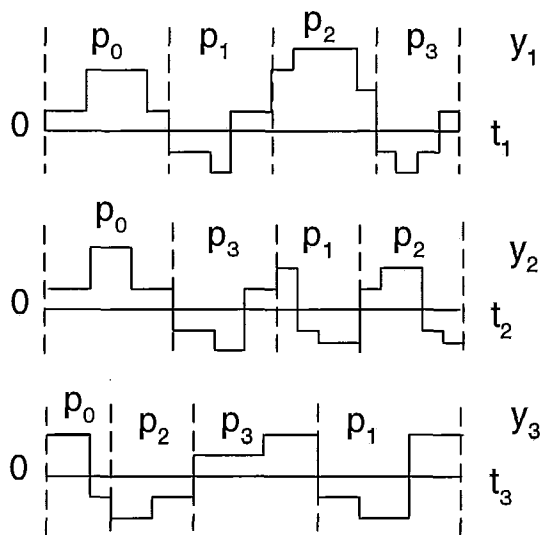


FIGURA 5.7: Estratégia de Alocação Cíclica de Sub-Séries

O grafo de alocação de tarefas da metodologia II está mostrado na figura 5.9, onde as principais tarefas são as mesmas descritas para a metodologia I, exceto que um super-índice  $k, l$  associado à uma tarefa significa que ela é relativa à  $l$ -ésima sub-série dentro do ano  $k$ . Um tarefa adicional é definida como **R** - Recepção e controle de resultados da análise de sub-séries.

Conforme pode ser verificado, a metodologia II também é assíncrona. Os processadores não precisam aguardar que os outros terminem as análises das suas sub-séries para partir para a análise de outra sub-série no ano seguinte. O mestre, por sua vez, pode receber resultados de sub-séries pertencentes a anos mais adiantados do que aquele que está analisando, mas somente pode calcular índices anuais e verificar a convergência quando todas as sub-séries relativas a cada ano tiverem sido analisadas. O balanceamento de carga é determinado pela complexidade de análise da adequação dos estados nas diferentes sub-séries e pela capacidade de processamento dos processadores. Devido ao assincronismo do algoritmo, pode ocorrer de sub-séries, pertencentes a anos posteriores ao ano para o qual a simulação converge, tenham sido analisadas. Os resultados dessas sub-séries são desprezados no cálculo dos índices de confiabilidade do processo, sem qualquer custo para a computação

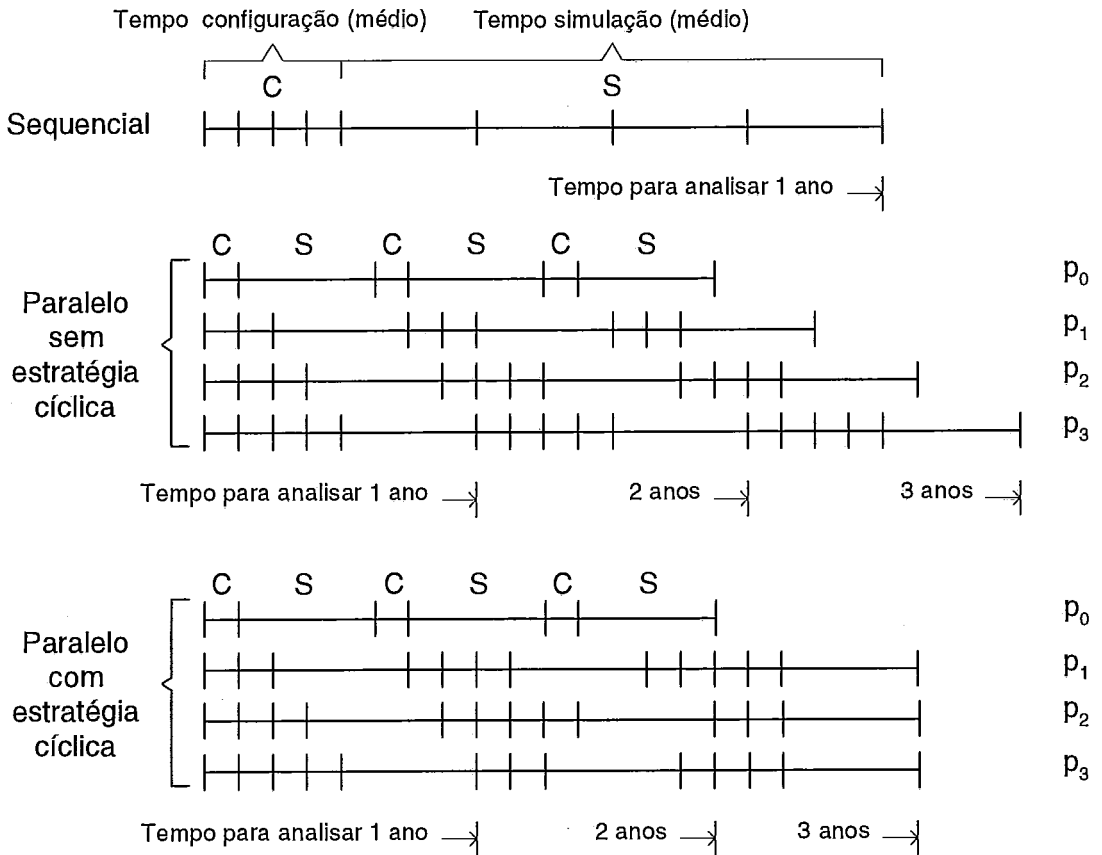


FIGURA 5.8: Exemplo Fictício do Ganho de Tempo da Estratégia Cíclica

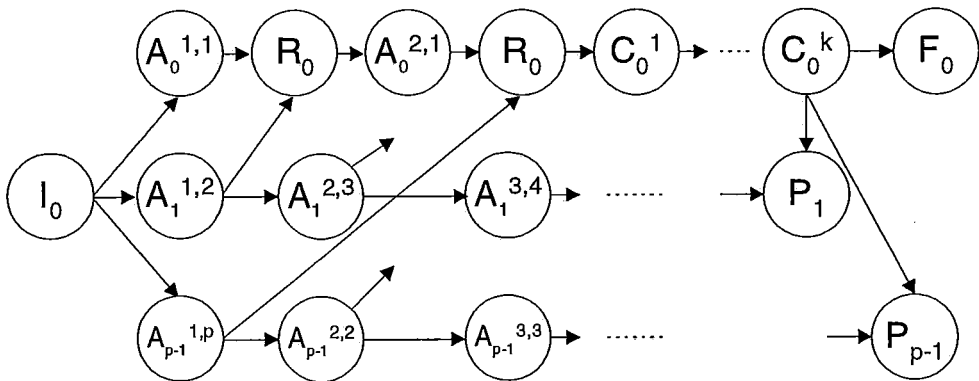


FIGURA 5.9: Metodologia II - Grafo de Alocação de Tarefas

paralela. O grafo de precedência para esta metodologia está mostrado na figura 5.10. Neste gráfico, a análise dos estados pertencentes às sub-séries aparece representada pela tarefa  $E$ , para a qual o super-índice  $k,l,j$  significa a análise do estado  $j$  da sub-série  $l$  dentro do ano  $k$ .

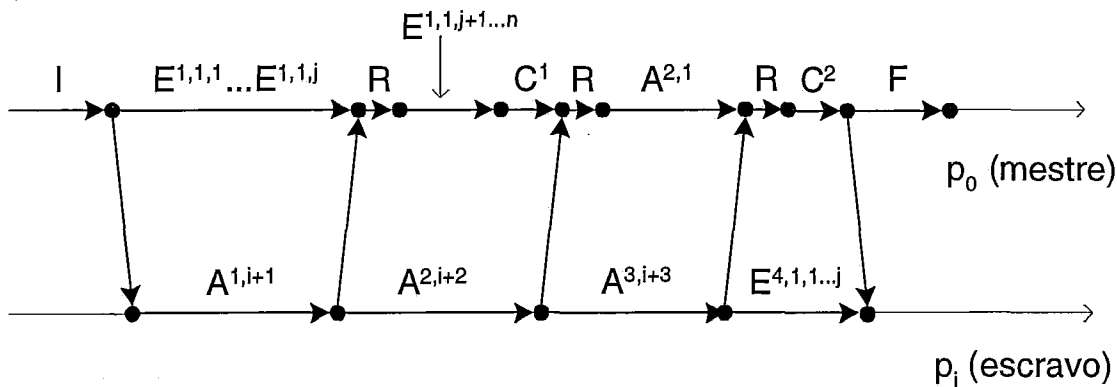


FIGURA 5.10: Metodologia II - Grafo de Precedência

Na avaliação da confiabilidade usando SMC sequencial está-se interessado na transição de estados do sistema e na duração desses estados. Para a atualização das estimativas dos índices de confiabilidade, procedimentos distintos são tomados dependendo do tipo de transição que ocorre entre dois estados consecutivos. Por exemplo, uma transição  $up \rightarrow down$  indica uma falha no sistema e o possível início de uma subsequência de falha. Conforme explicado na seção 2.2.2, uma subsequência de falha é uma sequência de estados de falha do sistema que corresponde à uma interrupção do fornecimento de energia. Por esta razão, numa transição  $up \rightarrow down$ , as variáveis que acumulam valores relacionados à energia não suprida e duração dos estados de falha, por exemplo, precisam ser inicializadas com os valores calculados para este estado de falha. Uma transição  $down \rightarrow down$  significa que o sistema se encontra dentro de uma subsequência de falha. Neste caso, os resultados relativos à energia não suprida e duração deste estado precisam ser somados aos já acumulados para esta subsequência de falha. Já uma transição  $down \rightarrow up$  significa que o sistema está saindo de uma subsequência de falha, ou seja, está se recuperando de um período de interrupção do fornecimento de energia. Neste caso, os valores acumulados para a subsequência de falha precisam ser totalizados e também precisa ser controlada a

distribuição da duração da falha, do custo da interrupção de energia e do valor de energia não suprida, ao longo dos meses do ano. Ou seja, após a análise da adequação de um estado amostrado na série sintética e conseqüentemente, a identificação se o estado é de falha ou sucesso, o procedimento a ser tomado depende se o estado anterior era de falha ou sucesso.

No processamento em paralelo, após a análise do primeiro estado de uma sub-série alocada a um processador, este não tem conhecimento, a princípio, se o estado anterior é de falha ou sucesso, porque este estado anterior foi analisado em outro processador. A fim de identificar o tipo de transição ocorrida entre sub-séries analisadas em processadores diferentes, na metodologia II o último estado de cada sub-série, exceto a última, é analisado em dois processadores: o processador ao qual a sub-série foi alocada e o processador ao qual a sub-série seguinte foi alocada. Ou seja, antes de analisar o primeiro estado da sub-série alocada ao processador, o último estado da sub-série anterior é analisado e identificado como sendo de falha ou sucesso. Dessa forma é possível identificar o tipo de transição que leva ao primeiro estado da sub-série e, conseqüentemente, tomar a medida correta na atualização dos índices de confiabilidade. Vale a pena salientar que apesar do último estado da sub-série ser analisado em dois processadores, os resultados de energia e duração deste estado só são considerados pelo processador ao qual a sub-série está alocada. Esse procedimento está ilustrado na figura 5.11 para 4 processadores.

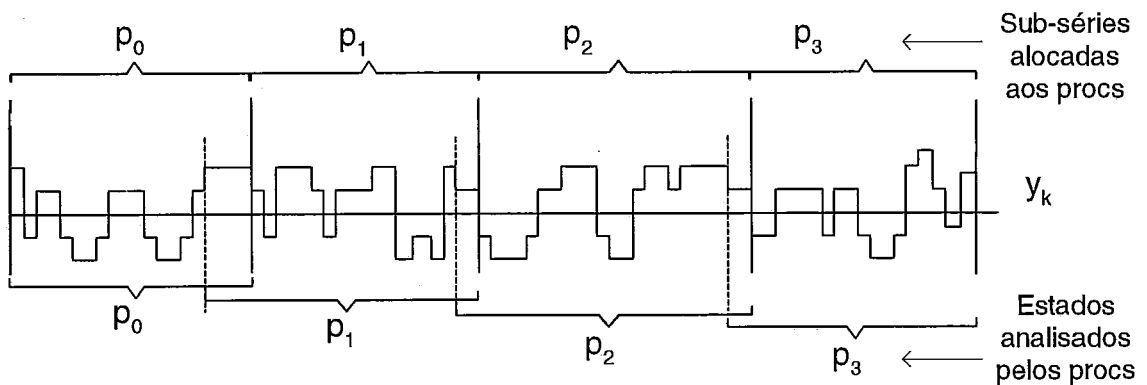


FIGURA 5.11: Estratégia de Identificação da Transição entre Sub-Séries Consecutivas

Um problema muito importante que precisa ser resolvido na divisão de uma série

sintética em sub-séries para serem analisadas em processadores diferentes é se esta divisão coincidir com uma subsequência de falha. Se esta coincidência ocorrer e não for devidamente tratada, os índices relacionados à duração e custo e as distribuições dos índices ao longo dos meses do ano serão erroneamente calculados. Conforme descrito anteriormente, esses valores são totalizados e controlados ao final da análise de uma subsequência de falha e se essa subsequência não for totalmente analisada no mesmo processador, os valores calculados estarão errados.

A solução adotada para esta questão na metodologia II é forçar a análise completa da subsequência de falha no mesmo processador no qual o primeiro estado de falha da subsequência ocorrer. Se o último estado de uma sub-série alocada a um processador for um estado de falha, o que significa que o sistema se encontra em uma subsequência de falha, este processador continua analisando os próximos estados até que um estado de sucesso seja atingido. Isso garante que toda a subsequência de falha seja analisada e totalizada no mesmo processador. De forma similar, se o estado anterior ao primeiro da sub-série alocada a um processador for um estado de falha, o que significa que a sub-série anterior termina dentro de uma subsequência de falha, este processador desconsidera os resultados de todos os estados até que um estado de sucesso seja atingido. A partir deste estado, o processador passa a acumular os valores calculados na análise dos próximos estados, pois a lógica garante que os resultados dos estados desconsiderados foram acumulados por outro processador. Esta estratégia possibilita a avaliação correta dos índices de confiabilidade e suas distribuições com um pequeno custo computacional devido a duplicação da análise de alguns estados. No entanto, dado o nível de confiabilidade de sistemas de potência, esta duplicação deve ocorrer para uma percentagem muito pequena de estados. A estratégia descrita está ilustrada na figura 5.12 para 4 processadores.



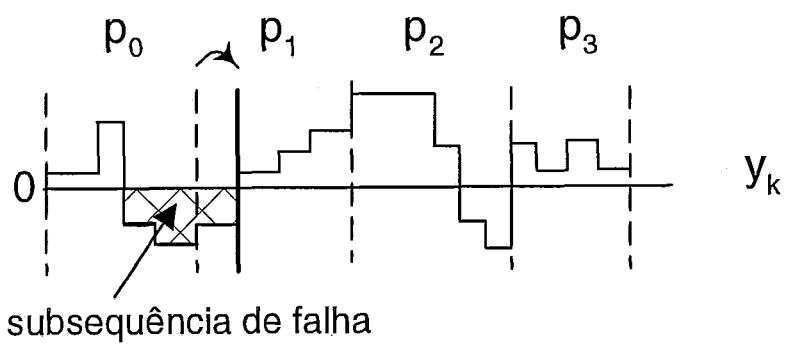


FIGURA 5.12: Estratégia de Análise de Subsequência de Falha dividida em Sub-Séries Distintas

## 5.3 Resultados

### 5.3.1 Considerações Iniciais

#### 5.3.1.1 Ambientes Computacionais

As metodologias I e II descritas na seção 5.2 foram implementadas em ambientes computacionais paralelos e distribuídos. O ambiente computacional paralelo é o computador IBM RS/6000 SP composto por 10 processadores interligados por um *switch* de alto desempenho. O ambiente distribuído é uma NOW composta por 8 estações de trabalho IBM RS/6000 43P interligadas por uma rede Ethernet. Os detalhes destas duas plataformas estão descritos na seção 4.5.1.1.

#### 5.3.1.2 Sistema de Troca de Mensagens

O sistema de troca de mensagens utilizado em ambas as plataformas computacionais é a implementação do MPI desenvolvida pela IBM para o sistema operacional AIX. Nas implementações das metodologias I e II foi utilizado o protocolo de transferência de dados estabelecido pelo modo *Standard* do MPI. Algumas mensagens foram trocadas usando diretivas de comunicação não-bloqueantes, como por exemplo aquelas enviadas pelos escravos para controle da convergência do processo de simulação. Já outras mensagens utilizaram diretivas bloqueantes, como as mensagens para obtenção dos resultados parciais calculados pelos escravos ao final da simulação na metodologia I. Ou seja, as diretivas apropriadas foram escolhidas em função da possibilidade de superposição da troca de mensagens com o processamento subsequente.

#### 5.3.1.3 Sistemas Testes

Cinco modelos de sistemas de potência foram utilizados para testar as metodologias desenvolvidas e para verificar seus desempenhos e escalabilidades. Esses modelos são basicamente os mesmos utilizados como teste para as metodologias que utilizam SMC não-sequencial, a menos de algumas alterações introduzidas em alguns casos para permitir a avaliação de custos e representação da curva de carga anual.

- RTS-SQ

Sistema baseado no IEEE-RTS, onde as cargas em cada barra são desagregadas por classe de consumidor. São definidas sete áreas de controle, cada uma associada a uma classe de consumidor diferente. Em função dessas alterações, são introduzidas novas barras onde são instaladas as cargas desagregadas e, conseqüentemente, novos circuitos de interligação. Os principais dados deste sistema estão resumidos na tabela 5.1.

Barras	79
Circuitos	93
Geradores	32
Áreas	7

TABELA 5.1: Dados do Sistema RTS-SQ

Foram adotadas sete classes de consumidores distintas, baseado em [2]. As curvas de custo de interrupção unitário para essas classes foram obtidas em pesquisa realizada pela Canadian Electrical Association (CEA) [44] e estão mostradas na figura 5.13.

Devido à estratégia de criação de novas barras, toda a carga atribuída a uma barra pertence à mesma classe de consumidor. Em relação às barras originais do sistema IEEE-RTS, a distribuição percentual das classes de consumidores por cada barra de carga é mostrada na tabela 5.2.

A curva de carga anual para este sistema não está disponível, não sendo possível a análise da influência da curva de carga no desempenho das metodologias e no cálculo dos índices de confiabilidade.

- CIGRÉ-NBPS

Esse sistema é o mesmo usado na avaliação da confiabilidade usando SMC não-sequencial. Para este sistema, não estão disponíveis os dados de custo de interrupção unitária nem a curva de carga anual. Dessa forma, os valores associados a custo não poderão ser avaliados, bem como a influência da curva de carga na eficiência da metodologia paralela e nos índices de confiabilidade calculados.

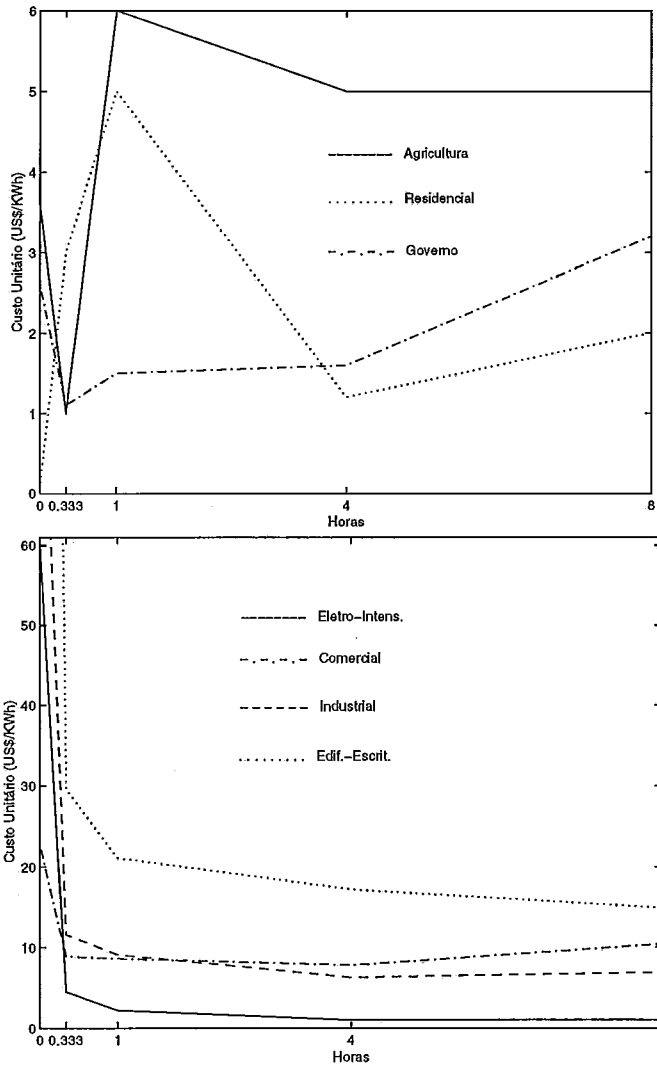


FIGURA 5.13: Custo de Interrupção Unitário adotado no sistema RTS-SQ

Barra	Agric. (%)	El.Inten. (%)	Resid. (%)	Gover. (%)	Indus. (%)	Comer. (%)	Ed.Esc. (%)
1			34	16	37	13	
2			50	35		15	
3	6		53		33	8	
4			35	46		19	
5			52		28	20	
6	8		50		29	11	2
7	18		39		32	11	
8			55	15	12	17	1
9	19	49	24			5	3
10	9	22	41		21	7	
13	6	16	30	10	23	11	4
14		44	32		21	3	
15		67	17			11	5
16		43	26	17		14	
18		56	19		12	7	6
19		61	31			8	
20		34	42	13		11	

TABELA 5.2: Composição das Cargas por Barra para o Sistema RTS-SQ (em relação às barras do sistema IEEE-RTS)

- BR-NNE

Esse sistema é o mesmo usado na avaliação da confiabilidade usando SMC não-sequencial. Para este sistema, também não estão disponíveis os dados de custo de interrupção unitária nem a curva de carga anual.

- BR-S

Esse sistema é o mesmo usado na avaliação da confiabilidade usando SMC não-sequencial, apenas acrescido dos dados de custo de interrupção de energia. Os dados de custo de interrupção unitária utilizados foram retirados de pesquisa realizada pela Eletrobrás - USP [45, 46] para três classes de consumidores distintas: residencial, comercial e industrial. Na pesquisa foram levantados os custos de interrupção das classes comercial e industrial para diferentes períodos do dia e neste trabalho foi adotado o custo relativo ao período das 8:00 às 18:00hs. O custo da classe residencial é considerado constante para todo o período. As curvas de custo de interrupção unitário para as três classes estão mostradas na figura 5.14.

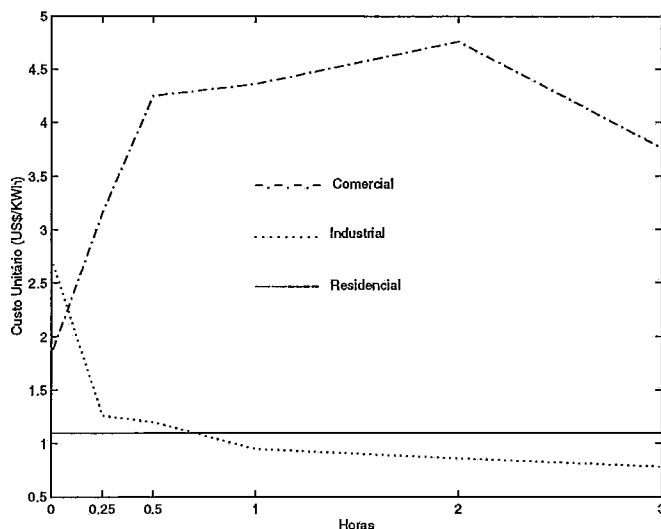


FIGURA 5.14: Custo de Interrupção Unitário adotado no sistema BR-S e BR-SE

Para cada uma das 18 áreas de controle desses sistema, foi definida uma composição específica das cargas por classe de consumidor, conforme mostrado na tabela 5.3.

A curva de carga anual para este sistema não está disponível, não sendo possível a análise da influência da curva de carga no desempenho das metodologias e no cálculo dos índices de confiabilidade.

- BR-SE

Esse sistema é o mesmo usado na avaliação da confiabilidade usando SMC não-sequencial, apenas acrescido dos dados de custo de interrupção de energia. Os dados de custo de interrupção unitário utilizados foram os mesmos do sistema BR-S, com as curvas de custo mostradas na figura 5.14. Para cada uma das 48 áreas de controle do sistema, foi definida uma composição específica das cargas por classe de consumidor, conforme mostrado na tabela 5.4.

As 48 áreas de controle do sistema podem ser agrupadas em 5 macro áreas: São Paulo, Rio, Minas, Centro e Sul. Cada uma dessas macro áreas possui uma curva de carga horária anual, conforme pode ser visto nas figuras 5.15 a 5.19.

Área	Resid. (%)	Indus. (%)	Comer. (%)
FURNAS - GERACAO/CONTROLE DE TENSÃO	10	20	70
FURNAS - SISTEMA DE TRANSMISSÃO	20	30	50
CESP - GERACAO E CONTROLE DE TENSÃO	20	40	40
CESP - SISTEMA DE TRANSMISSÃO	20	40	40
CESP - REGIAO DA SOROCABANA	5	15	80
CESP - REGIAO DO VOTUPORANGA	10	20	70
CESP - REGIAO DE PRESIDENTE PRUDENTE	20	40	40
ELETROPAULO - 345 KV	15	25	60
ELETROPAULO - 230 KV E ABAIXO	25	35	40
CEMIG - GERACAO E CONTROLE DE TENSÃO	20	40	40
REGIAO DE INTERLIGACAO SUL-SUDESTE	20	30	50
SISTEMA TRONCO DE ITAIPU	20	40	40
ELETROSUL - 230 KV NO MTSUL	26	33	41
*** ENERSUL ****	36	45	19
*** COPEL ****	24	32	44
*** ELETROSUL ****	21	24	55
*** CELESC ****	21	24	55
SISTEMA CEEE	26	33	41

TABELA 5.3: Composição das Cargas por Área para o Sistema BR-S

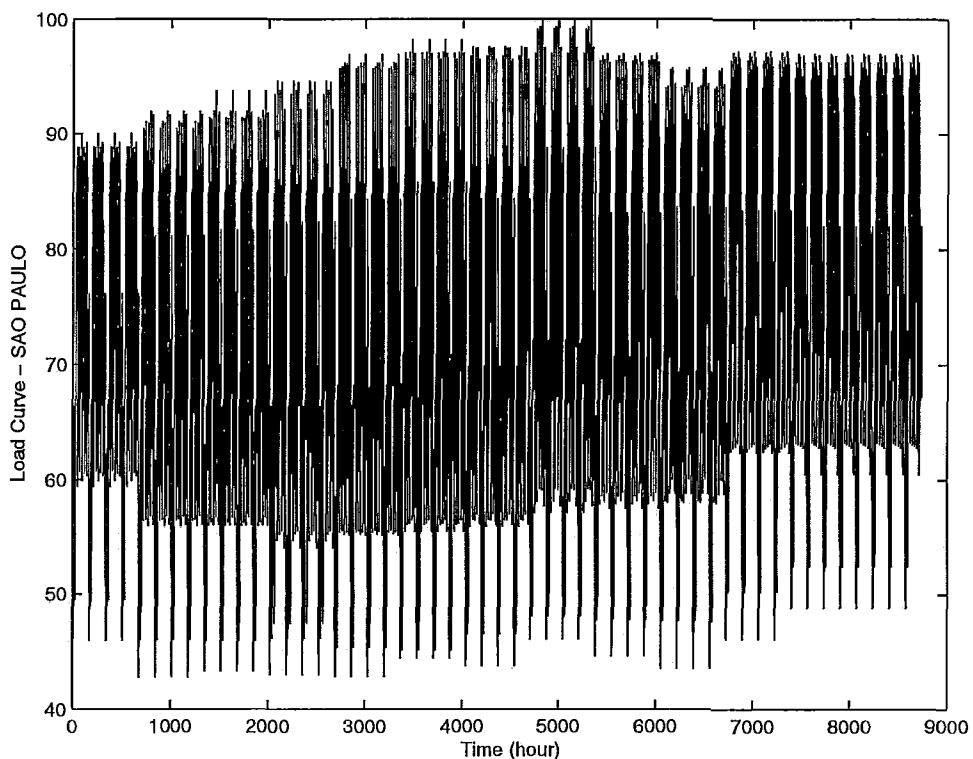


FIGURA 5.15: Curva de Carga da Macro Área São Paulo - Sistema BR-SE

Área	Resid. (%)	Indus. (%)	Comer. (%)
FURNAS - GERACAO/CONTROLE DE TENSAO	10	20	70
FURNAS - SISTEMA DE TRANSMISSAO	20	30	50
CESP - GERACAO E CONTROLE DE TENSAO	20	40	40
CESP - SISTEMA DE TRANSMISSAO	20	40	40
CESP - VALE DO RIBEIRA E LITORAL SUL	20	40	40
CESP - REGIAO DA SOROCABANA	5	15	80
CESP - REGIAO DO VOTUPORANGA	10	20	70
CESP - REGIAO DE PRESIDENTE PRUDENTE	20	40	40
CESP - REGIAO DE ARUJA/LITORAL NORTE	20	40	40
CESP - REGIAO DO PARDO	20	40	40
CPFL - REGIAO DE CAMPINAS	20	40	40
CPFL - REGIAO DE S.J.R.PRETO	20	40	40
CPFL - REGIAO DE BAURU	20	40	40
CPFL - REGIAO DE ARARAQUARA	20	40	40
CPFL - REGIAO DE RIBEIRAO PRETO	20	40	40
LIGHT - REGIAO DA BAIXADA FLUMINENSE	20	40	40
LIGHT - REGIAO METROPOLITANA	20	40	40
LIGHT - REGIAO SUBURBANA	20	40	40
LIGHT - REGIAO V. PARAIBA FLUMINENSE	20	40	40
LIGHT - REGIAO SERRANA	20	40	40
CEMIG - GERACAO E CONTROLE DE TENSAO	20	40	40
CEMIG - SISTEMA DE TRANSMISSAO	35	15	50
CEMIG - REGIAO CENTRO	10	20	70
CEMIG-REGIAO LESTE	25	25	50
CEMIG - REGIAO SUDESTE	25	35	40
CEMIG - REGIAO DO TRIANGULO MINEIRO	10	60	30
CEMIG-REGIAO OESTE	40	40	20
CEMIG - REGIAO NORTE	50	30	20
CEMIG - REGIAO SUL	35	25	40
ELETRONORTE	20	20	60
CEMAT	20	20	60
CELG	25	35	40
CELG - REGIAO GOIANIA	35	35	30
CELG - REGIAO MEIO-NORTE	40	40	20
CEB	40	40	20
C.F.L.C.L.	40	40	20
CERJ - REGIAO SUL FLUMINENSE	20	40	40
CERJ - REGIAO NORTE FLUMINENSE	20	40	40
CERJ - REGIAO NITEROI	20	40	40
ESCELSA	40	30	30
ELETROPAULO - 345 KV	15	25	60
ELETROPAULO - 230 KV	20	30	50
ELETROPAULO - 138 KV E ABAIXO	25	35	40
*** ENERSUL ****	36	45	19
*** COPEL ****	24	32	44
*** ELETROSUL ****	21	24	55
*** ELETROSUL-230KV - MTS ****	26	33	41
*** ESCELSA 11.4 KV ***	20	40	40

TABELA 5.4: Composição das Cargas por Área para o Sistema BR-SE



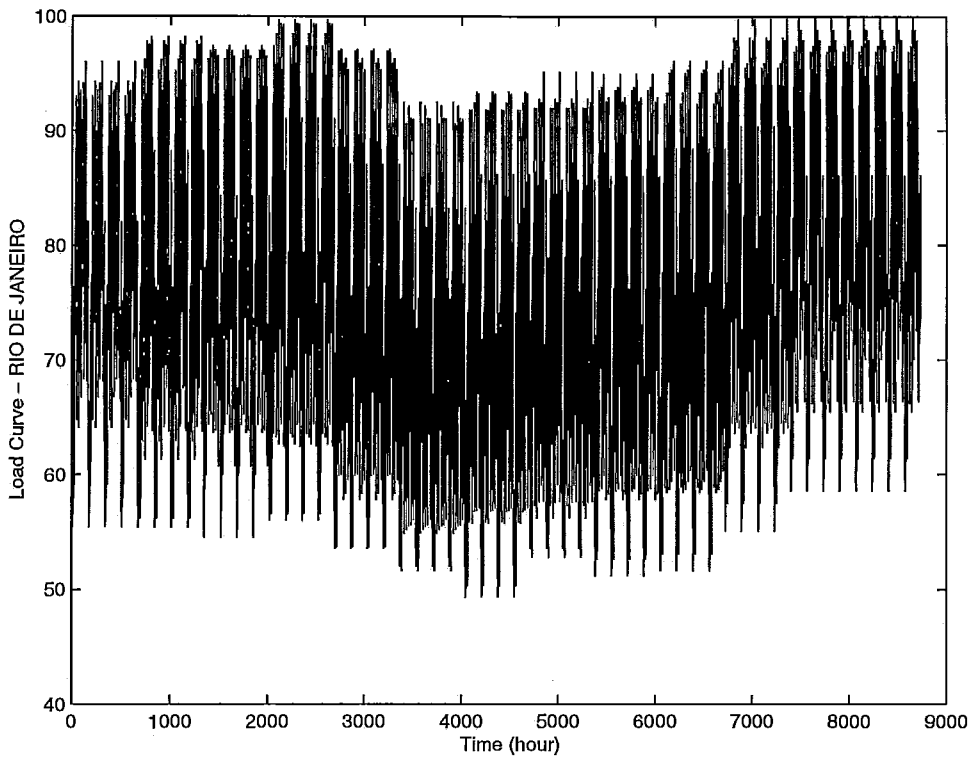


FIGURA 5.16: Curva de Carga da Macro Área Rio - Sistema BR-SE

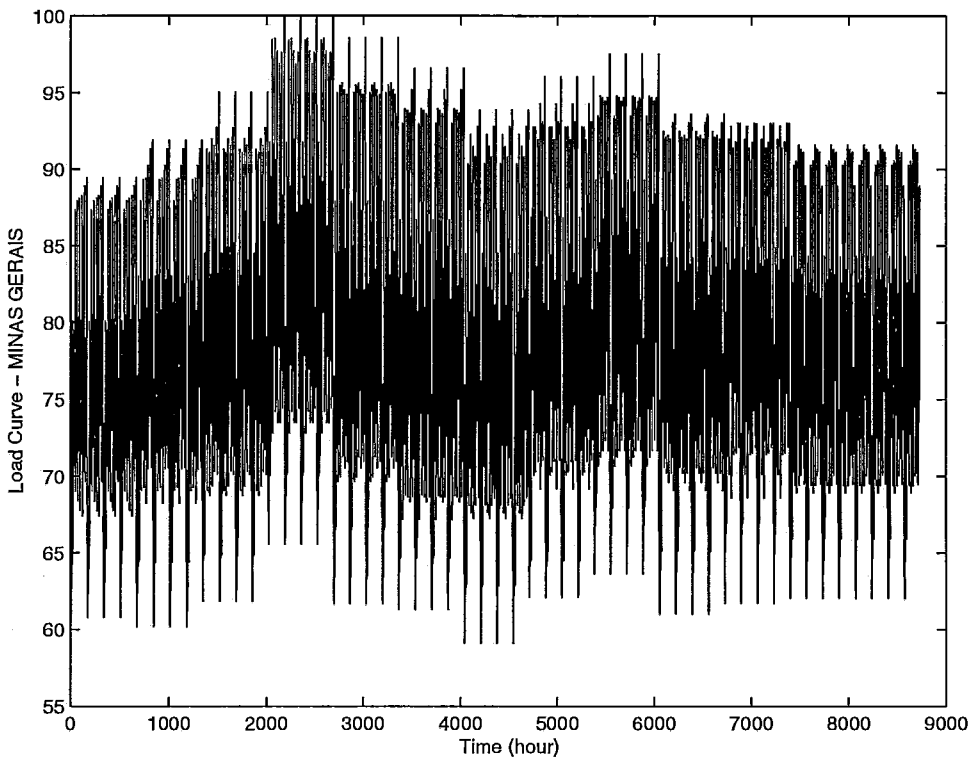


FIGURA 5.17: Curva de Carga da Macro Área Minas - Sistema BR-SE

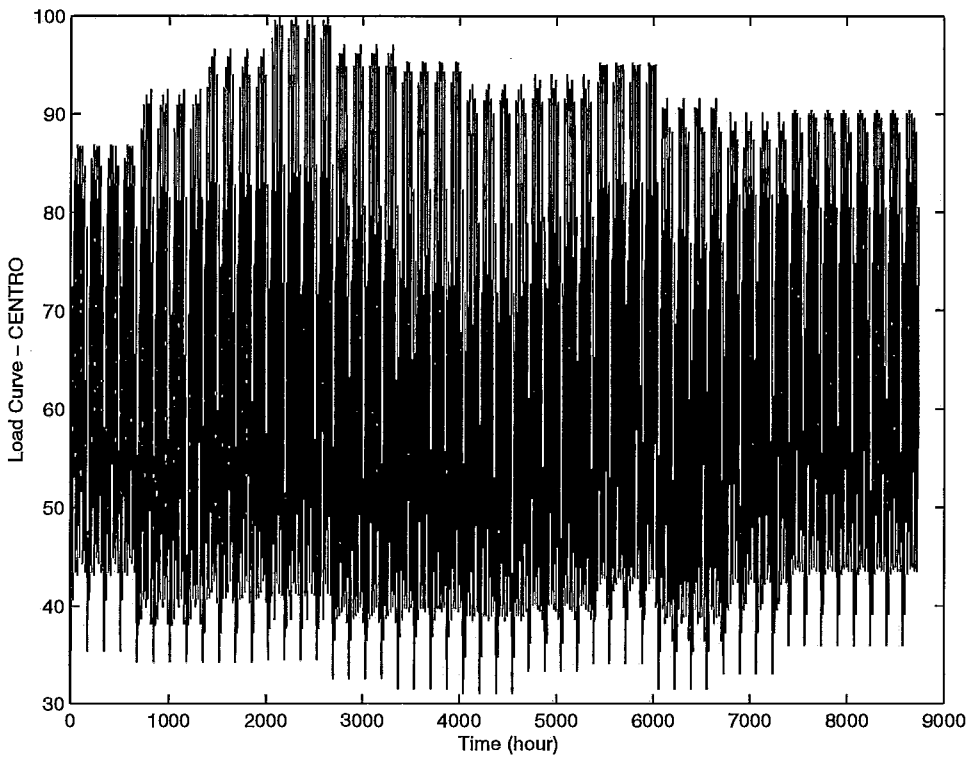


FIGURA 5.18: Curva de Carga da Macro Área Centro - Sistema BR-SE

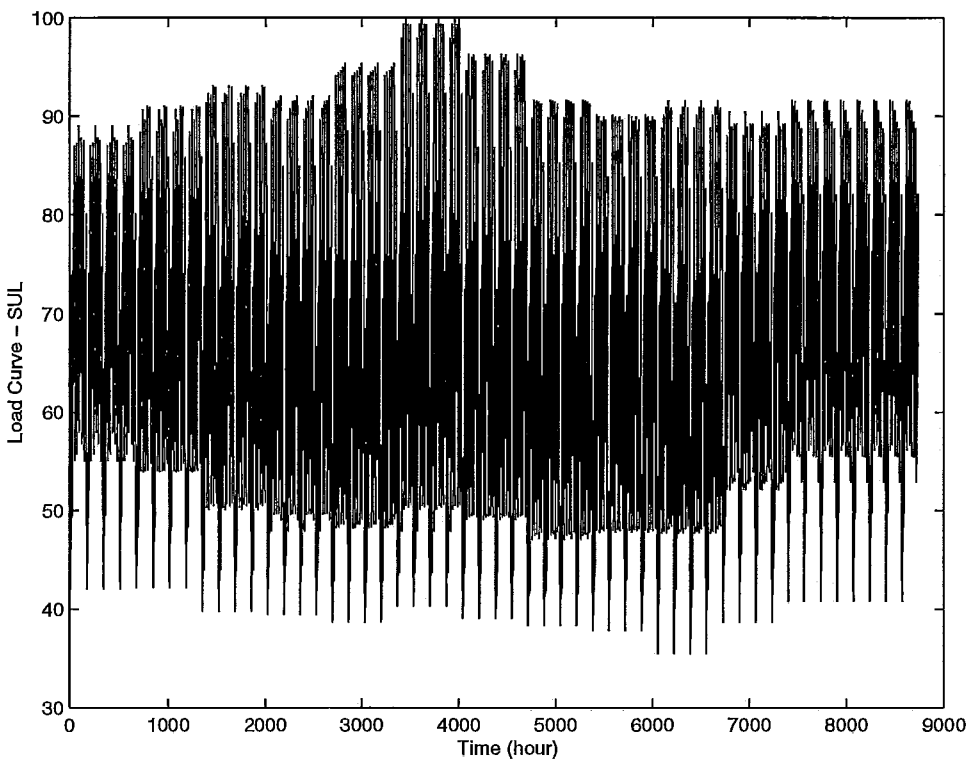


FIGURA 5.19: Curva de Carga da Macro Área Sul - Sistema BR-SE

### 5.3.1.4 Estudos Realizados

O critério de convergência adotado nos estudos realizados foi baseado no coeficiente de variação do índice EPNS. Essa escolha se deu devido ao fato de não estarem disponíveis informações de custo para todos os sistemas testes, o que inviabiliza a convergência pela LOLC que também é muito utilizado para esses estudos.

Foi adotado, a princípio, o valor de 5% como tolerância para convergência das simulações. Esse é o valor frequentemente adotado nos trabalhos publicados, como sendo um valor que fornece uma precisão aceitável a um custo computacional razoável. No entanto, com a aplicação do processamento paralelo, estudos mais precisos podem ser realizados sem que isso implique num tempo de processamento insuportável. A fim de ilustrar essa afirmativa, foram realizados testes usando como tolerância para convergência valores de 3% e 1% no coeficiente de variação do índice.

O nível de carga foi considerado, a princípio, constante no seu valor de pico para todo o período de simulação. A influência da representação da curva de carga anual no desempenho e escalabilidade das metodologias foi, no entanto, verificada em alguns estudos.

### 5.3.1.5 Resultados da Execução Sequencial

**Configuração Básica** A configuração básica dos estudos realizados consiste na adoção de um nível de carga constante para todo o período de simulação e uma tolerância de 5% para convergência.

Os resultados obtidos na execução sequencial da avaliação da confiabilidade composta usando SMC sequencial estão resumidos na tabela 5.5 para todos os estudos realizados na configuração básica. A tabela mostra o número de anos simulados para a convergência, o total de estados analisados e o tempo de CPU em um nó das plataformas paralela e distribuída.

Os principais índices calculados, bem como o coeficiente de variação da EPNS, para esta configuração estão mostrados na tabela 5.6, onde a EPNS, LOLF e LOLC estão dados em MW, ocorrências/ano e milhões US\$/ano, respectivamente.

Sistema	Anos	Estados	Tempo de CPU	
			RS/6000 SP	NOW
RTS-SQ	142	69.352	1,95 min	49,95 s
NBPS	356	396.318	30,17 min	14,43 min
BR-NNE	114	203.984	13,22 min	6,27 min
BR-S	13	24.480	13,02 min	6,18 min
BR-SE	54	312.054	15,30 h	7,08 h

TABELA 5.5: Resultados da Execução Sequencial - Configuração Básica

Sistema	LOLP	EPNS	LOLF	LOLC	$\alpha$ (%)
RTS-SQ	0,093	14,28	20,58	435,89	4,965
NBPS	0,008	1,17	7,23	0,00	4,997
BR-NNE	0,004	0,32	12,49	0,00	4,996
BR-S	0,174	4,31	73,00	74,18	4,881
BR-SE	0,038	1,47	111,22	21,59	4,923

TABELA 5.6: Índices de Confiabilidade calculados na Execução Sequencial - Configuração Básica

**Configuração de Maior Precisão** Nesta configuração são adotadas tolerâncias para convergência da simulação menores do que na configuração básica e mantido o nível de carga constante para toda a simulação. O objetivo é avaliar a influência do aumento da precisão das estimativas no tempo de processamento e desempenho das metodologias.

Foram realizados estudos com a tolerância de 3% para os sistemas RTS-SQ, BR-S e BR-SE e 1% para o sistema BR-NNE no ambiente computacional distribuído. Os resultados obtidos na execução sequencial da simulação em uma estação de trabalho RS/6000 43P estão resumidos na tabela 5.7.

Os principais índices de confiabilidade bem como o coeficiente de variação da EPNS calculados para esta configuração estão mostrados na tabela 5.8.

Sistema	Anos	Estados	Tempo de CPU
RTS-SQ	367	178.701	2,18 min
BR-NNE	2.792	4.970.799	2,54 h
BR-S	51	95.384	24,26 min
BR-SE	142	820.619	18,59 h

TABELA 5.7: Resultados da Execução Sequencial - Configuração Maior Precisão - NOW

Sistema	LOLP	EPNS	LOLF	LOLC	$\alpha$ (%)
RTS-SQ	0,096	14,85	20,57	453,40	2,998
BR-NNE	0,004	0,31	12,26	0,00	0,999
BR-S	0,174	4,45	72,35	71,05	2,942
BR-SE	0,036	1,44	112,89	22,88	2,995

TABELA 5.8: Índices de Confiabilidade calculados na Execução Sequencial - Configuração Configuração Maior Precisão - NOW

Sistema	Anos	Estados	Tempo de CPU
BR-SE	67	1.920.638	16,57 h

TABELA 5.9: Resultados da Execução Sequencial - Configuração Curva de Carga - RS/6000 SP

**Configuração com Curva de Carga** Nesta configuração é representada a curva de carga horária anual do sistema e mantida a tolerância de convergência de 5%. O objetivo é avaliar a influência da representação da curva de carga no tempo de processamento e desempenho das metodologias.

Foram realizados estudos para o sistema BR-SE no computador paralelo, usando as 5 curvas de carga horária anual das macro áreas, mostradas nas figuras 5.15 a 5.19. Os resultados obtidos na execução sequencial da simulação em um processador do RS/6000 SP estão resumidos na tabela 5.9.

Com a representação da curva de carga anual, o número de estados simulados aumenta, graças à ocorrência de transições de estado do sistema devido também à variação do nível de carga. Além disso, como o nível de carga assume valores inferiores ao de pico, a ocorrência de corte de carga reduz ao longo da simulação do ano, o que leva à necessidade de simular por maior número de anos para atingir a convergência.

Os principais índices de confiabilidade bem como o coeficiente de variação da EPNS calculados para esta configuração estão mostrados na tabela 5.10.

Sistema	LOLP	EPNS	LOLF	LOLC	$\alpha$ (%)
BR-SE	0,030	0,70	103,36	10,85	4,986

TABELA 5.10: Índices de Confiabilidade calculados na Execução Sequencial - Configuração Curva de Carga - RS/6000 SP

Sistema	p=4		p=6		p=10	
	Anos	Estados	Anos	Estados	Anos	Estados
RTS-SQ	141	68.881	143	69.839	138	67.509
NBPS	354	394.150	355	395.297	352	391.876
BR-NNE	114	203.988	113	202.283	116	207.585
BR-S	17	31.946	14	26.303	13	24.458
BR-SE	54	312.083	53	306.426	55	316.262

TABELA 5.11: Número de Anos e Estados Analisados - Metodologia I - Configuração Básica

## 5.3.2 Metodologia I - Anos em Paralelo

Essa metodologia foi implementada apenas no ambiente computacional paralelo composto pelo computador IBM RS/6000 SP.

### 5.3.2.1 Configuração Básica

O controle de convergência assíncrono da metodologia I pode implicar em um número de anos simulados diferente daquele da execução sequencial. Como a análise da adequação dos estados dentro de cada ano pode demandar tempos de simulação diferentes, o mestre pode receber os resultados dos anos simulados numa ordem diferente da que ocorre na execução sequencial. Isso não implica em problema quanto a validade da metodologia, uma vez que não existe sequenciamento entre os anos simulados, mas apenas entre os estados dentro do ano. A alteração da ordem de recepção dos resultados dos anos pode, contudo, provocar a alteração da trajetória de convergência da simulação, pela mesma razão explicada na seção 4.5.2.1 para as metodologias desenvolvidas que usam SMC não-sequencial. Em função disso, o número de anos simulados pode variar com o número de processadores e com a capacidade de processamento dos mesmos. Para ilustrar esse fenômeno, a tabela 5.11 contém o número de anos simulados e o total de estados analisados em 4, 6 e 10 processadores do computador RS/6000 SP.

Apesar deste fenômeno, todas as simulações são válidas e os índices de confiabilidade calculados apresentam incerteza relativa menor ou igual à especificada. A única consequência prática é a influência no tempo final da simulação.

Os tempos de execução do código paralelo da metodologia I para os sistemas testes na configuração básica, calculados como a média entre os tempos de relógio de

Sistema	Tempo de Execução		
	p=4	p=6	p=10
RTS-SQ	30,04 s	22,43 s	14,82 s
NBPS	7,65 min	5,29 min	3,29 min
BR-NNE	3,53 min	2,43 min	97,47 s
BR-S	4,83 min	3,04 min	2,05 min
BR-SE	4,00 h	2,63 h	1,75 h

TABELA 5.12: Tempos de Execução - Metodologia I - RS/6000 SP - Configuração Básica

Sistema	Eficiência (%)		
	p=4	p=6	p=10
RTS-SQ	97,23	86,81	78,83
NBPS	98,66	94,97	91,68
BR-NNE	93,62	90,66	81,41
BR-S	67,61	71,50	63,51
BR-SE	95,69	97,02	87,72

TABELA 5.13: Eficiências - Metodologia I - RS/6000 SP - Configuração Básica

três execuções distintas, estão mostrados na tabela 5.12 para 4, 6 e 10 processadores do RS/6000 SP.

Conforme pode ser observado pela comparação com a tabela 5.5, a aplicação da metodologia I provoca redução significativa do tempo de processamento da avaliação da confiabilidade composta usando SMC sequencial, especialmente para os modelos de sistema de grande porte. Para o sistema BR-SE, a redução de tempo de processamento foi de 11,31 horas em 4 processadores, 12,68 horas em 6 processadores e 13,56 horas em 10 processadores.

Os resultados em termos de eficiência da metodologia paralela estão apresentados na tabela 5.13.

Esses resultados deixam claro a dependência da eficiência da metodologia I com o número de anos simulados e o número de processadores da plataforma paralela. Se o número de anos simulados for elevado ou múltiplo do número de processadores, a eficiência é elevada. No entanto, nos casos em que o número de anos simulados é pequeno em relação ao número de processadores, a eficiência degrada consideravelmente. Isso significa que a metodologia não é adequadamente escalável.

Na avaliação da confiabilidade, o número de anos simulados será tanto menor quanto menos confiável for o sistema. Por exemplo, o sistema BR-S, que possui

uma probabilidade de perda de carga (LOLP) bastante elevada (17,4%), requer a simulação de apenas 13 anos para convergir a simulação com 5% de incerteza nas estimativas. Já o sistema NBPS, cuja LOLP vale 0,8%, requer a simulação de 356 anos para a mesma precisão. A metodologia I, então, pode apresentar baixa eficiência na avaliação de sistemas de menor confiabilidade, sendo esta eficiência dependente do número de processadores utilizados. Na realidade, é possível calcular *a priori* a eficiência máxima teórica para cada caso, em função do número de processadores e de anos simulados na execução sequencial.

Sendo  $n_{seq}$  o número de anos simulados na execução sequencial e  $p$  o número de processadores, pode-se calcular a eficiência máxima alcançável pela metodologia I  $\eta_{max}$  por:

$$a = \left\lceil \frac{n_{seq}}{p} \right\rceil \quad (5.1)$$

$$S_{max} = \frac{n_{seq}}{a} \quad \rightarrow \quad \eta_{max} = \frac{n_{seq}}{a p} \quad (5.2)$$

Usando como exemplo o sistema BR-S, as eficiências máximas teóricas para 4, 6 e 10 processadores são:

$$p = 4 : \left\lceil \frac{13}{4} \right\rceil = 4 \quad \rightarrow \quad \eta_{max} = \frac{13}{4 \times 4} = 81,25\% \quad (5.3)$$

$$p = 6 : \left\lceil \frac{13}{6} \right\rceil = 3 \quad \rightarrow \quad \eta_{max} = \frac{13}{3 \times 6} = 72,22\% \quad (5.4)$$

$$p = 10 : \left\lceil \frac{13}{10} \right\rceil = 2 \quad \rightarrow \quad \eta_{max} = \frac{13}{2 \times 10} = 65,00\% \quad (5.5)$$

As eficiências máximas podem atingir valores bastante reduzidos com o aumento do número de processadores e, na utilização de máquinas massivamente paralelas com elevado número de processadores, pode ocorrer de ter-se mais processadores disponíveis do que anos a serem simulados. Nesse caso, a adoção da metodologia I implicaria numa sub-utilização da máquina paralela.

Apesar da maioria dos estudos de confiabilidade não apresentarem um comportamento semelhante ao sistema BR-S, este caso serve para demonstrar a falta de escalabilidade desta metodologia. No entanto, vale lembrar que os casos mais demorados de avaliação da confiabilidade são relativos a sistemas de grandes dimensões



e muito confiáveis, pois requerem a simulação de muitos anos para convergir e a análise de cada ano demanda muito tempo de processamento. Para estes casos, a metodologia I deve apresentar eficiência adequada.

As curvas de *speedup* da metodologia I para as simulações realizadas estão mostradas na figura 5.20.

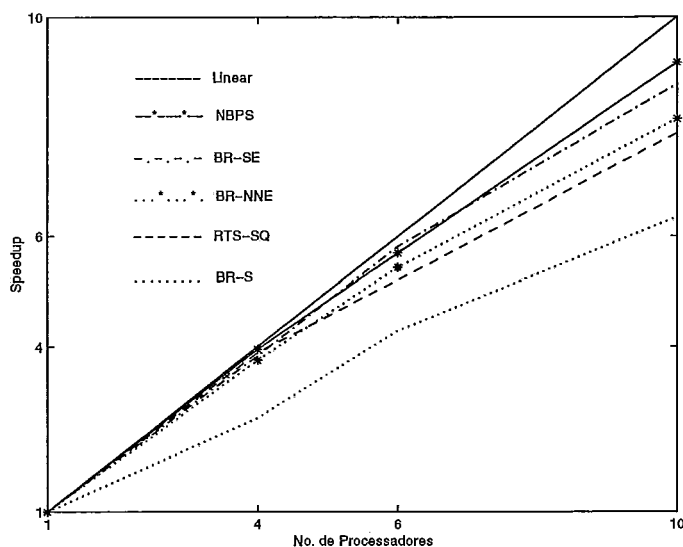


FIGURA 5.20: Curvas de *Speedup* - Metodologia I - RS/6000 SP - Configuração Básica

Conforme explicado anteriormente, os anos analisados em paralelo podem não ser os mesmos analisados sequencialmente, devido ao assincronismo da metodologia. Em consequência, os índices calculados na execução paralela podem não ser exatamente os mesmos calculados na execução sequencial, mas são estatisticamente equivalentes, apresentando o mesmo ou até menor grau de incerteza relativa. A título de ilustração, estão mostrados na tabela 5.14 os índices calculados pela implementação da metodologia I em 4 e 10 processadores, onde as unidades dos índices são as mesmas descritas para a tabela 5.6.

A estratégia de distribuição da análise dos anos entre os processadores descrita na seção 5.2.1 pressupõe a amostragem de séries sintéticas que não são analisadas pelos processadores. A fim de justificar a adoção desta estratégia, a tabela 5.15 mostra a percentagem do tempo de amostragem das séries sintéticas  $t_A$  em relação ao tempo total da simulação  $t_T$  para dois casos testes: RTS-SQ, o caso cuja análise

Sistema	LOLP	EPNS	LOLF	LOLC	$\alpha$ (%)
p=4					
RTS-SQ	0,093	14,32	20,64	437,17	4,977
NBPS	0,008	1,17	7,22	0,00	4,997
BR-NNE	0,004	0,31	12,49	0,00	4,995
BR-S	0,174	4,27	71,88	74,13	4,923
BR-SE	0,038	1,49	111,44	21,63	4,985
p=10					
RTS-SQ	0,093	14,45	20,71	440,86	4,993
NBPS	0,008	1,16	7,21	0,00	4,989
BR-NNE	0,004	0,32	12,48	0,00	4,962
BR-S	0,173	4,31	72,61	74,15	4,885
BR-SE	0,037	1,46	111,17	21,52	4,954

TABELA 5.14: Índices de Confiabilidade - Metodologia I - Configuração Básica

Sistema	$t_A/t_T$ (%)
RTS-SQ	1,47
BR-SE	0,19

TABELA 5.15: Percentagem de Tempo de Amostragem das Séries Sintéticas

de adequação dos estados demanda menos tempo e, conseqüentemente, o peso da amostragem é maior, e o BR-SE, caso para o qual a análise de adequação dos estados demanda o maior tempo.

A reduzida percentagem de tempo desperdiçado na amostragem de séries sintéticas que não são analisadas pelo processador justifica a adoção da estratégia de distribuição de séries descrita.

### 5.3.2.2 Configuração com Curva de Carga

A representação da curva de carga aumenta o número de anos simulados para atingir a convergência da SMC sequencial para uma mesma precisão, além de aumentar o número de estados analisados por ano. A combinação dessas duas características provoca o aumento do tempo de simulação, o que tende a melhorar o desempenho da metodologia paralela. A fim de avaliar esse efeito, foram realizados testes para o sistema BR-SE com representação das curvas de carga das 5 macro-áreas descritas na seção 5.3.1.3.

O número de anos simulados e o total de estados analisados em 10 processadores do computador RS/6000 SP, aplicando-se a metodologia I, estão mostrados na tabela

Sistema	p=10	
	Anos	Estados
BR-SE	67	1.911.389

TABELA 5.16: Número de Anos e Estados Analisados - Metodologia I - Configuração Curva de Carga

Sistema	p=10	
	Tempo	Eficiência (%)
BR-SE	1,78 h	93,12

TABELA 5.17: Tempo de Execução e Eficiência - Metodologia I - RS/6000 SP - Configuração Curva de Carga

5.16.

O número de anos simulados em paralelo é o mesmo da execução sequencial. No entanto, o número de estados analisados não é o mesmo, o que permite concluir que os anos simulados não são exatamente os mesmos, devido ao assincronismo da metodologia I.

O tempo de execução do código paralelo da metodologia I, calculado como a média entre os tempos de relógio de três execuções distintas, e respectiva eficiência em 10 processadores, estão mostrados na tabela 5.17.

A aplicação do processamento paralelo provoca uma redução significativa no tempo de simulação desse sistema, que passou de 16,57 horas em um processador para menos de 2 horas em 10 processadores. Conforme pode ser observado pela comparação com a tabela 5.13, a eficiência da metodologia I aumentou de 87,72% para mais de 93% devido à representação das curvas de carga. As principais razões para esse melhor desempenho são o aumento do esforço computacional demandado e, principalmente, a elevação do número de anos simulados para convergência.

A tabela 5.14 mostra os índices calculados na simulação paralela, onde pode-se observar a ligeira variação em relação ao resultado sequencial mostrado na tabela 5.10.

Sistema	LOLP	EPNS	LOLF	LOLC	$\alpha$ (%)
BR-SE	0,030	0,70	103,43	10,89	4,969

TABELA 5.18: Índices de Confiabilidade - Metodologia I - Configuração Curva de Carga (p=10)

Sistema	Tempo de Execução		
	p=4	p=6	p=10
RTS-SQ	30,61 s	21,68 s	15,38 s
NBPS	7,75 min	5,31 min	3,56 min
BR-NNE	3,54 min	2,46 min	1,69 min
BR-S	3,48 min	2,33 min	1,58 min
BR-SE	3,91 h	2,62 h	1,68 h

TABELA 5.19: Tempos de Execução - Metodologia II - RS/6000 SP - Configuração Básica

### 5.3.3 Metodologia II - Paralelização do Ano

Essa metodologia foi implementada no ambiente computacional paralelo composto pelo computador IBM RS/6000 SP e no ambiente computacional distribuído composto pela rede de estações de trabalho (NOW).

#### 5.3.3.1 Ambiente Computacional Paralelo

Os tempos de execução do código paralelo da metodologia II para os sistemas testes na configuração básica, calculados como a média entre os tempos de relógio de três execuções distintas, estão mostrados na tabela 5.19 para 4, 6 e 10 processadores do RS/6000 SP.

Conforme pode ser observado pela comparação com a tabela 5.5, a aplicação da metodologia II também provoca redução significativa do tempo de processamento da avaliação da confiabilidade composta usando SMC sequencial, especialmente para os modelos de sistema de grande porte. Para o sistema BR-SE, a redução de tempo de processamento foi de 11,39 horas em 4 processadores, 12,69 horas em 6 processadores e 13,62 horas em 10 processadores.

Os resultados em termos de eficiência da metodologia paralela estão apresentados na tabela 5.20.

As eficiências alcançadas pela metodologia II são boas, permanecendo superior a 75% para todos os casos testes e, em particular para o sistema de maior porte BR-SE, superior a 91% em 10 processadores. A metodologia II é escalável tanto com o número de processadores alocados como com o tamanho do sistema teste, demonstrando pouca redução da eficiência com o aumento do número de processadores. Em alguns casos, a eficiência da metodologia II fica inferior a da metodologia

Sistema	Eficiência (%)		
	p=4	p=6	p=10
RTS-SQ	95,42	89,81	75,96
NBPS	97,32	94,64	84,62
BR-NNE	93,46	89,69	78,03
BR-S	93,57	93,27	82,23
BR-SE	97,81	97,41	91,20

TABELA 5.20: Eficiências - Metodologia II - RS/6000 SP - Configuração Básica

I devido à maior complexidade da estratégia de paralelização. Isso, no entanto, só ocorre para os casos onde o número de anos simulados é elevado e são executados em um número de processadores reduzido, condição que é favorável à metodologia I. De uma forma geral, não existem limitações de escalabilidade impostas pela metodologia, uma vez que cada ano é analisado em paralelo, podendo apresentar boa eficiência mesmo para poucos anos simulados em grande número de processadores.

O problema de baixa eficiência em relação ao sistema BR-S, que ocorre na aplicação da metodologia I, é solucionado pela aplicação da metodologia II, quando a eficiência mantém-se sempre superior a 82% para qualquer número de processadores.

As curvas de *speedup* da metodologia II para as simulações realizadas estão mostradas na figura 5.21.

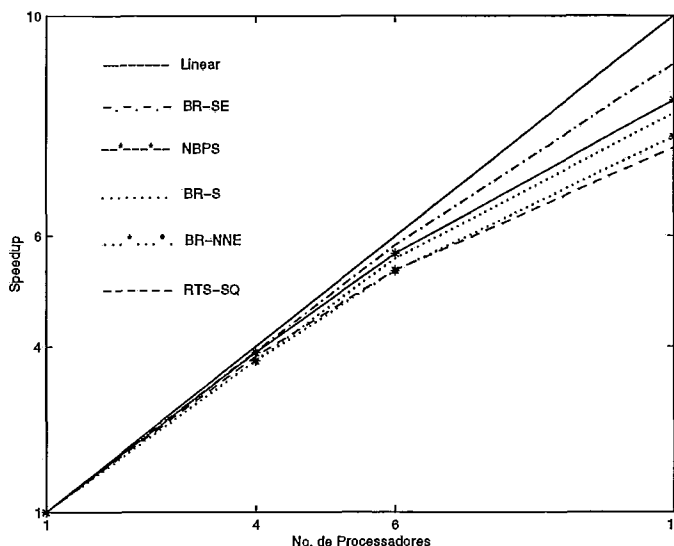


FIGURA 5.21: Curvas de *Speedup* - Metodologia II - RS/6000 SP - Configuração Básica

Sistema	Ganho (%)	
	p=4	p=6
BR-S	5,43	6,01
BR-SE	1,72	1,74

TABELA 5.21: Ganho Provocado pela Estratégia de Alocação Cíclica de Sub-Séries

O número de anos simulados na metodologia II é idêntico ao número de anos simulados na execução sequencial, independente do número de processadores alocados. Conseqüentemente, os índices de confiabilidade calculados são também idênticos aqueles calculados na execução sequencial, mostrados na tabela 5.6. Nesta metodologia, os estados dentro da cada série sintética anual são analisados em paralelo em diferentes processadores e a convergência é checada ao final da análise de cada série em um único processador, o que se traduz na mesma trajetória de convergência da execução sequencial.

A estratégia de alocação cíclica das sub-séries aos processadores contribuem para o bom desempenho da metodologia, especialmente para os casos de grande porte, onde o processo de evolução da configuração do sistema demanda mais tempo de processamento. A fim de ilustrar este fato, a tabela 5.21 contém o aumento da eficiência da computação paralela provocado pela estratégia de alocação cíclica em 4 e 6 processadores para dois sistemas testes.

Os bons resultados conseguidos pela metodologia II demonstram que o custo computacional pago pela paralelização de um processo com forte dependência sequencial, tais como a evolução da configuração dos estados e a duplicação da análise de estados ocorrida quando a divisão em sub-séries coincide com uma subsequência de falha, são plenamente compensados pela redução no tempo total da simulação.

### 5.3.3.2 Ambiente Computacional Distribuído (NOW)

**Configuração Básica** Devido ao bom desempenho e escalabilidade apresentados pela metodologia II em ambiente computacional paralelo, esta metodologia foi também implementada na rede de estações de trabalho (NOW) descrita na seção 4.5.1.1. O principal objetivo da implementação é levantar o desempenho da metodologia em ambiente computacional de mais baixo custo e maior disponibilidade nas empresas de energia, concessionárias e centros de pesquisa.

Sistema	Tempo de Execução		
	p=4	p=6	p=8
RTS-SQ	23,43 s	27,72 s	33,70 s
NBPS	4,10 min	3,00 min	2,47 min
BR-NNE	1,89 min	1,55 min	1,33 min
BR-S	1,77 min	1,42 min	1,08 min
BR-SE	1,90 h	1,29 h	58,61 min

TABELA 5.22: Tempos de Execução - Metodologia II - NOW - Configuração Básica

Sistema	Eficiência (%)		
	p=4	p=6	p=8
RTS-SQ	53,30	30,00	18,53
NBPS	87,96	80,21	73,11
BR-NNE	82,65	67,46	58,71
BR-S	87,26	72,29	65,36
BR-SE	92,90	91,57	90,60

TABELA 5.23: Eficiências - Metodologia II - NOW - Configuração Básica

Os tempos de execução do código paralelo da metodologia II para os sistemas testes na configuração básica, calculados como a média entre os tempos de relógio de três execuções distintas na NOW, estão mostrados na tabela 5.22 para 4, 6 e 8 estações de trabalho.

Conforme pode ser verificado pela comparação com a tabela 5.5, os resultados mostram ganhos de tempo bastante expressivos para os sistemas de médio a grande porte. Por exemplo, foi possível reduzir o tempo de processamento para avaliação do sistema BR-SE de 7,08 horas, em uma estação de trabalho, para menos de 1 hora em 8 estações interligadas em rede, aplicando a metodologia II. Esses resultados expressos em termos de eficiência da metodologia paralela estão mostrados na tabela 5.23.

A análise das eficiências alcançadas no ambiente distribuído mostra o custo de comunicação mais elevado em uma rede Ethernet em relação ao *switch* de alto desempenho do computador paralelo RS/6000 SP. A grande maioria do tempo de comunicação está concentrada no *broadcast* inicial dos dados do problema, como já havia sido constatado para as metodologias que utilizam SMC não-sequencial, e este tempo é tanto maior quanto mais estações forem alocadas para o processamento paralelo. Outro fator que contribui para a obtenção de mais baixas eficiências

nesta rede é o menor tempo de processamento demandado pelo código sequencial na estação de trabalho em relação a um nó do computador paralelo.

O custo da comunicação torna-se muito alto na avaliação de sistema de pequeno porte e para aqueles que requerem pouco tempo de simulação, a medida que o número de estações aumenta. No entanto, na avaliação de modelos de grande porte, para os quais a execução sequencial demanda horas de processamento, como o sistema BR-SE, a eficiência da metodologia II pode ser considerada muito boa, mantendo-se superior a 90% em 8 estações de trabalho.

A escalabilidade da metodologia II também é verificada no ambiente computacional distribuído, sofrendo maior influência do número de estações de trabalho alocadas do que a apresentada no computador paralelo, especialmente para os sistemas de menor demanda computacional. A avaliação do sistemas de grande porte BR-SE, no entanto, apresenta pouca redução da eficiência como o aumento do número de estações de trabalho.

As curvas de *speedup* da metodologia II para os casos teste na configuração básica, no ambiente distribuído composto pela NOW, estão mostradas na figura 5.22.

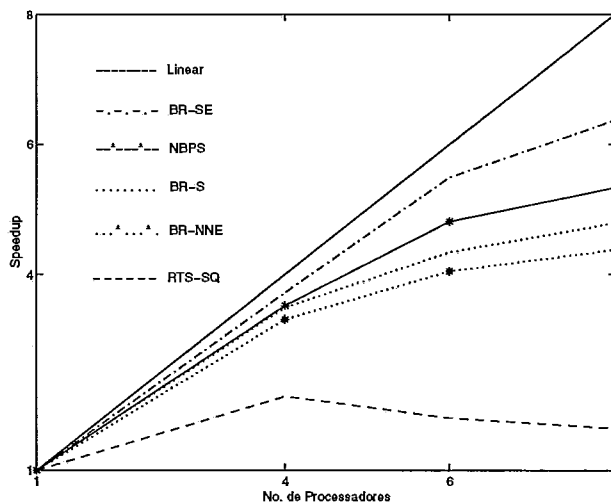


FIGURA 5.22: Curvas de *Speedup* - Metodologia II - NOW - Configuração Básica

**Configuração de Maior Precisão** A redução da tolerância para convergência da SMC sequencial provoca a necessidade de simular um número de anos mais elevado, o que aumenta sobremaneira o tempo de processamento e, conseqüentemente,



Sistema	Tempo de Execução		
	p=4	p=6	p=8
RTS-SQ	49,07 s	48,25 s	42,27 s
BR-NNE	43,66 min	30,23 min	23,41 min
BR-S	6,51 min	4,61 min	3,61 min
BR-SE	4,73 h	3,19 h	2,39 h

TABELA 5.24: Tempos de Execução - Metodologia II - NOW - Configuração Maior Precisão

Sistema	Eficiência (%)		
	p=4	p=6	p=8
RTS-SQ	66,73	44,60	38,73
BR-NNE	87,13	83,88	81,26
BR-S	93,24	87,69	83,89
BR-SE	98,26	97,09	97,00

TABELA 5.25: Eficiências - Metodologia II - NOW - Configuração Maior Precisão

tende a produzir melhores eficiências para a simulação paralela. A fim de avaliar esse efeito, foram realizados testes na rede de estações de trabalho usando a metodologia II.

Os tempos de execução do código paralelo da metodologia II para os sistemas testados na configuração de maior precisão, calculados como a média entre os tempos de relógio de três execuções distintas na NOW, bem como as eficiências correspondentes, estão mostrados nas tabelas 5.24 e 5.25 para 4, 6 e 8 estações de trabalho.

A aplicação do processamento paralelo torna o tempo de simulação aceitável para a avaliação de sistemas de grande porte com elevada precisão das estimativas. Por exemplo, a avaliação do sistema de pequeno porte BR-NNE com 1% de precisão passa de 2,54 horas em uma estação de trabalho para pouco mais de 23 minutos em 8 estações de trabalho. Já para o sistema de grande porte BR-SE com 3% de precisão, a redução no tempo de processamento é ainda mais expressiva, passando de quase 19 horas em 1 estação de trabalho para pouco mais de 2 horas em 8 estações.

Devido ao aumento do tempo de processamento provocado pelo aumento da precisão da simulação, as eficiências atingidas neste ambiente também se tornaram bastante boas, mantendo-se acima de 81% em 8 processadores para todos os casos testados, exceto o sistema RTS-SQ. Para o sistema de grande porte BR-SE, a eficiência é superior a 97% em até 8 estações de trabalho, o que pode ser considerado

excelente. A eficiência da metodologia II na avaliação do sistema BR-NNE aumentou 22,55% em 8 processadores com a redução da precisão de 5% para 1%, enquanto para o sistema BR-S o aumento de eficiência foi de 18,53% reduzindo  $\alpha$  de 5% para 3%.

A escalabilidade da metodologia também é melhorada com o aumento da precisão da simulação, mostrando menor influência do aumento do número de estações de trabalho na eficiência. As curvas de *speedup* da metodologia II para os casos testados na configuração com maior precisão, na rede de estações de trabalho, estão mostradas na figura 5.23.

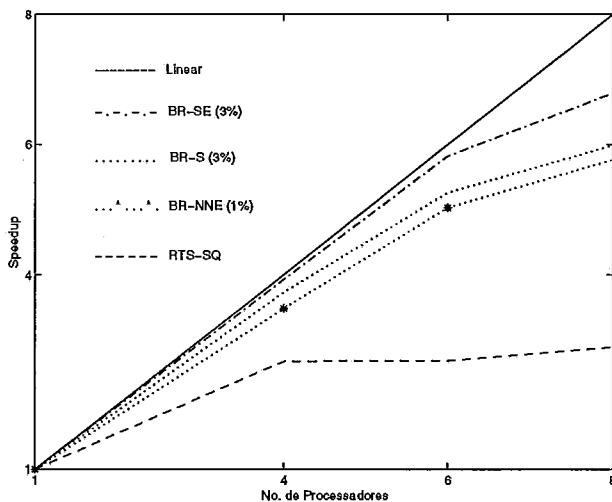


FIGURA 5.23: Curvas de *Speedup* - Metodologia II - NOW - Configuração Maior Precisão

Esses resultados permitem afirmar que é possível avaliar a confiabilidade composta de sistemas de grande porte, por SMC sequencial com elevada precisão, de maneira eficiente e com tempo de resposta plenamente aceitável, usando um ambiente computacional distribuído de mais baixo custo. Essa conclusão é de grande interesse prático para a indústria de energia elétrica e para os meios acadêmicos de uma forma geral.

## 5.4 Comparação entre Metodologias

As metodologias paralelas para avaliação da confiabilidade composta por SMC sequencial propostas neste capítulo apresentam eficiências adequadas em ambientes computacionais paralelos e distribuídos. A metodologia I, no entanto, devido ao fato de adotar uma grão de processamento muito grande, apresenta a característica de fraca escalabilidade. Para sistemas de baixo nível de confiabilidade, os quais requerem um menor número de anos simulados para a convergência, a eficiência dessa metodologia é comprometida pelo aumento do número de processadores do ambiente paralelo. No entanto, quando executada sobre um reduzido número de processadores, o desempenho da metodologia I pode ser superior ao da metodologia II, graças à menor complexidade de controle do processo paralelo. Nas simulações com representação da curva de carga, a metodologia I apresenta um melhor desempenho, devido ao aumento do número de anos simulados e do tempo de simulação demandado.

A metodologia II, por sua vez, é escalável tanto com o número de processadores do ambiente paralelo como com o número de anos simulados. O fato da análise da adequação dos estados dentro de cada ano simulado ser realizado em paralelo faz com que o número de processadores alocados não afete tanto a sua eficiência como ocorre com a metodologia I. A escalabilidade desta metodologia é boa, apresentando redução de eficiência com o aumento do número de processadores compatível com a dimensão do sistema teste. Essa característica de escalabilidade permite que a metodologia II seja empregada em máquinas massivamente paralelas com elevado número de processadores, o que já não ocorre com a metodologia I. Por outro lado, a implementação e depuração do código paralelo para esta metodologia é bastante mais complexo.

A metodologia II, no entanto, não pode ser diretamente estendida para aplicação em estudos do custo da confiabilidade de sistemas com restrições cronológicas críticas. Restrições cronológicas críticas podem ser encontradas, por exemplo, em sistemas hidrelétricos onde a disponibilidade de energia elétrica está limitada pela capacidade de armazenamento dos reservatórios. Isso cria uma dependência entre a estratégia de operação adotada e o custo da energia no futuro [47].

Uma solução adotada para os sistemas predominantemente hídricos é desacoplar o problema de confiabilidade da geração em duas componentes: uma componente energética, que incorpora as restrições cronológicas críticas, e uma componente de potência, que analisa os efeitos das falhas dos equipamentos na redução da capacidade de fornecimento [6]. A adoção dessa solução torna as duas análises independentes e permite que enfoques não extritamente sequenciais sejam adotados nas avaliações [21]. Dessa forma, a metodologia II pode ser aplicada com precisão na avaliação de sistemas hídricos, desde que sejam desacopladas as componentes de potência das energéticas. Já a metodologia I pode ser aplicada na avaliação de qualquer sistema composto de geração e transmissão sem restrição, mesmo que os aspectos energéticos e de análise de falhas sejam modelados conjuntamente.

Em relação a trabalhos publicados que apresentam propostas de avaliação da confiabilidade composta em paralelo, apenas o trabalho [11] enfoca a SMC sequencial, porém com a passagem de tempo por intervalo fixo. Existem dois métodos de passagem de tempo na SMC sequencial: intervalo fixo e próximo evento. No método do intervalo fixo, o tempo evolui em passos de intervalo de tempo pré-fixado, quando então o estado do sistema é selecionado por amostragem de estados. No método do próximo evento, adotado neste trabalho, o tempo evolui para a ocorrência do próximo evento, o que requer a amostragem sequencial das transições de estado dos componentes do sistema e da variação cronológica da carga. Dessa forma, o método paralelizado em [11] possui um grau de desacoplamento muito maior do que o tratado neste capítulo, haja visto que a amostragem de cada estado é independente da amostragem do estado anterior. Na realidade, do ponto de vista de estratégia de paralelização, mais se assemelha com a SMC não-sequencial apresentada no capítulo 4.

Em [11], a análise dos estados é realizada utilizando o algoritmo de fluxo máximo, em contraste com a análise de adequação dos estados através do fluxo de potência linearizado seguido de esquema de medidas corretivas baseado em programação linear adotada neste trabalho. Os índices mencionados são a LOLE e a EENS, enquanto no nosso trabalho são calculados em torno de 10 índices, para cada ano simulado e para todo o processo, além da distribuição dos índices ao longo dos meses do ano. O sistema teste utilizado é um sistema sintético obtido pela interligação de 3 sistemas

IEEE-RTS, enquanto as metodologias propostas foram testadas em modelos reais de sistemas de potência. Em termos de eficiência, a melhor metodologia proposta em [11] obteve eficiência superior a 92% em 8 processadores do computador paralelo de memória distribuída e topologia hipercúbica utilizado, o que se mostra da mesma ordem de grandeza das eficiências atingidas pelas metodologias propostas neste trabalho em até 10 processadores do RS/6000 SP. No entanto, deve-se ter em consideração que o nível de paralelismo inerente ao método paralelizado é muito maior do que o da SMC sequencial baseada na ocorrência do próximo evento, utilizada neste trabalho.

# Capítulo 6

## Conclusões

A avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência usando métodos probabilísticos tem a capacidade de refletir a natureza estocástica do comportamento do sistema. A simulação Monte Carlo tem sido amplamente utilizada na estimativa de índices de confiabilidade, baseado na simulação do processo estocástico de operação do sistema e da ocorrência aleatória de falhas. No entanto, a avaliação de sistemas de grande porte usando SMC pode demandar muitas horas de processamento em estações de trabalho de alto desempenho, devido ao elevado número de estados analisados e a complexidade de análise de cada estado. No caso particular da SMC sequencial, a avaliação de sistemas complexos de grande porte pode se tornar inviável para algumas aplicações em computadores convencionais.

Felizmente, a análise da adequação dos estados amostrados, onde se concentra o esforço computacional da simulação, pode ser realizada de forma concorrente. Assim, o uso do processamento paralelo é uma ferramenta poderosa na redução do tempo total da simulação. Neste trabalho foram apresentadas metodologias para avaliação em paralelo da confiabilidade composta de sistemas de potência, usando SMC nos enfoques não-sequencial e sequencial.

Para avaliação da confiabilidade por SMC não-sequencial, foram apresentadas duas metodologias assíncronas de granularidade grossa, onde o grão de processamento é composto pela análise da adequação de vários estados do sistema. A diferença básica entre as metodologias está no critério de controle da convergência paralela. Na metodologia A, a convergência é controlada a intervalos de tempo

fixos, enquanto na metodologia B a convergência é controlada em função da evolução da convergência do processo paralelo. A metodologia que apresentou melhor desempenho foi a metodologia A.

Na implementação desta metodologia no computador paralelo IBM RS/6000 SP, os testes realizados com modelos reais de sistemas de potência apresentaram eficiências superiores a 90% em 10 processadores, superando 93% para os casos de maior porte. A característica de escalabilidade da metodologia com o número de processadores e com a dimensão dos sistemas testes se mostrou muito boa. Na implementação desta metodologia na rede de estações de trabalho IBM RS/6000 43P, as simulações para os sistemas testados apresentaram eficiências superiores a 66% em 8 estações, ultrapassando 92% para os casos com demanda computacional mais elevada. Esses resultados representam uma significativa redução no tempo de processamento da avaliação da confiabilidade, usando uma plataforma computacional mais econômica e frequentemente disponível em empresas de energia elétrica. Testes realizados na plataforma composta por microcomputadores baseada no sistema operacional Windows NT mostraram alta eficiência em 3 PCs para a maioria dos casos. No entanto, testes com o sistema de maior porte apresentaram comportamento não adequado por razões não identificadas nesse trabalho, não permitindo concluir ser esta plataforma, em seu estado atual, estável e confiável para simulação distribuída de grande porte.

Para avaliação da confiabilidade por SMC sequencial, foram apresentadas duas metodologias assíncronas de granularidade grossa, que possuem tamanhos diferentes do grão de processamento. Na metodologia I, a análise da adequação de todos os estados amostrados dentro de uma série sintética anual é realizada por um mesmo processador e os vários anos necessários à convergência do processo são analisados em paralelo. Na metodologia II, a análise dos estados amostrados dentro de cada série sintética anual é realizada em paralelo por vários processadores e os resultados parciais são combinados ao final da análise de cada ano para gerar os índices de confiabilidade anuais. A metodologia I apresenta problemas de escalabilidade com o número de processadores devido ao tamanho do grão de processamento ser muito elevado. Em testes com sistemas onde o número de anos simulados é pequeno em relação ao número de processadores, o desempenho sofre forte redução. Essa situação

pode ocorrer na avaliação de sistemas de baixa confiabilidade. A metodologia II é escalável tanto com o número de processadores como com a dimensão do sistema avaliado.

Na implementação da metodologia II no computador paralelo RS/6000 SP, os testes realizados com modelos reais de sistemas apresentaram eficiências superiores a 78% em 10 processadores, superando 91% para o sistema de grande porte. Já a implementação na rede de estações de trabalho RS/6000 43P, os testes para os casos com demanda computacional elevada apresentaram eficiências superiores a 81% em 8 estações, ultrapassando 90% para o maior modelo de sistema testado. Esses resultados representam uma economia de tempo muito importante na avaliação da confiabilidade de sistemas de grande porte usando SMC sequencial, ainda mais se levado em consideração a possibilidade de utilização de uma plataforma computacional distribuída de custo reduzido e grande disponibilidade. A redução no tempo total da simulação pode tornar viável a realização de muitos estudos que são inviáveis em plataformas convencionais, tais como a avaliação do custo da confiabilidade de sistemas de grande porte para o dia seguinte, com alta precisão e representação das curvas de carga.

Algumas propostas de continuação desse trabalho podem ser enumeradas com vistas a trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa:

1. Inclusão da análise de confiabilidade multi-cenários na abordagem por SMC não-sequencial

O conceito de cenário está associado a uma descrição completa do sistema de potência, da sua configuração, das cargas e das condições hidrológicas que determinam seu comportamento sob o ponto de vista de confiabilidade. A análise multi-cenário corresponde a transformar a análise de um período anual em uma sequência de análises de cenários representativos dos diversos aspectos relevantes para a confiabilidade. A cada cenário pode associar-se uma probabilidade de ocorrência e índices globais podem ser calculados pela média ponderada dos índices de cada cenário.



2. Inclusão da formulação não-linear na análise da adequação dos estados na abordagem por SMC sequencial

A análise da adequação dos estados do sistema na SMC sequencial, utilizando as formulações não-linear do fluxo de potência e do problema de otimização para minimizar o corte de carga, melhora a precisão da simulação do comportamento do sistema. O aumento do tempo de processamento devido à modelagem não-linear é extremamente favorável à aplicação do processamento paralelo, tendendo a produzir ainda melhores eficiências para as metodologias propostas.

3. Solução do problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) utilizando técnica de Programação Não-Linear (PNL)

Na análise da adequação dos estados do sistema, a utilização de um método de PNL tipo Pontos Interiores, por exemplo, na solução do problema de FPO, além de apresentar melhor robustez no tratamento de casos de difícil convergência, produz soluções mais precisas e possibilita a especificação de outras funções objetivo. O elevado esforço computacional demandado pela aplicação de técnicas de PNL a problemas de grande porte não deve ser problema com a utilização do processamento paralelo.

4. Pesquisa de metodologia paralela para SMC sequencial com representação das restrições cronológicas críticas

Dentre as metodologias paralelas desenvolvidas que utilizam SMC sequencial, a metodologia I pode ser aplicada na avaliação de sistemas com restrições cronológicas críticas. No entanto, esta metodologia apresenta problemas de escalabilidade devido ao tamanho do grão de processamento. Uma continuação deste trabalho pode ser a pesquisa de uma metodologia eficiente e escalável que permita a avaliação em paralelo da confiabilidade de sistemas com representação das restrições cronológicas críticas.

5. Avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência sob o enfoque de segurança em ambiente computacional paralelo

Essa avaliação requer a modelagem do comportamento dinâmico do sistema, o que demanda um esforço computacional muito elevado. Uma possibilidade seria a substituição da análise estática do sistema realizada pelo fluxo de potência por um modelo de simulação rápida no tempo da estabilidade de tensão [48]. Isso implicaria na definição de novos índices de confiabilidade que refletissem os efeitos das falhas no comportamento dinâmico do sistema.

#### 6. Análise de Riscos na Operação do Sistema

A avaliação da confiabilidade na operação do sistema elétrico cobre períodos de tempo curtos, que vão desde a análise em tempo real a poucos (2 a 3) anos. Nesse ambiente, a disponibilidade de tempo para análise é escassa, requerendo técnicas e metodologias que permitam analisar os riscos com menor grau de incerteza em tempo compatível com a operação do sistema. O processamento paralelo é uma ferramenta poderosa para tratar esse problema.

#### 7. Determinação da reserva operativa considerando aspectos econômicos e de confiabilidade

A determinação da reserva operativa necessária para garantir um nível adequado de confiabilidade no sistema, levando-se em consideração um mercado competitivo na geração, constitui um problema de grande complexidade o qual pode ser resolvido através da combinação de técnicas de programação inteira e avaliação da confiabilidade composta. O problema computacional resultante dessa combinação requer esforço computacional muito elevado para sistemas com dimensões reais e apresenta características adequadas ao processamento paralelo tanto na parte relativa à programação inteira quanto na avaliação da confiabilidade.

#### 8. Identificar as incompatibilidades ocorridas no ambiente computacional distribuído composto pela rede de PCs com vistas a viabilizar a adoção desse ambiente em simulação distribuída de grande porte.

# Referências Bibliográficas

- [1] R. Billinton and R.N. Allan, “*Reliability Assessment of Large Electric Power Systems*”, Kluwer, Boston, 1988.
- [2] R. Billinton and W. Li, “*Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*”, Plenum Press, New York, 1994.
- [3] M.V.F. Pereira and N.J. Balu, “Composite Generation / Transmission Reliability Evaluation”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 4, pp. 470-491, April 1992.
- [4] A.C.G. Melo, M.V.F. Pereira, A.M. Leite da Silva, “Frequency and Duration Calculations in Composite Generation and Transmission Reliability Evaluation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 1, Jan 1993.
- [5] R. Billinton, A. Jonnavithula, “Application of Sequential Monte Carlo Simulation to Evaluation of Distributions of Composite System Indices”, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 2, pp. 87-90, March 1997.
- [6] O. Bertoldi, L. Salvaderi, S. Scalcino, “Monte Carlo Approach in Planning Studies: An Application to IEEE RTS”, *IEEE Transactions*, vol. 3, no. 3, August 1988.
- [7] D.J. Tylavsky, A. Bose, *et al.*, “Parallel Processing in Power Systems Computation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 629-637, May 1992.
- [8] D.M. Falcão, “High Performance Computing in Power System Applications”, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, vol. 1215, pp. 1-23, February 1997.
- [9] D.J. Boratynska-Stadnicka, M.G. Lauby and J.E. Van Ness, “Converting an Existing Computer Code to a Hypercube Computer”, *Proceedings of the IEEE Power Industry Computer Application Conference*, Seattle, WA, pp. 394-399, May 1989.
- [10] M.J. Teixeira, H.J.C. Pinto, M.V.F. Pereira and M.F. McCoy, “Developing Concurrent Processing Applications to Power System Planning and Operations”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 659-664, May 1990.

- [11] N. Gubbala and C. Singh, "Models and Considerations for Parallel Implementation of Monte Carlo Simulation Methods for Power System Reliability Evaluation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 779-787, May 1995.
- [12] IEEE APM Subcommittee, "IEEE Reliability Test System", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, pp. 2047-2054, Nov/Dec 1979.
- [13] C. Lemaître and B. Thomas, "Two Applications of Parallel Processing in Power System Computation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 246-253, February 1996.
- [14] A.M. Leite da Silva, J. Endrenyi, L. Wang, "Integrated Treatment of Adequacy and Security in Bulk Power System Reliability Evaluations", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, no. 1, pp. 275-285, Feb 1993.
- [15] J.C.O. Mello, M.V.F. Pereira, A.M.L. Silva, "Evaluation of Reliability Worth in Composite Systems based on Pseudo-Sequential Monte Carlo Simulation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1318-1326, August 1994.
- [16] J. Endrenyi, "*Reliability Modeling in Electric Power Systems*", John Wiley & Sons, 1978.
- [17] C. Singh, R. Billinton, "*System Reliability Modeling and Evaluation*", Hutchinson, London, 1977.
- [18] R. Billinton, R.N. Allan, "*Reliability Evaluation of Power Systems*", Pitman Advanced Publishing Program, New York, 1984.
- [19] J.C.O. Mello, A.C.G. Melo, S. Roméro, G.C.Oliveira, M. Morozowski, M.V.F. Pereira, S.H.F. Cunha, R.N. Fontoura, "Development of a Composite System Reliability Program for Large Scale Hydrothermal Power Systems - Issues and Solutions", *III PMAPS*, London, 1991.
- [20] A.C.G. Melo, M.V.F. Pereira, A.M.L. Silva, "A Conditional Probability Approach to Calculation of Frequency and Duration Indices in Composite Reliability Evaluation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 1118-1125, August 1993.
- [21] J.C.O. Mello, "Determinação do Valor da Confiabilidade em Sistemas Compostos de Geração e Transmissão", *Tese de Doutorado*, PUC, Rio de Janeiro, 1994.
- [22] A. Monticelli, "*Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*", Ed. Edgard Blucher Ltda, 1983.
- [23] B. Stott, O. Alsac, A. Monticelli, "Security Analysis and Optimization", *Proceedings of IEEE*, Vol. 75, No. 12, pp. 1623-1644, December 1987.

- [24] H.W. Dommel, W.F. Tinney, "Optimum Power Flow Solutions", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 1866-1876, Oct 1968.
- [25] S.P. Roméro, J.C.O. Mello, M. Morozowski, S.Granville, B.G.Gorestin, "Aplicação de um Novo Modelo de Otimização no Cálculo de Medidas Corretivas em Estudos de Planejamento", *Anais do IX Congresso Brasileiro de Automática*, Vitória, ES, Brasil, 1992.
- [26] J.C.O. Mello, A.C.G. Melo, B.G. Gorenstin, S. Granville, X. Vieira Filho, J.C.G. Praça, M.V. F.Pereira, E.M.T. Nery, "Power System Reliability Evaluation in a Competitive Framework", *Eletroevolução*, No. 8, pp.24-29, Maio 1997.
- [27] T.G. Lewis, H. El-Rewini, "*Introduction to Parallel Computing*", Prentice Hall, New York, 1992.
- [28] M.J. Quinn, "*Parallel Computing: Theory and Practice*", McGraw-Hill, New York, 1994.
- [29] B. Nitzberg, V. Lo, "Distributed Shared Memory: A Survey of Issues and Algorithms", *IEEE Computer*, Vol. 24, No. 8, pp. 52-60, Aug 1991.
- [30] A. Geist, A. Beguelin, J. Dongarra, W. Jiang, R. Manchek, V. Sunderam, "*PVM: A User's Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing*", MIT Press, 1994.
- [31] M. Snir, S. Otto, S. Huss-Lederman, D. Walker, J. Dongarra, "*MPI: The Complete Reference*", The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1996.
- [32] J.P. Kitajima, "Programação Paralela utilizando Mensagens", *Anais do XV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*, Canela, RS, Brasil, 1995.
- [33] K.M. Chaudy, J. Misra, "*Parallel Program Design: a Foundation*", Addison-Wesley, 1988.
- [34] L.R. Ford, D.R. Fulkerson, "*Flows in Networks*", Princeton University Press, USA, 1982.
- [35] "*Sistema Computacional NH2 para Análise de Confiabilidade de Sistemas de Geração/ Transmissão de Grande Porte - Manual de Metodologia*", Relatório CEPEL no. DPP/POL-137/93, 1993.
- [36] A.C.G. Melo, J.C.O. Mello, S.P. Roméro, G.C. Oliveira, R.N. Fontoura F., "Avaliação Probabilística do Desempenho do Sistema Interligado Brasileiro", *Anais do IV Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, 1994.
- [37] G. Fox, M. Johnson, G. Lyzenga, S. Otto, J. Salmon, D. Walker, "*Solving Problems on Concurrent Processors*", Vol.1, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
- [38] V.C. Barbosa, "*An Introduction to Distributed Algorithms*", The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1996.

- [39] "IBM POWERparallel Technology Briefing: Interconnection Technologies for High-Performance Computing (RS/6000 SP)", RS/6000 Division, IBM Corporation, 1997.
- [40] J.M. Marinho, "WMPI v0.9b", <http://dsg.dei.uc.pt/ fafe/w32mpi>, Universidade de Coimbra, Portugal.
- [41] R. Butler, E. Lusk, "User's Guide to the p4 Parallel Programming System", ANL-92/17, Mathematics and Computer Science Division, Argonne National Laboratory, October 1992.
- [42] CIGRÉ Task Force 38-03-10, "Power System Reliability Analysis - Volume 2 - Composite Power Reliability Evaluation", 1992.
- [43] M.V.F. Pereira, L.M.V.G. Pinto, "A New Computational Tool for Composite Reliability Evaluation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, February 1992.
- [44] R. Billinton, G. Wacker, R. Brewer, "Farm Losses Resulting from Electric Service Interruptions", *Canadian Electrical Association*, U403 Report, Montreal, Canada, 1987.
- [45] Eletrobrás, "Relatório de Pesquisa sobre Custo de Interrupção no Fornecimento de Energia Elétrica", *Relatório SCEL-GTAD-01/91*, Março 1991.
- [46] Eletrobrás, "Principais conclusões, Interpretações e Aplicações da Pesquisa sobre Custo de Interrupção", *Relatório SCEL-GTAD-01/92*, 1992.
- [47] J.C.O. Mello, A.M.L. Silva, M.V.F. Pereira, "Efficient Loss-of-Load Cost Evaluation by Combined Pseudo-Sequential and State Transition Simulation", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 2, pp. 147-154, March 1997.
- [48] W.J. Causarano, "Método de Simulação Rápida no Tempo para Avaliação da Estabilidade de Tensão", *Tese de Mestrado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Maio 1997.

# Apêndice A

## Publicações Relativas a Tese

1. Carmen L.T. Borges, Djalma M. Falcão, João C.O. Mello, Albert C.G. Melo, “Avaliação da Confiabilidade de Sistemas Compostos de Geração-Transmissão de Energia Elétrica em Computadores Paralelos”, *Anais do IX SBAC/PAD - Simpósio Brasileiro de Arquitetura de Computadores / Processamento de Alto Desempenho*, Campos do Jordão-SP, Outubro 1997.
2. Carmen L.T. Borges, Djalma M. Falcão, “A Parallelization Strategy for Power Systems Composite Reliability Evaluation”, *Proceedings of VECPAR'98 - III International Meeting on Vector and Parallel Processing*, Volume III, Porto-Portugal, Junho 1998.
3. Carmen L.T. Borges, Djalma M. Falcão, “Avaliação da Confiabilidade Composta de Sistemas de Potência usando Simulação Monte Carlo em Ambiente Computacional Paralelo”, *Colloquia on High Performance Scientific Computing*, LNCC/CNPq, Petrópolis-RJ, Agosto 1998.
4. Carmen L.T. Borges, Djalma M. Falcão, João C.O. Mello, Albert C.G. Melo, “Power Systems Composite Reliability Evaluation in a Parallel Processing Environment”, *Anais do XII CBA - Congresso Brasileiro de Automática*, Uberlândia-MG, Setembro 1998.
5. Carmen L.T. Borges, Djalma M. Falcão, “A Parallelization Strategy for Power Systems Composite Reliability Evaluation”, a ser publicado no livro *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, em 1999.

6. Carmen L.T. Borges, Djalma M. Falcão, “Parallel and Distributed Processing Applied to Electric Power Systems Composite Reliability Evaluation”, artigo aceito para apresentação no *XIX SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing*, San Antonio, Texas - USA, Março 1999.
7. Carmen L.T. Borges, Djalma M. Falcão, João C.O. Mello, Albert C.G. Melo, “Parallel Composite Reliability Evaluation using Monte Carlo Simulation”, resumo aprovado e artigo submetido ao *13th PSCC - Power Systems Computation Conference*, Trondheim - Noruega, Junho 1999.
8. Carmen L.T. Borges, Djalma M. Falcão, João C.O. Mello, Albert C.G. Melo, “The State Sampling Approach for Composite Reliability Evaluation on Parallel and Distributed Processing Environments”, artigo submetido para publicação no periódico *IEEE Transactions on Power Systems*.
9. Carmen L.T. Borges, Djalma M. Falcão, João C.O. Mello, Albert C.G. Melo, “Composite Reliability Evaluation by Sequential Monte Carlo Simulation on Parallel and Distributed Processing Environments”, artigo submetido para publicação no periódico *IEEE Transactions on Power Systems*.