

4

Análise de Confiabilidade em Sistemas de Potência

4.1.

Introdução

Qualquer sistema de potência está sujeito à falhas em seus equipamentos, que muitas vezes não podem ser previstas. Estas falhas podem comprometer a operação do sistema de potência a ponto de inviabilizar o fornecimento de energia aos consumidores finais. Entretanto, por meio da análise de índices probabilísticos do sistema, combinados com um julgamento próprio e sob critérios de decisão pré-estabelecidos, é possível buscar soluções adequadas para contornar estas falhas, de forma a minimizar o risco de interrupção no fornecimento de energia elétrica.

Estes índices são calculados por meio da técnica de análise de confiabilidade, que utiliza princípios e conceitos matemáticos fornecidos pela teoria da probabilidade. A análise de confiabilidade busca, basicamente, analisar o risco de não atendimento à demanda do sistema de potência, tanto na fase de operação, onde são avaliados os controles disponíveis no sistema, quanto na fase de planejamento, onde se analisa a necessidade de expansão dos circuitos de transmissão e da capacidade de geração.

O risco de não atendimento a demanda pode ser reduzido quando o serviço ancilar de reserva de geração é provido ao sistema. O benefício de confiabilidade proporcionado por este serviço ancilar pode ser mensurado por meio da redução nos índices de confiabilidade do sistema. Este benefício, obtido neste trabalho por meio do valor esperado de energia não suprida em um estudo de confiabilidade composta, servirá de base para o cálculo da remuneração dos geradores que provêem este serviço ancilar.

O objetivo deste capítulo é apresentar os conceitos básicos e a formulação matemática dos índices probabilísticos que compõe a análise de confiabilidade. O nível de detalhamento da análise de confiabilidade é definido de acordo com o conceito de níveis hierárquicos de confiabilidade, definido na seção 4.2. Os conceitos gerais de confiabilidade, bem como o cálculo do valor esperado de

uma função-teste, são apresentados na seção 4.3. A seção 4.4 define as principais funções-teste utilizadas no cálculo dos índices de confiabilidade.

Os principais métodos de seleção de estados dos componentes, enumeração de estados e simulação de Monte Carlo, são descritos na seção 4.5. Estes métodos serão utilizados na seção 4.6 para realizar a análise de desempenho do sistema em cada estado selecionado. A seção 4.7 apresenta um algoritmo simplificado da análise de confiabilidade utilizando o método de simulação de Monte Carlo Não-Sequencial, utilizado neste trabalho para o cálculo da remuneração dos geradores que provêm o serviço ancilar de reserva de potência. Por fim a seção 4.8 apresenta as principais conclusões obtidas neste capítulo.

4.2. Níveis Hierárquicos de Confiabilidade

Um sistema de energia elétrica pode ser dividido em três zonas funcionais: geração, transmissão e distribuição [46]. Para fins de estudos de confiabilidade, estas zonas podem ser combinadas em níveis hierárquicos, conforme mostra a Figura 4-1.

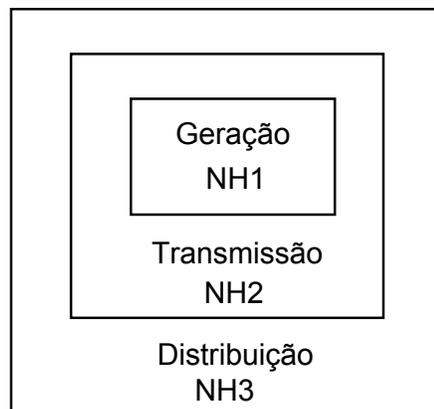


Figura 4-1 – Níveis Hierárquicos de Confiabilidade

No primeiro nível hierárquico, conhecido também por NH1, toda carga e geração estão concentradas em uma única barra. Neste nível hierárquico a rede de transmissão não é considerada, o que reduz de forma significativa a complexidade de cálculo dos índices de confiabilidade.

Entretanto, com a constante expansão dos sistemas de transmissão, as redes elétricas se tornaram cada vez mais interconectadas. Devido a este motivo, tornou-se necessário representar os circuitos de transmissão durante os estudos de confiabilidade. Este tipo de representação da rede elétrica equivale

ao nível hierárquico 2 (NH2), também denominado confiabilidade em sistemas compostos geração/transmissão, ou simplesmente confiabilidade composta. Neste nível hierárquico o cálculo dos índices de confiabilidade se torna mais complexo, pois, além do aumento no número de variáveis aleatórias, é necessário calcular o fluxo de potência para cada circuito da rede elétrica. O grau de complexidade deste problema aumenta ainda mais quando são representadas medidas corretivas que visam eliminar as violações operativas existentes no sistema de potência, formuladas por meio de problemas de otimização.

O terceiro nível hierárquico (NH3) compreende a análise conjunta de todas as zonas funcionais do sistema. Entretanto, devido à complexidade e à dimensão do problema, tradicionalmente a avaliação deste nível hierárquico é realizada de forma disjunta, onde o comportamento do sistema de distribuição é analisado em separado dos sistemas de geração e transmissão.

4.3. Conceitos Gerais

Um sistema de potência é composto por n componentes, tais como geradores, linhas de transmissão, transformadores e cargas. Cada um desses componentes possui um conjunto de estados possíveis, podendo se encontrar em qualquer um deles. Por exemplo, um gerador pode se encontrar nos estados de operação ou de falha, enquanto que as cargas podem se encontrar nos estados de carga leve, média ou pesada.

Seja um estado do sistema de potência representado pelo vetor x : [47]

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (4.1)$$

onde:

- x vetor de estados dos componentes do sistema
- x_i estado do componente i do sistema
- n número de componentes do sistema

Em geral, considera-se apenas dois estados possíveis para os componentes do sistema, estado de operação ($x_i=1$) e estado de falha ($x_i=0$), conforme mostrado na Figura 4-2:

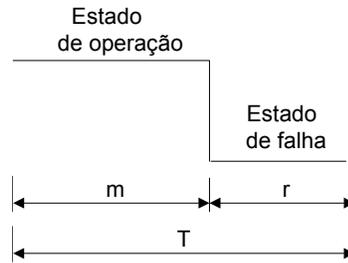


Figura 4-2 – Diagrama de Estados dos Componentes

onde:

- m tempo médio para falha ou MTTF (mean time to failure), calculado como o tempo médio em que o componente permanece no estado de operação
- r tempo médio para reparo ou MTTR (mean time to repair), calculado como o tempo médio que o componente permanece no estado de falha
- $T=m+r$ tempo médio entre falhas ou MTBF (mean time between failure), calculado como o tempo médio de ocorrência de dois estados de falha consecutivos para um componente

Dessa maneira, a probabilidade do componente i ser encontrado em um determinado estado pode ser calculada como:

$$P(x_i = 0) = TIF = \frac{r}{m+r} = \frac{r}{T} \quad (4.2)$$

$$P(x_i = 1) = \frac{m}{m+r} = \frac{m}{T} \quad (4.3)$$

onde:

- $P(x_i = 0)$ probabilidade de ocorrência do estado de falha ou taxa de indisponibilidade forçada (TIF)
- $P(x_i = 1)$ probabilidade de ocorrência do estado de operação

Estas probabilidades podem ser substituídas pelas taxas de transição dos componentes entre os dois estados, usualmente representadas por modelos de Markov [1]:

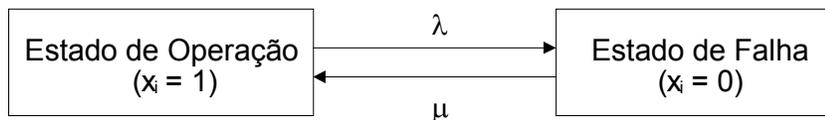


Figura 4-3 – Modelo de Markov a Dois Estados

onde:

- λ taxa de falha do componente i
- μ taxa de reparo do componente i

As taxas de falha e reparo do componente i são calculadas como:

$$\lambda = \frac{\text{número de falhas do componente}}{\text{tempo total que o componente permanece em operação}} = \frac{1}{m} \quad (4.4)$$

$$\mu = \frac{\text{número de reparos do componente}}{\text{tempo total que o componente permanece em falha}} = \frac{1}{r} \quad (4.5)$$

Assim, a probabilidade de ocorrência de cada estado do componente i pode ser calculada como:

$$P(x_i = 0) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (4.6)$$

$$\text{TIF} = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (4.7)$$

Caso as taxas de transição de cada componente x_i sejam estatisticamente independentes, é possível calcular a probabilidade do estado x do sistema como o produto das probabilidades associadas a cada estado dos componentes:

$$P(x) = \prod_{i=1}^n P(x_i) \quad (4.8)$$

onde:

n	número de componentes do sistema
x_i	estado do componente i
$P(x_i)$	probabilidade de um dado estado do componente i
x	estado do sistema, dado os estados dos n componentes
$P(x)$	probabilidade do vetor de estados x

De posse da probabilidade de ocorrência do vetor de estados x , é possível calcular índices probabilísticos de confiabilidade para o sistema. O valor destes índices equivale ao valor esperado de uma determinada função-teste $F(x)$:

$$E(F) = \sum_{x \in X} F(x) \cdot P(x) \quad (4.9)$$

onde:

$E(F)$	valor esperado da função-teste
$F(x)$	função-teste
$P(x)$	probabilidade do vetor de estados x
X	espaço de estados do vetor x

Todos os índices de confiabilidade podem ser obtidos através da fórmula (4.9), bastando apenas definir corretamente a função-teste $F(x)$.

4.4. Definição de Algumas Funções-Teste

4.4.1. Função-Teste para LOLP

O índice LOLP (Loss of Load Probability), ou probabilidade de perda de carga, avalia a probabilidade de se efetuar um corte de carga para cada estado amostrado x do sistema. Este índice pode ser obtido como o valor esperado da seguinte função-teste:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \text{ é um estado de sucesso} \\ 1, & \text{se } x \text{ é um estado de falha} \end{cases} \quad (4.10)$$

Um estado é considerado de sucesso quando todas as cargas do sistema são atendidas sem violações operativas. Um estado é considerado de falha quando algumas cargas do sistema deixam de ser atendidas, a fim de que as violações operativas sejam eliminadas.

4.4.2. Função-Teste para EPNS

A função-teste para o índice EPNS (Expected Power Not Supplied), ou valor esperado de potência não suprida, avalia o montante de corte de carga associado aos estados de falha do sistema. Este índice é calculado como o valor esperado da seguinte função-teste:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \text{ é um estado de sucesso} \\ V, & \text{se } x \text{ é um estado de falha} \end{cases} \quad (4.11)$$

onde:

V montante de corte de carga associado ao estado x

4.4.3. Função-Teste para LOLE

A função-teste LOLE (Loss of Load Expectation), ou valor esperado de horas de déficit de potência, avalia o valor esperado de tempo em que cada estado de falha irá permanecer sem atender plenamente a carga do sistema.

Esta função teste é obtida multiplicando o valor da LOLP pelo número de horas do período em estudo.

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \text{ é um estado de sucesso} \\ T, & \text{se } x \text{ é um estado de falha} \end{cases} \quad (4.12)$$

onde:

T número de horas de déficit de potência

4.4.4. Função-Teste para EENS

A função-teste EENS (Expected Energy Not Supplied), ou valor esperado de energia não suprida, avalia o valor esperado de energia que será cortada em cada estado amostrado x do sistema. Esta função teste é obtida multiplicando o valor da EPNS pelo número de horas do período em estudo.

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \text{ é um estado de sucesso} \\ V \cdot T, & \text{se } x \text{ é um estado de falha} \end{cases} \quad (4.13)$$

onde:

V montante de corte de carga associado ao estado x

T número de horas de déficit de potência

4.5. Métodos de Seleção de Estados

Nas seções anteriores foi visto que os índices de confiabilidade são obtidos como o valor esperado de uma função-teste, $E(F)$. Teoricamente, o cálculo de $E(F)$ poderia ser realizado de forma direta, enumerando todos os estados do vetor x pertencentes ao espaço de estados X e aplicando a fórmula (4.9). Entretanto, o número de estados cresce exponencialmente com o número de componentes do vetor x , fazendo com a enumeração explícita do espaço de estado se torne inviável.

Os métodos de seleção de estados têm como objetivo reduzir o número de estados simulados a uma pequena parcela do universo total que o sistema pode assumir. Dentre os diversos métodos de seleção de estados existentes, podem ser citados a Enumeração de Estados e a simulação de Monte Carlo.

4.5.1. Método de Enumeração de Estados

Este método busca selecionar o conjunto de estados a serem simulados segundo um critério misto de severidade/probabilidade. A severidade é geralmente estimada por índices de desempenho que tentam prever o impacto das contingências no sistema em questão, enquanto que a probabilidade indica a chance de ocorrência de falha do equipamento.

Considere, por exemplo, uma rede com 40 circuitos, cada um deles representado por um modelo a dois estados (“falho/operativo”). Essa rede apresentaria um total de 2^{40} estados, ou seja, mais de um trilhão de estados. A idéia desse método é, então, enumerar um subconjunto de estados e calcular os limites mínimos e máximos das estimativas. Dessa maneira, excelentes estimativas podem ser obtidas se o subconjunto for escolhido de forma adequada, de modo que os estados não analisados possuam contribuição desprezível na obtenção dos índices calculados.

Para ilustrar este método, considere um subconjunto de estados do sistema (X'), selecionado de acordo com algum critério a partir do espaço de estados do sistema (X), tal que $X' \subseteq X$. A partir deste subconjunto de estados pode-se computar os valores dos limites inferior e superior do índice LOLP, por exemplo, por meio das seguintes expressões [47]:

$$LOLP_{inf} = \sum_{x \in X'} F(x) \cdot P(x) \quad (4.14)$$

$$LOLP_{sup} = 1 - \sum_{x \in X'} [1 - F(x)] \cdot P(x) \quad (4.15)$$

O gap de incerteza da estimativa é definido pela diferença entre os limites superior e inferior do índice. Para o exemplo da LOLP tem-se:

$$\epsilon = LOLP_{sup} - LOLP_{inf} = 1 - \sum_{x \in X'} P(x) \quad (4.16)$$

Ou seja, o gap da estimativa do índice é igual ao somatório das probabilidades dos estados não classificados.

Este método é bastante eficiente quando, depois de classificados os estados que irão compor o subconjunto X' , a probabilidade dos estados não classificados é reduzida. Este caso é típico dos estudos de confiabilidade de transmissão, nos quais as indisponibilidades dos circuitos são usualmente baixas e, conseqüentemente, combinações de várias falhas simultâneas de circuitos

são muito improváveis e podem ser eliminadas, excluindo os casos onde uma falha ocorrida em um determinado circuito provoca falhas nos demais.

Entretanto, quando o número de estados que devem compor o subconjunto X' é potencialmente grande, este método pode se tornar inviável. Este caso ocorre em estudos de confiabilidade composta, onde as taxas de falha das unidades geradoras são, em geral, mais elevadas do que as dos circuitos. Nestes estudos as falhas simultâneas nas unidades geradoras possuem uma probabilidade de ocorrência considerável, e portanto não podem ser desconsideradas.

4.5.2. Simulação de Monte Carlo

Uma alternativa para estimar o valor de $E(F)$ é a simulação de Monte Carlo. A simulação de Monte Carlo pode ser classificada em duas categorias: sequencial e não-sequencial. Na primeira, os estados dos componentes do sistema são amostrados de forma sequencial, por meio de um processo estocástico que considere a transição entre os estados ao longo do tempo. Este tipo de simulação é empregue em problemas onde o tempo de duração de cada estado dos componentes possui relevância sobre os índices de confiabilidade obtidos.

A simulação não-sequencial corresponde à amostragem de eventos, ou seja, de “retratos” dos estados dos componentes do sistema. Nesta simulação se trabalha com os tempos médios de duração dos estados dos componentes. Como o tempo individual dos estados dos componentes não possui relevância para a metodologia de cálculo da remuneração dos geradores, será utilizado neste trabalho o método de simulação de Monte Carlo não-sequencial.

Uma vez conhecidas as distribuições de probabilidades dos componentes do sistema, o processo de amostragem realizado pelo método de simulação de Monte Carlo Não-Sequencial torna-se simples. O valor esperado da função-teste associada ao estados destes componentes, $E(F)$, é calculado através do seguinte estimador não-tendencioso [47]:

$$\tilde{E}(F) = \frac{1}{NE} \cdot \sum_{i=1}^{NE} F(x(i)) \quad (4.17)$$

onde:

$\tilde{E}(F)$	estimador do valor esperado $E(F)$
NE	número de estados amostrados
$x(i)$	estado amostrado i
$F(x(i))$	resultado da função-teste para o estado amostrado i

A expressão (4.17) é válida para qualquer tipo de função-teste F . Isto significa que o método de simulação de Monte Carlo não-sequencial pode produzir os mesmos índices de confiabilidade que o método de enumeração. Além disso, neste método o número de amostras NE necessárias para estimar $E(F)$ não depende do número de estados x no universo X . Ou seja, o tamanho da amostra necessária para estimar uma determinada função-teste será sempre a mesma, independente do número de barras e circuitos do sistema, conforme será demonstrado na próxima seção.

A principal limitação do método de Monte Carlo encontra-se no fato de que o esforço computacional aumenta com o quadrado da precisão desejada para o cálculo da estimativa de $E(F)$. Esta relação será apresentada na seção a seguir.

4.5.3. Cálculo da Precisão das Estimativas

Em geral o valor de $E(F)$ não é conhecido, pois os métodos de seleção de estados descritos anteriormente não utilizam o espaço de estados completo (população), e sim uma parcela dele (amostra). Assim, obtém-se uma estimativa do valor de $E(F)$, $\tilde{E}(F)$, com base na amostra adquirida.

De acordo com a amostra selecionada, o valor de $\tilde{E}(F)$ pode variar de forma aleatória. Portanto, o estimador $\tilde{E}(F)$ pode ser tratado como uma variável aleatória, calculado como a média dos NE estados amostrados de $F(x)$, onde x e $F(x)$ são também variáveis aleatórias.

Assim, assumindo-se que o estimador $\tilde{E}(F)$ é uma variável aleatória, pode-se calcular a incerteza associada à estimativa obtida em (4.17) como: [47]

$$V(\tilde{E}(F)) = \frac{V(F)}{NE} \quad (4.18)$$

Onde $V(F)$ representa a variância da função-teste, estimada por:

$$\tilde{V}(F) = \frac{1}{NE} \cdot \sum_{i=1}^{NE} [F(x(i)) - \tilde{E}(F)]^2 \quad (4.19)$$

Usualmente, a incerteza associada à estimativa é representada por um coeficiente de variação β , tal que:

$$\beta = \frac{[\tilde{V}(F)]^{0.5}}{\tilde{E}(F)} \quad (4.20)$$

Assim, reescrevendo a equação (4.18), tem-se que:

$$NE = \frac{V(F)}{[\beta \cdot \tilde{E}(F)]^2} \quad (4.21)$$

Este resultado mostra que o esforço computacional da simulação de Monte Carlo não-sequencial, dado pelo tamanho da amostra NE , não depende da dimensão ou complexidade do sistema analisado. Por outro lado, o esforço computacional depende fortemente da precisão desejada β .

Conclui-se, portanto, que o método de simulação Monte Carlo não-sequencial é o mais adequado para estudos de confiabilidade composta, onde o número de estados amostrados NE é usualmente elevado.

4.6. Análise de Desempenho

Uma vez selecionados os estados do sistema, é realizada a Análise de Desempenho do Sistema [48]. Esta fase pode ser dividida nas cinco etapas descritas a seguir.

4.6.1. Etapa de Configuração de Estados

A etapa de configuração de estados é responsável pela implementação das contingências referentes ao estado selecionado, realizando as modificações necessárias na rede elétrica do sistema.

As contingências podem ser modeladas a partir dos seguintes tipos de indisponibilidades de geração e/ou transmissão:

- Saídas forçadas independentes: a saída de dois ou mais componentes são independentes quando a saída de um deles não afeta a probabilidade de saída dos outros (ex.: falhas de circuitos simples);
- Saídas forçadas dependentes: uma única causa externa inicial resulta em saídas múltiplas de componentes, onde essas saídas não são consequência uma das outras, nem mesmo do sistema de proteção comum (ex.: falha de uma torre de transmissão que suporta dois ou mais circuitos);
- Saídas forçadas de componentes multi-terminais: são aquelas quando, além da remoção do componente falho, ocorre uma reconfiguração de parte da rede através da atuação do sistema de proteção.

4.6.2. Etapa de Pré-Solução

Na operação real de sistemas de potência, algumas alterações e ajustes preliminares no sistema são efetuados automaticamente por esquemas de proteção e controles específicos. Dessa maneira, os modelos utilizados na etapa de pré-solução procuram incluir algumas das características existentes nos controles usualmente empregados na prática.

Os algoritmos de pré-solução levam em consideração os seguintes aspectos:

- Identificação de separações elétricas na rede de transmissão (ilhamento);
- Atuação dos controles automáticos de geração;
- Corte de carga por insuficiência de geração.

4.6.3. Etapa de Solução

Nesta etapa são utilizados algoritmos de solução de fluxo de potência para a determinação dos problemas relacionados com a saída de unidades geradoras e/ou circuitos. Estes algoritmos possibilitam o cálculo da distribuição dos fluxos de potência na rede de transmissão, a fim de se avaliar potenciais problemas de sobrecarga nos circuitos e de tensão nas barras, identificando possíveis condições operativas anormais.

4.6.4. Etapa de Pós-Solução

A etapa de pós-solução consiste na monitoração de grandezas operativas do estado do sistema e identificação das falhas de acordo com um critério pré-definido. Os tipos de problemas identificados no sistema são:

- Sobrecargas em circuitos;
- Violação de tensão nas barras;
- Violação de intercâmbios entre áreas;
- Quantificação do corte de carga total devido a isolamento de barras e/ou deficiência de geração;
- Não convergência do fluxo de potência.

4.6.5. Etapa de Medidas Corretivas

Durante a análise de um estado x do sistema, procura-se classificá-lo como "sucesso" ou "falha" em função dos critérios previamente estipulados na fase de análise de desempenho do sistema. Um estado é considerado de sucesso se todas as cargas estão sendo atendidas sem nenhuma violação nos limites de operação do sistema e de carregamento em seus componentes. Em qualquer outra situação, caracteriza-se uma falha do sistema. A análise de desempenho do sistema tem como uma de suas ferramentas a etapa de medidas corretivas, capaz de determinar mudanças no ponto de operação do cenário original resultante do fluxo de potência, descrito na etapa de solução.

Tais mudanças buscam reconduzir o sistema de um estado de falha a um estado de sucesso por meio da atuação de controles, como o redespacho de potência dos geradores, modificação de tap's de transformadores, injeção de potência reativa e corte de carga. Estes controles são definidos por meio de funções-objetivo, descritas no capítulo 3.

4.7. Algoritmo de Simulação Monte Carlo Não-Sequencial

Nesta seção será apresentado um algoritmo simplificado para o método de simulação Monte Carlo não-sequencial.

Passo 1 – Inicializar o número de estados amostrados:

$$NE = 0$$

Passo 2 – Selecionar um estado $x(i) \in X$, a partir da distribuição de probabilidade $P(x)$. Incremente o número de estados amostrados:

$$NE = NE + 1$$

Passo 3 – Calcular a função-teste $F(x(i))$ para o estado amostrado $x(i)$.

Passo 4 – Estimar o valor esperado da função-teste $\tilde{E}(F)$:

$$\tilde{E}(F) = \frac{1}{NE} \cdot \sum_{i=1}^{NE} F(x(i))$$

Passo 5 – Calcular a incerteza do estimador β :

$$\beta = \frac{[\tilde{V}(F)]^{0.5}}{\tilde{E}(F)}$$

Passo 6 – Verificar a convergência do processo:

Se a incerteza é aceitável ($\beta < \text{tolerância}$) ou se o número máximo de estados amostrados foi alcançado ($NE = NE^{\max}$)

PARE

Senão

Retorne ao Passo 2.

Fim

4.8. Conclusões

Este capítulo apresentou os conceitos básicos que definem o conceito de análise de confiabilidade, como a representação de estados dos elementos do sistema por meio de Cadeias de Markov e a fórmula de cálculo para sua probabilidade de ocorrência.

A partir dos estados que os elementos do sistema podem assumir, são formuladas diversas funções-teste. Estas funções-teste, quando associadas às probabilidades de ocorrência de cada estado, irão dar origem aos principais índices de confiabilidade do sistema.

Para que o valor dos índices de confiabilidade seja o mais preciso possível, torna-se necessário amostrar todos possíveis estados que o sistema pode assumir. Como isto se torna inviável em sistemas de potência de grande

porte, foram apresentados os métodos mais utilizados para amostragem dos estados do sistema em estudos de confiabilidade: enumeração de estados e simulação Monte Carlo. Conclui-se que o método de simulação Monte Carlo é o mais eficiente para estudos de confiabilidade composta, pois é capaz de amostrar um conjunto de estados elevado com um esforço computacional reduzido.

Foi apresentado neste capítulo o método de análise de desempenho conforme utilizado pelo sistema computacional NH2 [48], desenvolvido pelo CEPEL. Este método permite que o estudo de confiabilidade composta seja aplicado a sistemas de grande porte, como o Sistema Elétrico Brasileiro.

O conhecimento dessas informações torna possível o cálculo do benefício proporcionado pelo serviço ancilar de reserva de geração ao sistema de potência. Este benefício, obtido por meio do valor esperado de energia não suprida em estudos de confiabilidade composta, servirá de base para o cálculo da remuneração dos geradores que provêem este serviço ancilar.