

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

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NO PLANEJAMENTO DE
SISTEMAS DE POTÊNCIA

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A OB
TENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA.

SETEMBRINO DE MENEZES FILHO

FLORIANÓPOLIS, MAIO-1978

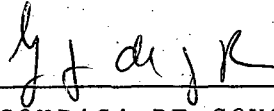
ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NO PLANEJAMENTO DE SISTEMAS
DE POTÊNCIA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
" MESTRE EM ENGENHARIA "

ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PE
LO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO.

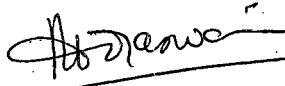


Prof. RAJAMANI DORAISWAMI, Ph.D.
ORIENTADOR



Prof. LUIZ GONZAGA DE SOUZA FONSECA, D.Sc.
COORDENADOR DO CURSO

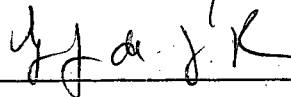
BANCA EXAMINADORA :



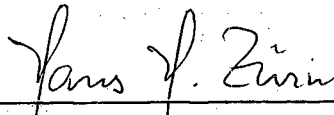
Prof. RAJAMANI DORAISWAMI, Ph.D.
PRESIDENTE



Prof. ALCIR JOSÉ MONTICELLI, Dr. Eng.



Prof. LUIZ GONZAGA DE SOUZA FONSECA, D.Sc.



Prof. HANS HELMUT ZÜRN, Ph.D.

À meus Pais e Irmãos

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Rajamani Doraiswami, a inestimável ajuda prestada na orientação deste trabalho.

Aos meus colegas, pelo incentivo e sugestões, particularmente ao Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca.

À CAPES pelo apoio financeiro.

R E S U M O

Esse trabalho consiste em uma análise de confiabilidade dos sistemas de potência de uma maneira unificada, abrangendo os aspectos de continuidade e qualidade de serviço.

O comportamento dos componentes do sistema foi representado por chaves cuja posição, caracteriza as contingências. As contingências simuladas foram, saídas de geração, saídas de linhas de transmissão, curto-circuitos e variações nas cargas. A continuidade de fornecimento de energia foi estudada para os sistemas de geração e transmissão, determinando as probabilidades dos estados pelo processo de Markov e usando a probabilidade de perda de carga como medida de confiabilidade. O comportamento dinâmico do sistema foi incluído, como critério de qualidade, estudando a estabilidade transitória pelo método de simulação. Determinou-se o desvio de frequência das máquinas para as saídas de geração e variações nas cargas e os ângulos internos para as saídas de linhas de transmissão e curto-circuito. Finalmente fez-se uma análise dos resultados considerando os aspectos da continuidade e qualidade de serviço, usando o modelo de decisão. Nesse modelo cada evento caracteriza um estado de operação do sistema, pertencente a uma região definida pelos critérios de riscos estabelecidos. Mostrou-se claramente a necessidade de incluir a qualidade de serviço na avaliação de confiabilidade.

A B S T R A C T

This work consists in analysis of reliability of Power System in unified manner considering the aspects of the continuity and the quality of service.

The component behaviour was represented by switches whose position characterize the contingencies. The contingencies like the loss of generation, the loss of lines of transmission, the short circuit and the load variations were simulated. The continuity of energy supply was studied for the generation and the transmission system after determining the probabilities of the states by Markov process and using the probability of loss of load as measure of reliability. The dynamic behaviour of the system was included, as a criteria of quality studying the transient stability by the method of simulation. The frequency deviation was determined for the case of loss of generation and load variations and the internal angles for the loss of lines and short circuit. Finally, the results were analysed using the decision model. In this model, every event characterize the state of operation of the system pertaining a region defined by the risk criterion adopted. The necessity of inclusion of quality of service in the analysis of reliability was clearly demonstrated .

S U M Á R I O

| | |
|--|----|
| GRÁFICOS E TABELAS | ix |
| SIMBOLOGIA | 1 |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 3 |
| CAPÍTULO 2 - MODELO PROBABILÍSTICO | 6 |
| 2.1. Introdução | 6 |
| 2.2. Considerações sobre o Modelo | 6 |
| 2.3. O Processo de Markov | 15 |
| 2.4. Conclusões | 19 |
| CAPÍTULO 3 - CONFIABILIDADE COMO CONTINUIDADE DE SERVIÇOS. | 20 |
| 3.1. Introdução | 20 |
| 3.2. Confiabilidade de Sistema de Geração Estática | 21 |
| 3.2.1. Modelo Probabilístico de Sistema de Ge ração | 22 |
| 3.2.2. Modelo Probabilístico de Carga | 32 |
| 3.2.3. Modelo Probabilístico de Disponibilida de de Capacidade do Sistema | 33 |
| 3.3. Confiabilidade do Sistema de Transmissão | 39 |
| 3.3.1. Representação do Sistema de Transmissão | 39 |
| 3.3.2. Considerações sobre os Métodos Existen tes | 39 |
| 3.3.3. Aplicação do Processo de Markov | 41 |
| 3.4. Conclusões | 50 |
| CAPÍTULO 4 - CONFIABILIDADE COMO QUALIDADE DE SERVIÇO | 51 |
| 4.1. Introdução | 51 |
| 4.2. Modelo Determinístico | 52 |
| 4.3. Análise da Frequência para Saídas de Geração ou variações na Carga | 54 |
| 4.4. Aplicação ao Sistema Exemplo | 56 |
| 4.5. Conclusões | 72 |
| CAPÍTULO 5 - MODELO DE DECISÃO NA ANÁLISE DE CONFIABILIDA- DE | 74 |
| 5.1. Introdução | 74 |

| | |
|---|-----|
| 5.2. Modelo de Decisão | 74 |
| 5.3. Aplicação ao Sistema Exemplo | 75 |
| 5.4. Conclusões | 79 |
| CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E SUGESTÕES PARA FUTU- ROS TRABALHOS | 84 |
| 6.1. Conclusões e Comentários | 84 |
| 6.2. Sugestões para Futuros Trabalhos | 86 |
| APÊNDICE I - PROGRAMAS PARA A CONFIABILIDADE DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO | 87 |
| APÊNDICE II- PROGRAMAS PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE | 93 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 110 |

GRÁFICOS E TABELAS

FIGURAS:

| | |
|---|----|
| 2.1 - Diagrama de transição de estados para um componente reparável | 8 |
| 2.2 - Histórico típico de um componente | 9 |
| 2.3 - Modelo de dois estados | 10 |
| 2.4 - Taxa de falha típica de um componente | 12 |
| 2.5 - Diagrama de transição | 14 |
| 3.1 - Diagrama unifilar (exemplo) | 23 |
| 3.2 - Diagrama de transição de estados para duas unidades geradoras | 26 |
| 3.3 - Curva de variação de picos de carga diários .. | 34 |
| 3.4 - Gráfico comparativo dos modelos probabilísticos de geração e de carga | 35 |
| 3.5 - Diagrama de transição para o sistema de transmissão | 45 |
| 4.1 - Frequências individuais das máquinas para várias contingências de saídas de geração | 59 |
| 4.2 - Diferenças angulares dos rotores para curtos-circuitos nas várias barras | 61 |
| 4.3 - Diferenças dos ângulos internos das máquinas para várias contingências de saídas de linhas. | 64 |
| 5.1 - Modelo de decisão | 75 |
| 5.2 - Representação do sistema para análise de confiabilidade | 76 |

TABELAS:

| | |
|---|----|
| 3.1 - Dados do sistema de geração para avaliação de confiabilidade do sistema da figura 3.1 | 25 |
| 3.2 - Modos de falhas e efeitos para o sistema de geração | 26 |
| 3.3 - Probabilidade dos estados para saídas de capacidades exatas | 28 |
| 3.4 - Probabilidades dos estados para saídas de capacidades de 0, 5, 20 e 25 MW | 28 |

| | |
|--|----|
| 3.5 - Probabilidades dos estados para saídas de capacidades de 0, 15, 20 e 35 MW | 29 |
| 3.6 - Probabilidades dos estados para saídas de capacidades de 0, 20, 20 e 40 MW | 29 |
| 3.7 - Modelo reduzido para saídas de capacidades de 0, 20, 20 e 40 MW | 32 |
| 3.8 - Níveis de pico de carga | 33 |
| 3.9 - Perda de carga esperada para saídas de capacidades de 0, 5, 20 e 25 MW | 37 |
| 3.10 - Perda de carga esperada para saídas de capacidades de 0, 15, 20 e 35 MW | 37 |
| 3.11 - Perda de carga esperada para saídas de capacidades de 0, 20, 20 e 40 MW | 37 |
| 3.12 - Dados do sistema de transmissão para avaliação de confiabilidade | 43 |
| 3.13 - Modos e efeitos de falhas para o sistema de transmissão | 44 |
| 3.14 - Probabilidade dos estados para o sistema de transmissão | 48 |
| 3.15 - Estados de falha para o sistema de transmissão | 49 |
| 4.1 - Impedâncias série e admitâncias shunts das linhas, em p.u. na base de 100 MVA | 57 |
| 4.2 - Geração e cargas previstas e tensões assumidas para o sistema da figura 3.1 | 57 |
| 4.3 - Constantes de inércia, constantes de amortecimento e reatâncias transitórias de eixo <u>di</u> reto das máquinas | 69 |
| 4.4 - Desvios de frequência para saídas de geração ou variações na carga | 69 |
| 4.5 - Diferenças dos ângulos internos das máquinas para saídas de linhas por curto-circuito ... | 70 |
| 4.6 - Diferenças dos ângulos internos das máquinas para contingências de saídas de linhas | 71 |
| 5.1 - Análise de confiabilidade para saídas de geração ou variações na carga | 80 |
| 5.2 - Análise de confiabilidade para saídas de <u>li</u> nhas de transmissão | 81 |
| 5.3 - Análise de confiabilidade para curto-circuito. | 82 |

SIMBOLOGIA

- A_i - Disponibilidade do sistema no estado i .
- B_{ij} - Susceptância de transferência entre a barra interna da i ésima e da j ésima máquina.
- C_i - Capacidade do sistema no estado i .
- D - Representação de um estado de defeito.
- D_i - Constante de amortecimento da máquina i .
- $E(d)$ - Valor esperado em dias.
- E_i - Tensão na barra interna da máquina i .
- $F(t)$ - Função de distribuição da variável aleatória t .
- F_{ij} - Coeficiente de sincronização entre a i ésima e j ésima máquina.
- $f(t)$ - Função densidade de probabilidade da variável aleatória t .
- $f(x)$ - Função da variável x .
- $h(t)$ - Função ou taxa de falha.
- G - Conjunto de falhas para o sistema de geração.
- G_{ii} - Carga equivalente na i ésima barra de geração.
- G_{ij} - Condutância de transferência entre as barras i e j .
- i - Índice representativo do elemento i .
- j - Índice representativo do elemento j .
- k - Índice representativo do elemento k .
- LOLP - Perda de carga esperada.
- M_i - Constante de inércia da i ésima máquina.
- m_i - Tempo de funcionamento do componente i .
- \bar{m} - Tempo médio de funcionamento de um componente.
- $P(A)$ - Probabilidade de ocorrência de um evento A .
- P_F - Probabilidade de falha do sistema.
- $P_i(t)$ - Probabilidade do sistema estar no estado i , no tempo t .

- $P_i'(t)$ - Derivada de probabilidade $P_i(t)$ em relação ao tempo.
 P_{m_i} - Potência mecânica fornecida a máquina i .
 P_{e_i} - Potência elétrica de saída da máquina i .
 r_i - Tempo de reparo do componente i .
 \bar{r} - Tempo médio de reparo de um componente.
 T - Conjunto de falhas para o sistema de transmissão.
 t - Representação do tempo.
 u - Representação de um estado de operação.
 ω_i - Velocidade da $i^{\text{ésima}}$ máquina relativo ao sistema de referência.
 $\dot{\omega}_i$ - Derivada de ω_i em relação ao tempo.
 $\bar{\omega}$ - Desvio de frequência em relação a uma referência de movimento.
 x - Representação de uma variável.
 \underline{x} - Representação do vetor x .
 \underline{x}^T - Transposto do vetor x .
 \dot{x} - Derivada de x em relação ao tempo.
 Y_i - Admitância própria na barra i .
 Y_{ij} - Admitância de transferência entre as barras i e j .
 Δ - Caracteriza um incremento, quando antecede uma grandeza.
 δ_i - Ângulo do rotor da $i^{\text{ésima}}$ máquina relativo a uma referência que gira a velocidade síncrona.
 $\dot{\delta}$ - Derivada de δ em relação ao tempo.
 λ_i - Taxa de falha do componente i .
 μ_i - Taxa de reparo do componente i .
 ρ_{ij} - Taxa de transição de um estado i para um estado j .

C A P Í T U L O 1

INTRODUÇÃO

O problema do fornecimento de energia elétrica, contínuo e de boa qualidade, tem se tornado mais importante com o aumento dos sistemas em tamanho e complexidade. Distingue-se, portanto, dois tipos de problemas. Um deles, é manter a continuidade na alimentação das cargas e outra é ter uma qualidade de serviço.

Esses dois problemas, normalmente, são abordados separadamente em estudo de confiabilidade quantitativa e qualitativa. Portanto a confiabilidade tem como objetivo, manter o bom funcionamento do sistema. Observa-se na bibliografia que a simples denominação confiabilidade, em geral, trata os problemas referentes a continuidade.

A manutenção da continuidade, naturalmente envolve solução probabilística, uma vez que os sistemas de potência estão sujeitos a contingências que ocorrem aleatoriamente tais como saídas de geração, saídas de linhas de transmissão, curto-circuito, variações nas cargas, etc. Um fornecimento de energia com boa qualidade, requer estudos determinísticos que indiquem como manter os níveis de tensão nas barras, variações na frequência dentro das tolerâncias específicas, não ultrapassar os limites térmicos das linhas de transmissão, manter a estabilidade do sistema ou outra condição de operação desejável.

Historicamente, na aplicação dos métodos probabilísticos em sistemas de potência, maior atenção tem sido dado ao planejamento da capacidade de geração estática (5). Tais estudos não pos

suem início bem identificado, tornando-se, no entanto, evidentes a partir de 1933 (5). Diversos trabalhos foram publicados em 1947 e atualmente existe uma vasta bibliografia sobre o assunto (2), (3), (4), (5). A partir de 1954, verificou-se um interesse crescente no planejamento de sistemas de transmissão e distribuição (4), (5). O impulso inicial, entretanto, surgiu com dois trabalhos, (12) e (14), publicados em 1964. Atualmente existem várias publicações nessa área, (5), (11), (12), (13), (14), (15) e (17), que ainda é bastante discutida quanto aos métodos utilizados.

A inclusão dos critérios de qualidade de serviço na avaliação de confiabilidade dos sistemas de potência foi sugerida em (13), para sistemas de transmissão e por outro grupo de trabalhos, (7), (24), (25) e (26), na operação do sistema, publicados a partir de 1970.

Nesse trabalho estudou-se a continuidade de fornecimento de energia, fazendo uma avaliação de confiabilidade para os sistemas de geração e transmissão. Estudou-se a estabilidade transitória e através de uma análise, mostrou-se a necessidade de incluir a qualidade de serviço, na avaliação de confiabilidade.

A confiabilidade, no planejamento, é normalmente avaliada por um conjunto de testes, chamados contingências, que o sistema deve satisfazer (29). Portanto o primeiro passo na avaliação de confiabilidade consiste na especificação de um conjunto de eventos (contingências) cuja ocorrência levaria o sistema a uma quebra de segurança (24), ou seja, uma condição de operação indesejável. No segundo passo, são tratadas as ações de controle e não foram incluídas no trabalho. As contingências simuladas foram as saídas de geração, saídas de linhas de transmissão, curto-circuito e variações na carga. Estabeleceu-se um conjunto de eventos cuja

ocorrência, levou o sistema a um estado de não fornecimento de energia ou a um grau de estabilidade inadequado, usado como critério de qualidade. O estudo foi aplicado a um sistema exemplo.

O modelo de Markov, foi apresentado no capítulo 2, e usado nos estudos probabilísticos para determinar as probabilidades dos estados.

No capítulo 3, estudou-se a continuidade na alimentação das cargas. Determinou-se a probabilidade de perda de carga para o sistema de geração e transmissão, fixaram-se os riscos satisfatórios e estabeleceu-se um conjunto de eventos que levaram o sistema a estados de operação indesejados.

No capítulo 4, estudou-se a estabilidade transitória, através do método de simulação, usando a equação de oscilação das máquinas, como modelo. Determinaram-se, os desvios de frequência para saídas de geração ou variações nas cargas e a diferença entre os ângulos internos das máquinas, para saídas de linhas de transmissão e curto-circuito. Fixaram-se os riscos aceitáveis e estabeleceu-se um conjunto de eventos que levaram o sistema a um grau de estabilidade inadequado.

No capítulo 5, fez-se uma análise dos resultados para o exemplo, considerando a continuidade e/ou a estabilidade transitória. Representou-se o comportamento dos componentes do sistema, através de chaveamentos e usou-se o modelo de decisão como uma maneira unificada de tratar a confiabilidade, incluindo a qualidade de serviço.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões, comentários e sugestões para futuros trabalhos.

C A P Í T U L O 2

MODELO PROBABILÍSTICO

2.1. Introdução

Nesse capítulo apresenta-se o modelo probabilístico para o estudo da confiabilidade, como continuidade de serviço. Como modelo probabilístico adotou-se o modelo de Markov, pela facilidade e exatidão na formulação e considerando que existe um procedimento geral e sistemático para a solução numérica das equações de Markov. Tal procedimento, consiste em reorganizar as equações relacionando as probabilidades de estado do sistema em forma de um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem, que podem ser resolvidas por técnicas largamente usadas em processo estocásticos e controle automático (1).

2.2. Considerações sobre o Modelo Probabilístico

Os modelos de Markov descrevem funções de duas variáveis aleatórias, o estado do sistema e o tempo de observação. Em avaliação de confiabilidade de sistemas de potência, o sistema é considerado discreto no espaço e contínuo no tempo. Portanto o modelo de estados discretos, contínuo no tempo é aplicável (2).

Foi considerado que os componentes do sistema assumem uma seqüência de estados de funcionamento e reparo de acordo com o

diagrama de transição de dois estados na figura 2.1 , que ilustra o caso para um componente reparável e mostra as possibilidades de transição de um estado para outro.

A figura 2.2 mostra um histórico típico para um componente ou seja, uma realização da seqüência de estados possíveis em função do tempo. O tempo gasto no estado 1, durante uma ocupação particular daquele estado, é classificado como tempo de funcionamento. O tempo gasto no estado 2, durante uma ocupação particular é chamado tempo de reparo. Tais tempos são variáveis aleatórias que obedecem a leis probabilísticas que governam o processo estocástico (3),(4). Um histórico típico de um componente, poderia ser uma série de períodos, de funcionamento, separados por períodos de falhas como na figura 2.2. Se os períodos de funcionamento forem considerados por um longo tempo, eles apresentam uma duração média constante, \bar{m} , chamada tempo médio para falhas (MTTF). De forma semelhante pode-se observar a duração de cada saída de funcionamento em um grande número de falhas e determinar \bar{r} , o tempo médio de saída, constante. Esse comportamento foi ilustrado na figura 2.3. O termo tempo médio entre falhas (MTBF) é usado para indicar o ciclo médio de tempo entre falhas ou seja, corresponde a um ciclo de tempo médio completo, funcionamento e reparo.

Considerando o tempo de funcionamento e o tempo para reparo como variáveis aleatórias, uma maneira de especificar leis de probabilidade para essas variáveis, é através da função distribuição.

A distribuição mais frequentemente usada, em avaliação de confiabilidade de sistemas de potência, é a exponencial (3) de finida pela equação (2.1), para $\lambda > 0$.

FIGURA 2.1 - DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS, PARA UM COMPO_NENTE REPARÁVEL

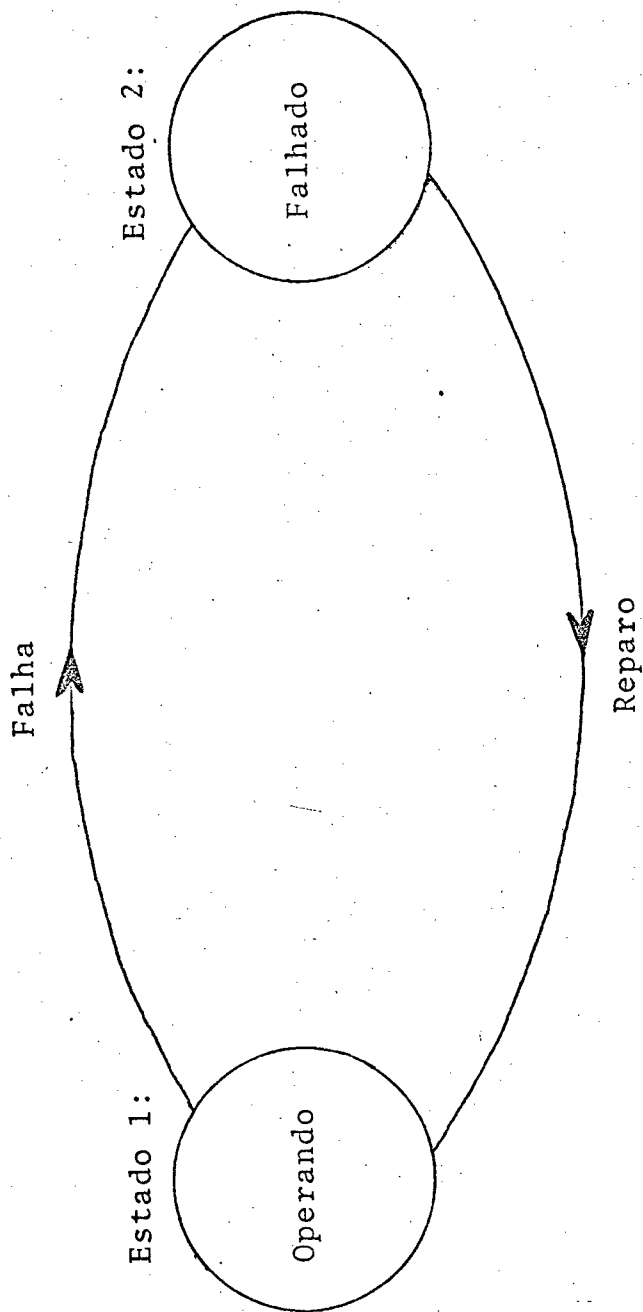


FIGURA 2.2 - HISTÓRICO TÍPICO DE UM COMPONENTE

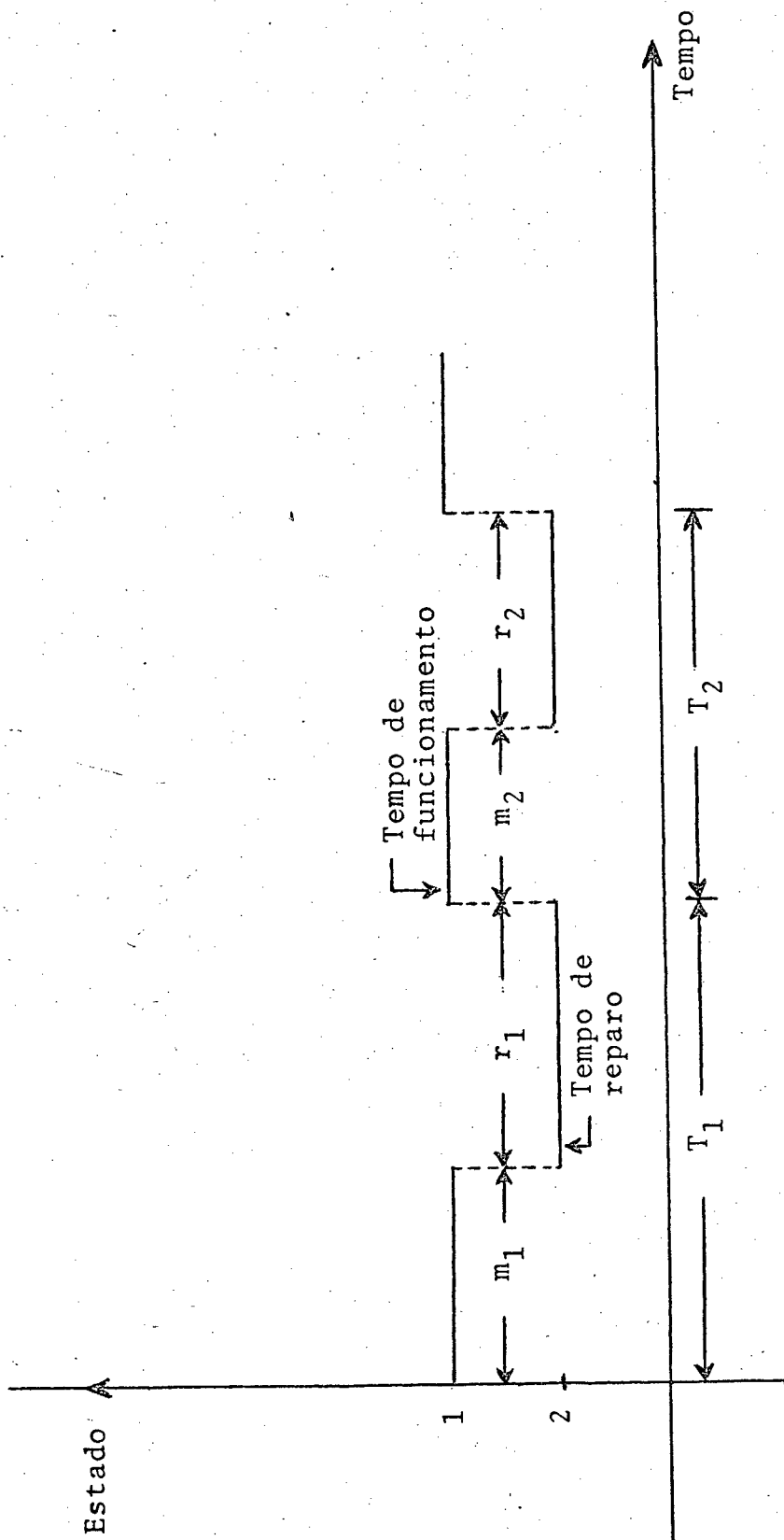
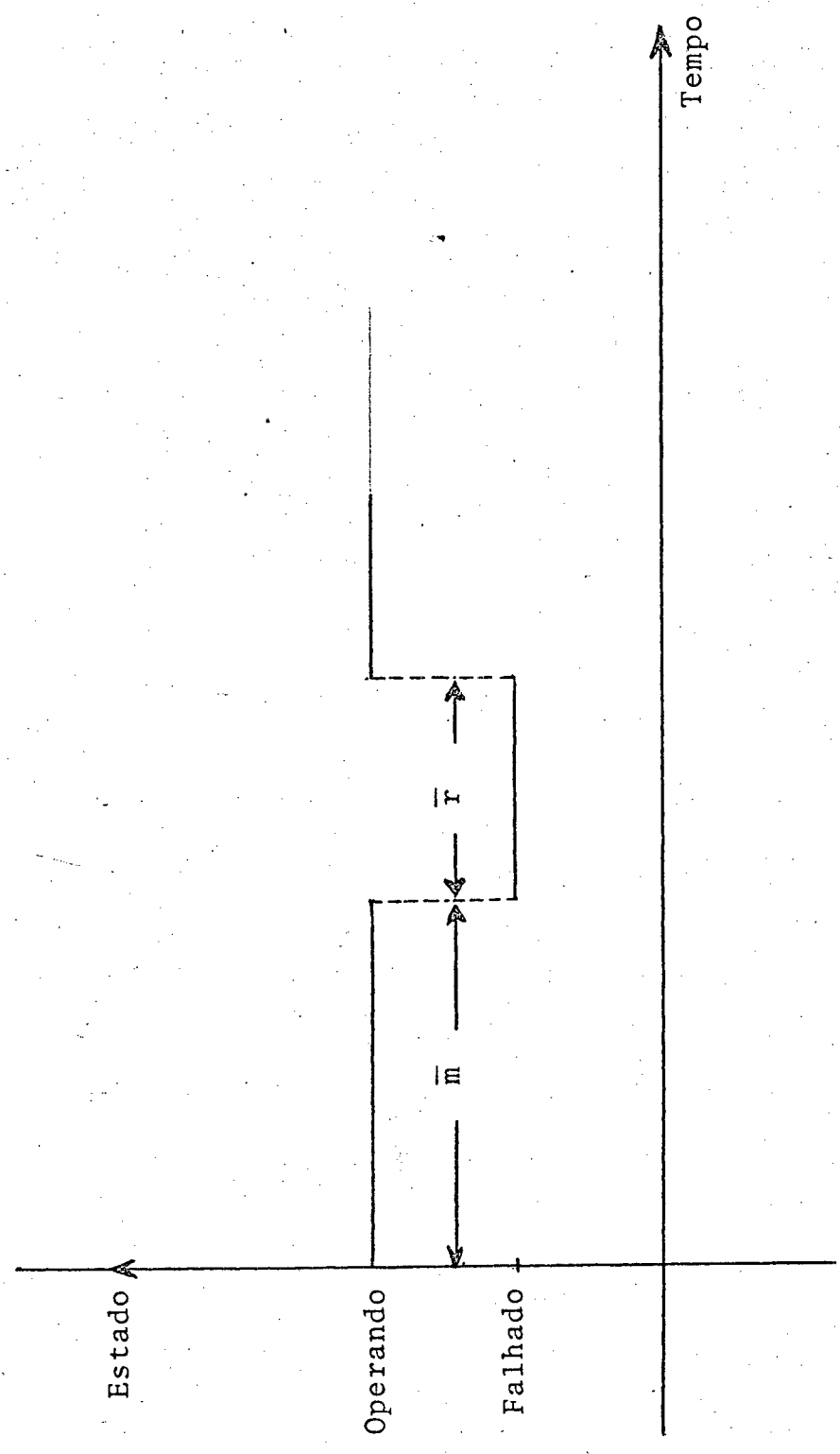


FIGURA 2.3 - MODELO DE DOIS ESTADOS



$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (2.1)$$

A equação (2.1) apresenta um único parâmetro λ , que uma vez conhecido, especifica completamente a distribuição, e a probabilidade de qualquer evento de interesse pode ser calculada (3).

As expressões mais importantes usadas em estudo para sistemas de potência são as expressões das probabilidades de um componente funcionar ou de falhar em um período de tempo especificado.

A experiência tem mostrado que a característica de vida de um componente obedece a curva da taxa de falha em relação a sua idade (2), (3), (5), mostrada na figura 2.4 e conhecida como curva da banheira. O gráfico apresenta três partes distintas. A primeira (I) é a fase inicial em que o componente é novo e tem uma alta taxa de falhas devido a defeito de fabricação que diminui gradualmente até a fase II. Esta fase corresponde ao período de vida normal, onde a taxa é relativamente pequena e constante e as falhas são causadas por fatores independentes da idade do componente.

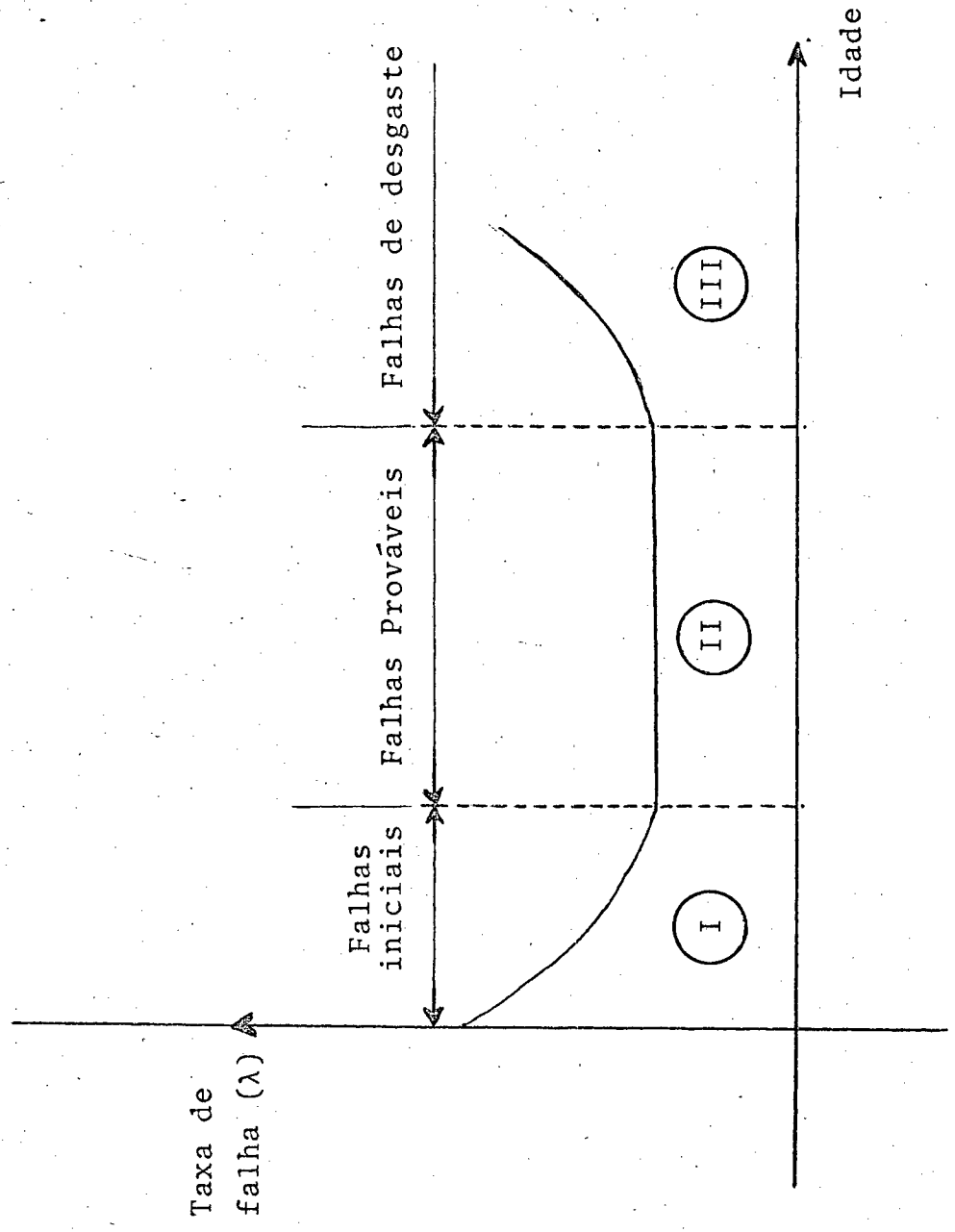
Finalmente na fase III, o período de desgaste, observa-se um aumento da taxa de falha com a idade.

A vida normal de um componente pode ser prolongada por meio de uma boa manutenção. Concordando com essa exposição uma medida mais lógica da tendência para falha é a função ou taxa de falha definida (2), (5) pela equação (2.2).

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.2)$$

onde $f(t)$ e $F(t)$ são funções densidade de falha e de distribuição

FIGURA 2.4 - TAXA DE FALHA TÍPICA DE UM COMPONENTE



ção, respectivamente. Como $1 - F(t)$ é a probabilidade de sobrevivência no tempo t , ou seja a confiabilidade, $h(t)dt$ é aproximadamente a probabilidade condicional de que um equipamento que funcionou t horas sem falhar, falhará nas próximas dt horas. Para a distribuição exponencial, demonstra-se (2), (5), (6) que

$$h(t) = \lambda \quad (2.3)$$

A equação (2.3) mostra uma propriedade chave da distribuição exponencial que apresenta uma tendência de falha constante. Também justifica porque o parâmetro λ , é chamado taxa de falha.

Mostra-se (4), usando conceitos probabilísticos, que para a distribuição assumida o tempo médio para falhas é igual ao inverso da taxa de falha. Portanto $\bar{m} = \frac{1}{\lambda}$. De forma semelhante mostra-se (4), que o tempo médio para reparo é igual ao inverso da taxa de reparo μ , ou seja $\bar{r} = \frac{1}{\mu}$.

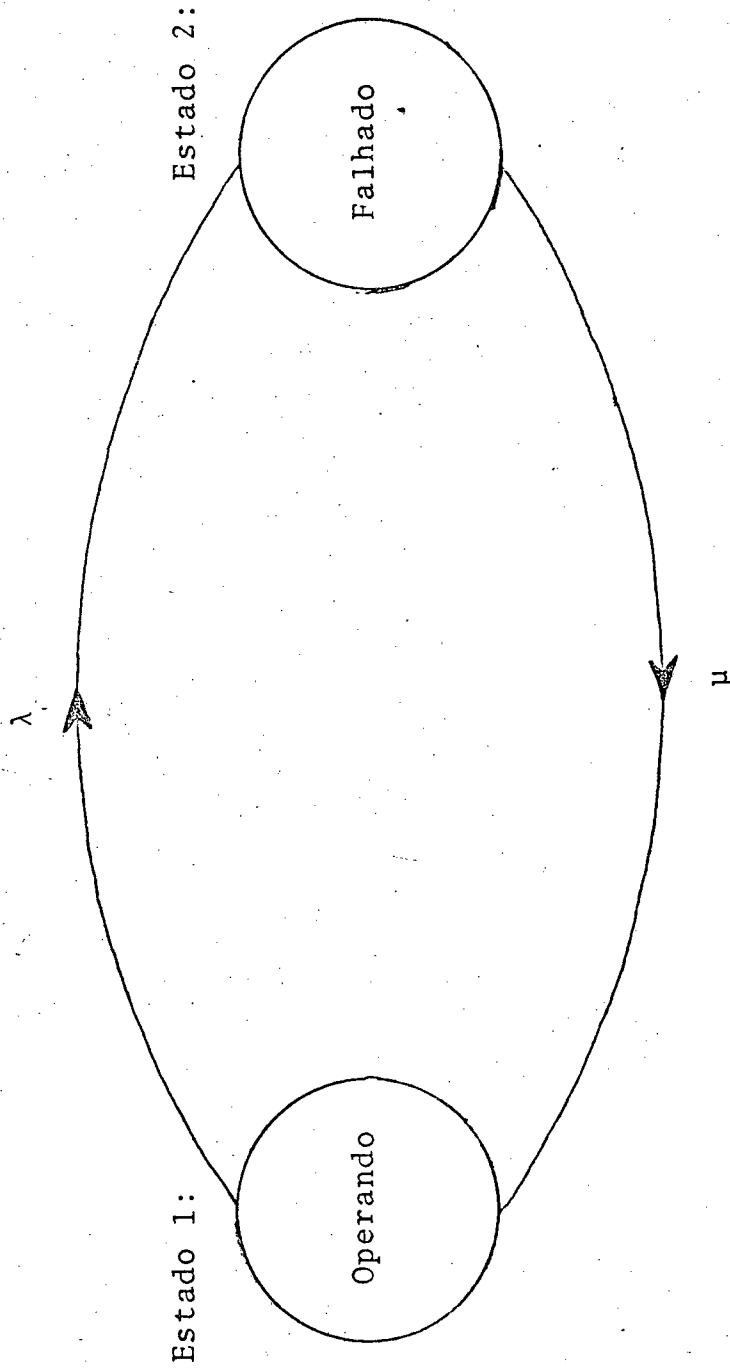
Portanto, considerar os componentes de um sistema funcionando no período de vida normal, com taxa de falha constante, significa admitir seus comportamentos descritos por uma distribuição exponencial (2), (3), (6).

Para os objetivos propostos é importante destacar as seguintes considerações:

1. Os componentes dos sistemas de potência assumem dois estados em operação ou em falha. Não se considera as saídas parciais, nem a manutenção preventiva. Portanto as taxas de saídas são referentes apenas as saídas forçadas de serviço.
2. As taxas de transição de estados λ e μ são constantes.

Esse comportamento foi ilustrado no diagrama de transi

FIGURA 2.5 - DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO



ção da figura 2.5.

2.3. O Processo de Markov

O processo de Markov homogêneo de estado discreto de transição contínua apresenta as seguintes propriedades ⁽³⁾:

1. O sistema é caracterizado em um dos estados de um conjunto, mutuamente exclusivo, coletivamente exaustivo, de estados discretos S_1, S_2, \dots, S_n , a qualquer tempo.
2. As mudanças de estados são possíveis a qualquer instante.
3. A probabilidade de mudança de um estado depende somente do estado atual. Isso significa que a probabilidade de saída de um estado independe do seu histórico, tal como estados anteriormente ocupados e tempo gasto no estado atual. Essas condições implicam que os tempos de residências no estado são exponencialmente distribuídos ⁽³⁾, uma consideração real frequentemente feita em avaliação de confiabilidade de sistemas de potência.
4. É desprezível a probabilidade de ocorrer mais que uma mudança de estados, em um pequeno intervalo de tempo.

O desenvolvimento matemático do modelo para o processo de Markov considera ⁽³⁾, ⁽⁷⁾:

$P_i(t)$ = probabilidade de que o sistema esteja no estado i no tempo t .

ρ_{ij} = taxa de saída de um estado i para um estado j .

$\rho_{ij} \cdot \Delta t$ = probabilidade de transição do estado i para o estado j no intervalo de tempo Δt .

A probabilidade de encontrar um sistema de n estados em algum estado i no tempo $t + \Delta t$, pode ser escrito como um conjunto de n equações simultâneas em termos das probabilidades $P_i(t)$ (3), (8). Cada equação do conjunto é da forma da equação (2.4).

$$P_i(t + \Delta t) = P_i(t) \left[1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ij} \Delta t \right] + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_j(t) \cdot \rho_{ji} \Delta t \quad (2.4)$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

A equação (2.4) pode ser melhor explicada, entendendo-se o primeiro termo como a probabilidade do sistema, estando no estado i no tempo t , não abandoná-lo no intervalo Δt . O segundo termo significa a probabilidade do sistema, estando em qualquer outro estado j no tempo t , mudar para o estado i durante o intervalo Δt .

A equação (2.4) pode ser reescrita na forma:

$$\frac{P_i(t + \Delta t) - P_i(t)}{\Delta t} = - P_i(t) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_j(t) \rho_{ji} \quad (2.5)$$

Na equação (2.5), tomando-se os limites quando Δt se aproxima de zero, obtêm-se um conjunto de equações diferenciais representado na equação (2.6), abaixo.

$$\frac{d P_i(t)}{dt} = P'_i(t) = - P_i(t) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_j(t) \rho_{ji} \quad (2.6)$$

obtem-se a equação (2.7), escrevendo a equação (2.6) na forma matricial.

$$\begin{pmatrix} P_1'(t) \\ P_2'(t) \\ \vdots \\ P_n'(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_{j=2}^n \rho_{1,j} & \rho_{2,1} & \dots & \dots & \rho_{n,1} \\ \rho_{1,2} & -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^n \rho_{2,j} & \dots & \dots & \rho_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{1,n} & \rho_{2,n} & \dots & \dots & -\sum_{j=1}^{n-1} \rho_{n,j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ \vdots \\ P_n(t) \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Para condições iniciais apropriadas, a equação (2.7) pode ser resolvida, fornecendo-se as probabilidades de estados do sistema. Uma solução geral para as probabilidades de estados se torna difícil quando se considera um grande número de estados. Soluções numéricas podem ser facilmente encontradas usando métodos numéricos (1), (2), (3).

As probabilidades obtidas pela solução da equação (2.7) são dependentes do tempo e conhecidas como probabilidade transitória dos estados. Tais probabilidades têm aplicação na avaliação de segurança para planejamento a curto prazo da operação dos sistemas de potência. Com o tempo tendendo para o infinito, as probabilidades dos estados alcançam valores constantes. São chamadas probabilidades de regime permanente e têm aplicações em estudos de planejamento a longo prazo. Portanto, tratando-se de planejamento a longo prazo, uma forma de encontrar as soluções em regime permanente para as probabilidades dos estados é achar a solução geral

da equação (2.7) e tomar o limite quando o tempo se aproxima do infinito. Outra maneira mais fácil, usada nesse trabalho, é considerar um novo conjunto de equações ⁽³⁾, onde uma delas tem a forma apresentada na equação (2.8).

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1 \tag{2.8}$$

De acordo com a equação (2.8), com certeza o sistema estará em algum estado. As outras n-1 equações que faltam para formar o novo conjunto são obtidas, tomando quaisquer n-1 equações do conjunto (2.7).

Considerando as probabilidades dos estados iguais a seus valores em regime permanente e fazendo os termos P_i^1 iguais a zero, obtem-se um novo conjunto, na equação (2.9), escrita na forma matricial.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_{j=2}^n \rho_{1,j} & \rho_{2,1} & \dots & \rho_{n-1,1} & \rho_{n,1} \\ \rho_{1,2} & -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^n \rho_{2,j} & \dots & \rho_{n-1,2} & \rho_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \rho_{1,n-1} & \rho_{2,n-1} & \dots & -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n-1}}^n \rho_{n-1,j} & \rho_{n,n-1} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ P_n \end{pmatrix} \tag{2.9}$$

A equação (2.9), quando resolvida, fornece as probabilidades em regime permanente para os vários estados. Sua solução é um

problema de álgebra matricial.

2.4. Conclusões

Nesse capítulo foi estabelecido que os componentes de um sistema, obedecem ao modelo de dois estados e apresentam taxas de falhas e reparo, constantes. Foi descrito o processo de Markov e apresentadas as equações matemáticas correspondentes ao modelo probabilístico. Usando o modelo da equação (2.9) e atribuindo valores numéricos para as taxas de transição, no próximo capítulo, determinam-se as probabilidades de regime permanente para um sistema de geração estática e para um sistema de transmissão.

C A P Í T U L O 3

CONFIABILIDADE COMO CONTINUIDADE DE SERVIÇO3.1. Introdução

Nesse capítulo estuda-se a confiabilidade dos sistemas de geração estática e transmissão com o objetivo de manter a continuidade de fornecimento de energia nos pontos de carga. É estabelecido um conjunto de estados em que o sistema falha, mediante contingências de saídas de geração, saídas de linhas de transmissão e variações na carga. O estudo foi limitado a contingências simples e duplas (7).

Para estabelecer um grau de confiabilidade, foram usados métodos probabilísticos que permitem considerar as incertezas características do sistema, tais como: o tempo de ocorrência de falhas, tempo para reparo de falhas e a intensidade de pico de carga.

A medida de confiabilidade adotada para o sistema de geração foi a probabilidade de perda de carga (LOLP) e para o sistema de transmissão adotou-se a probabilidade de interrupção em um ponto de carga especificado.

Os estudos foram realizados para um sistema de potência, considerado como exemplo.

Os sistemas de geração e transmissão, foram representados em diagramas de espaços de estados pelo modelo de dois estados. As probabilidades dos estados foram calculados pelo processo de Markov, descrito no capítulo 2 e usando um computador digital

PDP 11/40.

3.2. Confiabilidade do Sistema de Geração Estática

Nessa secção é apresentado um método para determinar uma medida de confiabilidade do sistema de geração estática, e estabelecer um conjunto de estados de falhas para o sistema, mediante contingências de saídas de geração e variações na carga.

Em sistemas de geração são usuais as abordagens de probabilidade de perda de carga (LOLP) e a de duração e frequência. Esses métodos são probabilísticos e fornecem uma base analítica para determinar os requisitos de capacidade de geração.

Embora não se possa afirmar a superioridade de um dos métodos, em relação ao outro, já que em geral ambos apresentam resultados idênticos em estudos de planejamento ⁽³⁾, adotou-se o método de probabilidade de perda de carga, pela sua simplicidade e frequente aplicação na avaliação de confiabilidade de sistemas de geração estática ⁽³⁾. Esse método consiste em calcular a probabilidade de que a capacidade de geração, não seja suficiente para alimentar o pico de carga esperado, em um período de tempo especificado. O índice obtido é apenas uma esperança matemática. Basicamente essa técnica combina as probabilidades de saídas de geração com o número de unidades de tempo em que ocorre uma perda de carga fundamentando-se nos seguintes passos básicos ⁽²⁾:

1. Formação de um modelo probabilístico do sistema de geração.
2. Formação de um modelo probabilístico da carga ou modelo de demanda.

3. Desenvolvimento de um modelo probabilístico de disponibilidade de capacidade do sistema, ou modelo de reserva de geração, combinando os modelos probabilísticos de geração e de carga.

O método de probabilidade de perda de carga para o sistema de geração estático é descrito, usando a formação desses modelos probabilísticos, na ordem estabelecida para os vários passos. Um exemplo foi inserido no contexto, para facilitar a compreensão, entretanto uma descrição mais geral, pode ser obtida na referência (4).

O exemplo, foi representado na figura 3.1.

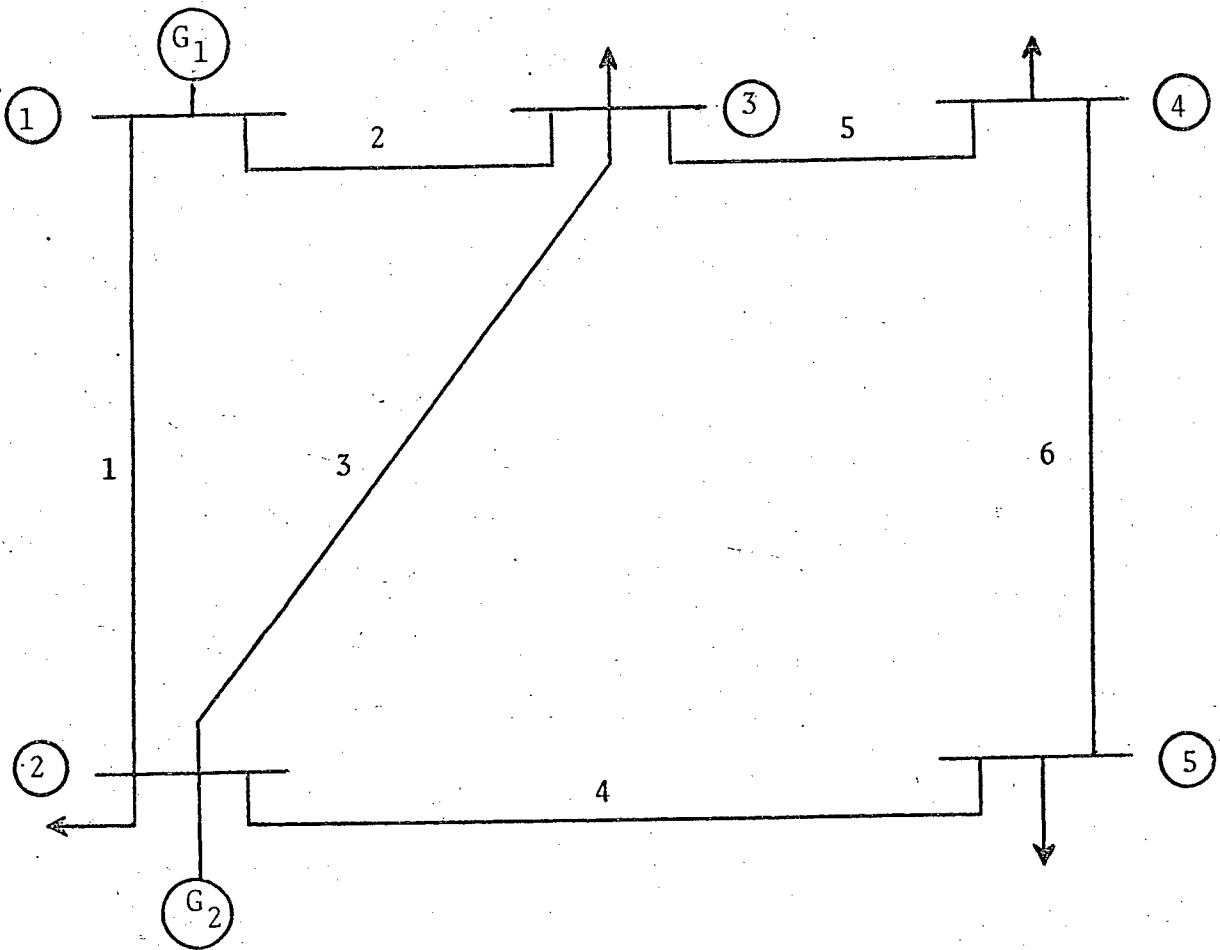
3.2.1. Modelo Probabilístico do Sistema de Geração

A modelagem de um sistema de geração consiste, basicamente na formação daquilo que é conhecido na literatura como tabela de probabilidade de saída de capacidade. As máquinas são consideradas conectadas em paralelo. Cada unidade é definida por uma dada capacidade máxima e por um comportamento padrão, a longo prazo, caracterizado pela ocorrência do ciclo disponível - reparo pelo qual ela passa (8). Essa tabela é montada com a ajuda das taxas de falhas individuais, λ e das taxas de reparos individuais, μ . O objetivo é calcular a probabilidade associada a cada estado de saída de capacidade.

As taxas de falhas e de reparos, foram supostas constantes o que enquadra a descrição do estado da unidade no processo de Markov, explicado no capítulo 2.

A seguir é apresentada uma descrição de vários passos pa

FIGURA 3.1 - DIAGRAMA UNIFILAR (EXEMPLO)



ra modelagem de um sistema de geração em forma de tabela de probabilidade de saída de capacidade. Foram usadas as taxas, de falha, λ e de reparo, μ , da tabela (3.1), para o sistema representado na figura 3.1, contendo duas unidades geradoras de capacidades respectivas, 130 MW e 40 MW.

Considerando que cada unidade assume apenas dois estados, funcionando ou em falha, o número total de estados pode ser enumerado como 2^n , onde n é o número de unidades.

Para o exemplo da figura 3.1, com duas unidades, obtêm-se os estados listados na tabela (3.2) que mostra os modos de falhas das unidades. O estado da unidade, foi representado de acordo com a bibliografia (3), ou seja:

U; significa a unidade em funcionamento, (UP) e D, a unidade em falha (DOWN).

Os estados foram relacionados em forma de diagrama de transição de estado na figura (3.2). Esse diagrama é um esquema para melhor visualizar os estados do sistema e a forma que esses estados estão relacionados através das falhas e reparos das várias unidades. Afim de melhor esclarecer, considerou-se como exemplo, o estado 2 onde existe apenas a unidade 1 em falha e a outra em funcionamento. Se a unidade 1, for reparada através de uma taxa de reparo correspondente, μ_1 , o sistema retorna ao estado 1, com a unidade agora funcionando. É possível que a unidade 2 em funcionamento no estado 2, falhe, através de uma taxa de falha λ_2 , o que corresponde a uma transição do sistema para o estado 4.

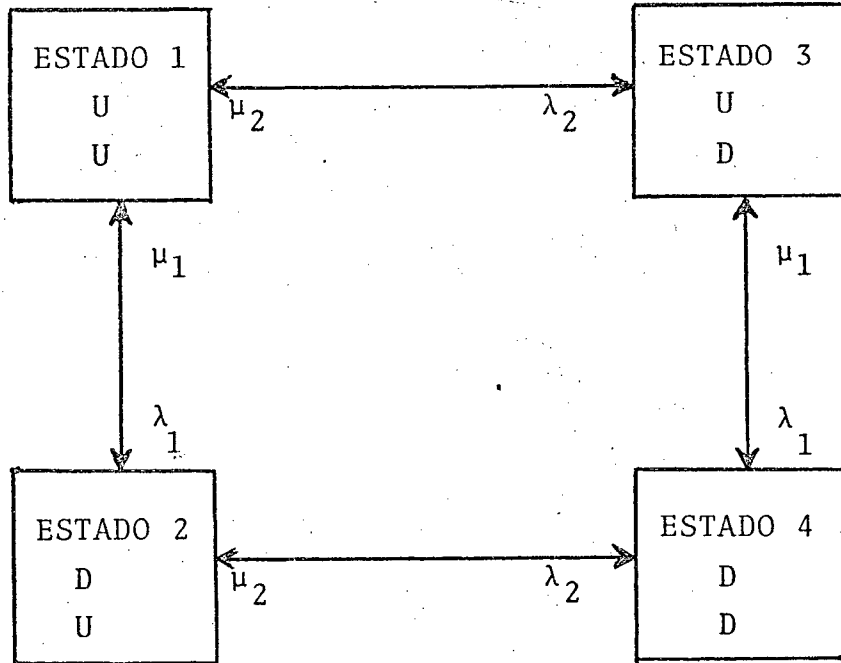
TABELA 3.1 - DADOS DO SISTEMA DE GERAÇÃO PARA AVALIAÇÃO
DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA DA FIGURA 3.1

| UNIDADE Nº | Nº DE MÁQUINAS | CAPACIDADE DE CADA UNIDADE (MW) | CAPACIDADE TOTAL NA BARRA (MW) | TIPOS DE UNIDADES | TAXA DE FALHA (λ) falha/dia | TAXA DE REPARO (μ) reparo/dia |
|---------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|--|--|
| 1 | 7 | 5 | 130 | Hidro | $\lambda_1 = 0,0014$ | $\mu_1 = 0,274$ |
| | 1 | 15 | | Hidro | | |
| | 4 | 20 | | Hidro | | |
| 2 | 2 | 20 | 40 | Térmica | $\lambda_2 = 0,003$ | $\mu_2 = 0,20$ |

TABELA 3.2 - MODOS DE FALHAS

| Nº DA UNIDADE \ ESTADOS | ESTADOS | | | |
|-------------------------|---------|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | U | D | U | D |
| 2 | U | U | D | D |

FIGURA 3.2 - DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS PARA DUAS UNIDADES



De acordo com o modelo probabilístico do capítulo 2 e aplicando a equação (2.9) ao sistema de geração da tabela (3.1), obteve-se a equação (3.1).

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \mu_1 & \mu_2 & 0 \\ \lambda_1 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 & \mu_2 \\ \lambda_2 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) & \mu_1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Para os valores numéricos das taxas de transição dados na tabela (3.1), as probabilidades de estados foram calculadas resolvendo o problema por meio de álgebra matricial. A solução foi obtida usando um computador digital PDP 11/40, cujo programa consta no Apêndice I.

Os resultados foram listados na tabela (3.3), que é constituída das probabilidades dos estados de capacidades exatas.

Para o sistema de geração da tabela (3.1), o estudo de confiabilidade limitou-se a contingências simples e duplas. Como contingências simples, estudou-se a confiabilidade para uma saída correspondente a capacidade total de cada máquina componente da unidade, ou seja na unidade 1, as saídas foram de 5 MW, 15 MW e 20 Mw. Para a unidade 2, as saídas foram de 20 MW correspondente a capacidade total de cada máquina componente daquela unidade.

Na simulação de contingências duplas, combinou-se as saídas correspondentes a cada máquina da unidade 1 e da unidade 2, ou seja, as capacidades de saídas foram de 25MW, 35MW e 40MW. Os resultados foram listados nas tabelas (3.4), (3.5) e (3.6), que são cons-

TABELA 3.3 - PROBABILIDADES DOS ESTADOS PARA SAÍDAS DE CAPACIDADES EXATAS

| ESTADO Nº | PROBABILIDADE DE ESTADOS |
|-----------|--------------------------|
| 1 | 0,980213 |
| 2 | 0,00500839 |
| 3 | 0,0147032 |
| 4 | 0,00007513 |

TABELA 3.4 - PROBABILIDADES DOS ESTADOS PARA SAÍDAS DE CAPACIDADE DE 0, 5, 20 e 25 MW.

| ESTADO Nº | SAÍDA DE CAPACIDADE (MW) | CAPACIDADE DISPO NÍVEL (MW) | PROBABILIDADE DE ESTADOS |
|-----------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | 0 | 170 | 0,980213 |
| 2 | 5 | 165 | 0,00500839 |
| 3 | 20 | 150 | 0,0147032 |
| 4 | 25 | 145 | 0,00007513 |

TABELA 3.5 - PROBABILIDADES DOS ESTADOS PARA SAÍ
DAS DE CAPACIDADES DE 0, 15, 20 e
35 MW.

| ESTADO Nº | SAÍDA DE CAPACI DADE (MW) | CAPACIDADE DIS PONÍVEL (MW) | PROBABILIDADE DE ESTADOS |
|--------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0 | 170 | 0,980213 |
| 2 | 15 | 155 | 0,00500839 |
| 3 | 20 | 150 | 0,0147032 |
| 4 | 35 | 135 | 0,00007513 |

TABELA 3.6 - PROBABILIDADES DOS ESTADOS PARA SAÍ
DAS DE CAPACIDADES DE 0, 20, 20 e
40 MW.

| ESTADO Nº | SAÍDA DE CAPACI DADE (MW) | CAPACIDADE DIS PONÍVEL (MW) | PROBABILIDADE DE ESTADOS |
|--------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0 | 170 | 0,980213 |
| 2 | 20 | 150 | 0,00500839 |
| 3 | 20 | 150 | 0,0147032 |
| 4 | 40 | 130 | 0,00007513 |

tituídas das saídas de capacidade, disponibilidades correspondentes e probabilidades dos estados respectivos.

O aumento do número de estados é um dos problemas existentes em estudos de confiabilidade de sistemas de potência⁽⁵⁾. Foram usadas taxas equivalentes para cada unidade, ao invés de cada máquina como uma simplificação para obter uma redução considerável do número de estados. Nos foram consideradas ocorrências de contingências duplas em uma mesma unidade, entretanto esse problema pode ser resolvido, discretizando as capacidades de geração, nos níveis de saídas desejados.

MODELO REDUZIDO

Na construção das tabelas de probabilidades dos estados de capacidades exatas é possível existirem estados com capacidades idênticas, formadas por diferentes combinações de unidades. Do ponto de vista de diagrama de transição, não existe relacionamento entre esses estados. O que existe são maneiras pelas quais um sistema, em determinado instante, pode mudar de um estado de capacidade exata para outro com a mesma capacidade disponível. Isto significa ter uma máquina reparada e outra falhar no mesmo instante. A probabilidade dessa ocorrência é de segunda ordem. É tão improvável que pode ser ignorada em relação a um evento simples⁽⁸⁾. Portanto os dois estados de mesma capacidade ser agrupados como estados isolados no tempo (4), (8).

Esses estados com saídas de capacidades idênticas podem ser combinados para formar um novo estado, chamado fundido, e o sistema será representado por um modelo reduzido, que permite a construção de tabelas de disponibilidade de capacidades exatas, não redundantes.

Seja i , um índice associado aos estados de mesma capaci-

dade disponível e k , um índice representativo do estado fundido.

As expressões (3.2) e (3.3) se destinam à formação do modelo reduzido.

$$\text{A capacidade do estado } k \text{ é: } C_k = C_1 = C_2 = \dots = C_i \quad (3.2)$$

$$\text{A probabilidade associada ao estado } k \text{ é: } P_k = \sum_{i=1}^n P_i \quad (3.3)$$

onde n é número de estados com mesma capacidade.

A capacidade de saída do novo estado fundido é, claramente, a mesma dos estados idênticos individuais e sua probabilidade é dada pela soma das probabilidades dos estados idênticos individuais de acordo com as leis básicas de probabilidade.

Analisando as tabelas (3.4) e (3.5), observa-se que elas não apresentam estados com capacidades idênticas, uma vez que as saídas de capacidades são todas diferentes. Nesse caso o modelo reduzido não se faz necessário e seria o mesmo que aquele com saídas de capacidades exatas. Na tabela (3.6), os estados 2 e 3, representam capacidades idênticas e podem ser fundidos em um único estado. Portanto, usando os dados da tabela (3.6), nas expressões (3.2) e (3.3), obteve-se o modelo reduzido correspondente, na tabela (3.7).

TABELA 3.7 - MODELO REDUZIDO PARA SAÍDAS DE CAPACIDADES
DE 0, 20, 20 e 40 MW.

| ESTADO Nº | SAÍDA DE CAPACIDADE (MW) | CAPACIDADE DIS PONÍVEL (MW) | PROBABILIDADES DE ESTADOS |
|--------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 1 | 0 | 170 | 0,980213 |
| 2 | 20 | 150 | 0,0197116 |
| 3 | 40 | 130 | 0,00007513 |

As tabelas (3.4), (3.5) e (3.7), constituem o modelo probabilístico do sistema de geração estática, para os casos estudados, e serão usados na formação do modelo probabilístico de disponibilidade de capacidade de sistema.

3.2.2. O Modelo Probabilístico de Carga

Em planejamento de sistemas de geração foi observado que as cargas podem ser representadas convenientemente pelas condições de picos diários (9).

A carga foi incluída, considerando na tabela (3.8), os níveis de pico de carga para um período de 20 dias.

TABELA 3.8 - NÍVEIS DE PICO DE CARGA

| NÍVEL DE PICO DE CARGA (MW) | Nº DE OCORRÊNCIA (dias) |
|-----------------------------|-------------------------|
| 165 | 8 |
| 155 | 4 |
| 150 | 4 |
| 146 | 4 |
| Período = 20 dias | |

Esse modelo de carga pode ser representado na forma acumulada da figura (3.3), pela curva de variação de pico de carga diária. A consideração para o seu traçado é que o pico de carga diário, dura o dia todo.

A figura (3.3), portanto, representa o modelo probabilístico de carga, a ser considerado na próxima secção.

3.2.3. Modelo Probabilístico de Disponibilidade de Capacidade do Sistema.

Nessa abordagem combina-se a tabela de probabilidades de saídas de capacidades do sistema com as características da carga para obter um risco esperado de perda de carga. O modelo de carga considerado está na forma acumulada o qual fornece o número de tempo em que a carga iguala ou excede os valores indicados na tabela (3.8). As unidades estão em dias de acordo com as características da carga usadas no modelo.

Um gráfico representativo foi traçado na figura (3.4)

FIGURA 3.3 - CURVA DE VARIAÇÃO DE PICOS DE CARGA DIÁRIO

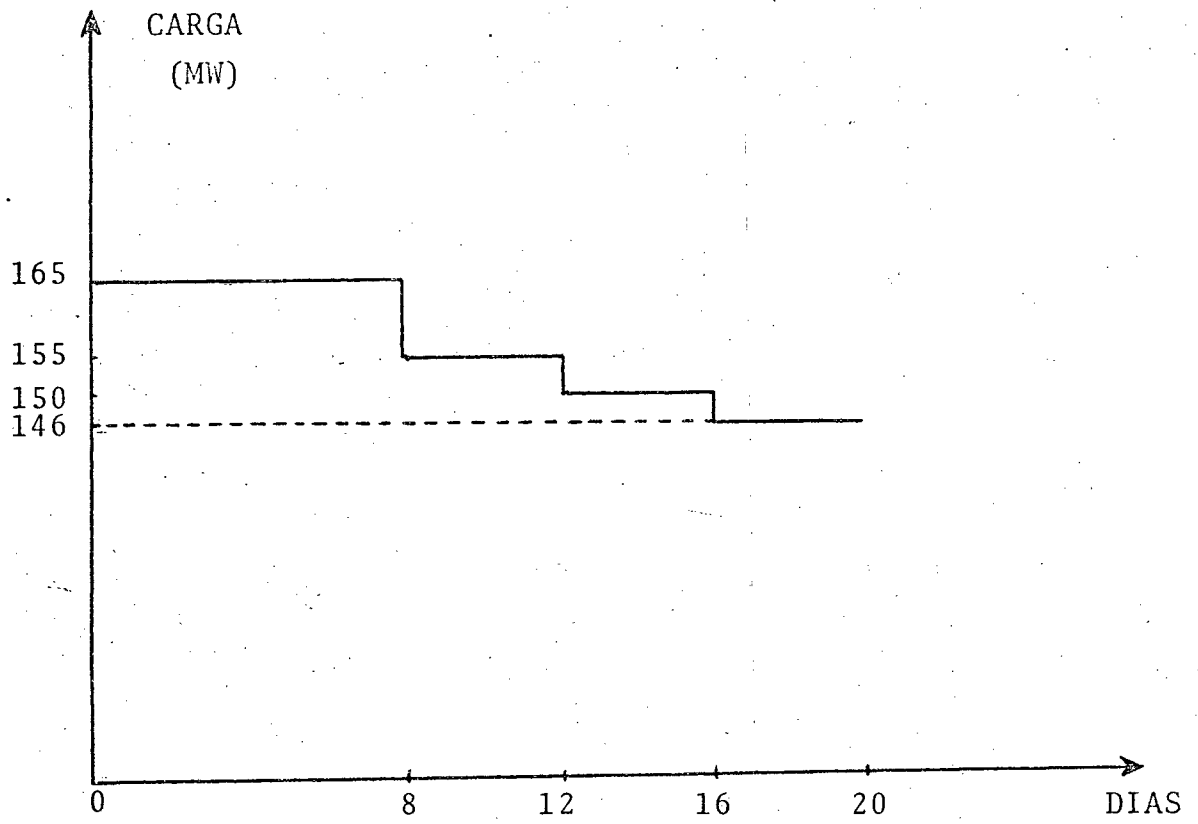
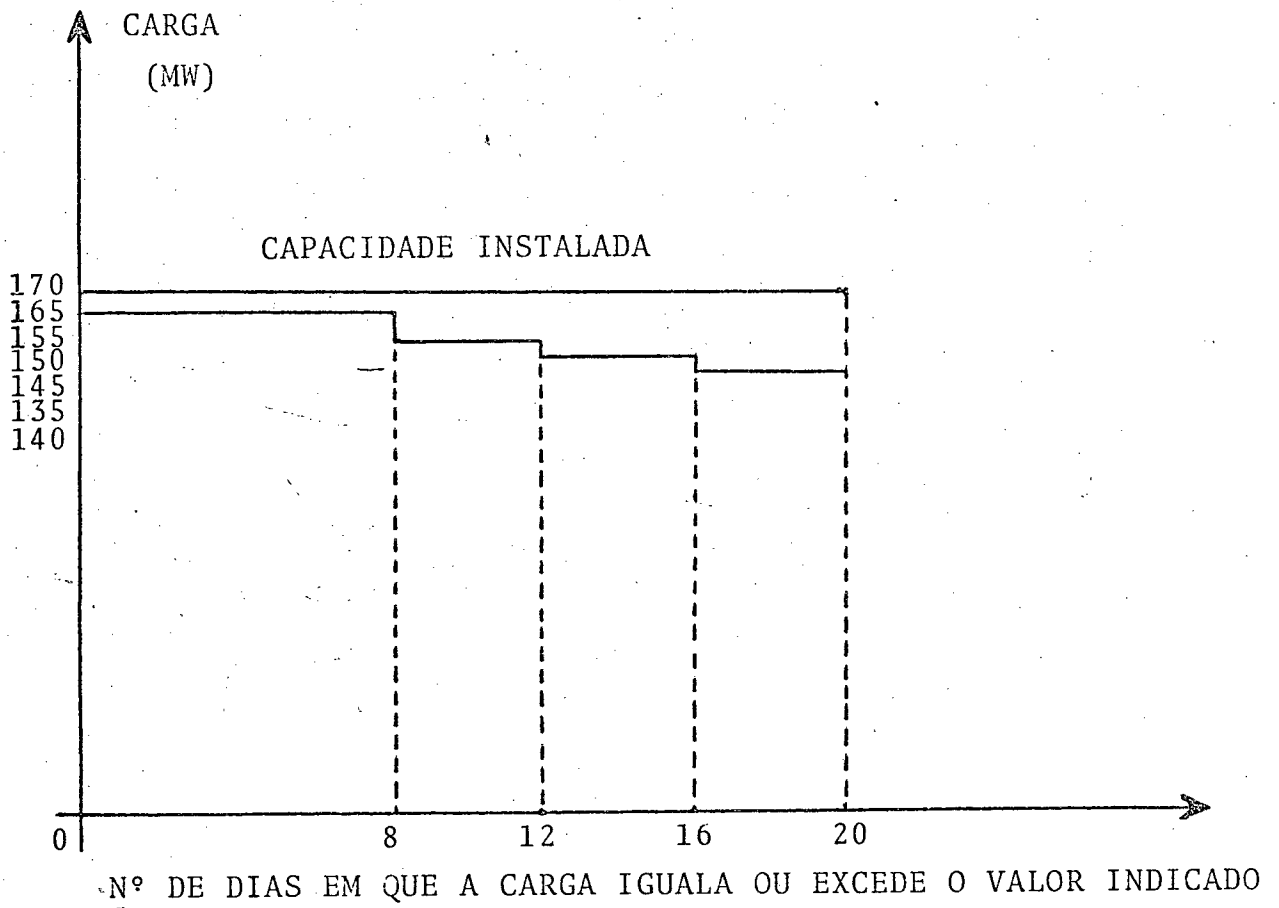


FIGURA 3.4 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS MODELOS PROBABILÍSTICOS DE GERAÇÃO E DE CARGA



para ilustrar a situação em que se compara os modelos probabilísticos de geração e de carga e conseqüentemente a reserva do sistema.

Matematicamente a probabilidade de perda de carga no sistema causada por uma saída de capacidade C_k , durante um tempo t_k , é $P_k \cdot t_k$ e a probabilidade de perda de carga total esperada é dada pela equação (3.4).

$$E(t) = \sum_{k=1}^n P_k \cdot t_k \quad \text{unidades de tempo (dias)} \quad (3.4)$$

onde, n = número de saídas.

P_k = probabilidade de saída de capacidade individual, igual a C_k .

t_k = número de unidades de tempo em que ocorre uma perda de carga, provocada por uma saída de capacidade C_k , no período em estudo.

Usando os valores de probabilidades das tabelas (3.4), (3.5) e (3.7), na equação (3.4), e os tempos de ocorrência de perda de carga provocada pela saída de capacidade correspondente, obteve-se a perda de carga esperada; nas tabelas (3.9), (3.10) e (3.11), para os casos estudados.

O valor de perda de carga obtido é apenas uma esperança matemática.

A perda de carga anual foi calculada pela expressão (2), (10) (3.5).

$$\text{LOLP} = E(d) \times \frac{365}{d} \quad \text{dias/ano} \quad (3.5)$$

Essa expressão está correta quando d significa o período considerado para o estudo em dias e $E(d)$ é a perda de carga total

TABELA 3.9 - PERDA DE CARGA ESPERADA PARA SAÍDAS
DE CAPACIDADE DE 0, 5, 20 e 25 MW

| SAÍDA DE CAPA CIDADE (MW) | UNIDADES DE TEMPO (dias) | PROBABILIDADES DE ESTADOS | PERDA DE CARGA |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 0,980213 | 0 |
| 5 | 0 | 0,00500839 | 0 |
| 20 | 12 | 0,0147032 | 0,176438 |
| 25 | 20 | 0,00007513 | 0,00150253 |

TABELA 3.10 - PERDA DE CARGA ESPERADA PARA SAÍDAS
DE CAPACIDADE DE 0, 15, 20 e 35 MW

| SAÍDA DE CAPA CIDADE (MW) | UNIDADES DE TEMPO (dias) | PROBABILIDADE DE ESTADOS | PERDA DE CARGA |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 0,980213 | 0 |
| 15 | 8 | 0,00500839 | 0,0400671 |
| 20 | 12 | 0,0147032 | 0,176438 |
| 35 | 20 | 0,00007513 | 0,00150253 |

TABELA 3.11 - PERDA DE CARGA ESPERADA PARA SAÍDAS
DE CAPACIDADE DE 0, 20, 20 e 40 MW

| SAÍDA DE CAPA CIDADE (MW) | UNIDADES DE TEMPO (dias) | PROBABILIDADE DE ESTADOS | PERDA DE CARGA |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 0,980213 | 0 |
| 20 | 12 | 0,0197116 | 0,236539 |
| 40 | 20 | 0,00007513 | 0,00150253 |

correspondente.

Portanto, para o sistema da figura (3.1) e os dados adotados, obteve-se a perda de carga total esperada.

Para os vários casos estudados:

LOLP = 3,24742 dias/ano para saídas de 0, 5, 20, 25 MW

LOLP = 3,97865 dias/ano para saídas de 0, 15, 20, 35 MW

LOLP = 4,37168 dias/ano para saídas de 0, 20, 20, 40 MW

O inverso desse valor em anos/dias é frequentemente usado como uma medida de confiabilidade (2), (3), (5). Entretanto isso tende a obscurecer o fato de que a perda de carga é apenas uma esperança matemática e provocando considerável confusão de seu real significado (5), particularmente entre pessoas menos familiarizadas com o assunto.

Estabelecer uma medida de confiabilidade satisfatória depende da experiência e do conhecimento do sistema. Nesse trabalho foi considerado aceitável uma perda de carga de até 0,164384, que corresponde a 3 dias/ano. Para esse valor o conjunto de estados que levam o sistema a uma perda de carga foi estabelecido, ou seja: nas tabelas (3.9), (3.10) o sistema no estado 3, para uma saída de capacidade igual a 20 Mw, apresenta 3,22 dias/ano de perda de carga e, na tabela (3.11), no estado 2 para a mesma capacidade de saída a perda de carga do sistema é 4,31684 dias/ano.

Para os casos estudados, observa-se que os valores de perda de carga esperada são alterados para diferentes saídas de capacidades de geração. Isso equivale a variações na carga. Portanto a um aumento de carga, corresponde um aumento na perda de carga, reduzindo a confiabilidade do sistema.

3.3. Confiabilidade do Sistema de Transmissão

3.3.1. Representação do Sistema de Transmissão

Os sistemas de potência, para estudos de confiabilidade podem ser representados por circuitos ou em diagramas de espaço de estado (17).

Os métodos que consideram a representação por circuitos, baseiam-se na solução de um diagrama de blocos, representativo do sistema, onde os blocos indicam eventos de falhas nos componentes e uma interrupção no diagrama representa a falha do sistema. (6),(12)

Nos métodos baseados na representação de espaço de estado, o sistema é descrito através de seus estados e das taxas de transição de um estado para outro. É normalmente usado na avaliação de confiabilidade de transmissão (11), por ser adequado para considerar as dependências entre os eventos de falha e reparo dos vários componentes. Adotou-se, nesse estudo, a representação de espaço de estado.

3.3.2. Considerações sobre os Métodos Existentes

A partir da representação do sistema existem dois métodos fundamentais para avaliação quantitativa da confiabilidade do sistema de transmissão (5).

O primeiro método é o da Taxa de Interrupção Média, que determina a probabilidade de saída forçada de uma duração mínima especificada para obter a taxa de interrupção média ao consumidor e o número de interrupções que excede uma dada duração (13). Essa

abordagem é aplicável a combinações série-paralelo, dos componentes do sistema. O método é completamente voltado para a continuidade de de alimentação nos pontos de carga e considera a redundância dos elementos em paralelo. Isso significa que em caso de falhas, as linhas restantes em operação terão capacidade suficiente para transportar a carga total.

O segundo método é o de Frequência e Duração, também chamado aproximado, que apresenta como aspecto mais importante a flexibilidade de incluir as condições ambientais ⁽¹³⁾. As variações ambientais são caracterizadas por dois estados, o tempo normal e adverso. As equações básicas desse método inclui a probabilidade de interrupção devido a taxas de sobre-carga no circuito e manutenção preventiva ⁽¹⁴⁾. O método considera que as taxas de falhas e de reparos, obedecem à distribuição exponencial para tempos, normal e adverso.

As duas unidades básicas de confiabilidade, previstas pelo método e que tem se mostrado satisfatórias, são a frequência e a duração de saída. Entretanto existem outros índices de interesse em sistemas de potência que também podem ser obtidos ^{(5), (14), (15)}.

No segundo método, se a taxa de falha é uma função do meio ambiente, o uso de taxas de falhas equivalentes para combinações de componentes em paralelo pode levar a previsões incorretas na confiabilidade, pelas aproximações que se fazem necessárias ⁽⁵⁾. Apresenta maior dificuldade de aplicação a sistemas complexos devido a sofisticação do modelo e considera mais de uma aproximação quando elementos paralelos adicionais são combinados ^{(5), (14), (15), (16)}. Uma das grandes dificuldades para aplicação desse método é a falta de dados disponíveis.

Torna-se claro que os índices obtidos pelos dois métodos descritos não podem ser comparados diretamente ⁽⁵⁾. O primeiro método é relativamente simples e aplicável a sistemas complexos, apresentando resultados plenamente satisfatórios ^{(5), (13), (16)}.

A bibliografia, ^{(5), (13), (16), (18)} considera que se obtem soluções teoricamente exatas usando o processo de Markov, sendo a maior dificuldade para sua aplicação o aumento considerável do número de estados com o tamanho do sistema.

3.3.3. Aplicação do Processo de Markov

Nessa secção propõe-se uma medida de confiabilidade, e é estabelecido um conjunto de estados de falhas do sistema, mediante contingências de saídas de Linhas de Transmissão. A medida de confiabilidade proposta, para o sistema de transmissão, é a probabilidade de interrupção no fluxo de potência que alimenta a carga. Para determiná-la, utilizou-se o processo de Markov, a partir da representação do sistema em diagrama de espaço de estado. O estudo foi realizado para um sistema com seis ⁽⁶⁾ linhas, representado na figura 3.1.

A representação do sistema em diagrama de espaço de estado foi obtida através de seus estados e das probabilidades de movimento de um estado para outro em qualquer intervalo ⁽¹¹⁾ $(t, t + \Delta t)$. As taxas de transição de estados foram supostas constantes, portanto as seguintes considerações básicas foram feitas ⁽¹¹⁾:

1. Os componentes do sistema são reparáveis e seus históricos, consistem de períodos em operação e reparo. As distribuições de tempo desses períodos possuem média

e esses valores são conhecidos.

2. Todos os processos cíclicos ocorreram a longo tempo de maneira que o equilíbrio estatístico tenha sido alcançado. Em várias aplicações essa consideração removerá a necessidade de levar em conta as várias distribuições de tempo, quando somente suas médias interessarão. Em outros casos a distribuição de tempo exponencial é necessária.
3. Não se faz restrições quanto a relação de independência entre eventos envolvendo diferentes componentes.

As duas primeiras considerações permitem que o sistema seja representado pelo modelo probabilístico descrito no capítulo 2. A terceira é uma condição natural de representação em espaço de estado.

As taxas de falha, λ e reparo μ ⁽⁴⁾ correspondentes ao exemplo da figura (3.1), foram listadas na tabela (3.12).

De acordo com o modelo cada componente assume apenas dois estados, em operação (U) ou em reparo (D), totalizando 22 estados, para o exemplo da figura (3.1), uma vez que se considera⁽⁷⁾ apenas contingências simples e duplas. Os modos de falhas, foram apresentados na tabela (3.13). Esses estados estão relacionados em forma de diagrama de transição na figura (3.5), a qual visualiza os vários estados do sistema de transmissão e a maneira que esses estados estão relacionados. A compreensão desse diagrama se faz de forma semelhante ao diagrama de transição para sistema de geração na figura (3.2), explicado na secção (3.2.1).

TABELA 3.12 - DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO PARA AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA MOSTRADO NA FIGURA 3.1.

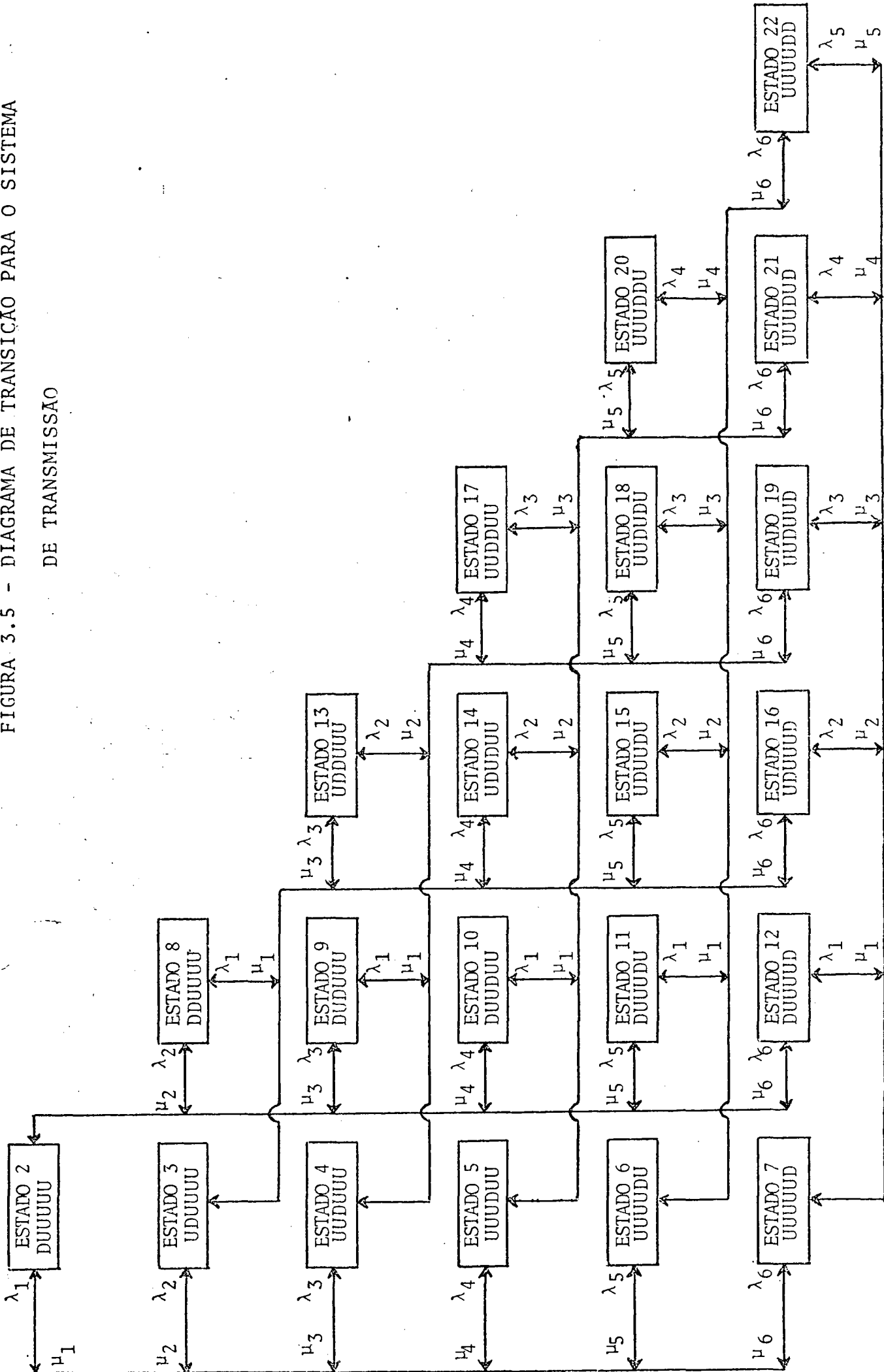
| LINHA N° | COMPRIMENTO DA LINHA (mi) | TAXA DE FALHA falha/dia | TAXA DE REPARO reparo / dia |
|----------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 1,6 | 20 | $\lambda_1 = \lambda_6 = 0,0027$ | $\mu_1 = \mu_6 = 0,42$ |
| 2,5 | 30 | $\lambda_2 = \lambda_5 = 0,0041$ | $\mu_2 = \mu_5 = 0,42$ |
| 3 | 80 | $\lambda_3 = 0,011$ | $\mu_3 = 0,42$ |
| 4 | 100 | $\lambda_4 = 0,0137$ | $\mu_4 = 0,42$ |

Para as taxas de falhas, λ , e reparos, μ , do sistema de transmissão, na tabela (3.12), usando o modelo probabilístico do capítulo 2, obteve-se a equação (3.6). Substituindo os valores numéricos da tabela (3.12), na equação (3.6), calculou-se as probabilidades de estados, por álgebra matricial. A solução foi obtida usando um computador digital PDP 11/40 cujo programa foi colocado no apêndice I. Os resultados foram apresentados na tabela (3.14). Como cada estado representa o sistema em operação ou em reparo, com uma probabilidade de ocorrência, o próximo passo é identificar os estados de falhas do sistema.

A identificação foi feita por inspeção, admitindo como falha uma interrupção no fluxo de potência para a carga, na barra considerada.

O conjunto de estados de falhas, mediante contingências de saídas de linhas, foi enumerado para cada barra de carga do sistema representado na figura (3.1).

FIGURA 3.5 - DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO PARA O SISTEMA DE TRANSMISSÃO



Os termos da diagonal principal, foram escritos abaixo, em função das taxas de falha e reparo:

$$a_{1,1} = - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)$$

$$a_{2,2} = - (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)$$

$$a_{3,3} = - (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)$$

$$a_{4,4} = - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)$$

$$a_{5,5} = - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_4 + \lambda_5 + \lambda_6)$$

$$a_{6,6} = - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_5 + \lambda_6)$$

$$a_{7,7} = - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \mu_6)$$

$$a_{8,8} = - (\mu_1 + \mu_2)$$

$$a_{9,9} = - (\mu_1 + \mu_3)$$

$$a_{10,10} = - (\mu_1 + \mu_4)$$

$$a_{11,11} = - (\mu_1 + \mu_5)$$

$$a_{12,12} = - (\mu_1 + \mu_6)$$

$$a_{13,13} = - (\mu_2 + \mu_3)$$

$$a_{14,14} = - (\mu_2 + \mu_4)$$

$$a_{15,15} = - (\mu_2 + \mu_5)$$

$$a_{16,16} = - (\mu_2 + \mu_6)$$

$$a_{17,17} = - (\mu_3 + \mu_4)$$

$$a_{18,18} = - (\mu_3 + \mu_5)$$

$$a_{19,19} = - (\mu_3 + \mu_6)$$

$$a_{20,20} = - (\mu_4 + \mu_5)$$

$$a_{21,21} = - (\mu_4 + \mu_6)$$

$$a_{22,22} = - (\mu_5 + \mu_6)$$

TABELA 3.14 - PROBABILIDADES DOS ESTADOS PARA
O SISTEMA DE TRANSMISSÃO

| ESTADO Nº | PROBABILIDADES DE ESTADOS |
|--------------|------------------------------|
| 1 | 0,913795 |
| 2 | 0,0058744 |
| 3 | 0,00892038 |
| 4 | 0,0239327 |
| 5 | 0,0298071 |
| 6 | 0,00892038 |
| 7 | 0,0058744 |
| 8 | 0,00005734 |
| 9 | 0,0001538 |
| 10 | 0,0001916 |
| 11 | 0,00005734 |
| 12 | 0,00003776 |
| 13 | 0,0002336 |
| 14 | 0,00029097 |
| 15 | 0,00008707 |
| 16 | 0,00005734 |
| 17 | 0,00078066 |
| 18 | 0,00023362 |
| 19 | 0,00015385 |
| 20 | 0,00029097 |
| 21 | 0,00019161 |
| 22 | 0,00005734 |

Para a Barra 2 e 3: o sistema não falha por contingências simples e duplas de saída de linhas.

Para a Barra 4 : a falha ocorre no estado 20, mediante a saída das linhas 4 e 5 ou no estado 22, mediante a saída das linhas 5 e 6.

Para a Barra 5 : a falha ocorre com a saída das linhas 4 e 5 ou 4 e 6, correspondentes aos estados 20 e 21, respectivamente.

Conhecendo os estados de falhas e as probabilidades correspondentes, determina-se a probabilidade de falha do sistema, como segue ⁽¹¹⁾: Seja P_i a probabilidade do estado i e F o conjunto de estados de falhas, então a probabilidade de falha do sistema P_F é dada pela equação (3.7).

$$P_F = \sum_{i \in F} P_i \quad (3.7)$$

Os estados de falhas e as probabilidades correspondentes, colocados na tabela (3.15).

TABELA 3.15 - ESTADOS DE FALHA PARA O SISTEMA DE TRANSMISSÃO DA FIGURA (3.1).

| ESTADO Nº | PROBABILIDADE DO ESTADO |
|-----------|-------------------------|
| 20 | 0,00029097 |
| 21 | 0,00019161 |
| 22 | 0,00005734 |

A probabilidade de falha do sistema, de acordo com a equação (3.7), será:

$$P_F = 0,00053992$$

3.4. Conclusões

De acordo com os métodos adotados nesse capítulo, foi estabelecido um conjunto de falhas G, para o sistema de geração e um conjunto T para o sistema de transmissão. O conjunto G é composto dos estados 3 para os dois primeiros casos estudados e pelo estado 2, para o terceiro caso, que correspondem a estados de falhas, para uma saída de capacidade de geração igual a 20 MW. O conjunto T, representa os estados 20, 21 e 22, para os quais o sistema falha, mediante saída de linhas de transmissão. Os conjuntos G e T, portanto são conjuntos de falhas para o sistema apresentado na figura (3.1).

C A P Í T U L O 4

CONFIABILIDADE COMO QUALIDADE DE SERVIÇO4.1. Introdução

Como um dos objetivos dos estudos de confiabilidade em sistemas de potência é estabelecer um fornecimento de energia elétrica, com boa qualidade, nesse capítulo, estuda-se a Estabilidade transitória como um critério de qualidade de serviço. Estabeleceu-se um conjunto de estados que levam o sistema a uma condição de operação indesejável ou seja, um grau de estabilidade inadequada.

Para maior segurança dos sistemas de potência, são necessários estudos determinísticos que estabeleçam critérios de qualidade adequados afim de manter os sistemas operando nas condições desejadas. Os critérios de qualidades, que se constituem em quebra de segurança, são (7), (24):

- Tensões nas barras fora das tolerâncias.
- Sobre carga nas linhas de transmissão.
- Perda de estabilidade.
- Outras condições de operação indesejáveis.

O método adotado, foi o da simulação, usando a equação de oscilação das máquinas como modelo.

A estabilidade foi estudada, analisando, as frequências individuais das máquinas para contingências de saídas de geração e variações na carga e as diferenças dos ângulos internos para saí-

das de linhas de transmissão e curto-circuito. Considerou-se apenas contingências simples e duplas.

Escolheu-se a estabilidade como critério de qualidade. A escolha se justifica, pela menor atenção dispensada, em estudos de confiabilidade, a esse critério, em relação aos outros.

O estudo foi aplicado a um exemplo, usando um computador digital PDP 11/40.

4.2. O Modelo Determinístico

Foi usado o modelo clássico para um sistema com várias máquinas (19), nos estudos de estabilidade. As seguintes considerações foram feitas (19), (20), (21), (22), (23):

- A potência mecânica de entrada permanece constante durante o transitório.
- As constantes de inércia e de amortecimento foram consideradas constantes.
- A máquina síncrona é representada por uma tensão constante atrás de uma reatância transitória de eixo direto.
- O ângulo mecânico do rotor da máquina coincide com a fase elétrica da tensão atrás da reatância transitória.
- As cargas são representadas por admitâncias constantes.

Admitindo essas hipóteses para um sistema com n barras, representou-se o movimento do rotor para a i ésima máquina, pela equação (4.1) (19).

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d \delta_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.1)$$

onde,

$$P_{e_i} = G_{ii} E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j \left[B_{ij} \sin (\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos (\delta_i - \delta_j) \right] \quad (4.2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

A potência elétrica P_{e_i} , na equação (4.2) é calculada em termos dos elementos da matriz Y_{bus} reduzida, das tensões nas barras internas das máquinas e também das diferenças angulares $(\delta_i - \delta_j)$, que por sua vez são funções dos resultados da integração das equações (4.1).

O conjunto de equações (4.1), foi colocado na forma da equação (4.3) (19), (21).

$$\dot{\underline{x}} = f(x) \quad (4.3)$$

onde \underline{x} é um vetor de dimensão $(2n \times 1)$,

$$\underline{x}^T = \left[\delta_1, \dot{\delta}_1, \delta_2, \dot{\delta}_2, \dots, \delta_n, \dot{\delta}_n \right],$$

e f é um conjunto de funções não lineares nos elementos do vetor de estado \underline{x} .

As considerações feitas, foram apenas simplificativas, e não constituem uma limitação do modelo.

O modelo da equação (4.1), na próxima secção, serve como base para estudar o caso específico das saídas de geração ou variações na carga e posteriormente é aplicado ao exemplo.

4.3. Análise da Frequência para saídas de geração ou variações na carga

Definindo δ_i e $\dot{\delta}_i$, $i = 1, \dots, n$, como variáveis de estados e usando a notação,

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \dot{\delta}_i = \omega_i \quad i = 1, \dots, n$$

onde ω_i é a velocidade de i ésima máquina em relação ao sistema de referência e está vinculada à frequência de operação do sistema (23). Desprezando as condutâncias de transferência e fazendo,

$$|E_i| |E_j| B_{ij} = F_{ij} \quad (4.4)$$

$$P_{mi} - G_{ii} E_i^2 = P_i \quad (4.5)$$

Tal que, F_{ij} são os coeficientes de sincronização e P_i , a injeção na barra i , escreveu-se o modelo do sistema da equação (4.1), na forma abaixo (23), (27), (28):

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i \\ M\dot{\omega}_i &= -D_i\omega_i + P_i - \sum_{j=1}^n F_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) \end{aligned} \quad (4.6)$$

$i = 1, \dots, n$

Os pontos de equilíbrio são obtidos pela equação (4.7) (23).

$$\begin{aligned} \omega_i &= 0 \\ P_i - \sum_{j=1}^n F_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) &= 0 \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (4.7)$$

Uma condição necessária para obtenção do equilíbrio (23), (27), é encontrada, somando-se as n últimas equações em (4.7). Tem-se

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (4.8)$$

Entretanto, quando há perda de uma parcela de geração ou carga, como é o caso em estudo, $\sum P_i \neq 0$ e haverá um desvio de velocidade, em relação a condição de operação, antes do defeito. Portanto $\omega_i \neq 0$. Isso resulta que $\omega_i \rightarrow \bar{\omega}$, $i = 1, \dots, n$, onde o desvio $\bar{\omega}$, é dado pela equação (4.9) (23), (28), para $D_i \neq 0$.

$$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (4.9)$$

O sistema foi considerado, operando em condições indesejáveis, para perda de geração ou variações na carga, quando

$$|\bar{\omega}| > \alpha \quad (4.10)$$

$$i = 1, \dots, n.$$

Fixar um valor para α , depende de experiência e conhecimento do sistema. Esse valor indica a capacidade de reserva girante disponível, a capacidade de aumentar a geração térmica ou hidráulica ou em geral a capacidade de recuperar esse desvio, aumentando a geração ou aliviando a carga.

A consideração de $D_i \neq 0$, permite a obtenção de resultados mais realísticos e o fato de não incluir a ação dos reguladores de velocidade, significa se colocar a favor da segurança.

Na próxima secção faz-se uma aplicação ao exemplo.

4.4. Aplicação ao Sistema Exemplo

A estabilidade transitória foi verificada para o sistema, representado na figura (3.1), pelas curvas de oscilação. Matematicamente, as curvas de oscilação correspondem, obter uma solução para o conjunto de equações (4.1). Tais soluções foram obtidas a partir dos dados para o sistema, nas tabelas (4.1), (4.2) e (4.3), resolvendo um fluxo de carga e integrando numericamente as equações diferenciais pelo método de Runge-Kutta de 4^a ordem. A simulação foi preferida aos métodos analíticos existentes pelas seguintes razões:

- A complexidade do modelo não se apresenta como uma restrição ao passo que os métodos analíticos são, em geral, simplificados e podem não ser completamente confiáveis.
- Pela facilidade de melhor representar as contingências.
- Os métodos analíticos, apresentam resultados conservativos.

Embora a simulação, apresente um maior tempo de computação, esse inconveniente foi atenuado, limitando as contingências, àquelas de maior probabilidade de ocorrência e severidade. Considerou-se contingências simples e duplas para saídas de geração, saídas de linhas de transmissão, curto circuito e variações na carga.

Por motivo de limitações na memória do computador utilizado, foram elaborados três programas, colocados no Apêndice II e enumerados abaixo:

TABELA 4.1 - IMPEDÂNCIAS SÉRIE E ADMITÂNCIA SHUNT DAS LINHAS, EM p.U. NA BASE DE 100 MVA.

| DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO | | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| NÚMERO DA LINHA | IMPEDÂNCIA | ADMITÂNCIA SHUNT ($y'/2$) |
| 1 | $0,02 + j 0,24$ | $0,0 + j 0,03$ |
| 2 | $0,08 + j 0,54$ | $0,0 + j 0,025$ |
| 3 | $0,06 + j 0,60$ | $0,0 + j 0,020$ |
| 4 | $0,04 + j 0,48$ | $0,0 + j 0,015$ |
| 5 | $0,01 + j 0,36$ | $0,0 + j 0,010$ |
| 6 | $0.08 + j 0.72$ | $0.0 + j 0.025$ |

TABELA 4.2 - GERAÇÃO E CARGAS PREVISTAS E TENSÕES ASSUMIDAS PARA O SISTEMA DA FIGURA (3.1)

| NÚMERO DA BARRA | TENSÃO ASSUMIDA NA BARRA | GERAÇÃO | | CARGA | |
|-----------------|--------------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| | | MEGAWATTS | MEGAVARS | MEGAWATTS | MEGAVARS |
| 1 | $1,06 + j 0,0$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | $1,0 + j 0,0$ | 40 | 30 | 20 | 10 |
| 3 | $1,0 + j 0,0$ | 0 | 0 | 45 | 15 |
| 4 | $1,0 + j 0,0$ | 0 | 0 | 40 | 5 |
| 5 | $1,0 + j 0,0$ | 0 | 0 | 60 | 10 |

1. Estudo do fluxo de Potência para o sistema antes do defeito, cuja finalidade é fornecer as condições de operação do sistema, antes da perturbação.
2. Modificação dos dados da r \hat{e} de, para corresponder \hat{a} representa \hat{c} o \hat{a} o desejada para o per \hat{i} odo transit \hat{o} rio. Esta modifica \hat{c} o \hat{a} o inclui tamb \hat{e} m as condi \hat{c} o \hat{e} s da rede du \hat{r} ante a aplica \hat{c} o \hat{a} o da perturba \hat{c} o \hat{a} o e ap \hat{o} s a elimina \hat{c} o \hat{a} o do defeito.
3. Integra \hat{c} o \hat{a} o num \hat{e} rica das equa \hat{c} o \hat{e} s diferenciais que descrevem o comportamento das m \hat{a} quinas durante e ap \hat{o} s o defeito.

A an \hat{a} lise das curvas representativas da solu \hat{c} o \hat{a} o das equa \hat{c} o \hat{e} s (4.1), no item 3, permite estabelecer um conjunto de estados que levam o sistema a um grau de estabilidade insatisfat \hat{o} rio.

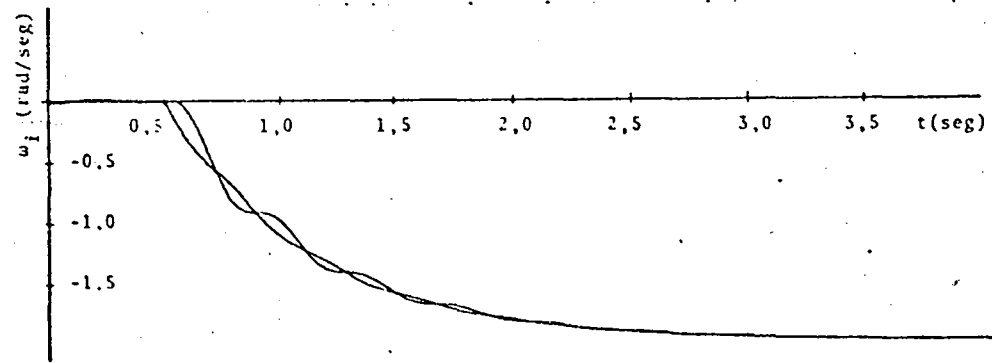
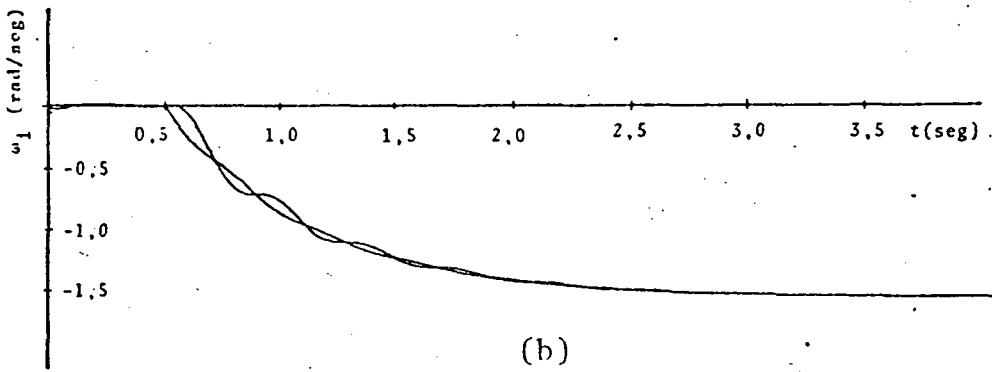
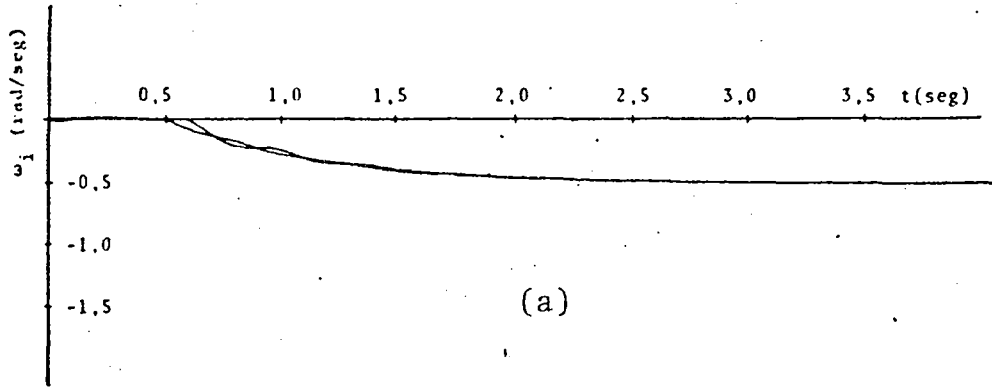
As curvas foram plotadas usando um computador digital PDP 11/40 e representadas nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3 .

A figura 4.1 representa as frequ \hat{e} ncias individuais das m \hat{a} quinas, para v \hat{a} rias conting \hat{e} ncias de sa \hat{i} das de gera \hat{c} o \hat{a} o. Cada situa \hat{c} o \hat{a} o foi particularizada como segue:

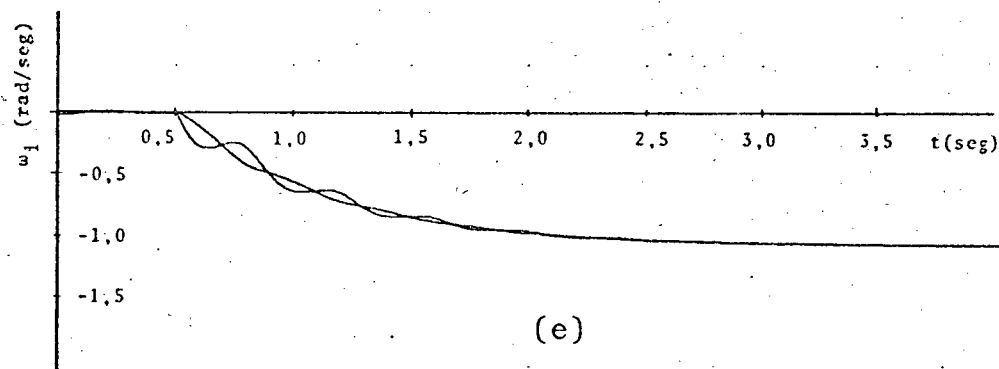
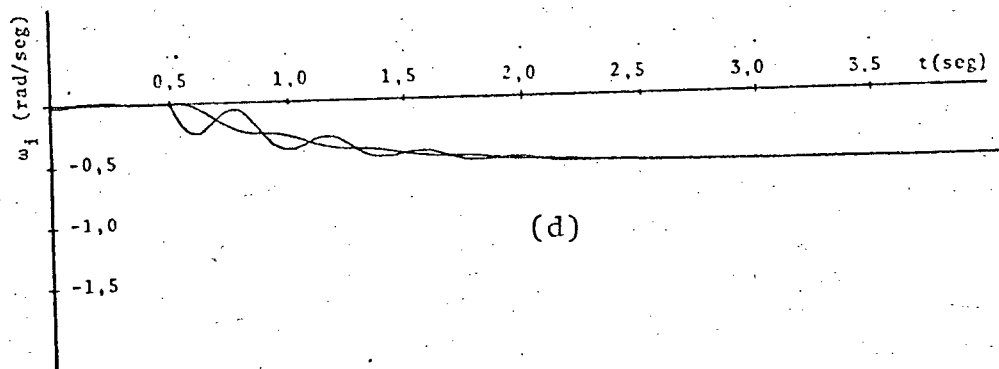
As figuras (1.a), (1.b) e (1.c) correspondem as sa \hat{i} das de capacidades das m \hat{a} quinas componentes da unidade 1, ou seja 5, 15 e 20 MW. A figura (1.d), corresponde a sa \hat{i} da de uma m \hat{a} quina componente da unidade 2 com capacidade igual a 20 MW e a figura (1.e), representa uma conting \hat{e} ncia dupla, para sa \hat{i} das de capacidades iguais a 5 MW e 20 MW, nas unidades 1 e 2, respectivamente. Esses resultados foram listados na tabela 4.4.

Na figura 4.2 obteve-se as diferen \hat{c} as angulares dos roto \hat{r} es. Foi simulado um curto-circuito trif \hat{a} sico, pr \hat{o} ximo a uma bar

FIGURA 4.1 - DESVIO DE FREQUÊNCIA DAS MÁQUINAS PARA
SAÍDAS DE GERAÇÃO OU VARIACÕES NA CARGA



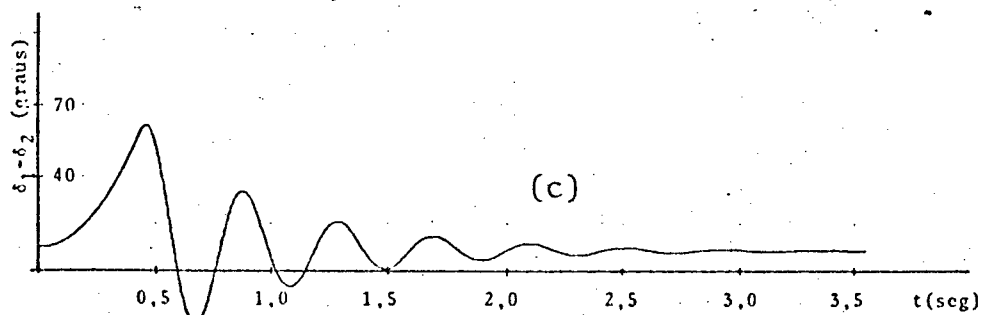
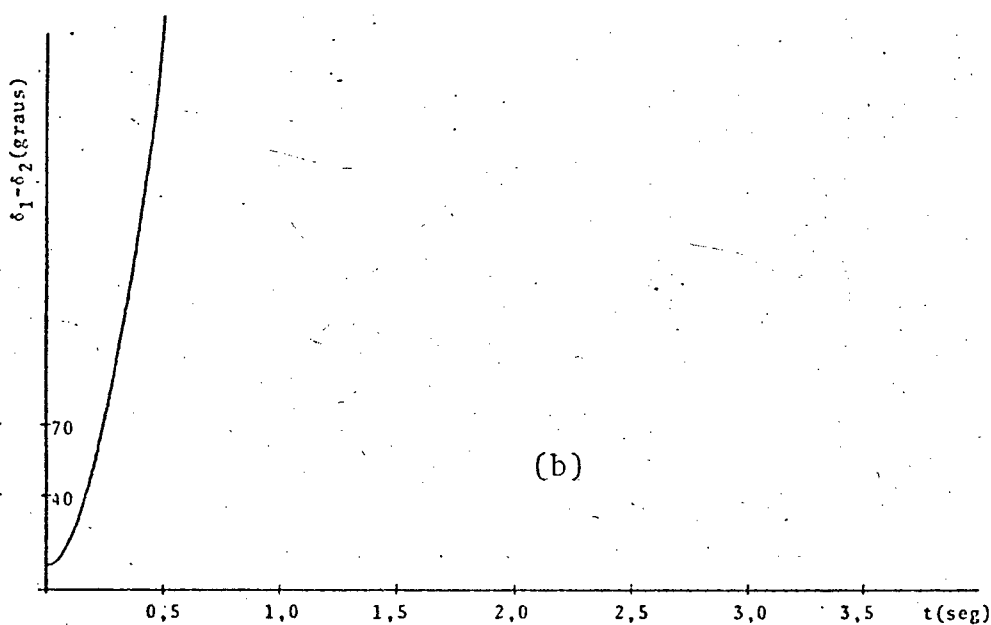
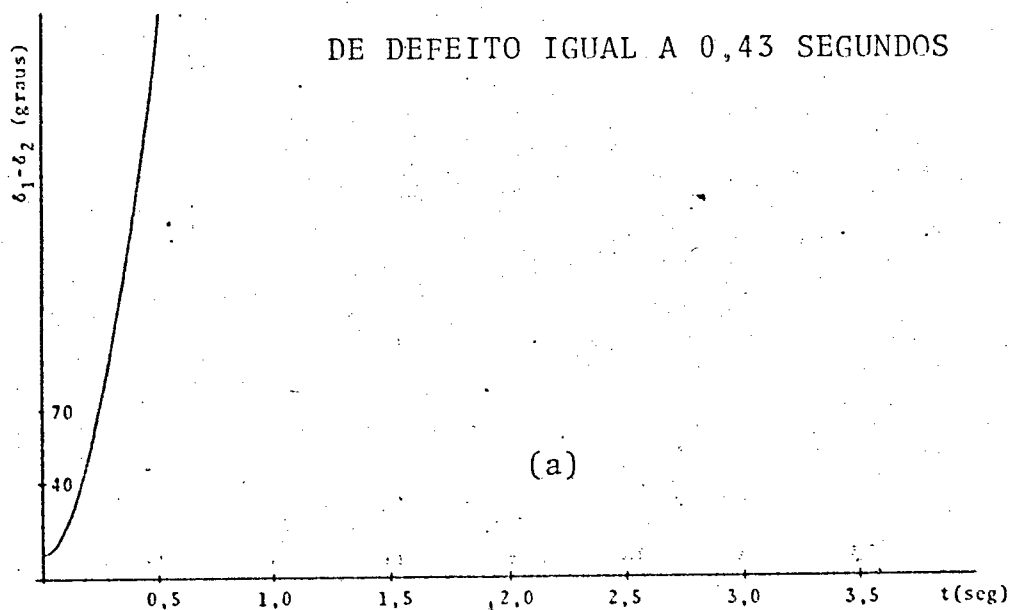
- (a) Perda de 5 Mw na unidade 1
 (b) Perda de 15 Mw na unidade 1
 (c) Perda de 20 Mw na unidade 1



(d) Perda de 20 Mw na unidade 2

(e) Perda de 5 Mw na unidade 1 e 20 Mw na unidade 2

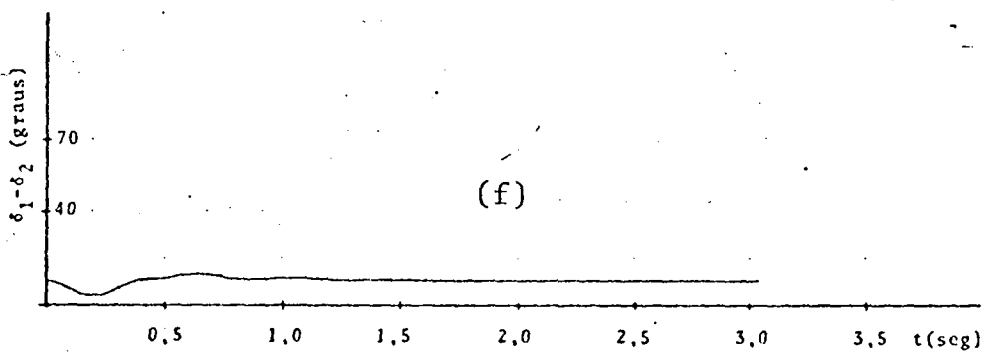
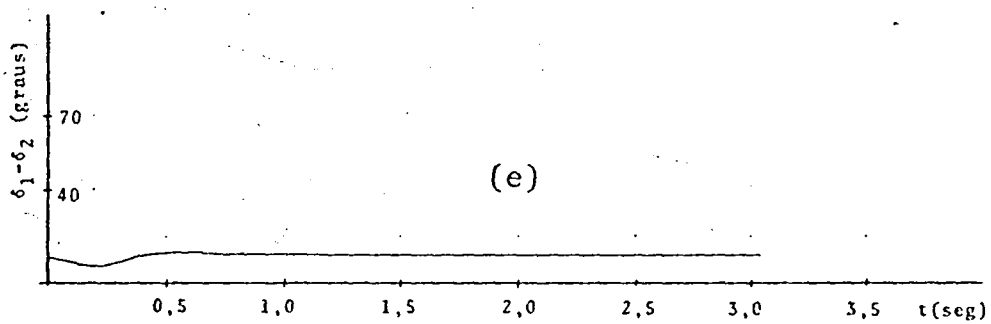
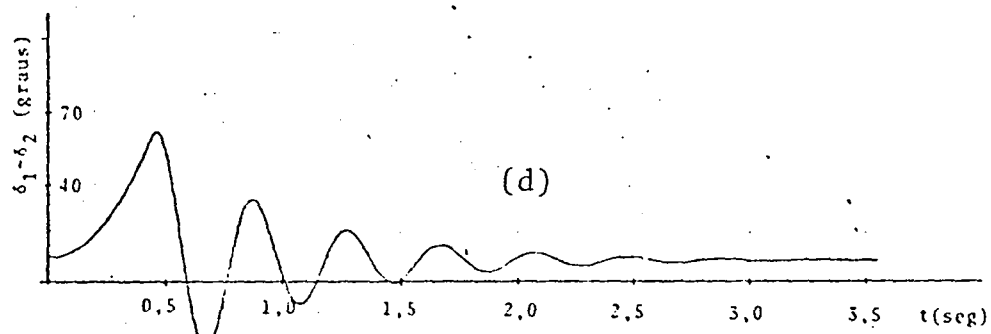
FIGURA 4.2 - DIFERENÇA ENTRE OS ÂNGULOS DOS ROTORES, PARA CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA BARRA, COM TEMPO DE DEFEITO IGUAL A 0,43 SEGUNDOS



(a) Saída da linha 1 por c.c. na barra 1

(b) Saída da linha 2 por c.c. na barra 1

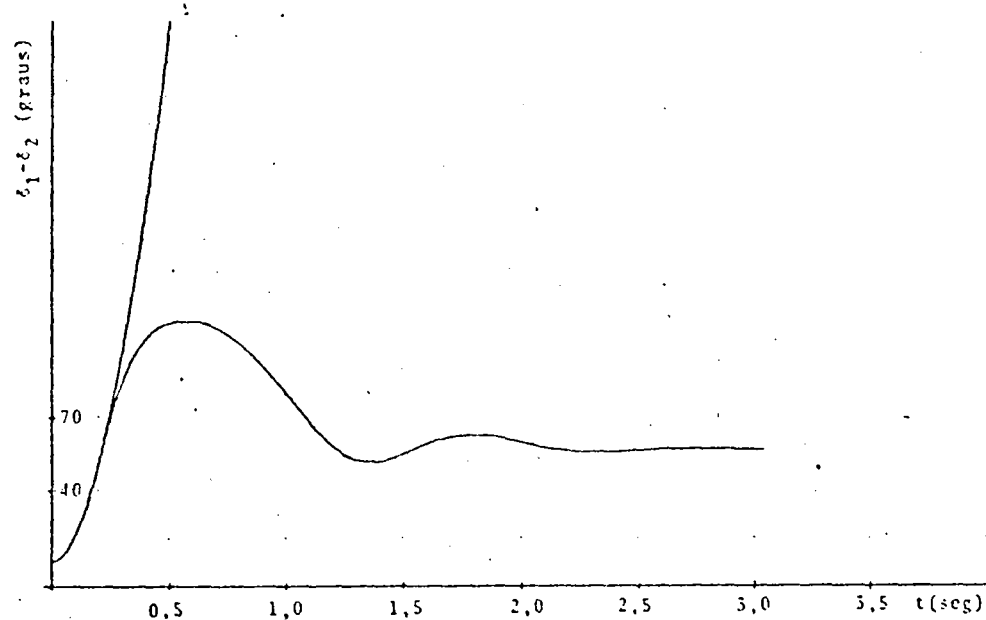
(c) Saída da linha 3 por c.c. na barra 2



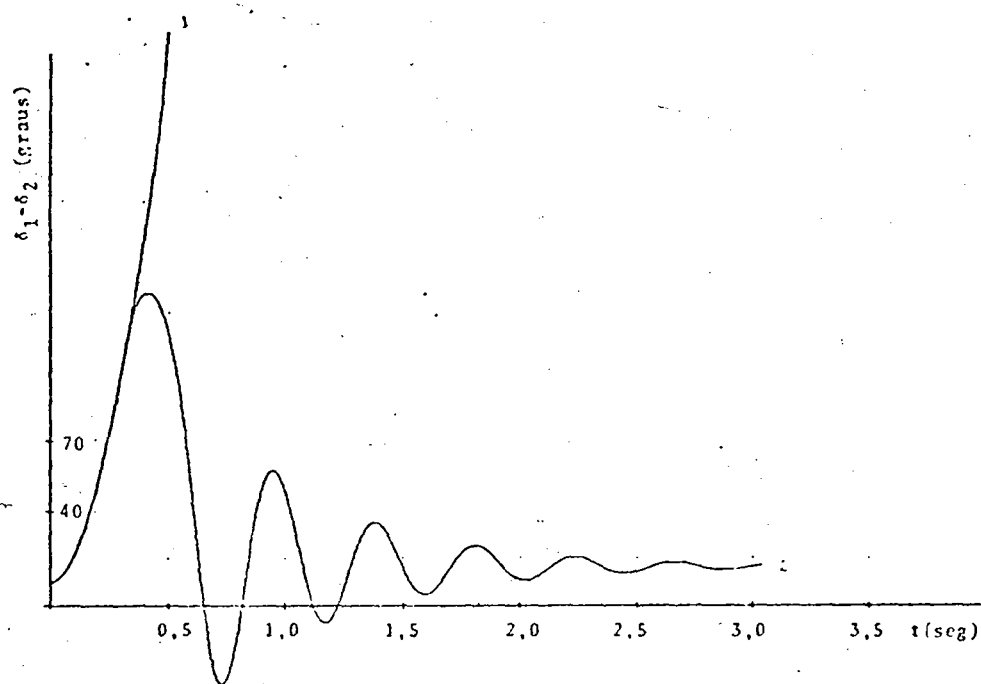
(d) Saída da linha 4 por c.c. na barra 2

(e) Saída da linha 5 por c.c. na barra 3

(f) Saída da linha 6 por c.c. na barra 4



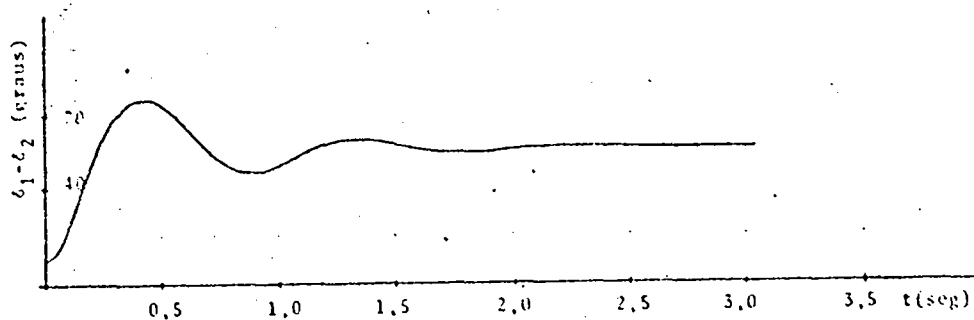
(g)



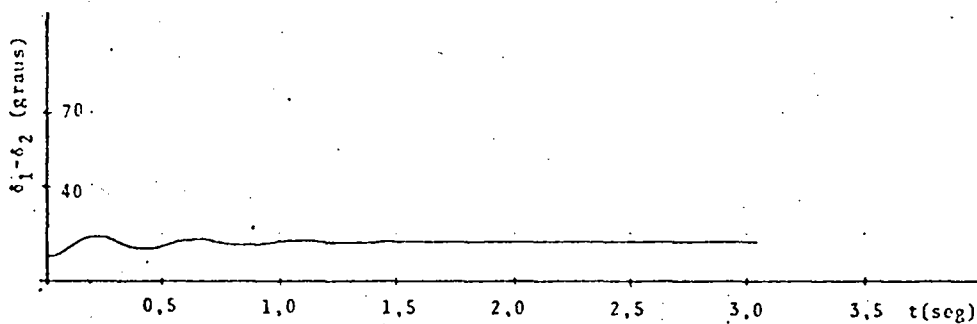
(h)

- (g) Saída da linha 1 por c.c. na barra 1, com tempos de defeito iguais a 0,43 e 0,2 segundos.
- (h) Saída da linha 2 por c.c. na barra 1, com tempos de defeito iguais a 0,43 e 0,32 segundos.

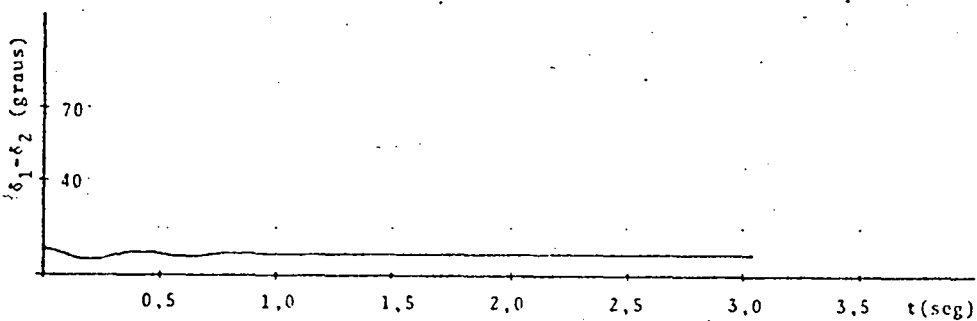
FIGURA 4.3 - DIFERENÇA ENTRE OS ÂNGULOS DOS ROTORES PARA CONTINGÊNCIAS DE SAÍDAS DE LINHAS



(a)



(b)

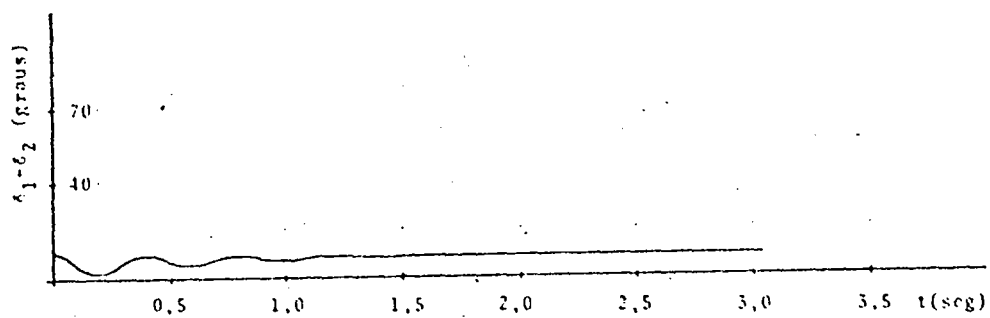


(c)

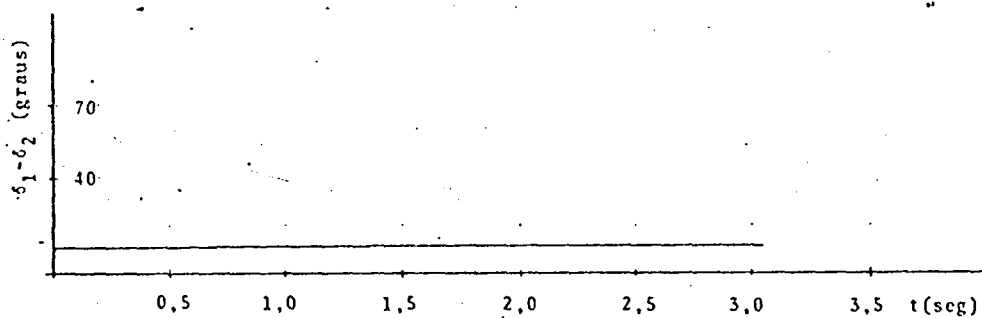
(a) Saída da linha 1

(b) Saída da linha 2

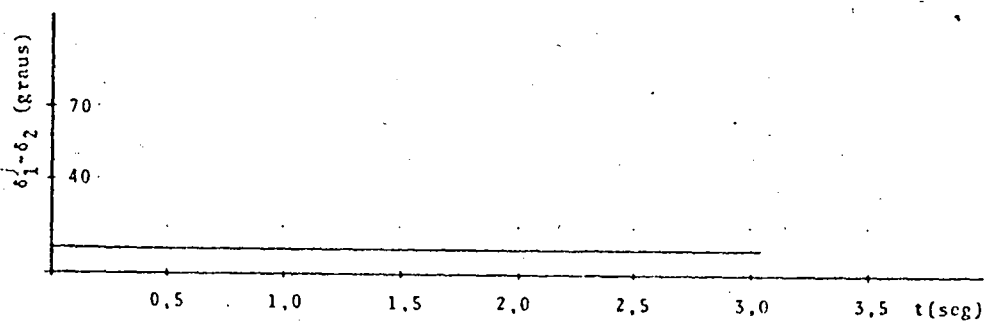
(c) Saída da linha 3



(d)



(e)

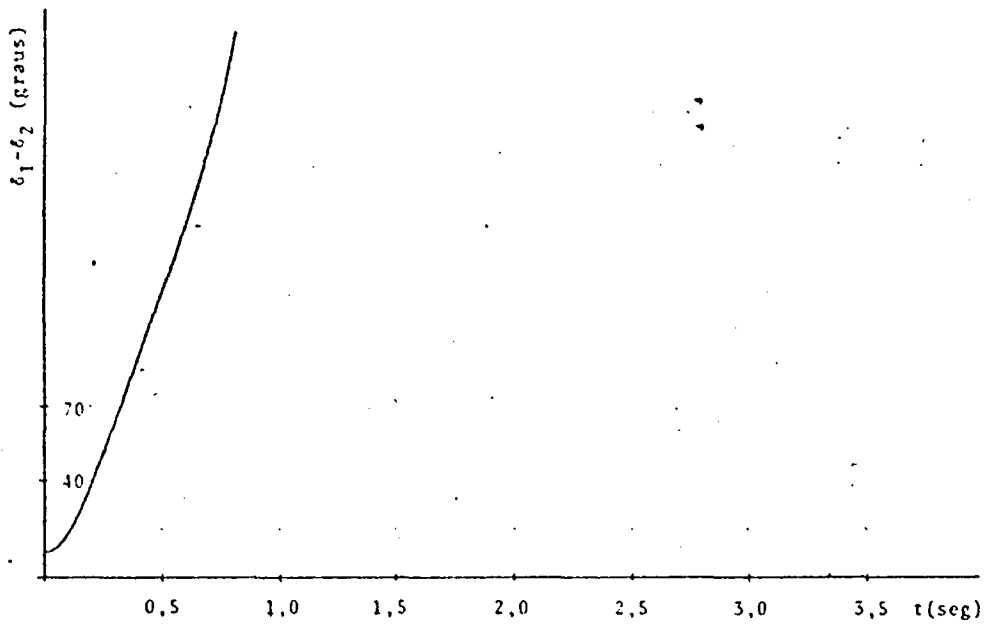


(f)

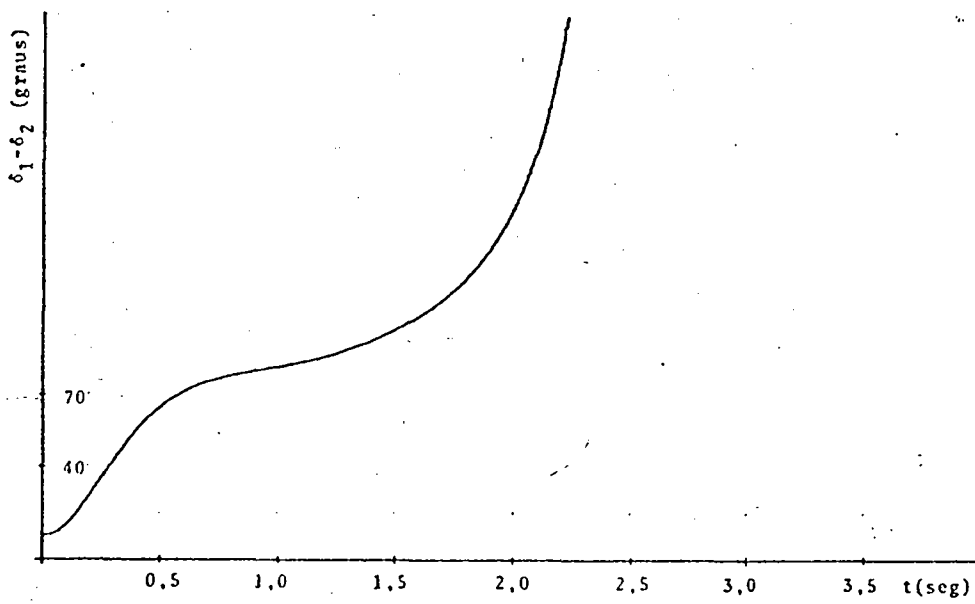
(d) Saída da linha 4

(e) Saída da linha 5

(f) Saída da linha 6



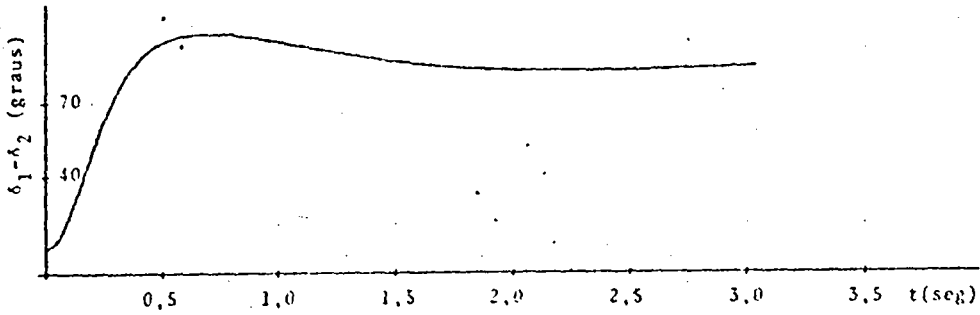
(g)



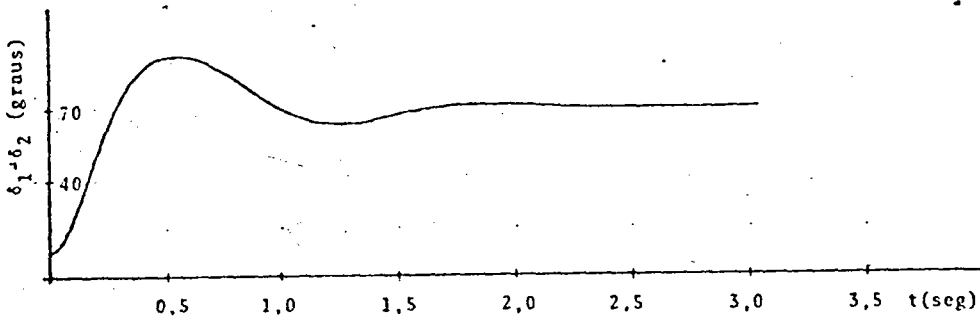
(h)

(g) Saída das linhas 1 e 3

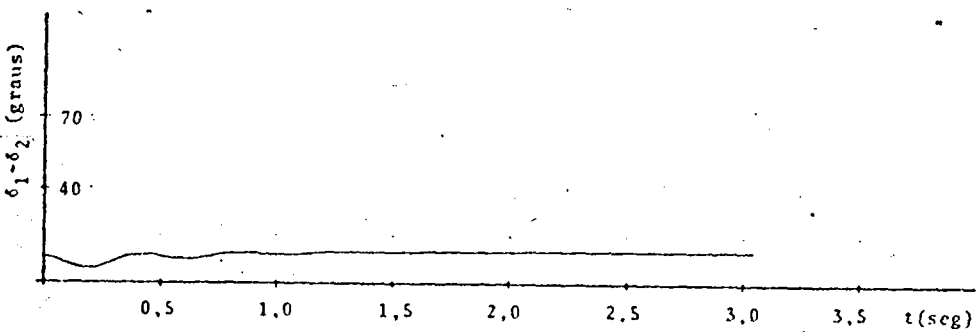
(h) Saída das linhas 1 e 4



(i)



(j)

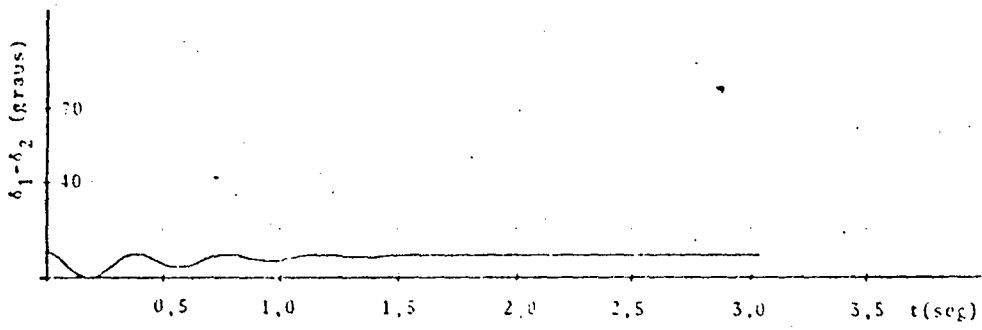


(k)

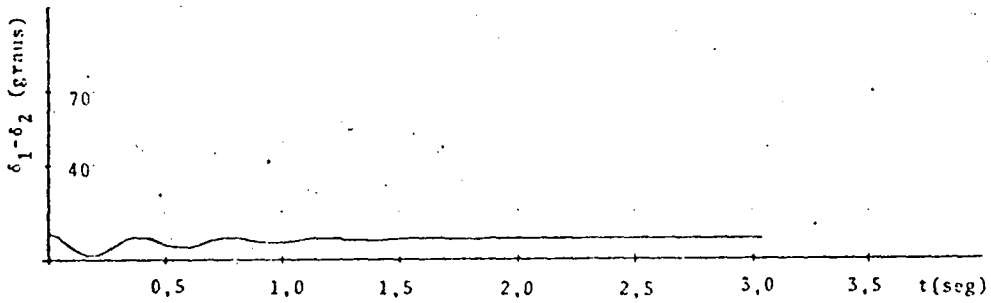
(i) Saída das linhas 1 e 5

(j) Saída das linhas 1 e 6

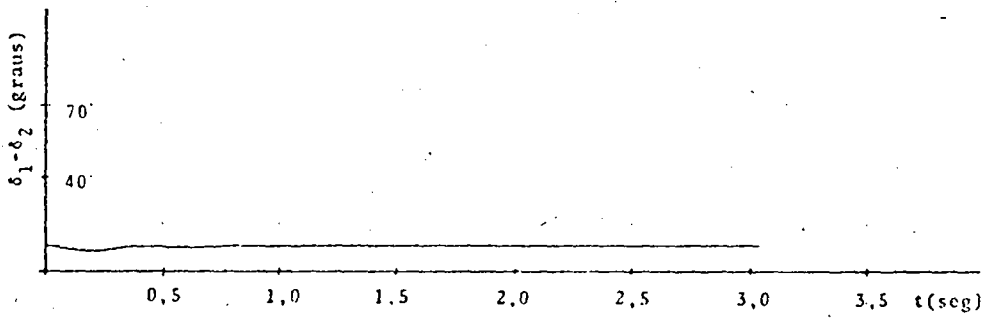
(k) Saída das linhas 2 e 3



(1)



(m)



(n)

(1) Saída das linhas 4 e 5

(m) Saída das linhas 4 e 6

(n) Saída das linhas 5 e 6

TABELA 4.3 - CONSTANTES DE INÉRCIA, CONSTANTES DE AMORTECIMENTO E REATÂNCIAS TRANSITÓRIAS DE EIXO DIRETO DAS MÁQUINAS

| NÚMERO DA MÁQUINA | CONSTANTE DE INÉRCIA (MWS) | AMORTECIMENTO (p.u.) | $x'd$ (p.u.) |
|-------------------|----------------------------|----------------------|--------------|
| 1 | 2364 | 0.05 | 0.0608 |
| 2 | 301 | 0.05 | 0.1813 |

TABELA 4.4 - DESVIOS DE FREQUÊNCIA PARA SAÍDAS DE GERAÇÃO OU VARIAÇÕES NA CARGA.

| UNIDADE Nº | SAÍDA DE CAPACIDADE (MW) | TEMPO DE CÁLCULO (seg) | DESVIO DE FREQUÊNCIA, $\bar{\omega}$ (rad/seg) |
|------------|--------------------------|------------------------|--|
| 1 | 5 | 4 | 0.494 |
| | 15 | 4 | 1.505 |
| | 20 | 4 | 1.909 |
| 2 | 20 | 4 | 0.54 |
| 1 | 5 | 4 | 1.034 |
| 2 | 20 | | |

TABELA 4.5 - DIFERENÇAS DOS ÂNGULOS INTERNOS DAS MÁQUINAS PARA SAÍDAS DE LINHAS POR CURTO-CIRCUITO NA BARRA INDICADA

| BARRA QUE OCORRE O C.C. | LINHAS RETIRADAS | DURAÇÃO DO DEFEITO (seg) | TEMPO DE CÁLCULO (seg) | DIFERENÇA ANGULAR ($\delta_1 - \delta_2$) (graus) |
|-------------------------|------------------|--------------------------|------------------------|---|
| 1 | 1 | 0.43 | 0.5 | 248.908 |
| | | 0.2 | 3 | 59.9499 |
| | 2 | 0.43 | 0.5 | 258.606 |
| | | 0.32 | 3 | 18.9863 |
| 2 | 3 | 0.43 | 3.5 | 9.2616 |
| | 4 | 0.43 | 3.5 | 9.54461 |
| 3 | 5 | 0.43 | 3 | 12.5322 |
| 4 | 6 | 0.43 | 3 | 11.2176 |

TABELA 4.6 - DIFERENÇAS DOS ÂNGULOS INTERNOS DAS MÁQUINAS PARA CONTIGÊNCIAS DE SAÍDAS DE LINHAS

| LINHAS RETIRADAS | TEMPO DE CÁLCULO (seg) | DIFERENÇA ANGU LAR ($\delta_1 - \delta_2$) (graus) |
|---------------------|------------------------------|--|
| 1 | 3 | 59.5374 |
| 2 | 3 | 17.9113 |
| 3 | 3 | 9.43892 |
| 4 | 3 | 9.48947 |
| 5 | 3 | 12.4934 |
| 6 | 3 | 11.1395 |
| 1 e 3 | 0,8 | 239.522 |
| 1 e 4 | 2,2 | 246.964 |
| 1 e 5 | 3 | 90.7729 |
| 1 e 6 | 3 | 74.9127 |
| 2 e 3 | 3 | 14.916 |
| 4 e 5 | 3 | 10.1588 |
| 4 e 6 | 3 | 9.3451 |
| 5 e 6 | 3 | 11.9033 |

ra com a conseqüente retirada da linha. Portanto, as figuras (2.a), (2.b), (2.c), (2.d), (2.e) e (2.f), representam contingências de saídas das linhas por curto-circuito na barra indicada, para tempo de defeito igual a 0,43 segundos. Observa-se, nas figuras (2.g) e (2.h), situações semelhantes às figuras (2.a) e (2.b), para tempos de defeitos iguais a 0,2 e 0,32 segundos, respectivamente. Os resultados numéricos constam na tabela (4.5).

A figura 4.3, representa as diferenças dos ângulos internos das máquinas, para contingências de saídas de linhas. As contingências simples correspondem as figuras (3.a), (3.b), (3.c), (3.d), (3.e), (3.f) e as contingências duplas, resultam nas figuras (3.g), (3.h), (3.i), (3.j), (3.k), (3.l), (3.m), (3.n), correspondentes as situações que se mostraram mais severas, pela análise das contingências simples. A tabela (4.6) foi construída a partir desses resultados.

4.5. Conclusões

Fixou-se um valor para o desvio de frequência, $\alpha = 1,5$ rad/seg e para as diferenças dos ângulos internos das máquinas em $\delta_1 - \delta_2 = 70$ graus como limites de operação desejável. Estabeleceu-se um conjunto de estados correspondentes as situações em que esses limites foram ultrapassados. Esse conjunto é constituído por todos os estados, que ultrapassam os limites de segurança estabelecidos, levando o sistema a condição de operação insatisfatória. No exemplo considerado, pela Tabela 4.4, para saídas de geração ou variações na carga de 15 e 20 MW, obteve-se desvios na frequência de 1,505 e 1,909 rad/seg, respectivamente. No caso de

saídas de linhas por curto-circuito, tabela 4.5, para um tempo de defeito igual a 0,43 seg, obteve-se diferenças angulares, de $248,908^{\circ}$ e $258,606^{\circ}$ com as saídas das linhas 1 e 2, respectivamente. Para as contingências de saídas das linhas (1 e 3), (1 e 4), (1 e 5) e (1 e 6), as diferenças angulares correspondentes foram, 239,522, 246,964 , 90,7729 e 74,9127. Esses estados constituem os estados de falha em que o sistema apresenta um grau de estabilidade inadequado e serão considerados no modelo de decisão, do próximo capítulo, como índices de qualidade.

C A P Í T U L O 5

MODELO DE DECISÃO PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

5.1. Introdução

Os sistemas de potência são projetados para fornecer energia elétrica aos consumidores, continuamente e com boa qualidade. Portanto a confiabilidade quantitativa e qualitativa se complementam para estabelecer a segurança do sistema.

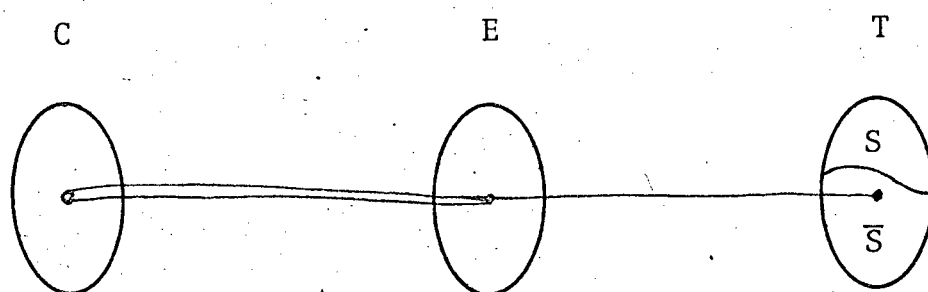
Usando uma abordagem probabilística, determinou-se a confiabilidade quantitativa no capítulo 3 e estabeleceu-se um conjunto de eventos que levaram o sistema a uma perda de continuidade na alimentação das cargas. A confiabilidade qualitativa, foi determinada no capítulo 4 onde se estabeleceu um conjunto de eventos que levaram o sistema a um grau de estabilidade insatisfatório. Nesse capítulo, representou-se o funcionamento ou falha dos componentes, através de chaveamentos, usou-se o modelo de decisão ⁽²⁵⁾ para melhor visualizar o problema e estabelecer um conjunto de eventos, cuja ocorrência, provoca uma perda de continuidade e/ou um grau de estabilidade inadequado, através de uma análise de confiabilidade.

5.2. O Modelo de Decisão

O modelo de decisão é um método eficiente para analisar

a confiabilidade do sistema ⁽²⁵⁾ e foi representado pela figura (5.1).

FIGURA 5.1 - MODELO DE DECISÃO



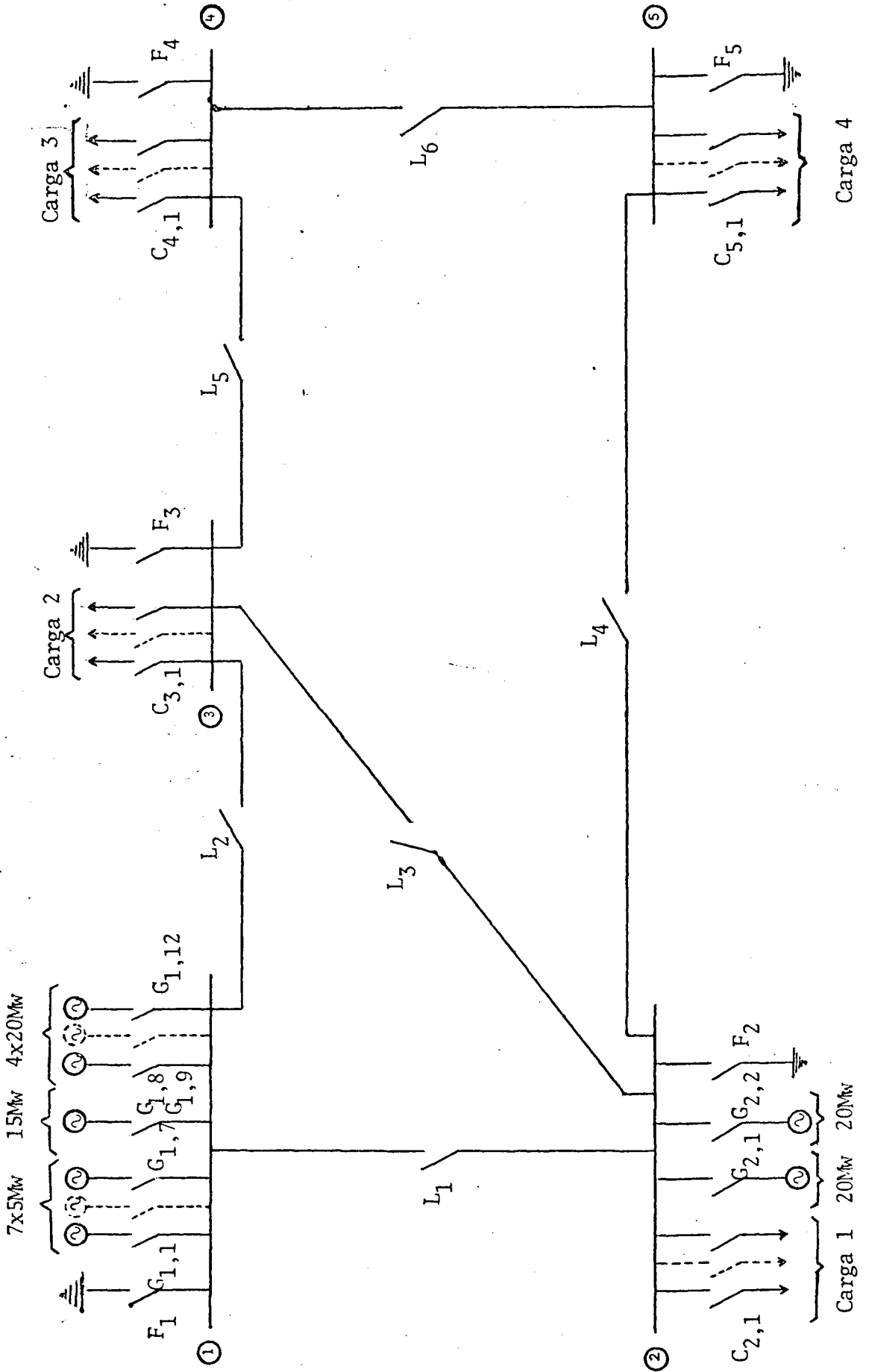
O modelo de decisão é constituído por um conjunto C , de todos os componentes do sistema, um conjunto E , subconjunto de C (correspondente às contingências) e um conjunto T , formado por todos os estados após as contingências, a partir do qual se pode tomar decisões. O conjunto T , se subdivide em duas regiões definidas pelos critérios de riscos adotados. Uma região de segurança S , onde o sistema satisfaz as condições de operação desejadas e uma região \bar{S} na qual os limites de confiabilidade, fixados, foram ultrapassados, após uma contingência.

5.3. Aplicação ao Sistema Exemplo

O exemplo da figura (3.1) foi representado na figura (5.2), para uma análise de confiabilidade.

Todos os componentes do sistema da figura (3.1), foram representados, nos estudos probabilísticos, pelo modelo de dois estados, operando ou em reparo. Essa modelagem sugeriu a represen

FIGURA 5.2 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

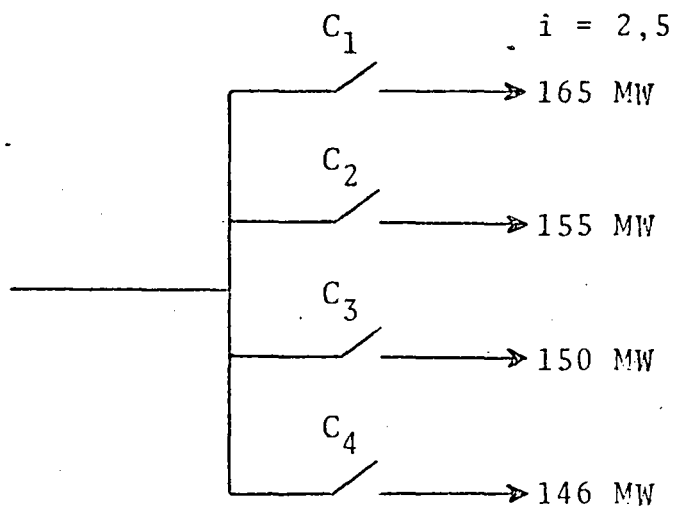


tação do sistema na forma da figura (5.2), para melhor visualizar a aplicação do modelo de decisão. A posição das chaves, caracteriza o funcionamento ou falha do equipamento. Portanto, as chaves, tipo G, indicam os estados das várias máquinas no sistema. As posições das chaves tipo L indicam os estados das linhas, as chaves F, se destinam a simulação de curto-circuito trifásico para terra, nas barras e C, as chaves correspondentes aos níveis de discretização da carga. Essa representação é conveniente, em estudos probabilísticos, para visualizar o funcionamento ou falha de um componente, através de uma operação de chaveamento que caracteriza a ocorrência de um evento.

Os eventos simulados foram, saídas de geração, variações na carga, saídas de linhas e curto-circuitos. Eles são aleatórios e possuem uma probabilidade de ocorrência correspondente. A partir da ocorrência probabilística de um evento, representado por chaveamento, o sistema evolui para um estado de operação definido, e os estudos passam a ser essencialmente determinísticos. Claramente, identificam-se dois problemas subsequentes. Um deles, probabilístico, denominado estático, que é referente a continuidade de fornecimento de energia e outro determinístico, relacionado à dinâmica do sistema.

Considerou-se o exemplo representado na figura (5.2), com a carga discretizada nos níveis indicados na figura (5.3).

FIGURA 5.3 - NÍVEIS DE DISCRETIZAÇÃO DA CARGA



No capítulo 3, estabeleceu-se como índice estático, a probabilidade de perda de carga e no capítulo 4, os desvios de frequências e diferenças entre ângulos internos das máquinas como índices característicos da dinâmica do sistema. Esses índices foram fixados para limitar as regiões S e \bar{S} , no conjunto T . A definição dessas regiões permite ao operador, tomar as decisões necessárias para restabelecer a operação satisfatória do sistema, que é caracterizada pelos riscos escolhidos.

Para saídas de geração ou variações na carga escolheu-se, uma probabilidade de perda de carga igual a 0,164384 (3 dias/ano) e um desvio de frequência $\alpha = 1,5$ radianos/segundo, como riscos, estático e dinâmico, respectivamente. Para saídas de linhas de transmissão e curto-circuito, fixou-se, como limite estático, a continuidade de alimentação das cargas, enquanto que o risco dinâmico foi caracterizado por uma diferença entre os ângulos internos das máquinas igual a 70 graus.

As chaves foram consideradas, inicialmente, nas posi-

ções $G = 0$, $L = 0$, $C = 0$ e $F = 1$. Isso significa todos os componentes em funcionamento, onde 0 indica uma chave fechada e 1, aberta.

Os resultados, para os eventos simulados, foram colocados nas tabelas (5.1), (5.2) e (5.3).

Identificou-se na coluna "Decisão", os estados referentes a uma operação desejável ou não, analisando a confiabilidade do aspecto quantitativo e/ou qualitativo.

5.4. Conclusões

A caracterização do comportamento dos componentes através de chaveamentos e o uso do modelo de decisão se mostraram eficientes para analisar a confiabilidade.

Analisando os resultados, na tabela 5.1, para saídas de geração ou variações na carga, observou-se que o sistema no estado 2, para saídas de geração de 15 e 20 MW na unidade 1, apresenta um desvio de frequência insatisfatório de acordo com a tabela 4.4 do capítulo 4. Para uma saída de geração de 20 MW na unidade 2, o sistema no estado 3, ultrapassa o risco estático de acordo com as tabelas 3.9, 3.10 e 3.11, no capítulo 3. Portanto para saídas de geração ou variações na carga de 15 e 20 MW, o sistema opera na região de insegurança \bar{S} . A análise do risco dinâmico não inclui contingências duplas.

Pela tabela 5.2, para saídas de linhas, o sistema opera na região \bar{S} quando assume os estados 9, 10, 11 e 12, não satisfazendo o risco dinâmico (tabela 4.6, capítulo 4) ou nos estados 20, 21 e 22, não apresentando continuidade para as cargas (tabe-

TABELA 5.1 - ANÁLISE DE CONFIABILIDADE PARA SAÍDAS DE GERAÇÃO
OU VARIÁÇÕES NA CARGA

| E V E N T O S | CAPACIDADE DE SAÍDA (MW) | ESTADO | ÍNDICE ESTÁTICO | | ÍNDICE DINÂMICO | | DECISÃO |
|--|--------------------------|--------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------|
| | | | PROBABILIDADE DE PERDA DE CARGA | DESVIO DE FREQUÊNCIA (rad/seg) | PROBABILIDADE DE PERDA DE CARGA | DESVIO DE FREQUÊNCIA (rad/seg) | |
| $G_{1,i} = 0 \cap G_{2,j} = 0$ $i = 1,12 \quad j = 1,2$ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | Sim |
| $G_{1,1} \cup G_{1,2} \cup \dots \cup G_{1,7} = 1$ | 5 | | 0 | 0,494 | 0,494 | 0,494 | Sim |
| $G_{1,8} = 1$ | 15 | 2 | 0,0400671 | 1,505 | 1,505 | 1,505 | Não |
| $G_{1,9} \cup G_{1,10} \cup \dots \cup G_{1,12} = 1$ | 20 | | 0,0601007 | 1,909 | 1,909 | 1,909 | Não |
| $G_{2,1} \cup G_{2,2} = 1$ | 20 | 3 | 0,176438 | 0,54 | 0,54 | 0,54 | Não |
| $G_{1,i} = 1 \cap G_{2,j} = 1$ $i = 1,7 \quad j = 1,2$ | 25 | | 0,00150253 | - | - | - | Sim |
| $G_{1,8} = 1 \cap G_{2,j} = 1$ $j = 1,2$ | 35 | 4 | 0,00150253 | - | - | - | Sim |
| $G_{1,i} = 1 \cap G_{2,j} = 1$ $i = 9,12 \quad j = 1,2$ | 40 | | 0,00150253 | - | - | - | Sim |

TABELA 5.2 - ANÁLISE DE CONFIABILIDADE PARA SAÍDAS
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

| EVENTOS | ESTADO | ÍNDICE ESTÁTICO | ÍNDICE DINÂMICO | DECISÃO |
|------------------------|--------|-----------------|---------------------------|---------|
| | | PROBABILIDADE | DIFERENÇA ANGULAR (GRAUS) | |
| $L_i = 0$ $i = 1,6$ | 1 | 0,913795 | 0 | Sim |
| $L_1 = 1$ | 2 | 0,0058744 | 59,5374 | Sim |
| $L_2 = 1$ | 3 | 0,00892038 | 17,9113 | Sim |
| $L_3 = 1$ | 4 | 0,0239327 | 9,43892 | Sim |
| $L_4 = 1$ | 5 | 0,0298071 | 9,48947 | Sim |
| $L_5 = 1$ | 6 | 0,00892038 | 12,4934 | Sim |
| $L_6 = 1$ | 7 | 0,0058744 | 11,1395 | Sim |
| $L_1 \cap L_2 = 1$ | 8 | 0,00005734 | - | Sim |
| $L_1 \cap L_3 = 1$ | 9 | 0,0001538 | 239,522 | Não |
| $L_1 \cap L_4 = 1$ | 10 | 0,0001916 | 246,964 | Não |
| $L_1 \cap L_5 = 1$ | 11 | 0,00005734 | 90,7729 | Não |
| $L_1 \cap L_6 = 1$ | 12 | 0,00003776 | 74,9127 | Não |
| $L_2 \cap L_3 = 1$ | 13 | 0,0002336 | 14,916 | Sim |
| $L_2 \cap L_4 = 1$ | 14 | 0,00029097 | - | Sim |
| $L_2 \cap L_5 = 1$ | 15 | 0,00008707 | - | Sim |
| $L_2 \cap L_6 = 1$ | 16 | 0,00005734 | - | Sim |
| $L_3 \cap L_4 = 1$ | 17 | 0,00078066 | - | Sim |
| $L_3 \cap L_5 = 1$ | 18 | 0,00023362 | - | Sim |
| $L_3 \cap L_6 = 1$ | 19 | 0,00015385 | - | Sim |
| $L_4 \cap L_5 = 1$ | 20 | 0,00029097 | 10,1588 | Não |
| $L_4 \cap L_6 = 1$ | 21 | 0,00019161 | 9,3451 | Não |
| $L_5 \cap L_6 = 1$ | 22 | 0,00005734 | 11,9033 | Não |

TABELA 5.3 - ANÁLISE DE CONFIABILIDADE PARA CURTO-CIRCUITO

| EVENTOS | ESTADO | ÍNDICE ESTÁTICO | ÍNDICE DINÂMICO | DECISÃO |
|--------------------|--------|-----------------|---------------------------|---------|
| | | PROBABILIDADE | DIFERENÇA ANGULAR (GRAUS) | |
| $F_1=0 \cap L_1=1$ | 2 | 0,0058744 | 248,908 | Não |
| $F_1=0 \cap L_2=1$ | 3 | 0,00892038 | 258,606 | Não |
| $F_2=0 \cap L_3=1$ | 4 | 0,0239327 | 9,2616 | Sim |
| $F_2=0 \cap L_4=1$ | 5 | 0,0298071 | 9,54461 | Sim |
| $F_3=0 \cap L_5=1$ | 6 | 0,00892038 | 12,5322 | Sim |
| $F_4=0 \cap L_6=1$ | 7 | 0,0058744 | 11,2176 | Sim |

la 3.13, capítulo 3).

Na tabela 5.3, o sistema nos estados 2 e 3, não satisfaz o risco dinâmico, para curto-circuito na barra 1, com tempo de defeito igual a 0,43 segundos e subsequente retirada das linhas 1 e 2. Esses resultados constam da tabela 4.5, no capítulo 4.

Da análise dos resultados, observou-se que a ocorrência de alguns eventos leva o sistema a estados de operação que ultrapassam os riscos estáticos, não ultrapassando os riscos dinâmicos e vice-versa. Torna-se claro que a confiabilidade não pode ser avaliada, separando os aspectos estáticos e dinâmicos, ou seja a confiabilidade quantitativa e qualitativa se complementam para estabelecer a segurança na operação do sistema.

C A P Í T U L O 6

CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E SUGESTÕES PARA FUTUROSTRABALHOS6.1. Conclusões e Comentários

O modelo de decisão para analisar a confiabilidade, quantitativa e qualitativa, de uma maneira unificada, mostrou-se eficiente, uma vez que a falha do sistema pode ocorrer por aspectos estáticos ou dinâmicos. Ressalta-se que esses dois problemas não são tão isolados fisicamente. Os estudos determinísticos decorrem da ocorrência probabilística dos eventos, e a confiabilidade como uma abordagem determinística começa onde a abordagem probabilística termina. Conseqüentemente a unificação da confiabilidade, resulta na segurança de operação do sistema. A idéia do modelo de decisão que divide a região do espaço pelos critérios de riscos, constitui o primeiro passo para as ações de controle. Identificam-se os estados de falhas do sistema e decide-se que providências devem ser tomadas para restabelecer a operação normal. Essas providências podem ser aumento na geração, reforço das linhas de transmissão, corte de cargas, etc.

Deve-se enfatizar que a simples distinção de comportamento do sistema, em estável e instável, não é muito significativa, quando um conjunto de contingências e as probabilidades de sua ocorrência não forem determinadas. Portanto a segurança do sistema fica melhor caracterizada, quando sua estabilidade é definida para

um conjunto de contingências especificadas e pela probabilidade de ocorrência desses eventos. O método de simulação usado nos estudos de estabilidade, apresenta o inconveniente de aumentar o tempo de computação. Tentou-se contornar esse problema, analisando as contingências mais rigorosas e de maior probabilidade de ocorrência. Uma solução para esse problema é sugerida em ⁽³⁰⁾, pelo uso dos métodos diretos e usando a simulação apenas para as contingências que se mostrarem mais severas.

Na abordagem probabilística, a representação dos eventos através de chaveamentos, permite uma maneira de analisar o sistema de potência como um todo, em estudos de planejamento. Essa representação pode sugerir uma medida de confiabilidade única para o sistema ao invés de estudar os sistemas de geração, transmissão e distribuição, separadamente. O posicionamento das chaves em 0 ou 1, facilita a identificação dos eventos que interrompem o fluxo de potência para as cargas, usando álgebra booleana, através de um computador ⁽¹¹⁾. As saídas parciais de capacidade, podem ser simuladas, discretizando-as nos níveis desejados. Não há restrições para incluir os efeitos ambientais para os componentes expostos ao tempo, quando o processo de Markov é utilizado ⁽¹⁷⁾. O maior problema dessa representação é o aumento do número de estados com o tamanho do sistema. Representando os componentes por chaves, o conjunto de estados do sistema é 2^n , onde n corresponde ao número de chaves. Sugere-se a solução desse problema através da simulação de Monte Carlo, em que os componentes são escolhidos aleatoriamente, a partir de especificação do número de eventos a estudar.

A probabilidade de perda de carga, usada como risco estático, é uma medida convencional, em estudos de confiabilidade. O desvio de frequências e a diferença entre os ângulos dos rotores,

tomando um deles como referência, foram usados como riscos dinâmicos. Esses riscos foram sugeridos em ⁽²³⁾ como índices representativos nos estudos de estabilidade. Estabelecer quais os melhores riscos estáticos e dinâmicos para caracterizar a confiabilidade de uma maneira unificada, incluindo a continuidade e a qualidade de serviço pode constituir um problema a ser solucionado. Outro problema é limitar esses riscos para definir a região de segurança. Naturalmente isso envolve conhecimento do sistema e experiência. Entretanto é possível que se obtenham soluções que garantem maior segurança a um custo muito elevado ou vice-versa. Conclui-se que uma análise de segurança e custo pode levar a uma solução desejada.

6.2. Sugestões para Futuros Trabalhos

A partir de um exame detalhado das conclusões e comentários apresenta-se como sugestões para futuros trabalhos, em avaliação de confiabilidade.

A criação de riscos para analisar a confiabilidade de uma maneira unificada, incluindo uma avaliação de custos desses riscos.

Uma abordagem analítica para tratar os aspectos dinâmicos, minimizando o tempo de simulação.

O uso da simulação de Monte Carlo para reduzir o número de estados em sistemas com muitos componentes.

Relativo às ações de controle, sugere-se:

O reforço das linhas de transmissão, a partir de uma análise de confiabilidade.

O remanejamento da geração ou planejamento da reserva girante.

A P Ê N D I C E I

PROGRAMAS PARA A CONFIABILIDADE DOS SISTEMAS DE
GERAÇÃO E TRANSMISSÃO

```

1  REM CONFIRACAO DO PLANEJAMENTO DE GERENCIA ESCOLAR
2  DIM A(20,30),B(20,20),C(20,20)
3  DIM X(20),S(20),F(20),P(20)
4  DIM E(20,20),T(20,20),Q(20,20)
5  DIM G(10,10),H(10,10)
10 PRINT "MATRIZ DE CADES N-1, N=10"
15 PER ENTRADA DA MATRIZ A(1,1) A(10,10) LINHEIRAS
17 PRINT "MATRIZ A(1,1) A(10,10)"
20 FOR I=1 TO N
21  J=1
22 FOR J=1 TO N
23  K=1
24  INDI=1:GOTO 25
25 PRINT TAB(10);A(I,J);
26  J=J+1:K=K+1
27 NEXT J
28 PRINT
29 NEXT I
30 REM TRANSFORMACAO DA MATRIZ A(I,J) EM DUAS MATRIZES TRIANGULARES B E C
31 E=0:F=0
32 FOR I=1 TO N
33 FOR J=1 TO N
34 IF J=1 THEN 140
35 IF J>1 THEN 110
36 FOR K=1 TO J-1
37 E=E+A(I,J)+C(K,J)
38 NEXT K
39 B(I,J)=A(I,J)-E+E=0
40 IF J=100 TO 104
41 C(I,J)=0
42 GO TO 141
43 C(I,J)=1
44 GO TO 145
45 B(I,J)=A(I,J)
46 IF J=1 THEN 144
47 C(I,J)=0
48 GO TO 145
49 C(I,J)=1
50 NEXT J
51 NEXT I
52 FOR I=1 TO N
53 FOR J=1 TO N
54 NEXT J
55 NEXT I
56 FOR I=1 TO N
57 FOR J=1 TO N
58 NEXT J
59 NEXT I
600 REM INVERSAO DA MATRIZ TRIANGULAR INFERIOR B(I,J)
601 G=0
602 FOR I=1 TO N
603 FOR J=1 TO N
604 IF J=100 TO 366
605 IF J=100 TO 308
606 FOR K=J TO 1-1
607 G=G+B(I,K)+C(K,J)
608 NEXT K
609 B(I,J)=G/B(I,1)+G=0
610 GO TO 369
611 B(I,J)=1/B(I,1)
612 GO TO 365
613 B(I,J)=0
614 NEXT J
615 NEXT I
616 FOR I=1 TO N
617 FOR J=1 TO N
618 NEXT J
619 NEXT I
700 REM INVERSAO DA MATRIZ TRIANGULAR SUPERIOR C(I,J)
701 H=0
702 FOR I=N TO 1 STEP -1
703 FOR J=N TO 1 STEP -1
704 IF J=100 TO 456
705 IF J=100 TO 456
706 FOR K=J+1 TO N
707 H=H+C(I,K)+T(K,J)
708 NEXT K
709 C(I,J)=H/C(I,1)+H=0
710 GO TO 465

```

```

450 T(I,J)-1700(I,J)
455 GO TO 460
460 T(I,J)-0
465 NEXT J
470 NEXT I
475 FOR I=1 TO N
480 FOR J=1 TO N
490 NEXT J
495 NEXT I
500 REM CALCULO DA MATRIZ INVERSA DA MATRIZ INICIAL R(I,J)
505 R=0
510 FOR I=1 TO N
515 FOR J=1 TO N
520 FOR K=1 TO N
525 R=R+T(I,K)*D(K,J)
530 NEXT K
535 F(I,J)=R\R=0
540 NEXT J
545 NEXT I
550 PRINT APRINT
555 PRINT "PROBABILIDADES DE ESTADOS EM REGIME PERMANENTE"
560 PRINT "*****"
565 U=0
570 FOR I=1 TO N
575 INPUT #1 K(I)
580 NEXT I
585 FOR I=1 TO N
590 FOR K=1 TO N
595 U=U+F(I,K)*R(K)
600 NEXT K
605 S(I)=U*U=0
610 PRINT S(I)
615 PRINT
620 NEXT I
625 F(I)=R(I,I)+S(I)
630 NEXT I
635 R(N,N)=-1.47
640 F(N)=R(N,N)+S(N)
645 REM CAPACIDADES DE SAIDA
650 STOP
655 FOR I=1 TO N
660 INPUT #1 P(I)
665 NEXT I
670 REM MATRIZ DOS ESTADOS-CAPACIDADES-PROBABILIDADES-FREQUENCIAS
675 FOR I=1 TO N
680 H(I,1)=1
685 H(I,2)=P(I)
690 H(I,3)=170-P(I)
695 H(I,4)=S(I)
700 H(I,5)=F(I)
705 NEXT I
710 PRINT
715 PRINT "TABELA DO MODELO REDUZIDO"
720 PRINT "*****"
725 FOR I=1 TO N PRINT P(I);NEXT I
730 PRINT APRINT APRINT
735 PRINT TAB(1)"NUMERO",TAB(14)"CAPACIDADE",TAB(27)"CAPACIDADE",
740 PRINT TAB(40)"PROBABILIDADE",
745 PRINT TAB(3)"DE",TAB(16)"DE",TAB(31)"DE",
750 PRINT TAB(45)"DE",
755 PRINT TAB(1)"ESTADOS",TAB(14)"SAIDA",TAB(27)"ENTRADA",
760 PRINT TAB(43)"ESTADO",
765 I1=0;I2=1;K1=0
770 IF K1=0 GO TO 780
775 IF K1=1 GO TO 785
780 I1=I1+1\R(I1,1)=11\R(I1,2)=H(I,2)\R(I1,3)=H(I,3)-H(I,3)
785 R(I1,4)=H(I,4)\R(I1,5)=H(I,5)\I1=I1+1;K1=0
790 GO TO 780
795 I=I+1;I1=1;K1=0
800 GO TO 780
805 IF K1=1 GO TO 785
810 I1=I1+1\R(I1,1)=11\R(I1,2)=H(I,2)\R(I1,3)=H(I,3)
815 R(I1,4)=H(I,4)+H(I+1,4)\R(I1,5)=H(I,5)+H(I+1,5)
820 I=I+1;K1=1
825 GO TO 780
830 I=I+1;I1=1;K1=1
835 IF I=N GO TO 730
840 FOR I=1 TO I1
845 J1=1
850 FOR J=1 TO 4
855 K1=13
860 PRINT TAB(J1)R(I,J),
865 J1=J1+K1
870 NEXT J
875 PRINT
880 NEXT I
885 PRINT APRINT APRINT
890 PRINT "TABELA DA PERDA DE CARGA ESPERADA"
895 PRINT "*****"

```

```

805 REM.ENTRADA DO NIVEL DE PICO DE CARGA E CAPACIDADE DO PICO
806 REM. OS DADOS DEVERAO SEGUIR A ORDEM DECRESCENTE DO NIVEL DE PICO
810 FOR I=1 TO 4
812 FOR J=1 TO 2
815 INPUT #1,P1(I,J)
816 PRINT P1(I,J)
817 NEXT J
820 NEXT I
825 S=0
826 FOR I=1 TO 5
827 C1(I,2)=0
828 NEXT I
830 FOR I=1 TO 5
832 FOR II=1 TO 4
835 IF R(I,3)-P1(II,1)<0 THEN 845
846 GO TO 850
848 C1(I,2)=P1(II,2)+C1(I,2)
850 NEXT II
855 C1(I,1)=R(I,2)+C1(I,3)+R(I,4)+C1(I,4)+C1(I,3)+C1(I,2)
860 S=S+C1(I,4)
865 NEXT I
870 PRINT
875 PRINT TAB(1) "CAPACIDADE",TAB(14) "UNIDADE",
876 PRINT TAB(2) "PROBABILIDADE",TAB(42) "PERDA"
877 PRINT TAB(3) "DE",TAB(17) "DE",TAB(32) "DE",TAB(42) "DE"
878 PRINT TAB(1) "SABOR",TAB(16) "TEMPO",
879 PRINT TAB(30) "ESTADOS",TAB(41) "CARGA"
880 FOR I=1 TO 4
882 J1=1
885 FOR J=1 TO 4
888 K1=15
890 PRINT TAB(J1)C1(I,J)
893 J1=J1+K1
895 NEXT J
897 PRINT
900 NEXT I
905 PRINT
910 PRINT "PERDA DE CARGA TOTAL ESPERADA=",S
912 PRINT "*****"
915 PRINT
916 S9=0+19=0
917 FOR I=1 TO 4
918 T9=T9+P1(I,2)NEXT I
919 S9=S+365/T9
920 PRINT "MEDIDA DE CONFIABILIDADE=",S9,PRINT "DIAS/ANO"
923 PRINT "*****"
950 END

```

READY

```

1  REM: CONFIGURACAO DO PLANEJAMENTO DA TRANSMISSAO
2  DIM R(22,22),E(22,22),C(22,22)
3  DIM K(22),S(22),F1(22),F(22)
4  DIM F(22,22),T(22,22),B(22,22)
5  DIM O(10,10),A(10,10)
10 PRINT "MATRIZ DE ORDEN N=";INPUT N
15 REM: ENTRADA DA MATRIZ A(I,J) E INVERTER
17 PRINT
20 FOR I=1 TO N
21  J1=1
25  FOR J=1 TO N
27    K1=2
30    INPUT #1:A(I,J)
35    J1=J1+K1
40  NEXT J
45  NEXT I
50  REM: TRANSFORMACAO DA MATRIZ A(I,J) EM DUAS MATRIZES TRIANGULARES B E C
55  E=6NF=0
60  FOR I=1 TO N
65  FOR J=1 TO N
70  IF J=1 THEN 140
75  IF J>I THEN 110
80  FOR K=1 TO J-1
85  E=E+B(I,K)*C(K,J)
90  NEXT K
95  B(I,J)=A(I,J)-E\F=0
97  IF J=100 TO 104
100  C(I,J)=0
102  GO TO 145
104  C(I,J)=1
106  GO TO 145
110  B(I,J)=0
115  FOR K=1 TO I-1
120  F=F+B(I,K)*C(K,J)
125  NEXT K
130  C(I,J)=(A(I,J)-F)/B(I,I)\F=0
135  GO TO 145
140  B(I,J)=A(I,J)
141  IF I=1 THEN 144
142  C(I,J)=0
143  GO TO 145
144  C(I,J)=1
145  NEXT J
150  NEXT I
155  FOR I=1 TO N
160  FOR J=1 TO N
170  NEXT J
175  NEXT I
180  FOR I=1 TO N
185  FOR J=1 TO N
200  NEXT J
205  NEXT I
300  REM: INVERSAO DA MATRIZ TRIANGULAR INFERIOR B(I,J)
302  G=0
305  FOR I=1 TO N
310  FOR J=1 TO N
315  IF J>100 TO 360
320  IF J=100 TO 350
325  FOR K=J TO I-1
330  G=G+B(I,K)*D(K,J)
335  NEXT K
340  D(I,J)=-G/B(I,I)\G=0
345  GO TO 365
350  D(I,J)=1/B(I,I)
355  GO TO 365
360  D(I,J)=0
365  NEXT J
370  NEXT I
375  FOR I=1 TO N
380  FOR J=1 TO N
390  NEXT J
395  NEXT I
400  REM: INVERSAO DA MATRIZ TRIANGULAR SUPERIOR C(I,J)
402  H=0
405  FOR I=N TO 1 STEP -1
410  FOR J=N TO 1 STEP -1
415  IF J<100 TO 460
420  IF J=100 TO 450
425  FOR K=I+1 TO J
430  H=H+C(I,K)*T(K,J)
435  NEXT K
440  T(I,J)=-H/C(I,I)\H=0
445  GO TO 465
450  T(I,J)=1/C(I,J)
455  GO TO 465

```

```
460 T(I,J)=0
465 NEXT J
470 NEXT I
475 FOR I=1 TO N
480 FOR J=1 TO N
485 NEXT J
495 NEXT I
500 REM:CALCULO DA MATRIZ INVERSA DA MATRIZ INICIAL A(I,J)
505 R=0
510 FOR I=1 TO N
515 FOR J=1 TO N
520 FOR K=1 TO N
525 A=S-T(I,K)+D(I,J)
530 NEXT K
535 F(I,J)=A/R=0
540 NEXT J
545 NEXT I
550 PRINT APRINT
555 PRINT "PROBABILIDADES DE ESTADOS EM REGIME PERMANENTE"
560 PRINT "=====
565 U=0
570 FOR I=1 TO N
575 INPUT #1:K(I)
580 NEXT I
585 FOR I=1 TO N
590 FOR K=1 TO N
595 U=U-F(I,K)*K(K)
600 NEXT K
605 S(I)=U/D=0
610 PRINT S(I)
615 NEXT I
620 END
```

A P Ê N D I C E II

PROGRAMAS PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE

```

LIST
1 REM - F. L. U. X. O. D. E. P. O. T. E. N. C. I. A
2 REM -
3 REM -
4 DIM L1(15), P2(15), Q2(15), P(15), Q(15), D(15), Y(15), P1(15), Q1(15)
5 DIM N3(15), N4(15), G1(15), B1(15), G2(15), B2(15), G(15,15), B(15,15)
6 DIM E(15), D5(15), J(15,15), C(15)
10 PRINT "NO. TOTAL DE BARRAS, NO. DE BARRAS PV INCLUINDO"
12 PRINT "A BARRA DE FOLGA", \INPUT N1, N2
15 PRINT "NO. DE LINHAS", \INPUT N3
16 PRINT \PRINT \PRINT
17 REM INCLUIR NAS DECLARAÇÕES 20 A 40, ATRAVÉS DE INSTRUÇÕES
18 REM DATA, OS DADOS REFERENTES ÀS LINHAS
20 DATA 1,1,2, .02, 24,0, .05
21 DATA 2,1,3, .08, 54,0, .05
22 DATA 3,2,3, .06, 6,0, .04
23 DATA 4,2,5, .04, 48,0, .03
24 DATA 5,3,4, .01, 36,0, .02
25 DATA 6,4,5, .08, 72,0, .05
50 FOR I=1 TO N5
52 READ L1(I), N3(I), N4(I), G2(I), B2(I), G1(I), B1(I)
54 NEXT I
60 FOR I=1 TO N5 \D(I)=G2(I)^2+B2(I)^2 \Q2(I)=G2(I)/D(I)
62 B2(I)=-B2(I)/D(I) \NEXT I
63 FOR I=1 TO N5 \PRINT #1: L1(I) \PRINT #1: N3(I) \PRINT #1: N4(I) \PRINT #1: G2(I)
64 PRINT #1: B2(I) \PRINT #1: G1(I) \PRINT #1: B1(I) \NEXT I
65 GOSUB 3000
70 FOR I=1 TO N1 \FOR K=1 TO N1 \PRINT #1: G(I,K) \PRINT #1: B(I,K)
75 NEXT K \NEXT I
100 DATA 0,0,1,1,1
105 FOR I=1 TO N1 \READ C(I) \NEXT I
110 DATA 1,06,1,0474
115 FOR I=1 TO N1
116 D5(I)=0 \IF C(I)=0 THEN 120
118 E(I)=1 \GO TO 125
120 READ E(I)
125 NEXT I
130 DATA .2, -.45, -.4, -.6
135 FOR I=2 TO N1 \READ P2(I) \NEXT I
145 DATA -.15, -.05, -.1
150 FOR I=2 TO N1 \IF C(I)=0 THEN 155
152 READ Q2(I)
155 NEXT I
160 DATA -10,10, -10,10
165 FOR I=2 TO N1 \IF C(I)>0 THEN 170
167 READ Q0(I), Q1(I)
170 NEXT I
173 I0=0
175 FOR I=1 TO N1 \P(I)=0 \Q(I)=0 \NEXT I
180 FOR I=2 TO N1
183 FOR K=1 TO N1
185 D8=D5(I)-D5(K)
190 P(I)=P(I)+E(I)*E(K)*(G(I,K)*COS(D8)+B(I,K)*SIN(D8))
197 Q(I)=Q(I)+E(I)*E(K)*(G(I,K)*SIN(D8)-B(I,K)*COS(D8))
200 NEXT K
205 P1(I)=P2(I)-P(I) \IF C(I)=0 THEN 215
210 Q1(I)=Q2(I)-Q(I)
215 NEXT I
220 P3=0 \Q3=0
225 FOR I=2 TO N1 \IF ABS(P1(I))<=P3 THEN 235
230 P3=ABS(P1(I))
235 IF C(I)=0 THEN 245
240 IF ABS(Q1(I))<=Q3 THEN 245
243 Q3=ABS(Q1(I))
245 NEXT I
247 PRINT \PRINT "ERRO DE POT. ATIVA = "P3
248 PRINT \PRINT "ERRO DE POT. REATIVA = "Q3
250 IF P3>.01 THEN 260
255 IF Q3>.01 THEN 1000
260 IF I0=0 THEN 300
270 FOR I=2 TO N1
272 IF C(I)>0 THEN 285
275 IF Q(I)<=Q1(I) THEN 280
277 Q2(I)=Q1(I) \C(I)=1 \N2=N2-1
280 IF Q(I)>=Q0(I) THEN 285
283 Q2(I)=Q0(I) \C(I)=1 \N2=N2-1
285 NEXT I
300 J3=2*N1-N2-1
310 FOR I=1 TO J3
315 FOR K=1 TO J3
320 J(I,K)=0 \NEXT K
325 NEXT I
330 I1=1
333 FOR I=2 TO N1 \K=2 \K1=0
335 IF C(I)=0 THEN 340
337 J6=1 \I2=I1+1 \GO TO 345
340 J6=0
345 K1=K1+1 \IF K=1 THEN 270
350 D8=D5(I)-D5(K)
355 J(I1,K1)=J(I1,K1)+E(I)*E(K)*(G(I,K)*SIN(D8)-B(I,K)*COS(D8))
360 IF J6=0 THEN 100

```



```

367 GO TO 400
370 FOR K7=1 TO N1\IF I=K7 THEN 377
373 D8=D5(I)-D5(K7)
375 J(I,K1)=J(I,K1)+E(I)*E(K7)*(B(I,K7)*COS(D8)-G(I,K7)+SIN(D8))
377 NEXT K7
380 IF J8=0 THEN 400
385 FOR K7=1 TO N1\IF I=K7 THEN 393
387 D8=D5(I)-D5(K7)
390 J(I,K1)=J(I,K1)+E(I)*E(K7)*(G(I,K7)*COS(D8)+B(I,K7)*SIN(D8))
393 NEXT K7
400 IF C(K)=0 THEN 480
405 K4=K4+1\IF K=1 THEN 430
410 D8=D5(I)-D5(K)
415 J(I,K1)=J(I,K1)+E(I)*E(K)*(G(I,K)*COS(D8)+B(I,K)*SIN(D8))
420 IF J8=0 THEN 480
425 J(I,K1)=J(I,K1)+E(I)*E(K)*(G(I,K)*SIN(D8)-B(I,K)*COS(D8))
427 GO TO 460
430 J(I,K1)=2+G(I,I)*E(I)2
435 FOR K7=1 TO N1\IF I=K7 THEN 445
437 D8=D5(I)-D5(K7)
440 J(I,K1)=J(I,K1)+E(I)*E(K7)*(G(I,K7)+COS(D8)+B(I,K7)*SIN(D8))
445 NEXT K7
450 IF J8=0 THEN 480
455 J(I,K1)=-2*B(I,I)*E(I)2
460 FOR K7=1 TO N1\IF I=K7 THEN 475
465 D8=D5(I)-D5(K7)
470 J(I,K1)=J(I,K1)+E(I)*E(K7)*(G(I,K7)*SIN(D8)-B(I,K7)*COS(D8))
475 NEXT K7
480 IF K1=J3 THEN 490
485 K=K+1\GO TO 345
490 IF J8<>0 THEN 497
493 I1=I1+1\GO TO 500
497 I1=I1+2
500 NEXT I
501 GO TO 515
502 PRINT \PRINT
503 PRINT "MATRIZ JACOBIANO" \PRINT \PRINT
505 FOR I=1 TO J3
507 FOR K=1 TO J3 \PRINT J(I,K) \NEXT K
510 PRINT \NEXT I
515 GOSUB 4000
520 IF I8<>0 THEN 525
522 PRINT \PRINT "JACOBIANO NAO TEM INVERSA" \GO TO 2000
525 I1=0
526 FOR I=2 TO N1\I1=I1+1\Y(I1)=P1(I)
527 IF C(I)=0 THEN 540
530 I1=I1+1\Y(I1)=Q1(I)
540 NEXT I
550 FOR I=2 TO N1\P(I)=0\Q(I)=0 \NEXT I
555 I1=0
560 FOR I=2 TO N1\I1=I1+1
565 FOR K7=1 TO J3\Y(I1)=P(I)+J(I1,K7)*Y(K7) \NEXT K7
567 D5(I)=D5(I)+P(I)
570 IF C(I)=0 THEN 585
575 I1=I1+1
580 FOR K7=1 TO J3\Q(I)=Q(I)+J(I1,K7)*Y(K7) \NEXT K7
583 E(I)=E(I)*(1+Q(I))
585 NEXT I
590 I8=I8+1\IF I8<50 THEN 175
600 PRINT \PRINT "NAO SE OBTIVE CONVERGENCIA EM 50 ITERACOES"
605 GO TO 2000
1000 PRINT \PRINT \PRINT "METODO DE NEWTON - RAPHSON CONVERGIU EM '10' ITERACOES"
1005 PRINT "LINHA", "BARRA", "BARRA", "POTENCIA", "POTENCIA"
1010 PRINT " ", "INICIAL", "FINAL", "ATIVA", "REATIVA"
1013 P(1)=0\Q(1)=0
1015 FOR K=1 TO N5\I1=N3(K)\K1=N4(K)
1016 O=0
1017 D8=D5(K1)-D5(I1)
1018 P3=(G2(K)+.5*G1(K))*E(I1)2-G2(K)*E(I1)*E(K1)*COS(D8)
1019 P3=P3+B2(K)*E(I1)*E(K1)*SIN(D8)
1020 Q3=-(.B2(K)+.5*B1(K))*E(K1)2+G2(K)*E(I1)*E(K1)*SIN(D8)
1021 Q3=Q3+B2(K)*E(I1)*E(K1)*COS(D8)
1022 IF I1<>1 THEN 1024
1023 P(1)=P(1)+P3\Q(1)=Q(1)+Q3
1024 IF K1<>1 THEN 1026
1025 O=1
1026 PRINT L1(K), I1, K1, P3, Q3
1030 P3=(G2(K)-.5*G1(K))*E(K1)2-G2(K)*E(I1)*E(K1)*COS(D8)
1031 P3=P3-B2(K)*E(I1)*E(K1)*SIN(D8)
1035 Q3=-(.B2(K)+.5*B1(K))*E(K1)2-G2(K)*E(I1)*E(K1)*SIN(D8)
1036 Q3=Q3+B2(K)*E(I1)*E(K1)*COS(D8)
1037 IF O<>1 THEN 1040
1038 P(1)=P(1)+P3\Q(1)=Q(1)+Q3
1040 PRINT L1(K), K1, I1, P3, Q3 \NEXT K
1050 PRINT \PRINT
1055 PRINT "BARRA", "MODULO DA", "DELTA", "POTENCIA", "POTENCIA"
1060 PRINT " ", "TENSOR", "(GRAUS)", "ATIVA", "REATIVA"
1100 FOR I=1 TO N1\D5(I)=57.2358*D5(I)
1105 PRINT #1: P(I) \PRINT #1: Q(I) \PRINT #1: E(I) \PRINT #1: D5(I)
1110 PRINT #1: E(I), D5(I), P(I), Q(I)
1111 NEXT I
2000 END

```

```

3000 REM - FORNACAO DE YEOS
3005 FOR I=1 TO N1
3010 FOR K=1 TO N1\G(I,K)=B\NS(I,K)=B\NEXT K
3015 NEXT I
3020 FOR I=1 TO N5\1=N3(I)\N=N4(I)
3025 G(L,L)=G(L,L)+G2(I)+G1(I)/2
3030 B(L,L)=B(L,L)+B2(I)+B1(I)/2
3035 G(N,M)=G(N,M)+G2(I)+G1(I)/2
3040 B(N,M)=B(N,M)+B2(I)+B1(I)/2
3045 G(L,N)=G(L,N)+G2(I)
3050 B(L,N)=B(L,N)+B2(I)
3055 G(N,L)=G(N,L)+G2(I)
3060 B(N,L)=B(N,L)+B2(I)
3070 NEXT I
3080 RETURN
4000 REM - INVERSAO DO JACOBIANO
4005 I3=1\N1=0\N2=0
4010 FOR K=1 TO J3\N(K)=0\NEXT K
4020 FOR K=1 TO J3\1=J3+1-K\IF V(L)<>0 THEN 4100
4025 IF J(L,L)=0 THEN 4100
4030 V(L)=1\N2=V2+1
4035 P8=G(L,L)\N(J(L,L))=-1/J(L,L)
4040 FOR I=1 TO J3\IF I=L THEN 4045
4045 J(I,L)=-J(I,L)/P8
4050 FOR I1=1 TO J3\IF I1=L THEN 4075
4060 FOR I2=1 TO J3\IF I2=L THEN 4070
4065 J(I1,I2)=J(I1,I2)+J(I1,L)*J(L,I2)
4070 NEXT I2
4075 NEXT I1
4080 FOR I=1 TO J3\IF I=L THEN 4090
4085 J(L,I)=-J(L,I)/P8
4090 NEXT I
4100 IF V1<>0 THEN 4120
4110 NEXT K
4120 IF J3=V2 THEN 4150
4130 FOR I=1 TO J3\IF V(I)<>0 THEN 4170
4140 IF J(I,I)=0 THEN 4170
4160 V1=V1+1\N2=V2+1\N(I)=1\N=L-I
4165 GO TO 4033
4170 NEXT I
4180 I3=0\G0 TO 4300
4190 FOR I=1 TO J3
4195 FOR K=1 TO J3\J(I,K)=-J(I,K)\NEXT K
4200 NEXT I
4300 RETURN
7000 INPUT E3
7005 INPUT E6
7010 D6=E3^2+E6^2\VE3=E3/D6\VE6=-E6/D6
7015 PRINT E3,E6

```

READY

```

3 REM - ESTADO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA PARA SISTEMAS
4 REM - DE VARIAS MAQUINAS
5 REM - CONTINGENCIAS DE GRUPOS DE GERACAO
6 DIM L(19),N3(10),N4(10),G2(10),B1(10),G1(10)
7 DIM G1(7),G2(7),F(10),G(10),Y2(10),G(10)
8 DIM X(10),X1(10),X4(10)
9 DIM E(5),G6(5),G5(7),G5(7),G5(7)
10 DIM F1(10),F2(10),N6(3)
11 DIM Y(5)
12 PRINT "NO. DE BARRAS",INPUT N1
13 PRINT "NO. DE GERADORES",INPUT G7
14 PRINT "NO. DE LINHAS",INPUT N5
15 K7=G7+1;N6=N1+G7
16 PRINT "PRINT"
17 REM - LEITURA DOS DADOS DO FLUXO DE POTENCIA PARA LINHAS
18 FOR I=1 TO N5:INPUT #1:L1(I),N3(I),N4(I),G2(I),G2(I),G1(I),B1(I)
19 N6(I)=N3(I)+G7;N4(I)=N4(I)+G7:NEXT I
20 REM - LEITURA DA MATRIZ YBUS
21 FOR I=1 TO N1
22 FOR J=1 TO N1:INPUT #1:G4(I,J);B4(I,J):NEXT J
23 PRINT
24 REM - LEITURA DOS DADOS DO FLUXO DE POTENCIA PARA AS BARRAS
25 FOR I=K7 TO N5:INPUT #1:P(I),Q(I),Y2(I),G(I):NEXT I
26 REM - IDENTIFICACAO DE BARRAS(1 PARA BARRAS DE CARGA,
27 REM 2 PARA BARRAS DE GERACAO,3 PARA BARRAS PV SEM GERACAO)
28 DATA 2,0,1,1,1
29 FOR I=K7 TO N5:READ C(I):NEXT I
30 REM - LEITURA DA REATANCIA TRANSITORIA DE GERADORES E
31 REM - REATANCIAS DE TRAFOS (XG1,XT1,XG2,XT2,...)
32 DATA 0.0008,0.1813,0
33 FOR K=1 TO G7
34 FOR I=1 TO G7:V30(I,K)=0;V30(I,K)=0:NEXT I
35 FOR J=1 TO N1:V35(I,K)=0;V35(I,K)=0:NEXT J
36 NEXT K
37 K=1
38 FOR I=K7 TO N5:IF I=I-G7:IF C(I)=1 THEN 34
39 READ N1(K),X4(K)
40 B=X1(K)+X4(K)
41 G6(K,K)=0;G6(K,K)=-1/B
42 D(I)=B(I)/57.2958
43 E(K)=500*((V2(I)+(Q(I)*B)/V2(I))^2+(P(I)*B/V2(I))^2)
44 D8(K)=D(I)+ATN(P(I)*B/(V2(I)^2+Q(I)*B))
45 B4(I1,I1)=B4(I1,I1)+B6(K,K)
46 G5(I1,K)=G5(I1,K)+B6(K,K)
47 K=K+1
48 IF C(I)=2 THEN 37
49 A=V2(I)^2;B4(I1,I1)=G4(I1,I1)-P(I)/A;B4(I1,I1)=B4(I1,I1)+Q(I)/A
50 NEXT I
51 FOR I=1 TO G7:PRINT #1:E(I);PRINT #1:D8(I);PRINT "E('I')="E(I),
52 PRINT "DELTA('I')="57.2958*D8(I):NEXT I
53 FOR I=1 TO N1:FOR K=1 TO N1:G6(I,K)=G4(I,K)+B6(I,K)
54 NEXT K:NEXT I
55 FOR I=1 TO G7:V(I)=D8(I):NEXT I
56 PRINT "PRINT TAB(28)"YBUS REDUZIDA"
57 U=1;G6SUB 3150
58 REM - CALCULO DAS POTENCIAS MECANICAS DOS GERADORES
59 FOR I=1 TO G7:P1(I)=G9(I,I)*E(I)^2
60 FOR K=1 TO G7:IF K=I THEN 103
61 A=D8(I)-D8(K)
62 P1(I)=P1(I)+E(I)*E(K)+(B5(I,K)*SIN(A)+B6(I,K)*COS(A))
63 NEXT K
64 PRINT "P('I')="P1(I);PRINT #1:P1(I):NEXT I
65 PRINT "PRINT"
66 DIM F2(5,5)
67 FOR I=2 TO G7
68 FOR K=1 TO G7:IF K=I THEN 150
69 F2(I,K)=E(I)*E(K)+B9(I,K)
70 NEXT K
71 NEXT I
72 FOR I=1 TO G7:FOR K=1 TO G7:PRINT "F('I','K')="F2(I,K)
73 NEXT K:NEXT I
74 END
3150 REM - SUBROTINA PARA REDUZIR AS MATRIZES ADMITANCIAS
3151 REM -
3152 U7=0
3153 G8=G7+1
3154 J3=2+N1
3155 L1=G7;N1=N1;N2=N1;N3=G7
3156 REM - DEFINICAO DAS MATRIZES G3 E B3
3157 FOR I=1 TO G7
3158 FOR K=1 TO N1:G3(I,K)=G6(K,I);B3(I,K)=B5(K,I):NEXT K:NEXT I

```

```

3231 REM - PROBABILIDADE PARA CALCULO DAS MATRIZES REDUZIDAS
3240 FOR I=1 TO 67
3241 FOR K=1 TO 67\05(1,K)=60(1,K)+69(1,K)+66(1,K)\NEXT K
3250 NEXT I
3255 GOSUB 3500
3260 FOR I=1 TO 67
3270 FOR K=1 TO 67\02(1,K)=61(1,K)\NEXT K
3275 NEXT I
3280 FOR I=1 TO 67
3285 FOR K=1 TO 67\04(1,K)=64(1,K)\NEXT K
3290 FOR K=1 TO 67\03(1,K)=65(1,K)\NEXT K
3295 NEXT I
3300 GOSUB 3500
3305 R=-1\01008 3500
3310 FOR I=1 TO 67
3315 FOR K=1 TO 67\01(1,K)=63(1,K)\NEXT K
3320 NEXT I
3325 FOR I=1 TO 67
3330 FOR K=1 TO 67\04(1,K)=64(1,K)\NEXT K\nEXT I
3335 GOSUB 3500
3340 R=1\00108 3500
3345 FOR I=1 TO 67
3350 FOR K=1 TO 67\04(1,K)=64(1,K)\NEXT K
3355 FOR K=1 TO 67\05(1,K)=65(1,K)\NEXT K
3360 NEXT I
3365 GOSUB 3500
3370 GOSUB 3500
3375 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\03(1,K)=63(1,K)\NEXT K\nEXT I
3380 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\04(1,K)=64(1,K)\NEXT K\nEXT I
3385 GOSUB 3500
3390 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\05(1,K)=65(1,K)\NEXT K\nEXT I
3400 GOSUB 3500
3405 R=-2\00108 3500
3410 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\03(1,K)=63(1,K)\NEXT K\nEXT I
3415 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\04(1,K)=64(1,K)\NEXT K\nEXT I
3420 GOSUB 3500
3425 GOSUB 3500
3430 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\03(1,K)=63(1,K)\NEXT K\nEXT I
3435 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\05(1,K)=65(1,K)\NEXT K\nEXT I
3440 GOSUB 3500
3445 GOSUB 3500
3450 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\03(1,K)=63(1,K)\NEXT K\nEXT I
3455 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\04(1,K)=64(1,K)\NEXT K\nEXT I
3460 PRINT \PRINT
3465 GOSUB 3500
3470 R=2\00108 3500
3475 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\PRINT 41:09(1,K)
3480 PRINT #1:BS(1,K)\PRINT "(^G9(1,K)^B9(1,K)^)"
3485 NEXT K\PRINT \NEXT I
3490 PRINT \RETURN
3500 REM - CALCULO DAS MATRIZES REDUZIDAS G9 E B9
3501 REM - =====
3502 IF ABS(A)=2 THEN 3550
3510 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\09(1,K)=G9(1,K)+SGN(A)*W(1,K)
3520 NEXT K\nEXT I
3530 GO TO 3570
3540 FOR I=1 TO 67
3545 FOR K=1 TO 67\B9(1,K)=B9(1,K)+SGN(A)*W(1,K)\NEXT K
3550 NEXT I
3560 RETURN
3600 REM - INVERSAO DE MATRIZ COMPLEXA
3601 REM - =====
3605 REM - TRANSFORMACAO DE MATRIZ COMPLEXA EM UMA MATRIZ REAL
3610 I1=1
3620 FOR I=1 TO J3 STEP 2\I2=I+1\K1=1
3625 FOR K=1 TO J3 STEP 2\K2=K+1
3630 J(1,K)=G4(I1,K1)\J(1,K2)=-B4(I1,K1)
3640 J(12,K)=B4(I1,K1)\J(12,K2)=G4(I1,K1)
3650 K1=K1+1\nEXT K
3660 I1=I1+1\nEXT I
4000 REM - INVERSAO DE MATRIZ REAL
4005 I0=1\N1=0\N2=0
4010 FOR K=1 TO J3\N(K)=0\nEXT K
4020 FOR K=1 TO J3\N=J3+1-K\IF Y(L)<>0 THEN 4100
4025 IF J(L,L)=0 THEN 4100
4030 Y(L)=1\N2=Y2+1
4035 P8=J(L,L)\J(L,L)=-1/J(L,L)
4040 FOR I=1 TO J3\IF I=L THEN 4045
4045 J(I,L)=-J(I,L)/P8
4050 NEXT I
4055 FOR I1=1 TO J3\IF I1=L THEN 4075
4060 FOR I2=1 TO J3\IF I2=L THEN 4070
4065 J(I1,I2)=J(I1,I2)+J(I1,L)*J(L,I2)
4070 NEXT I2
4075 NEXT I1
4080 FOR I=1 TO J3\IF I=L THEN 4090
4085 J(L,I)=-J(L,I)/P8
4090 NEXT I
4100 IF Y1<>0 THEN 4120

```

```

4150 NEXT K
4160 IF J0=V2 THEN 4130
4170 FOR I=1 TO J3 IF V(I)<0 THEN 4170
4180 IF I(1,1)=0 THEN 4170
4190 V1=V1+I*V2=V2+I*V(1)=I*V1
4200 GO TO 4010
4210 NEXT I
4220 I0=0\GO TO 4245
4230 FOR I=1 TO J3
4235 FOR K=1 TO J3\J(I,K)=-J(I,K)\NEXT K
4240 NEXT I
4250 IF *U7=5 THEN 4250
4255 I1=1
4260 FOR I=1 TO J3 STEP 2\I2=I+1\K1=1
4265 FOR K=1 TO J3 STEP 2\K2=K+1
4270 G4(I1,K1)=J(I1,K2)\G4(I1,K1)=-J(I1,K2)\K1=K1+1\NEXT K
4275 I1=I1+1\NEXT I
4280 GO TO 4250
4285 PRINT "MATRIZ SINGULAR"
4290 RETURN
4300 REM - CALCULO DO PRODUTO DE TRES MATRIZES
4301 REM - *****
4302 FOR I=1 TO L1
4305 FOR K=1 TO C2\W1(I,K)=0
4310 FOR L=1 TO C1
4315 W1(I,K)=W1(I,K)+W3(L,L)*G4(L,K)\NEXT L
4320 NEXT K\NEXT I
4330 FOR I=1 TO L1
4335 FOR K=1 TO C2\W(I,K)=0
4340 FOR L=1 TO C2
4345 W(I,K)=W(I,K)+W1(I,L)*G5(L,K)\NEXT L
4350 NEXT K\NEXT I
4360 RETURN

```

```

0 REM INTEGRACAO DE EQUACOES DIFERENCIAIS POR RUNGE KUTZ
1 REM .....
2 REM CALCULO DAS FREQUENCIAS PARA SAIDAS DE BERBOM
3 DIM E(4),X0(2),R(4)
4 DIM X(6),P2(4),F(6)
5 DIM H1(4),D1(4),K0(3),K1(3),K2(3),K3(3),B(4),N1, G(4),N2, P1(4)
13 PRINT "NO. DE GERADORES" \INPUT G7
14 PRINT "TEMPO DE CALCULO" \INPUT T3
15 PRINT "PASSO" \INPUT H
17 S1=30\S2=2500
18 N=2407
20 R1=1600
21 R2=10
22 GO SUB 1001
29 PRINT
30 FOR I=1 TO G7\I1=2*I-1\I2=2*I
32 INPUT #1: E(1), X0(1)\X0(2)=0
33 PRINT "E('I')="E(1), "DELTA('I')="57.2988*X0(1)
34 NEXT I\PRINT
35 N0=2*3.14159*50\N1=G\N1=T3
36 T=0
39 REM - LEITURA DAS CONSTANTES DE INERCIA E DE AMORTECIMENTO
40 DATA 9.55, .05, 2.35, .05
41 PRINT
42 FOR I=1 TO G7\READ H1(1), D1(1)\R(1)=N0/(2*H1(1))\NEXT I
43 CALL "PLOT"(S1+R1*T, S2+R2*57.3*X0(2))
44 CALL "PLOT"(S1+R1*T, S2+R2*57.3*X0(4))
45 L7=1
50 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\INPUT #1: B(1,K), R(1,K)\NEXT K\NEXT I
51 PRINT "MATRIZ DE ADMITANCIA REDUZIDA" \PRINT
52 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\PRINT "( 'B(1,K)', 'R(1,K)')";
53 NEXT K\PRINT \NEXT I\PRINT \PRINT
54 FOR I=1 TO G7\X(1)=X0(1)\NEXT I
55 FOR I=1 TO G7\INPUT #1: P1(1)\NEXT I
56 FOR I=1 TO G7\PRINT "F1('I')="P1(1)\NEXT I
57 FOR I=1 TO G7\X(1)=X0(1)\NEXT I
58 N=1
59 REM = CALCULO DAS POTENCIAS ELETRICAS DE SAIDA DAS MAQUINAS
60 FOR I=1 TO G7\P2(1)=G(P,1)*E(1)^2
61 I1=2*I-1
62 FOR K=1 TO G7\IF K=1 THEN 65
63 K1=2*K-1\N=X(I1)-X(K1)
64 P2(1)=P2(1)+E(1)*E(K)*B(1,K)*SIN(A)+G(1,K)*COS(A)
65 NEXT K
66 NEXT I
100 FOR I=1 TO G7\I1=2*I-1\I2=2*I
105 F(11)=X(12)
110 F(12)=E(1)*(P1(1)-P2(1)-D1(1)*X(12))
115 NEXT I
170 IF J=1 THEN 190
175 IF J=2 THEN 200
180 IF J=3 THEN 210
185 IF J=4 THEN 220
190 FOR I=1 TO N\K0(1)=F(1)\X(1)=X0(1)+K0(1)*H/2\NEXT I
195 T=T+H/2\J=2\GO TO 60
200 FOR I=1 TO N\K1(1)=F(1)\X(1)=X0(1)+K1(1)*H/2\NEXT I
205 J=3\GO TO 60
210 FOR I=1 TO N\K2(1)=F(1)\X(1)=X0(1)+K2(1)*H\NEXT I
215 J=4\T=T+H\GO TO 60
220 FOR I=0 TO N\K3(1)=F(1)
225 X0(1)=X0(1)+(K0(1)+2*(K1(1)+K2(1))+K3(1))*H/6\NEXT I
370 CALL "PLOT"(S1+R1*T, S2+R2*57.3*X0(2))
372 CALL "PLOT"(S1+R1*T, S2+R2*57.3*X0(4))
385 IF IK.5 THEN 387
386 IF L7=1 THEN 395
387 T=T
390 IF IK1 THEN 57
395 PRINT \PRINT "T="T-H
400 PRINT \PRINT "FREQUENCIA DE CADA MAQUINA:"
410 PRINT \PRINT "X0(2)="X0(2)
420 PRINT \PRINT "X0(4)="X0(4)
425 L7=L7+1
430 STOP
1000 END
1001 G1=.1
1103 I1=1\I=51
1105 FOR J=0 TO 50\NEXT J
1110 CALL "PLOT"(I, S2)
1112 U7=R1*I1+G1+S1
1115 IF ABS(I-U7)>.01 THEN 1135
1130 I1=I+1
1135 I=I+10\IF I<4000 THEN 1105
1140 I=I-5\IF I<51 THEN 1200
1150 CALL "PLOT"(I, S2)\GO TO 1140
1200 I1=1\I=52
1201 G1=10
1205 FOR J=0 TO 50\NEXT J
1210 CALL "PLOT"(S1, I)
1212 U7=R2*I1+G1+S2
1215 IF ABS(I-U7)>.01 THEN 1235
1230 I1=I+1
1235 I=I+10\IF I<4000 THEN 1205

```

```

LIST
0 REM - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA PARA SISTEMAS
1 REM - =====
2 REM - DE VARIAS MAQUINAS
3 REM - =====
4 REM - CONTINGENCIA DE SAIDA DE LINHA POR C.C. TRI-FASICO
5 DIM L1(10),N3(10),N4(10),G2(10),B2(10),G1(10),B1(10)
6 DIM G4(7,7),B4(7,7),F(10),Q(10),V2(10),D(10)
7 DIM C(10),X1(10),X4(10)
8 DIM E(5),D0(5),G5(7,7),B6(7,7)
9 DIM J(12,12),Y(12)
10 DIM R1(10),R2(10),N8(3)
11 DIM Y(5)
12 PRINT "NO. DE BARRAS";\INPUT N1
13 PRINT "NO. DE GERADORES";\INPUT G7
14 PRINT "NO. DE LINHAS";\INPUT N5
15 K7=G7+1\K8=N1+G7
16 PRINT \PRINT
17 REM - LEITURA DOS DADOS DO FLUXO DE POTENCIA PARA LINHAS
18 FOR I=1 TO N5\INPUT #1:L1(I),N3(I),N4(I),G2(I),B2(I),G1(I),B1(I)
19 N3(I)=N3(I)+G7\N4(I)=N4(I)+G7\NEXT I
20 REM - LEITURA DA MATRIZ YBUS
21 FOR I=1 TO N1
22 FOR K=1 TO N1\INPUT #1:G4(I,K),B4(I,K)\NEXT K\NEXT I
23 PRINT
24 REM - LEITURA DOS DADOS DO FLUXO DE POTENCIA PARA AS BARRAS
25 FOR I=K7 TO K8\INPUT #1:F(I),Q(I),V2(I),D(I)\NEXT I
26 REM - IDENTIFICACAO DE BARRAS(1 PARA BARRAS DE CARGA,
27 REM 2 PARA BARRAS DE GERACAO,0PARA BARRAS PV SEM GERACAO)
28 DATA 2,0,1,1,1
29 FOR I=K7 TO K8\READ C(I)\NEXT I
30 REM - LEITURA DA REATANCIA TRANSITORIA DE GERADORES E
31 REM - REATANCIAS DE TRAFOS (XG1,XT1,XG2,XT2,...)
32 DATA .0608,0.,.1813,0
33 FOR K=1 TO G7
34 FOR I=1 TO G7\G0(I,K)=0\B0(I,K)=0\NEXT I
35 FOR J=1 TO N1\G5(J,K)=0\B5(J,K)=0\NEXT J
36 NEXT K
37 K=1
38 FOR I=K7 TO K8\I1=I-G7\IF C(I)=1 THEN 84
39 READ X1(K),X4(K)
40 B=X1(K)+X4(K)
41 G0(K,K)=0\B0(K,K)=-1/B
42 D(I)=D(I)/57.2958
43 E(K)=SQRT((V2(I)+(Q(I)*B)/V2(I))^2+(F(I)*B/V2(I))^2)
44 D0(K)=D(I)+ATH(P(I)*57/(V2(I)^2+Q(I)*B))
45 B4(I1,I1)=B4(I1,I1)+B0(K,K)
46 G5(I1,K)=0\B5(I1,K)=-B0(K,K)
47 K=K+1
48 IF C(I)=2 THEN 87
49 A=V2(I)^2\G4(I1,I1)=G4(I1,I1)-F(I)/A\B4(I1,I1)=B4(I1,I1)+Q(I)/A
50 NEXT I
51 FOR I=1 TO G7\PRINT #1:E(I)\PRINT #1:D0(I)\PRINT "E("I")="E(I),
52 PRINT "DELTA("I")="57.2958*D0(I)\NEXT I
53 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\G6(I,K)=G4(I,K)\B6(I,K)=B4(I,K)
54 NEXT K\NEXT I
55 FOR I=1 TO G7\Y(I)=D0(I)\NEXT I
56 U=1\GOSUB 3160
57 REM - CALCULO DAS POTENCIAS MECANICAS DOS GERADORES
58 FOR I=1 TO G7\P1(I)=G9(I,I)*E(I)^2
59 FOR K=1 TO G7\IF K=I THEN 103
60 A=D0(I)-D0(K)
61 P1(I)=P1(I)+E(I)*((G9(I,K)*SIN(A)+G9(I,K)*COS(A))
62 NEXT K
63 PRINT \PRINT "P("I")="P1(I)\PRINT #1:P1(I)\NEXT I
64 PRINT \PRINT
65 PRINT "BARRA EM QUE OCORRE O C.C. 30";\INPUT N4
66 PRINT \PRINT TAB(20)"YBUS REDUZIDA DURANTE O DEFEITO"
67 FOR K=1 TO G7\R1(K)=G5(N4,K)\R2(K)=B5(N4,K)\NEXT K
68 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\G4(I,K)=G6(I,K)\B4(I,K)=B6(I,K)
69 NEXT K\NEXT I
70 U=2\GOSUB 3160
71 FOR I=N4 TO K9\I1=N1+N4-I\I2=I1-1
72 FOR K=1 TO G7\G5(I1,K)=G5(I2,K)\B5(I1,K)=B5(I2,K)
73 NEXT K\NEXT I
74 FOR K=1 TO G7\G5(N4,K)=R1(K)\B5(N4,K)=R2(K)
75 NEXT K
76 PRINT \PRINT
77 PRINT "NO. DE LINHAS RETIRADAS";\INPUT N8
78 PRINT "INDIQUE AS LINHAS RETIRADAS"
79 FOR I=1 TO N5\INPUT N8(I)\NEXT I
80 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\G4(I,K)=G6(I,K)\B4(I,K)=B6(I,K)
81 NEXT K\NEXT I

```

```

148 PRINT \PRINT TAB(20)*YBUS REDUZIDA APOS O DEFEITO"
150 FOR I=1 TO N8\L8=M8(I)\L=N3(L8)-G7\A=N4(L8)-G7
152 G4(L,L)=G6(L,L)-G2(L8)-G1(L8)/2
154 B4(L,L)=B6(L,L)-B2(L8)-B1(L8)/2
156 G4(M,M)=G6(M,M)-G2(L8)-G1(L8)/2
158 B4(M,M)=B6(M,M)-B2(L8)-B1(L8)/2
160 G4(L,M)=G6(L,M)+G2(L8)
162 B4(L,M)=B6(L,M)+B2(L8)
164 G4(M,L)=G6(M,L)+G2(L8)
166 B4(M,L)=B6(M,L)+B2(L8)
168 NEXT I
170 U=3\GOSUB 3160
180 GOSUB 2000
• 200 END
2000 REM-SUBROTINA PARA CALCULAR OS ANGULOS DE
2005 REM- EQUILIBRIO APOS O DEFEITO
2007 FOR I=1 TO G7\DO(I)=Y(I)-Y(I)\NEXT I
2009 J3=G7-1
2015 DIM Z(5),F2(5,5)
2045 U7=5
2046 I3=0
2047 PRINT \PRINT
2050 FOR I=2 TO G7
2055 Z(I)=G9(I,1)*E(I)^2-F1(I)
2060 FOR K=1 TO G7\IF K=1 THEN 2075
2065 A=D0(I)-D0(K)
2070 Z(I)=Z(I)+E(I)*E(K)*(G9(I,K)*COS(A)+B9(I,K)*SIN(A))
2072 F2(I,K)=E(I)*E(K)*B9(I,K)
2075 NEXT K
2080 NEXT I
2090 U1=0\FOR I=2 TO G7\IF ABS(Z(I))<=U1 THEN 2100
2095 U1=ABS(Z(I))
2100 NEXT I
2105 PRINT "ITERACAO NO. "; \PRINT I3
2107 I3=I3+1
2108 PRINT "CRITERIO DE CONVERGENCIA="U1
2110 IF U1<=1.00000E-03 THEN 2400
2115 FOR I=2 TO G7\I1=I-1\J(I1,I1)=0
2120 FOR K=1 TO G7\IF K=1 THEN 2127
2122 A=D0(I)-D0(K)
2125 J(I1,I1)=J(I1,I1)+E(I)*E(K)*(B9(I,K)*COS(A)-G9(I,K)*SIN(A))
2127 NEXT K
2130 NEXT I
2135 FOR I=2 TO G7\I1=I-1
2140 FOR K=2 TO G7\K1=K-1\IF K1=I1 THEN 2153
2145 A=D0(I)-D0(K)
2150 J(I1,K1)=E(I)*E(K)*(G9(I,K)*SIN(A)-B9(I,K)*COS(A))
2153 NEXT K
2155 NEXT I
2157 FOR I=1 TO J3\FOR K=1 TO J3
2158 PRINT J(I,K), \NEXT K\PRINT \NEXT I
2160 GOSUB 4000
2165 PRINT "INV. DO JACOBIANO"
2166 FOR I=1 TO J3\FOR K=1 TO J3
2167 PRINT J(I,K)\NEXT K\PRINT \NEXT I
2170 FOR I=2 TO G7\I1=I-1
2175 FOR K=2 TO G7\K1=K-1
2180 D0(I)=D0(I)-J(I1,K1)*Z(K)
2185 NEXT K
2187 NEXT I
2188 PRINT
2189 PRINT "NOVOS D0", \PRINT D0(1),D0(2),D0(3)
2190 GO TO 2050
2400 FOR K=2 TO G7
2405 PRINT "DELTA("K")="D0(K),
2410 IF K=1 THEN 2425
2420 PRINT "DELTA("K", "1")="D0(K)-D0(1)
2425 PRINT
2430 NEXT K
2450 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\PRINT "F("I", "K")="F2(I,K)
2455 NEXT K\NEXT I
2500 RETURN
3160 REM - SUBROTINA PARA REDUZIR AS MATRIZES ADMITANCIAS
3161 REM - =====
3164 U7=0
3165 G8=G7+1
3166 J3=2*N1
3167 L1=G7\C1=N1\C2=N1\C3=G7
3168 REM - DEFINICAO DAS MATRIZES G3 E B3
3170 FOR I=1 TO G7
3175 FOR K=1 TO N1\G3(I,K)=G5(K,I)\B3(I,K)=B5(K,I)\NEXT K\NEXT I
3180 REM -MODIFICACAO DE YBUS PARA C.C. 3-FASICO NA BARRA N4
3182 IF U<>2 THEN 3240
3200 K9=N1-1
3205 FOR I=N4 TO K9\I1=I+1
3210 FOR K=1 TO G7\G5(I,K)=G5(I1,K)\B5(I,K)=B5(I1,K)\NEXT K
3215 FOR K=1 TO N1\G4(I,K)=G4(I1,K)\B4(I,K)=B4(I1,K)\NEXT K
3220 NEXT I

```



```

3225 FOR I=1 TO G7
3230 FOR K=N4 TO K5\K1=K+1\G3(I,K)=G3(I,K1)\B3(I,K)=B3(I,K1)
3232 NEXT K\NEXT I
3233 FOR I=1 TO N1
3234 FOR K=N4 TO K9\K1=K+1\G4(I,K)=G4(I,K1)\B4(I,K)=B4(I,K1)\NEXT K
3235 NEXT I
3236 J3=24\K9
3237 C1=K9\C2=K9
3238 REM - PREPARACAO PARA CALCULO DAS MATRIZES REDUZIDAS
3240 FOR I=1 TO G7
3245 FOR K=1 TO G7\G9(I,K)=G9(I,K)\B9(I,K)=B9(I,K)\NEXT K
3250 NEXT I
3255 GOSUB 3800
3265 FOR I=1 TO G7
3270 FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=G3(I,K)\NEXT K
3275 NEXT I
3280 FOR I=1 TO N1
3285 FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=G4(I,K)\NEXT K
3290 FOR K=1 TO G7\Q5(I,K)=G5(I,K)\NEXT K
3300 NEXT I
3302 GOSUB 4500
3303 A=-1\GOSUB 3500
3305 FOR I=1 TO G7
3310 FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=B3(I,K)\NEXT K
3315 NEXT I
3320 FOR I=1 TO N1
3325 FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=B4(I,K)\NEXT K\NEXT I
3330 GOSUB 4500
3333 A=1\GOSUB 3500
3335 FOR I=1 TO N1
3340 FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=G4(I,K)\NEXT K
3345 FOR K=1 TO G7\Q5(I,K)=G5(I,K)\NEXT K
3350 NEXT I
3352 GOSUB 4500
3353 GOSUB 3500
3360 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=G3(I,K)\NEXT K\NEXT I
3375 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=B4(I,K)\NEXT K\NEXT I
3387 GOSUB 4500
3388 GOSUB 3500
3390 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO G7\Q5(I,K)=G5(I,K)\NEXT K\NEXT I
3402 GOSUB 4500
3403 A=-2\GOSUB 3500
3405 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=B3(I,K)\NEXT K\NEXT I
3420 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=G4(I,K)\NEXT K\NEXT I
3432 GOSUB 4500
3433 GOSUB 3500
3435 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=G3(I,K)\NEXT K\NEXT I
3450 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO G7\Q5(I,K)=B5(I,K)\NEXT K\NEXT I
3462 GOSUB 4500
3463 GOSUB 3500
3465 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=B3(I,K)\NEXT K\NEXT I
3480 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=B4(I,K)\NEXT K\NEXT I
3490 PRINT \PRINT
3492 GOSUB 4500
3493 A=2\GOSUB 3500
3494 IF U=1 THEN 3498
3495 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\PRINT #1:G9(I,K)
3496 PRINT #1:B9(I,K)\PRINT "("G9(I,K)", "B9(I,K)");
3497 NEXT K\PRINT \NEXT I
3498 RETURN
3500 REM - CALCULO DAS MATRIZES REDUZIDAS G9 E B9
3501 REM - =====
3502 IF ABS(A)=2 THEN 3550
3515 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\G9(I,K)=G9(I,K)+SGN(A)*W(I,K)
3520 NEXT K\NEXT I
3530 GO TO 3570
3550 FOR I=1 TO G7
3555 FOR K=1 TO G7\B9(I,K)=B9(I,K)+SGN(A)*W(I,K)\NEXT K
3560 NEXT I
3570 RETURN
3800 REM - INVERSAO DE MATRIZ COMPLEXA
3801 REM - =====
3805 REM - TRANSFORMACAO DE MATRIZ COMPLEXA EM UMA MATRIZ REAL
3810 I1=1
3820 FOR I=1 TO J3 STEP 2\I2=I+1\K1=1
3825 FOR K=1 TO J3 STEP 2\K2=K+1
3830 J(I,K)=G4(I1,K1)\J(I,K2)=-B4(I1,K1)
3840 J(I2,K)=B4(I1,K1)\J(I2,K2)=G4(I1,K1)
3850 K1=K1+1\NEXT K
3860 I1=I1+1\NEXT I
4000 REM - INVERSAO DE MATRIZ REAL
4005 I8=1\Y1=0\Y2=0
4010 FOR K=1 TO J3\Y(K)=0\NEXT K
4020 FOR K=1 TO J3\L=J3+1-K\IF V(L)<0 THEN 4100
4025 IF J(L,L)=0 THEN 4100
4030 V(L)=1\Y2=Y2+1
4035 P8=J(L,L)\J(L,L)=-1/J(L,L)
4035 FOR I=1 TO J3\IF I=L THEN 4045
4040 J(I,L)=-J(I,L)/P8
4045 NEXT I

```

```

4050 FOR I1=1 TO J3\IF I1=L THEN 4075
4060 FOR I2=1 TO J3\IF I2=L THEN 4070
4065 J(I1,I2)=J(I1,I2)+J(I1,L)+J(L,I2)
4070 NEXT I2
4075 NEXT I1
4080 FOR I=1 TO J3\IF I=L THEN 4090
4085 J(L,I)=-J(L,I)/P8
4090 NEXT I
4100 IF Y1<>0 THEN 4120
4110 NEXT K
4120 IF J2=Y2 THEN 4190
4130 FOR I=1 TO J3\IF Y(I)<>0 THEN 4170
4140 IF J(I,I)=0 THEN 4170
4160 Y1=Y1+1\Y2=Y2+1\Y(I)=1\I=I
4165 GO TO 4033
4170 NEXT I
4180 I8=0\GO TO 4245
4190 FOR I=1 TO J3
4195 FOR K=1 TO J3\J(I,K)=-J(I,K)\NEXT K
4200 NEXT I
4203 IF U7=5 THEN 4250
4205 I1=1
4210 FOR I=1 TO J3 STEP 2\I2=I+1\K1=I
4220 FOR K=1 TO J3 STEP 2\K2=K+1
4230 G4(I1,K1)=J(I1,K1)\G4(I1,K2)=-J(I1,K2)\K1=K1+1\NEXT K
4240 I1=I1+1\NEXT I
4241 GO TO 4250
4245 PRINT "MATRIZ SINGULAR"
4250 RETURN
4500 REM - CALCULO DO PRODUTO DE TRES MATRIZES
4501 REM - =====
4502 FOR I=1 TO L1
4505 FOR K=1 TO C2\W1(I,K)=0
4510 FOR L=1 TO C1
4515 W1(I,K)=W1(I,K)+O3(I,L)*G4(L,K)\NEXT L
4520 NEXT K\NEXT I
4530 FOR I=1 TO L1
4535 FOR K=1 TO C3\W(I,K)=0
4540 FOR L=1 TO C2
4545 W(I,K)=W(I,K)+W1(I,L)*O5(L,K)\NEXT L
4550 NEXT K\NEXT I
4700 RETURN

```

READY

```

0 REM INTEGRACAO DE EQUACOES DIFERENCIAIS POR RUNGE KUTTA
1 REM -----
2 REM DIFERENCA ANGULAR PARA SAIDAS DE LT POR C.C. TRIFASICO
3 DIM E(4),X0(8),A(4)
4 DIM X(8),P2(4),F(8)
5 DIM H1(4),D1(4),K0(8),K1(8),K2(8),K3(8),B(4,4),G(4,4),P1(4)
12 PRINT "BURACO DO DEFEITO";\INPUT T2
13 PRINT "NO. DE GERADORES";\INPUT G7
14 PRINT "TEMPO DE CALCULO";\INPUT T3
15 PRINT "PASSO";\INPUT H
17 S1=50;S2=1500
18 N=2+87
19 R1=1000
21 R2=10
22 COSUS 1001
25 PRINT
30 FOR I=1 TO 67\I1=2*I-1;I2=2*I
32 INPUT #1:E(I),X0(I2)\X0(I2)=0
33 PRINT "E("I")="E(I),"DELTA("I")="57.2958*X0(I1)
34 NEXT I\PRINT
35 W0=2+3.14159*60;T0=0;T1=T2
36 T=T0
37 FOR I=1 TO G7\INPUT #1:P1(I)\NEXT I
38 FOR I=1 TO G7\PRINT "P1("I")="P1(I)\NEXT I
39 REM - LEITURA DAS CONSTANTES DE INERCIA E DE AMORTECIMENTO
40 DATA 3.55, 0.5, 2.35, .65
41 PRINT
42 FOR I=1 TO 67\READ H1(I),D1(I)\A(I)=W0/(2*H1(I))\NEXT I
43 CALL "PLOT"(S1+R1*T,S2+R2*57.3*(X0(1)-X0(3)))
50 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\INPUT #1:G(I,K),B(I,K)\NEXT K\nEXT I
51 PRINT "MATRIZ DE ADMITANCIA REDUZIDA"\PRINT
52 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\PRINT "("G(I,K)", "B(I,K)");
53 NEXT K\PRINT \NEXT I
54 FOR I=1 TO 67\X(I)=X0(I)\NEXT I
55 J=1
57 REM - CALCULO DAS POTENCIAS ELETRICAS DE SAIDA DAS MAQUINAS
60 FOR I=1 TO 67\P2(I)=G(I,I)*E(I)^2
61 I1=2*I-1
62 FOR K=1 TO 67\IF K=1 THEN 65
63 K1=2*K-1;A=X(I1)-X(K1)
64 P2(I)=P2(I)+E(I)*E(K)*(B(I,K)*SIN(A)+G(I,K)*COS(A))
65 NEXT K
66 NEXT I
100 FOR I=1 TO 67\I1=2*I-1;I2=2*I
105 F(I1)=X(I2)
110 F(I2)=A(I1)*(P1(I)-P2(I)-D1(I)*X(I2))
115 NEXT I
170 IF J=1 THEN 160
175 IF J=2 THEN 200
180 IF J=3 THEN 210
185 IF J=4 THEN 220
190 FOR I=1 TO N\K0(I)=F(I)\X(I)=X0(I)+K0(I)*H/2\nEXT I
195 T=T0+H/2;J=2;GO TO 60
200 FOR I=1 TO N\K1(I)=F(I)\X(I)=X0(I)+K1(I)*H/2\nEXT I
205 J=3;GO TO 60
210 FOR I=1 TO N\K2(I)=F(I)\X(I)=X0(I)+K2(I)*H\nEXT I
215 J=4;T=T0+H;GO TO 60
220 FOR I=0 TO N\K3(I)=F(I)
225 X0(I)=X0(I)+(K0(I)+2*(K1(I)+K2(I))+K3(I))*H/6\nEXT I
370 CALL "PLOT"(S1+R1*T,S2+R2*57.3*(X0(1)-X0(3)))
385 T=T
390 IF T<T1 THEN 54
395 IF T1=T3 THEN 430
400 T1=T3
410 PRINT
420 GO TO 50
430 PRINT \PRINT "DIFERENCA ANGULAR"
440 PRINT \PRINT 57.3*(X0(1)-X0(3))
1000 END
1001 Q1=1
1103 I1=1;I=S1
1105 FOR J=0 TO 50\nEXT J
1110 CALL "PLOT"(I,S2)
1112 U7=R1*I1+Q1+S1
1115 IF ABS(I-U7)>.01 THEN 1135
1130 I1=I+1
1135 I=I+10;IF IC=4000 THEN 1105
1140 I=I-5;IF IC=51 THEN 1200
1150 CALL "PLOT"(I,S2)\GO TO 1140
1200 I1=1;I=S2
1201 Q1=10
1205 FOR J=0 TO 50\nEXT J
1210 CALL "PLOT"(S1,I)
1212 U7=R2*I1+Q1+S2
1215 IF ABS(I-U7)>.01 THEN 1235
1230 I1=I+1
1235 I=I+10;IF IC=4000 THEN 1205
1240 I=I-5;IF IC=52 THEN 1300
1250 CALL "PLOT"(S1,I)\GO TO 1240
1300 RETURN

```

```

0 REM - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA PARA SISTEMAS
1 REM - .....
2 REM - DE VARIAS MAQUINAS
3 REM - .....
4 REM - CONTINGENCIAS DE RETIRADA DE LINHAS
5 DIM L1(10),N3(10),N4(10),G2(10),B2(10),G1(10),B1(10)
6 DIM G4(7,7),B4(7,7),P(10),Q(10),V2(10),D(10)
7 DIM C(10),X1(10),X4(10)
8 DIM E(5),D0(5),G5(7,7),B6(7,7)
9 DIM J(12,12),V(12)
10 DIM R1(10),R2(10),N8(3)
11 DIM V(5)
12 PRINT "NO. DE BARRAS",\INPUT N1
13 PRINT "NO. DE GERADORES",\INPUT G7
14 PRINT "NO. DE LINHAS",\INPUT N5
15 K7=G7+1\N8=N1+G7
16 PRINT \PRINT
17 REM - LEITURA DOS DADOS DO FLUXO DE POTENCIA PARA LINHAS
18 FOR I=1 TO N5\INPUT #1:L1(I),N3(I),N4(I),G2(I),B2(I),G1(I),B1(I)
19 N3(I)=N3(I)+G7\N4(I)=N4(I)+G7\NEXT I
20 REM - LEITURA DA MATRIZ YBUS
21 FOR I=1 TO N1
22 FOR K=1 TO N1\INPUT #1:G4(I,K),B4(I,K)\NEXT K\NEXT I
23 PRINT
24 REM - LEITURA DOS DADOS DO FLUXO DE POTENCIA PARA AS BARRAS
25 FOR I=K7 TO K8\INPUT #1:P(I),Q(I),V2(I),D(I)\NEXT I
26 REM - IDENTIFICACAO DE BARRAS(1 PARA BARRAS DE CARGA,
27 REM 2 PARA BARRAS DE GERACAO,OPARA BARRAS PV SEM GERADOR)
28 DATA 2,0,1,1,1
29 FOR I=K7 TO K8\READ C(I)\NEXT I
30 REM - LEITURA DA REATANCIA TRANSITORIA DE GERADORES E
31 REM - REATANCIAS DE TRAFOS (XG1,XT1,XG2,XT2,...)
32 DATA .0698,0, .1813,0
33 FOR K=1 TO G7
34 FOR I=1 TO G7\G0(I,K)=0\B0(I,K)=0\NEXT I
35 FOR J=1 TO N1\G5(J,K)=0\B5(J,K)=0\NEXT J
36 NEXT K
37 K=1
38 FOR I=K7 TO K8\I1=I-G7\IF C(I)=1 THEN B4
39 READ X1(K),X4(K)
40 B=X1(K)+X4(K)
41 G0(K,K)=0\B0(K,K)=-1/B
42 D(I)=D(I)/57.2958
43 E(K)=50R((V2(I)+(Q(I)+B)/V2(I))^2+(P(I)+B/V2(I))^2)
44 D0(K)=D(I)+ATN(P(I)+B/V2(I)^2+Q(I)+B)
45 B4(I1,I1)=B4(I1,I1)+B0(K,K)
46 G5(I1,K)=0\B5(I1,K)=-B0(K,K)
47 K=K+1
48 IF C(I)=2 THEN B7
49 A=V2(I)^2\G4(I1,I1)=G4(I1,I1)-P(I)/A\B4(I1,I1)=B4(I1,I1)+Q(I)/A
50 NEXT I
51 FOR I=1 TO G7\PRINT #1:E(I)\PRINT #1:D0(I)\PRINT "E('I)'="E(I),
52 PRINT "DELTA('I)'="57.2958*D0(I)\NEXT I
53 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\G6(I,K)=G4(I,K)\B6(I,K)=B4(I,K)
54 NEXT K\NEXT I
55 FOR I=1 TO G7\V(I)=D0(I)\NEXT I
56 U=1\GOSUB 3160
57 REM - CALCULO DAS POTENCIAS MECANICAS DOS GERADORES
58 FOR I=1 TO G7\P1(I)=G9(I,I)*E(I)^2
59 FOR K=1 TO G7\IF K=I THEN 103
60 R=D0(I)-D0(K)
61 P1(I)=P1(I)+E(I)*E(K)*(B9(I,K)*SIN(R)+G9(I,K)+COS(R))
62 NEXT K
63 PRINT "P('I)'="P1(I)\PRINT #1:P1(I)\NEXT I
64 PRINT \PRINT
65 PRINT "NO. DE LINHAS RETIRADAS",\INPUT N8
66 PRINT "INDIQUE AS LINHAS RETIRADAS"
67 FOR I=1 TO N5\INPUT N8(I)\NEXT I
68 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\G4(I,K)=G6(I,K)\B4(I,K)=B6(I,K)
69 NEXT K\NEXT I
70 PRINT \PRINT TAB(20)"VEUS REDUZIDA APOS A SAIDA DA LINHA"
71 FOR I=1 TO N8\L8=N8(I)\L=N3(L8)-G7\N=N4(L8)-G7
72 G4(L,L)=G6(L,L)-G2(L8)-G1(L8)/2
73 B4(L,L)=B6(L,L)-B2(L8)-B1(L8)/2
74 G4(M,N)=G6(M,N)-G2(L8)-G1(L8)/2
75 B4(M,N)=B6(M,N)-B2(L8)-B1(L8)/2
76 G4(L,H)=G6(L,H)+G2(L8)
77 B4(L,H)=B6(L,H)+B2(L8)
78 G4(H,L)=G6(H,L)+G2(L8)
79 B4(H,L)=B6(H,L)+B2(L8)
80 NEXT I
81 U=3\GOSUB 3160
82 GOSUB 2000
83 END
84 REM - SUBROTINA PARA CALCULAR OS ANGULOS DE

```

```

2005 REM - EQUILIBRIO APÓS O DEFEITO
2007 FOR I=1 TO G7\DO(I)=Y(I)-Y(1)\NEXT I
2009 J3=G7-1
2015 DIM Z(5),F2(5,5)
2045 U7=5
2046 I3=0
2047 PRINT
2050 FOR I=2 TO G7
2055 Z(I)=G9(I,1)+E(I)^2-F1(I)
2060 FOR K=1 TO G7\IF K=J THEN 2075.
2065 A=DO(I)-DO(K)
2070 Z(I)=Z(I)+E(I)*E(K)*(G9(I,K)+COS(A)+B9(I,K)+SIN(A))
2072 F2(I,K)=E(I)*E(K)*B9(I,K)
2075 NEXT K
2080 NEXT I
2090 U1=0\FOR I=2 TO G7\IF ABS(Z(I))<=U1 THEN 2100
2095 U1=ABS(Z(I))
2100 NEXT I
2107 I3=I3+1
2110 IF U1<=1.00000E-03 THEN 2400
2115 FOR I=2 TO G7\I1=I-1\J(I1,11)=0
2120 FOR K=1 TO G7\IF K=I THEN 2127.
2122 A=DO(I)-DO(K)
2125 J(I1,11)=J(I1,11)+E(I)*E(K)*(B9(I,K)*COS(A)-G9(I,K)*SIN(A))
2127 NEXT K
2130 NEXT I
2135 FOR I=2 TO G7\I1=I-1
2140 FOR K=2 TO G7\K1=K-1\IF K1=I1 THEN 2153
2145 A=DO(I)-DO(K)
2150 J(I1,K1)=E(I)*E(K)*(G9(I,K)*SIN(A)-B9(I,K)*COS(A))
2153 NEXT K
2155 NEXT I
2160 GOSUB 4000
2170 FOR I=2 TO G7\I1=I-1
2175 FOR K=2 TO G7\K1=K-1
2180 DO(I)=DO(I)-J(I1,K1)*Z(K)
2185 NEXT K
2187 NEXT I
2190 GO TO 2050
2400 FOR K=2 TO G7
2430 NEXT K
2450 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO G7\PRINT "F('I','K')="F2(I,K)
2455 NEXT K\nEXT I
2500 RETURN
3160 REM - SUBROTINA PARA REDUZIR AS MATRIZES ADMITÂNCIAS
3161 REM - =====
3164 U7=0
3165 G0=G7+1
3166 J3=2*N1
3167 L1=G7\O1=N1\O2=N1\O3=G7
3168 REM - DEFINIÇÃO DAS MATRIZES G3 E B3
3170 FOR I=1 TO G7
3175 FOR K=1 TO N1\G3(I,K)=G5(K,1)\B3(I,K)=B5(K,1)\NEXT K\nEXT I
3230 REM - PREPARAÇÃO PARA CÁLCULO DAS MATRIZES REDUZIDAS
3240 FOR I=1 TO G7
3245 FOR K=1 TO G7\G9(I,K)=G0(I,K)\B9(I,K)=B0(I,K)\NEXT K
3250 NEXT I
3255 GOSUB 3600
3265 FOR I=1 TO G7
3270 FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=G3(I,K)\NEXT K
3275 NEXT I
3280 FOR I=1 TO N1
3285 FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=G4(I,K)\NEXT K
3290 FOR K=1 TO G7\Q5(I,K)=G5(I,K)\NEXT K
3300 NEXT I
3302 GOSUB 4500
3303 A=-1\GOSUB 3500
3305 FOR I=1 TO G7
3310 FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=B3(I,K)\NEXT K
3315 NEXT I
3320 FOR I=1 TO N1
3325 FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=B4(I,K)\NEXT K\nEXT I
3330 GOSUB 4500
3333 A=1\GOSUB 3500
3335 FOR I=1 TO N1
3340 FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=G4(I,K)\NEXT K
3345 FOR K=1 TO G7\Q5(I,K)=B5(I,K)\NEXT K
3350 NEXT I
3352 GOSUB 4500
3353 GOSUB 3500
3360 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=G3(I,K)\NEXT K\nEXT I
3375 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=B4(I,K)\NEXT K\nEXT I
3387 GOSUB 4500
3388 GOSUB 3500
3390 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO G7\Q5(I,K)=G5(I,K)\NEXT K\nEXT I
3402 GOSUB 4500
3403 A=-2\GOSUB 3500
3405 FOR I=1 TO G7\FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=B3(I,K)\NEXT K\nEXT I
3420 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=G4(I,K)\NEXT K\nEXT I
3432 GOSUB 4500

```

```

3433 GOSUB 3500
3435 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=G3(I,K)\NEXT K\nEXT I
3450 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO 67\Q5(I,K)=B5(I,K)\NEXT K\nEXT I
3462 GOSUB 4500
3463 GOSUB 3500
3465 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO N1\Q3(I,K)=B3(I,K)\NEXT K\nEXT I
3480 FOR I=1 TO N1\FOR K=1 TO N1\Q4(I,K)=B4(I,K)\NEXT K\nEXT I
3490 PRINT \PRINT
3492 GOSUB 4500
3493 A=2\GOSUB 3500
3494 IF U<>3 THEN 3498
3495 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\PRINT #1:G9(I,K)
3496 PRINT #1:B9(I,K)\PRINT "(G3(I,K),B9(I,K))"
3497 NEXT K\nEXT I
3498 PRINT \RETURN
3500 REM - CALCULO DAS MATRIZES REDUZIDAS G9 E B9
3501 REM - =====
3502 IF ABS(A)=2 THEN 3550
3515 FOR I=1 TO 67\FOR K=1 TO 67\G9(I,K)=G9(I,K)+SGN(A)*W(I,K)
3520 NEXT K\nEXT I
3530 GO TO 3570
3550 FOR I=1 TO 67
3555 FOR K=1 TO 67\B9(I,K)=B9(I,K)+SGN(A)*W(I,K)\NEXT K
3560 NEXT I
3570 RETURN
3600 REM - INVERSAO DE MATRIZ COMPLEXA
3601 REM - =====
3605 REM - TRANSFORMAÇÃO DE MATRIZ COMPLEXA EM UMA MATRIZ REAL
3610 I1=1
3620 FOR I=1 TO J3 STEP 2\I2=I+1\K1=1
3625 FOR K=1 TO J3 STEP 2\K2=K+1
3630 J(I1,K)=B4(I1,K1)\J(I1,K2)=-B4(I1,K1)
3640 J(I2,K)=B4(I1,K1)\J(I2,K2)=B4(I1,K1)
3650 K1=K1+1\nEXT K
3660 I1=I1+1\nEXT I
4000 REM - INVERSAO DE MATRIZ REAL
4005 I8=1\Y1=0\Y2=0
4010 FOR K=1 TO J3\Y(K)=0\nEXT K
4020 FOR K=1 TO J3\L=J3+1-K\IF V(L)<>0 THEN 4100
4025 IF J(L,L)=0 THEN 4100
4030 V(L)=1\Y2=Y2+1
4033 P8=J(L,L)\J(L,L)=-1/J(L,L)
4035 FOR I=1 TO J3\IF I=L THEN 4045
4040 J(I,L)=-J(I,L)/P8
4045 NEXT I
4050 FOR I1=1 TO J3\IF I1=L THEN 4075
4060 FOR I2=1 TO J3\IF I2=L THEN 4070
4065 J(I1,I2)=J(I1,I2)+J(I1,L)*J(L,I2)
4070 NEXT I2
4075 NEXT I1
4080 FOR I=1 TO J3\IF I=L THEN 4090
4085 J(L,I)=-J(L,I)/P8
4090 NEXT I
4100 IF Y1<>0 THEN 4120
4110 NEXT K
4120 IF J3=Y2 THEN 4190
4130 FOR I=1 TO J3\IF V(I)<>0 THEN 4170
4140 IF J(I,I)=0 THEN 4170
4160 Y1=Y1+1\Y2=Y2+1\V(I)=1\L=I
4165 GO TO 4033
4170 NEXT I
4180 I8=0\GO TO 4245
4190 FOR I=1 TO J3
4195 FOR K=1 TO J3\J(I,K)=-J(I,K)\NEXT K
4200 NEXT I
4203 IF U7=5 THEN 4250
4205 I1=1
4210 FOR I=1 TO J3 STEP 2\I2=I+1\K1=1
4220 FOR K=1 TO J3 STEP 2\K2=K+1
4230 G4(I1,K1)=J(I1,K)\G4(I1,K2)=-J(I1,K2)\K1=K1+1\nEXT K
4240 I1=I1+1\nEXT I
4241 GO TO 4250
4245 PRINT "MATRIZ SINGULAR"
4250 RETURN
4500 REM - CALCULO DO PRODUTO DE TRES MATRIZES
4501 REM - =====
4502 FOR I=1 TO L1
4505 FOR K=1 TO C2\W1(I,K)=0
4510 FOR L=1 TO C1
4515 W1(I,K)=W1(I,K)+Q3(I,L)*Q4(L,K)\NEXT L
4520 NEXT K\nEXT I
4530 FOR I=1 TO L1
4535 FOR K=1 TO C3\W(I,K)=0
4540 FOR L=1 TO C2
4545 W(I,K)=W(I,K)+W1(I,L)*Q5(L,K)\NEXT L
4550 NEXT K\nEXT I
4700 RETURN

```

READY

```

0 REM INTEGRACAO DE EQUACOES DIFERENCIAIS POR RUNGE KUNTA
1 REM -----
2 REM - SAIDA DE LINHAS SEM C.O.
4 DIM E(4),X0(3),R(4)
6 DIM H(8),P2(4),F(8)
8 DIM H1(4),D1(4),W(8),K1(8),K2(8),K3(8),B(4,4),G(4,4),P1(4)
13 PRINT "NO. DE GERADORES" \INPUT D7
14 PRINT "TEMPO DE CALCULO" \INPUT T3
15 PRINT "PASSO" \INPUT H
17 S1=50 \ S2=1500
18 N=2*67
20 R1=1000
21 R2=10
22 GOSUB 1001
25 PRINT
30 FOR I=1 TO 67 \ I1=2*I-1 \ I2=2*I
32 INPUT #1: E(I),X0(I1) \ X0(I2)=0
33 PRINT "E("I")="E(I), "DELTA("I")="57.2958*H0(I1)
34 NEXT I \ PRINT
35 W0=2*3.14159*60 \ T0=0 \ T1=73
36 T=T0
37 FOR I=1 TO 67 \ INPUT #1: F1(I) \ NEXT I
38 FOR I=1 TO 67 \ PRINT "F1("I")="F1(I) \ NEXT I
39 REM - LEITURA DAS CONSTANTES DE INERCIA E DE AMORTECIMENTO
40 DATA 9.55, .05, 2.35, .05
41 PRINT
42 FOR I=1 TO 67 \ READ H1(I),D1(I) \ A(I)=W0/(2*H1(I)) \ NEXT I
43 CALL "PLOT"(S1+R1*T, S2+R2*57.3*(X0(1)-X0(3)))
50 FOR I=1 TO 67 \ FOR K=1 TO 67 \ INPUT #1: G(I,K),B(I,K) \ NEXT K \ NEXT I
51 PRINT "MATRIZ DE ADMITANCIA REDUZIDA" \ PRINT
52 FOR I=1 TO 67 \ FOR K=1 TO 67 \ PRINT "("G(I,K)", "B(I,K)")";
53 NEXT K \ PRINT \ NEXT I
54 FOR I=1 TO 67 \ X(I)=X0(I) \ NEXT I
55 J=1
57 REM - CALCULO DAS POTENCIAS ELETRICAS DE SAIDA DAS MAQUINAS
60 FOR I=1 TO 67 \ P2(I)=G(I,I)*E(I)^2
61 I1=2*I-1
62 FOR K=1 TO 67 \ IF K=I THEN 65
63 K1=2*K-1 \ A=X(I1)-X(K1)
64 P2(I)=P2(I)+E(I)*E(K)*(B(I,K)*SIN(A)+G(I,K)*COS(A))
65 NEXT K
66 NEXT I
100 FOR I=1 TO 67 \ I1=2*I-1 \ I2=2*I
105 F(I1)=X(I2)
110 F(I2)=A(I)*(F1(I)-P2(I)-D1(I)*X(I2))
115 NEXT I
170 IF J=1 THEN 190
175 IF J=2 THEN 200
180 IF J=3 THEN 210
185 IF J=4 THEN 220
190 FOR I=1 TO N \ X0(I)=F(I) \ X(I)=X0(I)+K0(I)*H/2 \ NEXT I
195 T=T0+H/2 \ J=2 \ GO TO 60
200 FOR I=1 TO N \ X1(I)=F(I) \ X(I)=X0(I)+K1(I)*H/2 \ NEXT I
205 J=3 \ GO TO 60
210 FOR I=1 TO N \ X2(I)=F(I) \ X(I)=X0(I)+K2(I)*H \ NEXT I
215 J=4 \ T=T0+H \ GO TO 60
220 FOR I=0 TO N \ K3(I)=F(I)
225 X0(I)=X0(I)+(X0(I)+2*(K1(I)+K2(I))+K3(I))*H/6 \ NEXT I
370 CALL "PLOT"(S1+R1*T, S2+R2*57.3*(X0(1)-X0(3)))
385 T=T
390 IF T<T1 THEN 54
395 PRINT \ PRINT "DIFERENCA ANGULAR"
400 PRINT \ PRINT 57.3*(X0(1)-X0(3))
1000 END
1001 G1=.1
1103 I1=1 \ I=51
1105 FOR J=0 TO 50 \ NEXT J
1110 CALL "PLOT"(I, S2)
1112 U7=R1*I1*G1+S1
1115 IF ABS(1-U7)>.01 THEN 1135
1130 I1=I1+1
1135 I=I+10 \ IF I<=4000 THEN 1105
1140 I=I-5 \ IF I<=51 THEN 1200
1150 CALL "PLOT"(I, S2) \ GO TO 1140
1200 I1=1 \ I=52
1201 G1=10
1205 FOR J=0 TO 50 \ NEXT J
1210 CALL "PLOT"(S1, I)
1212 U7=R2*I1*G1+S2
1215 IF ABS(1-U7)>.01 THEN 1235
1230 I1=I1+1
1235 I=I+10 \ IF I<=4000 THEN 1205
1240 I=I-5 \ IF I<=52 THEN 1200
1250 CALL "PLOT"(S1, I) \ GO TO 1240
1300 RETURN

```

REFERÊNCIAS. BIBLIOGRÁFICAS

1. STANTON, K.N. "Reliability Analysis for power System Applications". IEEE Trans. Power App. and Syst. Vol. PAS-88, April, 1969. pp. 131 a 437.
2. ANDERSON, N.; FIKRI, Z. and LUND, Y.B. "Power System Simulation". The Royal Institute of Technology-Stockholm, September 1974.
3. IEEE TUTORIAL COURSE. "Probability Analysis of Power System Reliability". 71 M 30 PWR, 1971.
4. BILLINTON, R.; RINGLEE, R.J. and WOOD, A.J. "Power System Reliability Calculations". The Massachusetts Institute of Technology, 1973.
5. BILLINTON, R. "Power System Reliability Evaluation". Gordon and Breach, New York, 1974.
6. DESIENO, C.F. and STINE, L.L. "A probability Method for Determining the Reliability of Electric Power Systems". IEEE Trans. Power App. and Syst., february, 1964, pp. 174-181.
7. PATTON, A.D. "Short-Term Reliability Calculation". IEEE Trans. Power App. and Syst., Vol. PAS-89, nº 4, April 1970, pp. 509-513.
8. HALL, J.D.; RINGLEE, R.J. and WOOD, A.J. "Frequency and Duration Methods for Power System Reliability Calculations: I-Generation System Model". IEEE Trans. Power App. and Syst., Vol. PAS-87, nº 9, September 1968, pp. 1787-1796.
9. RINGLEE, R.J. and WOOD, A.J. "Frequency and Duration Methods for Power System Reliability Calculations: II-Demand Model and Capacity Reserve Model". IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-88, nº 4, April 1969, pp. 375-388.
10. GALLOWAY, C.D.; GARVER, L.L.; RINGLEE, R.J. and WOOD, A.J. "Frequency and Duration Methods for Power System Reliability Calculations: Part III-Generation System Planning". IEEE Trans. Power App. and Syst., Vol. PAS-88, nº 8, August 1969, pp. 1216-1223.

11. ENDRENY, J.; MAENHAUT, P.C. and PAYNE, L.E. "Reliability Evaluation of Transmission Systems with Switching after Faults-Approximations and a Computer Program". IEEE Trans. Power App. and Syst., Vol. PAS-92, November/December 1973, pp. 1863-1875.
12. TODD, Z.G. "A probability Method for Transmission and Distribution outage Calculation". IEEE Trans. Power App. Syst., July 1964, pp. 695-701.
13. BHAVARAJU, M.P. and BILLINTON, R. "Transmission System Reliability Methods". IEEE Trans. PAS-91, n° 2, March/April 1972, pp. 628-637.
14. GAVER, D.P.; MONTMEAT, F.E. and PATTON, A.D. "Power System Reliability I - Measures of Reliability and Methods of Calculation". IEEE Trans. Vol. PAS-83, n° 7, July 1964, pp. 727-737.
15. MONTMEAT, F.E.; PATTON, A.D.; ZEMKOSKI, J. and CUMMING, D.I. "Power System Reliability II - Applications and a Computer Program". IEEE Vol. PAS-95, n° 7, July 1965, pp. 636-643.
16. BILLINTON, R. "Transmission System Reliability Evaluation". System Planning and Operation Section Fall Meeting-October 1966, Calgary.
17. BILLINTON, R. and BOLLINGER, K.E. "Transmission System Reliability Evaluation Using Markov Processes". IEEE Trans. Vol. PAS-87, n° 2, February 1968, pp. 538-547.
18. BILLINTON, R. and GROOVER, M.S. "Quantitative Evaluation of Permanent Outages in Distribution Systems". IEEE Trans. Vol. PAS-94, n° 3, May/June 1975, pp. 733-741.
19. ANDERSON, P.M. and FOUAD, A.A. "Power System Control and Stability". Volume I, COPPE - U.F.R.J., 1969, Rio de Janeiro.
20. KIMBARK, E.W. "Power System Stability". Vol. I, John Wiley e Sons, Inc. N.Y. 1948.
21. ELGERD, O.I. "Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica". Mc Graw-Hill do Brasil, 1976.
22. STAGG, G.W. and EL-ABIAD, A.H. "Computer Methods in Power System Analysis". Mc Graw-Hill, Kogakusha, Ltd. 1968.

23. FONSECA, L.G.S. "Determinação de Domínios de Estabilidade para Uso em Planejamento e Operação de Sistemas de Potência". Tese de D.Sc. - COPPE-U.F.R.J., Abril 1976.
24. PATTON, A.D. "A Probability Method for Bulk Power System Security Assessment, I - Basic Concepts". IEEE Trans. Power App. Syst. January/February 1972, pp. 54-61.
25. DORAISWAMI, R. and FABIOUS, M. "Security Indices for Planning and Operation of the Multimachine Power Systems". A ser publicado no IEEE Trans. Reliability.
26. PATTON, A.D.; AYOUB, A.K. and RINGER, L.J. "Project Origin and Organization". Edison Electric Institute Project RP 90-6.
27. WILLEMS, J.L. "Direct Methods for Transient Stability Studies in Power System Analysis". IEEE Trans. on Aut. Control - Vol. AC-16, nº 4, Aug. 1971, pp. 332-341.
28. RIBBENS-PAVELLA, M. "Comments on Direct Methods for Transient Stability Studies in Power System Analysis". IEEE Trans. on Aut. Control, Jun 1972, pp. 415-416.
29. BORESTEIN, C.R. "Planejamento a Curto Prazo do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica com Restrição de Estabilidade Transitória". Tese de Mestrado - UFSC, Dezembro 1977.
30. COGO, J.R. "Determinação de Domínios de Estabilidade para Sistemas de Potência com N-Máquinas". Tese de Mestrado - UFSC, Junho 1977.