

4

Modelo Markoviano para Equipamentos de Proteção de Sistemas Elétricos

Conforme verificou-se, através da teoria de Manutenção Centrada na Confiabilidade - MCC descrita na Seção 2.3 do Capítulo 2, ao se estabelecer um programa de manutenção, duas decisões básicas são necessárias do planejador: definir o elenco de atividades que serão executadas para cada função e sua frequência de execução. A primeira decisão deve ser precedida por um estudo das características técnicas dos equipamentos, objetivando identificar seus modos de falhas, os efeitos resultantes, e as tarefas preventivas ou corretivas aplicáveis. A segunda exige o conhecimento das taxas de falhas internas e probabilidades de ocorrência de defeitos externos, necessárias à definição da periodicidade da manutenção.

Neste capítulo serão identificados, através da análise dos modos de falha de equipamentos de proteção definidas no Apêndice A, os estados de interesse e as respectivas transições possíveis entre eles. Posteriormente, serão realizadas simulações, tomando como base a estrutura formal do modelo, os dados disponíveis sobre o meio ambiente, e ações de controle possíveis, buscando derivar conclusões úteis sobre seu comportamento.

4.1

Modelagem

4.1.1

Estados de Proteção

Os modos de falha de equipamentos de proteção do sistema elétrico foram definidos no Apêndice A. A partir da análise dos modos de falhas apresentados na Tabela A.3, do Apêndice A, é possível identificar o conjunto dos estados possíveis de um sistema de proteção. Inicialmente, três estados são identificados, quando a proteção estiver disponível para a operação:

- **NORMAL**: se a proteção estiver apta a executar sua missão, atuando conforme projetada. Em outras palavras, não possuir defeito interno ou intrínseco, estando em condições de desligar o equipamento protegido na ocorrência de um defeito interno do mesmo, e simultaneamente bloquear seu desligamento na ausência de defeito ou na ocorrência de defeitos externos ao processo;
- **Falha causada por DESLIGAMENTOS INDEVIDOS do sistema de proteção**: quando a proteção desligar intempestivamente o equipamento protegido, na ausência de uma falha no equipamento protegido, necessitando de reparo para voltar a operar;
- **Falha causada por RECUSA de atuação do sistema de proteção**: é o caso onde a proteção apresenta uma falha que a impeça de atuar na ocorrência de uma falha no equipamento protegido. A proteção voltará ao estado normal após a realização de manutenção corretiva. Neste caso, o equipamento protegido será desligado pelas proteções de retaguarda de outros equipamentos, ou pelos sistemas de proteção contra falha de disjuntor, em consequência da recusa de atuação da proteção.

Além desses casos, a proteção poderá estar indisponível para operação, por estar em manutenção programada.

- **TESTE**: quando a proteção estiver sendo submetida a uma inspeção ou teste periódico, manutenção preventiva ou auto-teste.

4.1.2

Diagrama de Estados do Sistema de Proteção

A etapa seguinte no processo de modelagem consiste na identificação das transições entre os estados da proteção. Ilustra-se, na Figura 4.1 o ciclo operacional do sistema de proteção.

O ciclo operacional do sistema de proteção inicia-se no estado NORMAL, onde a proteção atua corretamente na ocorrência de falhas no equipamento protegido.

Em um segundo momento, pode ocorrer um defeito interno no sistema de proteção, mas que não impossibilita que este atue corretamente quando ocorre uma falha no equipamento protegido. Posteriormente, quando o defeito interno evolui a ponto de causar desligamento do equipamento protegido sem que tivesse ocorrido falha neste equipamento, o sistema de proteção terá que sofrer uma manutenção corretiva para voltar ao estado NORMAL.

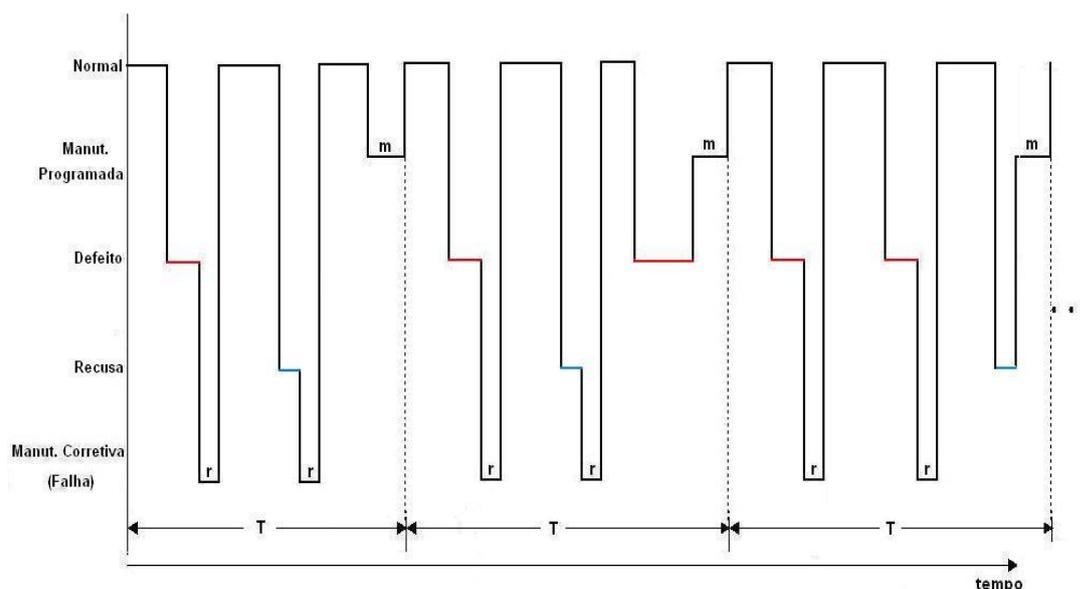


Figura 4.1 – Ciclo Operacional do Sistema de Proteção

Após a realização da manutenção corretiva, o ciclo operacional volta ao estado NORMAL até que surja um novo defeito no sistema de proteção. Porém as características deste novo defeito fazem com que o sistema de proteção não desligue o equipamento protegido na ocorrência de uma falha no mesmo. Neste caso, o equipamento protegido será desligado pelas proteções de retaguarda. Esta recusa, só será observada no momento da falha no equipamento protegido. Após a falha, realiza-se manutenção corretiva para corrigir o defeito causador da recusa de atuação do sistema de proteção e este volta ao estado NORMAL.

Quando o sistema de proteção estiver realizando manutenção programada (TESTE), poderão ser observadas três situações:

- i) o sistema de proteção não possui defeito interno, ou falha que causa recusa de atuação;

- ii) o sistema de proteção encontra-se com defeito interno que pode evoluir para o caso de desligamento indevido do equipamento protegido; e
- iii) o sistema de proteção encontra-se com defeito que causa recusa de atuação na ocorrência de falha do equipamento protegido.

As transições diretas entre os estados de falha causadas por DESLIGAMENTO INDEVIDO e RECUSA, embora fisicamente possíveis, são desprezíveis estatisticamente. Elas exigem a ocorrência de contingência tripla, ou seja, o sistema precisaria estar com defeito interno, surgir outro defeito, e este último cancelar o efeito do primeiro. Em todo caso, mesmo que este evento ocorresse na prática, ele jamais seria computado, uma vez que estas transições não são observáveis fisicamente, e estatisticamente o estado computado será sempre aquele detectado no instante de uma ocorrência ou durante a manutenção.

Introduz-se, na Figura 4.2, uma numeração de referência para os quatro estados e ilustra-se as possibilidades de transições entre elas. Esta numeração será utilizada consistentemente, até o final deste trabalho.

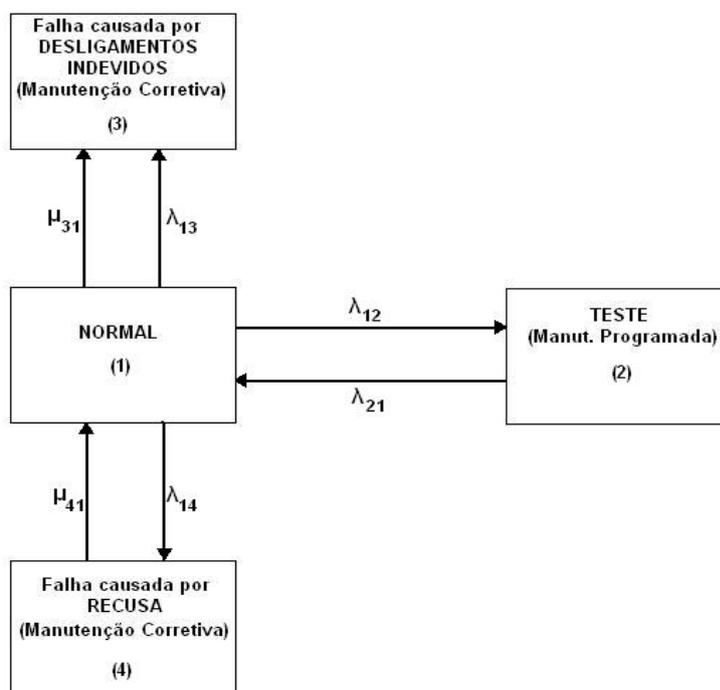


Figura 4.2 – Diagrama de Transições entre Estados

Na figura:

- λ_{12} taxa de transição entre os estados NORMAL e TESTE
- λ_{21} taxa de transição entre os estados TESTE e NORMAL
- λ_{13} taxa de falha do estado NORMAL para falha por DESLIGAMENTO INDEVIDO
- μ_{31} taxa de reparo do estado DESLIGAMENTO INDEVIDO para NORMAL
- λ_{14} taxa de falha do estado NORMAL para falha causada por RECUSA
- μ_{41} taxa de reparo do estado falha causada por RECUSA para NORMAL

4.1.3

Processos de Manutenção

Para análise do processo de manutenção, foi necessário o desenvolvimento de modelos quantitativos para as atividades de manutenção programada e corretiva, característicos dos sistemas de proteção. O estudo detalhado do processo de manutenção [Siqueira, 1999] é apresentado no Apêndice A.

Na Tabela 4.1, relacionam-se os tempos médios de manutenção preventiva e corretiva, para cada um dos 18 estratos de sistemas de proteção utilizados na rede elétrica, observados no Apêndice A. O intervalo de observação abrangeu o período de 1983 à 1991, durante os quais analisou-se o desempenho de 1.248 equipamentos de proteção. O início deste período coincidiu com a implementação do intervalo entre manutenções programadas de 3 anos [Siqueira, 1999].

O tempo médio de duração da manutenção programada é definido por:

$$m = \frac{\sum T(TESTES)}{\sum N^{\circ}(TESTES)} \quad (4.1)$$

O tempo médio de duração da manutenção corretiva, ou de reparo, é definido por:

$$r = \frac{\sum T(\text{REPAROS})}{\sum N^{\circ}(\text{REPAROS})} \quad (4.2)$$

Pela análise da Tabela 4.1, observa-se que o tempo médio de duração da manutenção programada - m é sempre superior ao tempo médio da duração do reparo - r . Isto decorre da complexidade atual destes sistemas, e porque ele pode incluir tempo adicional de localização de defeito interno, eventualmente detectado durante a realização do teste.

Nota-se também que m aumenta com o nível de tensão, enquanto r permanece relativamente constante. Enquanto o primeiro cresce com a complexidade do sistema, o segundo, em geral, sendo guiado pelo sintoma do defeito, é mais independente da dimensão e complexidade do sistema.

Tabela 4.1 – Tempos Médios para Teste e Reparo

SISTEMA	m [h]	r [h]	SISTEMA	m [h]	r [h]
500 kV	48,692	5,7539	Síncronos	39,778	10,530
230 kV	31,434	4,1697	Barras	9,3925	4,4813
138 kV	17,893	3,5074	Leste	16,266	4,6611
69 kV	8,4344	4,1183	Sul	18,821	4,4333
13,8 kV	8,4566	4,1699	Norte	16,414	4,2386
Linhas	23,095	4,3861	Oeste	17,793	7,5378
Trafos	14,585	4,0436	Centro	21,558	3,0524
Reatores	11,463	5,2840	Centro-Oeste	17,498	3,7336
Capacitores	7,7167	2,8865	Sistema	17,831	4,3131

4.1.3

Modelo de Estados Agrupados

É importante investigar a possibilidade de agrupar estados da cadeia de Markov da proteção, para simplificar o problema. Para manter a ocorrência lógica, o agrupamento só será viável se o novo modelo permanecer um sistema markoviano. Para isto será suficiente que as taxas de transição do estado

agregado para qualquer outro estado, permaneçam iguais às da cadeia original [Howard, 1971 e Endrenyi, 1978].

Os valores das probabilidades calculados após agrupamento dos estados só são precisos em regime permanente, ou seja, o agrupamento de estados não pode ser usado quando se deseja calcular valores transitórios de probabilidade [Endrenyi, 1978]

No sistema em estudo, pode-se investigar a possibilidade de agrupar os estados de falha devido a RECUSA de atuação do sistema de proteção e falha devido a DESLIGAMENTOS INDEVIDOS em um único estado não-conforme, doravante denominado de FALHA.

Na Figura 4.3, ilustra-se o diagrama de transição entre estados do processo de Markov resultante, na qual o estado agregado é representado pelo número cinco (5), que será utilizado na identificação de todos os índices associados a esta condição. Os demais estados permanecem com a numeração original.

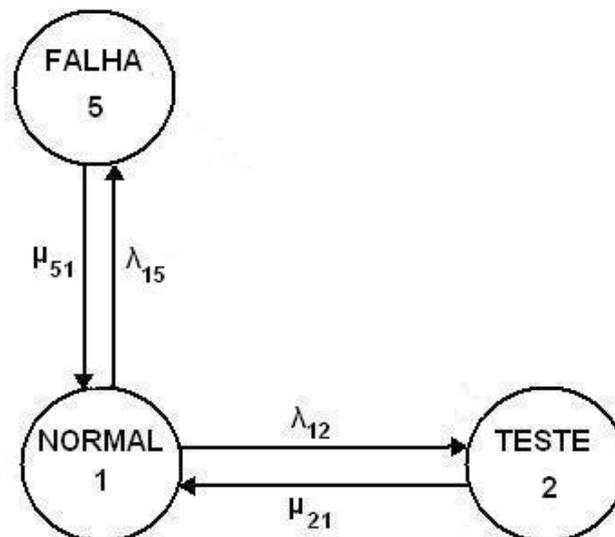


Figura 4.3 – Modelo Agrupado

Segundo o critério adotado, o tempo de manutenção corretiva do sistema de proteção é o mesmo, independentemente do tipo de falha [Endrenyi, 1978]. Portanto, na cadeia original tem-se:

$$\mu_{31} = \mu_{41} = \mu \quad (4.3)$$

onde μ é a taxa de reparo do equipamento de proteção.

Admite-se que havendo uma recusa de operação do equipamento de proteção em virtude de um desligamento do sistema protegido, ocorre uma transição entre os estados de falha devido a RECUSA de atuação da proteção para NORMAL com taxa μ_{41} devido à manutenção corretiva. Logo, a frequência do estado de falha por RECUSA de atuação é:

$$F_4 = P_4 \cdot \mu_{41} = P_1 \cdot \lambda_{14} \quad (4.4)$$

onde P_4 é a probabilidade da proteção encontrar-se no estado 4 (falha causada por RECUSA de atuação da proteção).

De maneira semelhante, a frequência do estado de falha devido a DESLIGAMENTO INDEVIDO do sistema de proteção será dada por:

$$F_3 = P_3 \cdot \mu_{31} = P_1 \cdot \lambda_{13} \quad (4.5)$$

Conforme apresentado no Capítulo 3, a probabilidade do sistema de proteção ser encontrado no estado de FALHA (5) será evidentemente a soma das probabilidades dos estados de falha devido a RECUSA de atuação da proteção (4) e falha causada por DESLIGAMENTOS INDEVIDOS (3):

$$P_{3 \text{ e } 4} = P_5 = P_4 + P_3 \quad (4.6)$$

A frequência do estado FALHA (5) é dada por:

$$F_{3 \text{ e } 4} = F_5 = F_3 + F_4 \quad (4.7)$$

Substituindo (4.4) e (4.5) em (4.7):

$$F_{3 \text{ e } 4} = F_5 = P_3 \cdot \mu_{31} + P_4 \cdot \mu_{41} \quad (4.8)$$

Por outro lado, a frequência do estado FALHA (5) é:

$$F_5 = P_1 \cdot \lambda_{15} = P_5 \cdot \mu_{51} \quad (4.9)$$

Substituindo (4.9) em (4.8):

$$P_5 \cdot \mu_{51} = P_3 \cdot \mu_{31} + P_4 \cdot \mu_{41} \quad (4.10)$$

Como $\mu_{31} = \mu_{41} = \mu$:

$$P_5 \cdot \mu_{51} = (P_3 + P_4) \cdot \mu \quad (4.11)$$

A condição (4.6) será verdadeira se e somente se:

$$\mu_{51} = \mu \quad (4.12)$$

A demonstração (4.12) permite agregar os estados 3 e 4 em um único estado, denominado de FALHA (5). Conseqüentemente, a frequência do estado FALHA será dada por:

$$F_5 = P_5 \cdot \mu = P_1 \cdot \lambda_{15} \quad (4.13)$$

Em geral, a taxa de transição do estado NORMAL para o estado FALHA (λ_{15}), não é observável diretamente, uma vez que os defeitos internos à proteção são invisíveis ao operador.

Em conseqüência, a taxa de falha de proteção ($\lambda_{15} = \lambda_r$), principal variável da confiabilidade do sistema de proteção, terá de ser estimada de outras variáveis observáveis, usando as equações do modelo. As variáveis observáveis são ocorrências e durações de eventos visíveis:

freqüência de atuações indevidas ($F_3 = F_e$);

freqüência de recusas de atuação ($F_4 = F_r$);

tempo médio de duração do teste ($m = 1/\lambda_{21}$);

tempo médio de duração do reparo ($r = 1/\mu$);

periodicidade da manutenção ($F_t = 1/T$).

Frequência de Atuações Indevidas da Proteção - F_e

A frequência F_e é o número médio de desligamentos forçados do equipamento protegido devido a atuação indevida da proteção, por unidade de equipamento, constatado durante um período de observação, em um determinado sistema.

A frequência de atuações indevidas da proteção, cujos resultados constam na Tabela 4.2, para 18 modelos representativos do sistema, no período de 1983 – 1991, foi obtida por:

$$F_e = \frac{\sum N^\circ(\text{INDEVIDAS})}{T \cdot \sum \text{EQP}} \quad (4.14)$$

Tabela 4.2 – Frequência de Desligamentos Indevidos [ocorrências/hora]

SUBSISTEMA	F_e [occ/hora]	SUBSISTEMA	F_e [occ/hora]
500kV	3,4176e-5	Síncronos	22,549e-5
230kV	4,3575e-5	Barras	1,4335e-5
138kV	12,503e-5	Leste	2,0301e-5
69kV	2,5456e-5	Sul	5,0558e-5
13.8kV	4,3784e-5	Norte	4,6549e-5
Linhas	4,7998e-5	Oeste	4,9456e-5
Trafos	2,2806e-5	Centro	4,8476e-5
Reatores	1,2359e-5	Centro-Oeste	2,8949e-5
Capacitores	7,5453e-5	Sistema	3,8631e-5

Frequência de Recusas de Atuação da Proteção - F_r

A frequência F_r mede o número de recusas de atuação da proteção (número de desligamentos forçados realizados pelas proteções de retaguarda), por unidade

de equipamento, constatado durante o período de observação, em um determinado sistema:

$$F_r = \frac{\sum N^\circ(RECUSAS)}{T \cdot \sum EQP} \quad (4.15)$$

Os resultados constam na Tabela 4.3, para 18 modelos representativos do sistema, no período de 1983 – 1991.

Tabela 4.3 – Frequências de Recusas da Proteção [ocorrências/hora]

SUBSISTEMA	F_r [occ/hora]	SUBSISTEMA	F_r [occ/hora]
500kV	1.7617e-6	Síncronos	0
230kV	2.7618e-6	Barras	2.6063e-7
138kV	9.0599e-7	Leste	9.1533e-7
69kV	1.2010e-6	Sul	2.7053e-6
13.8kV	4.8073e-7	Norte	1.8472e-6
Linhas	2.7180e-6	Oeste	1.5128e-6
Trafos	1.2395e-7	Centro	2.9158e-7
Reatores	0	Centro-Oeste	1.6414e-6
Capacitores	9.7569e-7	Sistema	1.4940e-6

Estabelecidas as médias amostrais de F_r e F_e , será possível obter as taxas de transição do estado NORMAL para o estado FALHA, a partir do modelo agrupado.

$$F_5 = F_3 + F_4 \quad (4.16)$$

$$P_1 \cdot \lambda_{15} = P_1 \cdot \lambda_{13} + P_1 \cdot \lambda_{14} \quad (4.17)$$

$$\lambda_{15} = \lambda_{13} + \lambda_{14} = \lambda_f \quad (4.18)$$

onde λ_f é a taxa de falha do modelo agrupado.

Na Figura 4.4, ilustra-se, o diagrama de estado do modelo simplificado bem como suas respectivas taxas de transição.

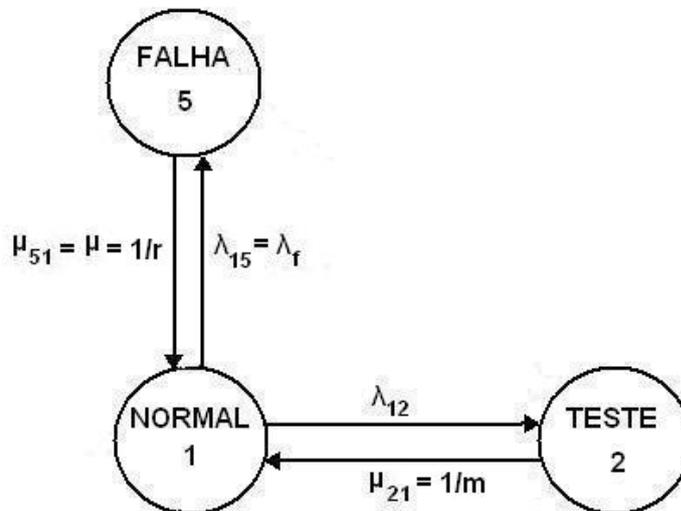


Figura 4.4 – Diagrama de Transição de Estados (Agrupado)

4.2

Análise do Modelo Markoviano

Na etapa de análise do modelo markoviano, serão realizados experimentos de simulação e dedução, tomando como base a estrutura formal do modelo, os dados disponíveis sobre o meio ambiente, e ações de controle possíveis, buscando derivar conclusões úteis sobre seu comportamento.

4.2.1

Parametrização do Modelo

Verificou-se nas Seções 3.2 e 3.3, que as freqüências com que as transições ocorrem dependem naturalmente da probabilidade do estado de origem, e da taxa de transição entre o estado atual e o futuro.

As taxas de variação das probabilidades de estado serão então calculadas pela diferença das freqüências com que o sistema entra e sai de cada estado.

A probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado de TESTE em um determinado instante será estimada por:

$$F_2 = F_{21} = P_2 \cdot \lambda_{21} = P_1 \cdot \lambda_{12} \quad (4.19)$$

$$P_2 = \frac{F_2}{\lambda_{21}} \quad (4.20)$$

sendo F_2 a frequência de manutenções programadas F_t , e $\lambda_{21} = \frac{1}{m}$. Então:

$$P_2 = F_t \cdot m \quad (4.21)$$

onde m é o tempo médio de duração da manutenção preventiva.

Analogamente, a probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado de FALHA será estimada por:

$$F_5 = P_5 \cdot \mu_{51} = P_1 \cdot \lambda_{15} \quad (4.22)$$

$$P_5 = \frac{F_5}{\lambda_{51}} \quad (4.23)$$

$$P_5 = F_5 \cdot r \quad (4.24)$$

onde r é o tempo médio de reparo do sistema de proteção e F_5 é a frequência de falhas observadas.

Observou-se que o sistema de proteção encontrar-se-á no estado FALHA em virtude da ocorrência de desligamentos forçados do sistema de proteção. Verificou-se em (4.16) que a frequência de desligamentos forçados total será o somatório da frequência de desligamentos indevidos – F_e , com a frequência de recusas de atuação da proteção – F_r . Por esta razão tem-se:

$$F_5 = (F_e + F_r) \quad (4.25)$$

Substituindo (4.24) em (4.25), tem-se:

$$P_5 = (F_r + F_e) \cdot r \quad (4.26)$$

Verifica-se também que:

$$F_5 = (F_e + F_r) = P_5 \cdot \mu_{51} = P_1 \cdot \lambda_{15} \quad (4.27)$$

$$(F_e + F_r) = P_1 \cdot \lambda_{15} \quad (4.28)$$

Resolvendo-se (4.28) determina-se a taxa de falha do sistema de proteção:

$$\lambda_{15} = \frac{(F_e + F_r)}{P_1} \quad (4.29)$$

Como $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ tem-se:

$$\lambda_{15} = \frac{(F_e + F_r)}{1 - P_2 - P_5} \quad (4.30)$$

Substituindo-se (4.21) e (4.26) em (4.30):

$$\lambda_f = \frac{(F_r + F_e)}{1 - F_t \cdot m - r \cdot (F_r + F_e)} \quad (4.31)$$

Em (4.31), todos os elementos do lado direito podem ser avaliados por estatísticas dos dados históricos de desligamentos forçados. F_r e F_e representam respectivamente as frequências observadas de recusas e atuações indevidas no período, ambas observáveis, após um tempo longo de adoção da frequência de teste F_t . Com exceção destas frequências, os demais dados são característicos do sistema de proteção, e independentes da frequência de testes F_t [Siqueira, 1999]. Na Tabela 4.5 relacionam-se estas variáveis para os 18 modelos do sistema, para uma frequência de testes de 3 anos.

Tabela 4.4 – Taxa de Falha do Sistema de Proteção [falha/hora]

SUBSISTEMA	TAXA	SUBSISTEMA	TAXA
500kV	3,6013e-5	Síncronos	22,637e-5
230kV	4,6402e-5	Barras	1,4602e-5
138kV	12,608e-5	Leste	2,1232e-5
69kV	2,6669e-5	Sul	5,3315e-5
13.8kV	4,4287e-5	Norte	4,8437e-5
Linhas	5,0773e-5	Oeste	5,1023e-5
Trafos	2,2945e-5	Centro	4,8815e-5
Reatores	1,2365e-5	Centro-Oeste	3,0615e-5
Capacitores	7,6468e-5	Sistema	4,0160e-5

As maiores taxas de falha são verificadas nas proteções de compensadores síncronos, provavelmente devido ao pouco tempo em operação no sistema elétrico, e à maturidade incipiente da tecnologia utilizada [Siqueira, 1999]. Estes equipamentos caracterizam-se por complexos sistemas de automação de partida e parada, aumentando sua probabilidade de defeitos.

4.2.1.1

Cálculo das Probabilidades dos Estados em Regime Permanente Através da Matriz de Transição do Diagrama de Estados

Pode-se determinar as probabilidades em regime permanente dos estados NORMAL, TESTE e FALHA através da matriz de transição do diagrama de estados ilustrado na Figura 4.4. Utiliza-se o vetor de probabilidade em regime permanente α , que permanecerá com o mesmo valor quando for multiplicada pela matriz estocástica de transição, conforme verificado na Seção 3.3:

$$\alpha \cdot P = \alpha \quad (4.32)$$

Sendo α dado por $[P_1 \ P_2 \ P_3]$ para um único equipamento, e utilizando a matriz estocástica de transição do diagrama de estados da Figura 4.4, tem-se:

$$\begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \lambda_{12} - \lambda_f & \lambda_{12} & \lambda_f \\ \lambda_{21} & 1 - \lambda_{21} & 0 \\ \mu_{51} & 0 & 1 - \mu_{51} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_5 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Desmembrando-se (4.33),

$$\begin{aligned} P_1 - P_1 \cdot \lambda_{12} - P_1 \cdot \lambda_f + P_2 \cdot \lambda_{21} + P_5 \cdot \mu_{51} &= P_1 \\ P_1 \cdot \lambda_{12} + P_2 - P_2 \cdot \lambda_{21} &= P_2 \\ P_1 \cdot \lambda_f + P_5 - P_5 \cdot \mu_{51} &= P_5 \\ P_1 + P_2 + P_5 &= 1 \end{aligned} \quad (4.34)$$

Resolvendo (4.34):

$$P_1 + \frac{\lambda_{12} \cdot P_1}{\lambda_{21}} + \frac{\lambda_f \cdot P_1}{\mu_{51}} = 1 \quad (4.35)$$

$$P_1 = \frac{\lambda_{21} \cdot \mu_{51}}{\lambda_{21} \cdot \mu_{51} + \lambda_{12} \cdot \mu_{51} + \lambda_f \cdot \lambda_{21}} \quad (4.36)$$

Como $\mu_{51} = 1/r$ e $\lambda_{21} = 1/m$, a probabilidade em regime permanente do estado NORMAL é:

$$P_1 = \frac{1}{1 + \lambda_{12} \cdot m + \lambda_f \cdot r} \quad (4.37)$$

Sabe-se que:

$$F_2 = F_t = P_1 \cdot \lambda_{12} = P_2 \cdot \lambda_{21} \quad (4.38)$$

$$\lambda_{12} = \frac{F_t}{P_1} \quad (4.39)$$

Substituindo (4.39) em (4.37), obtém-se a probabilidade em regime permanente do estado NORMAL:

$$P_1 = \frac{1 - F_t \cdot m}{1 + \lambda_f \cdot r} \quad (4.40)$$

Para os estados TESTE e FALHA, as probabilidades em regime permanente são respectivamente:

$$P_2 = F_t \cdot m \quad (4.41)$$

$$P_5 = \frac{\lambda_f \cdot (1 - F_t \cdot m) \cdot r}{1 + \lambda_f \cdot r} \quad (4.42)$$

Tabela 4.5 – Probabilidades Permanentes dos Estados

MODELO	NORMAL (P ₁)	TESTE (P ₂)	FALHA (P ₅)
500kV	0,99791467	18,785e-4	2,0678e-4
230kV	0,99859406	12,127e-4	1,9321e-4
138kV	0,99886798	6,9032e-4	4,4171e-4
69kV	0,99956482	3,2540e-4	1,0978e-4
13.8kV	0,99948916	3,2626e-4	1,8458e-4
Linhas	0,99888654	8,9101e-4	2,2245e-4
Trafos	0,99934459	5,6269e-4	0,92720e-4
Reatores	0,99949245	4,4225e-4	0,65305e-4
Capacitores	0,99948168	2,9771e-4	2,2061e-4
Síncronos	0,99609095	15,346e-4	23,744e-4
Barras	0,99957223	3,6236e-4	0,65407e-4
Leste	0,99927356	6,2755e-4	0,98891e-4
Sul	0,99903775	7,2612e-4	2,3613e-4
Norte	0,99916161	6,3326e-4	2,0513e-4
Oeste	0,99892935	6,8646e-4	3,8419e-4
Centro	0,99901943	8,3171e-4	1,4886e-4
C. Oeste	0,99921071	6,7508e-4	1,1421e-4
Sistema	0,99913901	6,8792e-4	1,7306e-4

Apresentou-se na Tabela 4.6, os valores das probabilidades permanentes dos estados, para os 18 modelos representativos do sistema elétrico, com a política de manutenção programada a cada 3 anos.

As informações listadas na Tabela 4.6 são úteis para identificar, entre os diferentes estratos, aquele que apresenta maior variedade de probabilidade nos estados.

4.3

Conclusão do Capítulo

Através da análise das taxas de falha, probabilidades de permanência nos estados NORMAL e de FALHA, pode-se identificar os componentes críticos do sistema de proteção. A taxa de falha dos equipamentos de proteção, considerando-se o intervalo entre manutenções preventivas de três anos, são ilustrados na Figura 4.5.

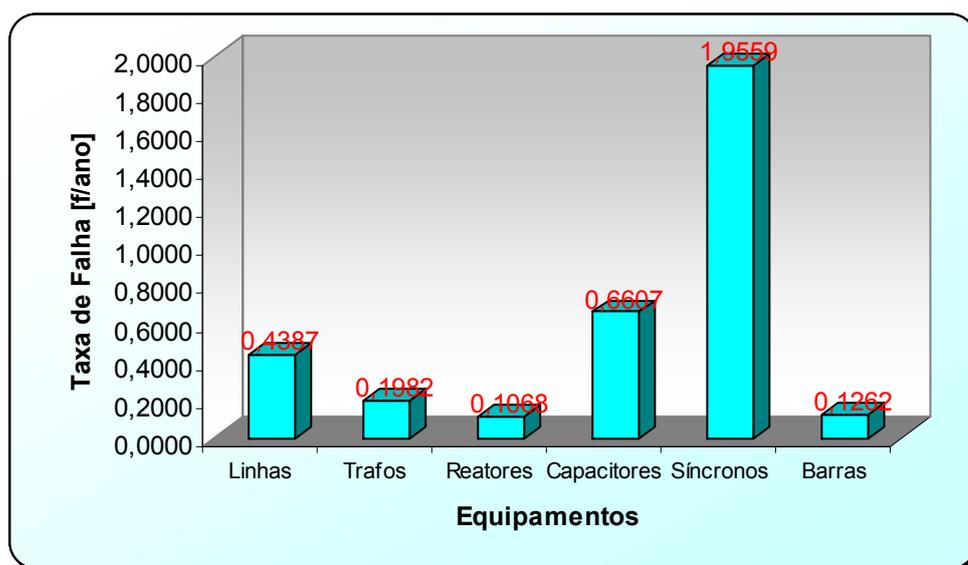


Figura 4.5 – Taxa de Falha dos Equipamentos de Proteção

Observa-se que a taxa de falha do sistema de proteção dos compensadores síncronos é muito maior comparada aos demais equipamentos. Para um intervalo de manutenção de 3 anos no sistema de proteção dos compensadores síncronos, ocorrerá praticamente duas falhas por ano. Supõe-se que o intervalo de manutenção de 3 anos seja insuficiente para reduzir o número de falhas do sistema de proteção de compensadores síncronos. Faz-se necessário um intervalo de manutenção menor.

Na Figura 4.6, ilustra-se a probabilidade de permanência no estado de FALHA para os equipamentos de proteção, conforme calculado por (4.42).

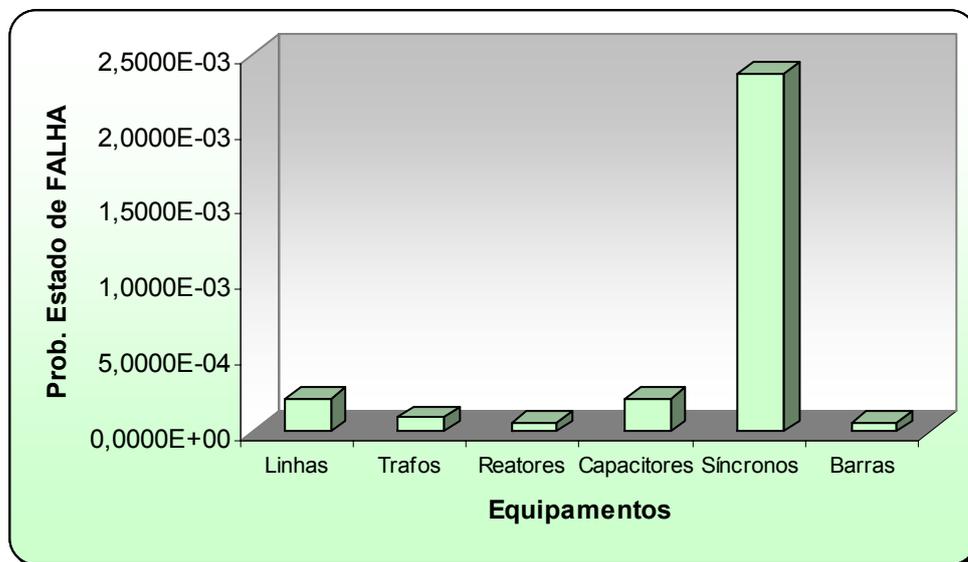


Figura 4.6 – Probabilidade de Permanência no Estado de Falha

Como a taxa de falha do sistema de proteção dos compensadores síncronos é muito maior do que os demais, sua probabilidade de permanência no estado de falha também será maior.

Por outro lado, observa-se pelo resultado apresentado na Figura 4.7, que o tempo médio de manutenção programada dos equipamentos de proteção de compensadores síncronos é maior comparado aos demais equipamentos. Observa-se que o tempo médio de manutenção do sistema de proteção de linhas de transmissão também é bastante elevado.

Supõe-se que o equipamento protegido permaneça fora de operação durante toda a duração da manutenção programada do sistema de proteção. Em (4.41), o tempo médio de duração da manutenção programada – m , permanece o mesmo, independentemente da frequência de testes – F_t . Verifica-se em (4.43) que com o aumento da frequência de manutenção programada, a probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado TESTE irá aumentar proporcionalmente.

$$F_t = \frac{P_2}{m} \quad (4.43)$$

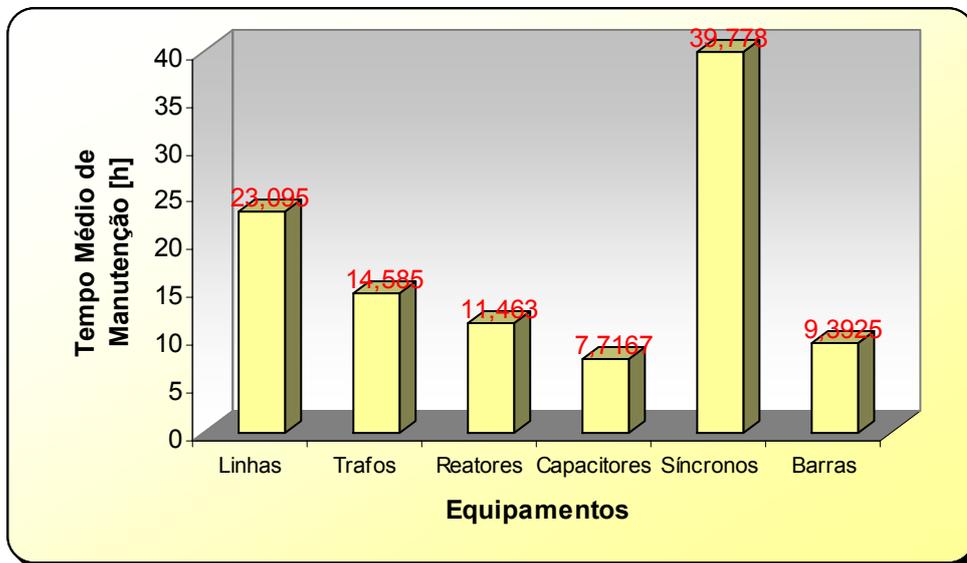


Figura 4.7 – Tempo Médio de Duração da Manutenção Programada do Sistema de Proteção

O aumento da frequência de manutenções programadas do sistema de proteção das linhas de transmissão resultaria no aumento de pagamento de penalidades por indisponibilidade (parcela variável por desligamento programado).

Na Figura 4.8, apresenta-se os resultados do tempo médio de duração da manutenção corretiva para cada equipamento do sistema de proteção.

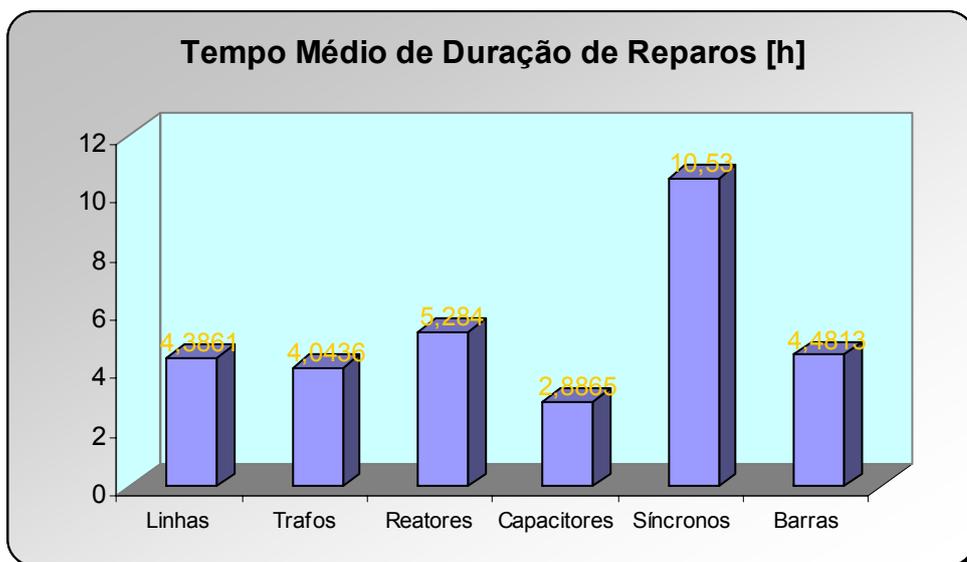


Figura 4.8 - Tempo Médio de Duração da Manutenção Corretiva do Sistema de Proteção

Supõe-se novamente que o equipamento protegido permaneça fora de operação durante toda a duração da manutenção corretiva do sistema de proteção. Verificou-se em (4.42) que a probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA – P_5 , depende da frequência de manutenções programadas e da taxa de falha do equipamento de proteção.

Uma diminuição na frequência de manutenções programadas resultaria no aumento da probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA. A diminuição da frequência de manutenções corretivas do sistema de proteção das linhas de transmissão resultaria no aumento de pagamento de penalidades por indisponibilidade (parcela variável por desligamento não programado).

Conclui-se que para a realização de uma análise mais detalhada do intervalo ótimo de manutenção dos equipamentos de proteção, são necessárias informações adicionais sobre o comportamento do sistema para diferentes intervalos de manutenções programadas. No entanto, não estão disponíveis dados do sistema de proteção do sistema elétrico em análise, equivalentes aos descritos no Apêndice A, para intervalos entre manutenções diferentes de três anos.