

DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

JULIANO R. FREIRE*, MARCOS V. MOREIRA*[†], TATIANA M. L. DE ASSIS*[†], FELIX F. G. ESTRELLA*

**Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade Universitária
Rio de Janeiro, 21.945-970, RJ, Brasil*

[†]*COPPE-Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Cidade Universitária, Rio de Janeiro, 21.945-970, RJ, Brasil*

Emails: ramaldes@poli.ufrj.br, moreira@dee.ufrj.br, tatiana@dee.ufrj.br,
ffgamarrae@dee.ufrj.br

Abstract— In this paper, we present a methodology for the computation of automaton models for protection devices, and for the coordination and selectivity of the protection, of electrical distribution systems. By using these models, we show that it is possible to diagnose the occurrence of failure events in the protection devices using the theory of failure diagnosis of discrete event systems. The method can be extended to diagnose failures in complex distribution systems with different topologies.

Keywords— Smart grid, Discrete event systems, Failure diagnosis.

Resumo— Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a obtenção de modelos por autômatos de dispositivos de proteção, e da coordenação e seletividade de sistemas de proteção, em redes de distribuição de energia elétrica. Utilizando esses modelos, é mostrado que é possível realizar o diagnóstico de falhas em equipamentos do sistema de proteção utilizando a teoria de diagnóstico de falhas em sistemas a eventos discretos. O método pode ser estendido para uso em sistemas de distribuição complexos com diferentes topologias.

Palavras-chave— Redes elétricas inteligentes, Sistemas a eventos discretos, Diagnóstico de falhas.

1 Introdução

O aumento da confiabilidade em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica é um dos principais objetivos a serem alcançados ao se utilizar redes elétricas inteligentes (*smart grids*), e está diretamente relacionado à quantidade de interrupções no fornecimento de energia elétrica, bem como à qualidade da mesma. Essas interrupções podem ser causadas por diversos fatores em que se destacam faltas ou condições anormais de operação como, por exemplo, curtos-circuitos e sobrecargas. As faltas podem ser de natureza transitória ou permanente, e provocam a atuação do sistema de proteção.

Os equipamentos de proteção são responsáveis por detectar a ocorrência de uma falta e isolar somente a parte defeituosa do sistema (Coutto Filho et al., 1999). Em Mason (1967), a filosofia dos sistemas de proteção é apresentada, em que são destacados os conceitos de seletividade e de coordenação. A seletividade se refere à capacidade do sistema de proteção de retirar de operação apenas o elemento defeituoso. Por outro lado, a coordenação estabelece uma sequência de operação dos diferentes equipamentos de proteção de forma a garantir a seletividade. Contudo, quando ocorrem falhas no sistema de proteção, as faltas podem não ser corretamente isoladas, ocasionando o desligamento de uma parte maior do que a necessária do sistema, ou seja, levando à perda de seletividade. Essa perda de seletividade traz prejuízos para as concessionárias de energia, bem como para

os consumidores. Assim, uma forma de identificar automaticamente o equipamento defeituoso, aumentaria a confiabilidade do sistema e reduziria os custos com manutenção.

As redes elétricas inteligentes requerem que um grande fluxo de dados seja transmitido para o monitoramento e controle do sistema. Contudo, lidar com um grande número de informações e com a segurança no tráfego dessas informações é um desafio ainda a ser vencido (Calderaro et al., 2011). Assim, um menor número de dados a serem transmitidos, permitindo ainda o diagnóstico de falhas em equipamentos de proteção, torna o sistema de diagnóstico mais eficiente e prático para ser implementado nos sistemas de distribuição atuais.

Recentemente, diversos trabalhos têm sido realizados visando o diagnóstico de falhas em sistemas de potência utilizando a teoria de Sistemas a Eventos Discretos (SEDs) (Arora et al., 2002; Sun et al., 2004; Calderaro et al., 2011; Wang et al., 2014; Reshmila e Devanathan, 2016). Em Calderaro et al. (2011), redes de Petri são utilizadas para modelar o sistema de proteção de uma rede de distribuição, e o objetivo é detectar falhas de comunicação ou de coordenação da proteção, e localizar as faltas na rede. O problema do método proposto está na grande quantidade de informações necessárias para o diagnóstico de falhas, o que torna o método impossível de ser aplicado no cenário atual dos sistemas de distribuição. Em Reshmila e Devanathan (2016), um modelo por autômato é obtido para o diagnóstico de falhas

em um único dispositivo de proteção, utilizando a técnica clássica de diagnóstico de falhas em SEDs (Sampath et al., 1995).

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a obtenção de modelos por aut matos de dispositivos de proteção, e da coordenação e seletividade do sistema de proteção, em redes de distribuição de energia elétrica. Utilizando esses modelos é mostrado que   possível realizar o diagnóstico de falhas em equipamentos do sistema de proteção baseando-se na lógica da coordenação e seletividade da proteção. Além disso, é mostrado que   possível fazer o diagnóstico de falhas usando apenas informações binárias sobre os estados dos equipamentos de proteção, o que possibilita a operação desses diagnosticadores com um número reduzido de dados a serem transmitidos para o centro de operações, permitindo, assim, sua aplicação nas redes de distribuição atuais, onde o grau de automação e a incorporação de modernos sistemas de comunicação ainda não é uma realidade

Este trabalho está organizado da seguinte forma. Na seção 2 são apresentadas as not  es e os fundamentos teóricos de diagnóstico de falhas em SEDs. Na seção 3, os modelos por aut matos dos dispositivos, e da coordenação e seletividade da proteção, são apresentados. Na seção 4, a diagnosticabilidade das falhas do sistema de proteção são analisadas e os diagnosticadores são obtidos. Finalmente, na seção 5, são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 Fundamentos Teóricos

2.1 Not  es e definições

Seja $G = (X, \Sigma, f, x_0)$ o modelo em autômato de um SED, em que X é o espaço de estados, Σ é o conjunto de eventos, $f : X \times \Sigma^* \rightarrow X$ é a função de transição, em que Σ^*   o fecho de Kleene de Σ , e x_0 é o estado inicial do sistema. A linguagem gerada por G , $\mathcal{L}(G)$, é denotada por L .

A parte acessível de G é o autômato $Ac(G) = (X_{ac}, \Sigma, f_{ac}, x_0)$, em que $X_{ac} = \{x \in X : (\exists s \in \Sigma^*)[f(x_0, s) = x]\}$ e $f_{ac} = f|_{X_{ac} \times \Sigma^* \rightarrow X_{ac}}$, isto é, f_{ac} é igual   função de transição f com domínio restrito aos estados acessíveis.

Sejam G_1 e G_2 dois aut matos. $G_1 \times G_2$ e $G_1 \parallel G_2$ denotam as composições produto e paralela de G_1 e G_2 , respectivamente (Cassandras e Lafortune, 2008).

A operação de projeção $P_s : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_s^*$, em que $\Sigma_s \subset \Sigma$ é definida como $P_s(\varepsilon) = \varepsilon$, $P_s(\sigma) = \sigma$, se $\sigma \in \Sigma_s$ ou $P_s(\sigma) = \varepsilon$, se $\sigma \in \Sigma \setminus \Sigma_s$, e $P_s(s\sigma) = P_s(s)P_s(\sigma)$, para todo $s \in \Sigma^*$, e $\sigma \in \Sigma$. A operação de projeção pode ainda ser aplicada à linguagem L , aplicando-se a projeção a todas as sequências $s \in L$. A projeção inversa $P_s^{-1} : \Sigma_s^* \rightarrow 2^{\Sigma^*}$ aplicada a uma sequência $s \in \Sigma_s^*$ gera todas

as sequências de Σ^* cuja projeção é igual a s . A projeção inversa P_s^{-1} também pode ser aplicada a linguagens.

Suponha agora que o conjunto de eventos de G seja particionado em $\Sigma = \Sigma_o \dot{\cup} \Sigma_{uo}$, em que Σ_o e Σ_{uo} denotam os conjuntos de eventos observáveis e não observáveis, respectivamente. O autômato determinístico cuja linguagem gerada é igual a $P_o(L)$, em que $P_o : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$   uma operação de projeção, é denominado de observador de G , e é denotado por $Obs(G)$ (Cassandras e Lafortune, 2008).

2.2 Diagnosticabilidade de SEDs

Seja G o autômato que modela o sistema e seja $\Sigma_f \subseteq \Sigma_{uo}$ o conjunto de eventos de falha. Além disso, suponha que o conjunto de eventos de falha possa ser particionado como

$$\Sigma_f = \bigcup_{k=1}^r \Sigma_{f_k}, \quad (1)$$

em que Σ_{f_k} representa um conjunto de eventos de falha do mesmo tipo e Π_f denota essa partição.

Seja G_{N_k} o subaut mato de G que representa o comportamento normal do sistema com relação ao conjunto de eventos de falha Σ_{f_k} , i.e., supondo que $\mathcal{L}(G_{N_k}) = L_{N_k}$, então L_{N_k}   a linguagem prefixo-fechada formada por todas as sequências de L que não cont m nenhum evento de falha do conjunto Σ_{f_k} . A seguinte definição de diagnosticabilidade pode ser formulada (Sampath et al., 1995).

Definição 1 *Sejam L e $L_{N_k} \subset L$ as linguagens prefixo-fechadas geradas por G e G_{N_k} , respectivamente, e defina a operação de projeção $P_o : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$. Então L é dita ser diagnosticável com relação   projeção P_o e   partição Π_f se*

$$(\forall k \in \Pi_f)(\exists n_k \in \mathbb{N})(\forall s \in L \setminus L_{N_k})(\forall st \in L \setminus L_{N_k}) \\ (\|t\| \geq n_k) \Rightarrow (\forall \omega \in P_o^{-1}(P_o(st)) \cap L, \omega \in L \setminus L_{N_k}),$$

em que $\|\cdot\|$ denota o comprimento de uma sequência.

De acordo com a definição 1, L   diagnosticável com relação a P_o e Π_f se e somente se para todas as sequências st de comprimento arbitrariamente longo após a ocorrência de um evento de falha do conjunto Σ_{f_k} , não existirem sequências $\omega_k \in L_{N_k}$, de tal forma que $P_o(\omega_k) = P_o(st)$ para todo $k \in I_r = \{1, 2, \dots, r\}$. Portanto, se L   diagnosticável, então sempre   possível identificar o tipo de falha que ocorreu após um número limitado de observações de eventos.

O primeiro passo para implementar um diagnosticador é verificar se todos os tipos de falha podem ser diagnosticados. Existem duas formas de fazer essa verificação. Construindo o

autômato diagnosticador e verificando a existência de ciclos indeterminados observáveis ou escondidos (Cassandras e Lafortune, 2008; Basilio et al., 2012), ou construindo aut matos verificadores (Moreira et al., 2011; Qiu e Kumar, 2006; Yoo e Lafortune, 2002). Neste trabalho, usaremos apenas aut matos diagnosticadores que podem ser obtidos em dois passos: (i) Obtenha o autômato $G_{l_k} = G \parallel A_{l_k}$, em que $A_{l_k} = (\{N, Y\}, \Sigma_{f_k}, f_{l_k}, N)$, com $f_{l_k}(N, \sigma_{f_k}) = f_{l_k}(Y, \sigma_{f_k}) = Y, \forall \sigma_{f_k} \in \Sigma_{f_k}$; (ii) Calcule o autômato diagnosticador para a falha do tipo Σ_{f_k} , $D_k = Obs(G_{l_k})$.

3 Modelos por aut matos de sistemas de proteção

Neste trabalho, será utilizado como exemplo um alimentador t pico de uma rede de distribuição urbana radial de 13,8kV, onde as cargas indicadas operam com fator de potência 0,90 indutivo. O alimentador considerado é mostrado na figura 1. Note que existem três equipamentos de proteção no alimentador da figura 1, sendo um disjuntor D_1 comandado por um relé de sobrecorrente (função 51) localizado mais a montante, um religador automático R_1 , e um seccionizador S_1 localizado mais a jusante. O seccionizador opera de forma coordenada com o religador. Assim, no caso de defeitos permanentes no trecho final do alimentador (trecho entre as barras 7 e 8), o seccionizador conta as tentativas de religamento e atua desligando o trecho. Dessa forma, as cargas a montante do seccionizador permanecem atendidas. Por outro lado, no caso de defeitos transit rios a jusante da barra 5, a rede é prontamente restabelecida com a atuação do religador. O relé de sobrecorrente que atua no disjuntor opera como proteção principal no trecho entre as barras 3 e 4, e como proteção de retaguarda no caso de defeitos a jusante da barra 5 (Mason, 1967).

A seguir, o funcionamento de cada um dos componentes do sistema é descrito, e o autômato correspondente é obtido, considerando duas possíveis falhas no sistema de proteção: (i) travamento do religador na posição fechada; (ii) travamento do seccionizador na posição fechada. Além dos aut matos dos componentes do sistema, é apresentado também o autômato que modela a coordenação e seletividade da proteção. Para melhor entendimento, a tabela 1 apresenta o significado de cada evento do sistema.

3.1 Disjuntor

A abertura do disjuntor é comandada pelo relé de sobrecorrente no caso de defeitos entre as barras 3 e 4, ou no caso de defeitos a jusante da barra 5, com falha na operação do religador. Na figura 2, é mostrado o autômato que modela a operação do disjuntor. Inicialmente, o disjuntor está no es-

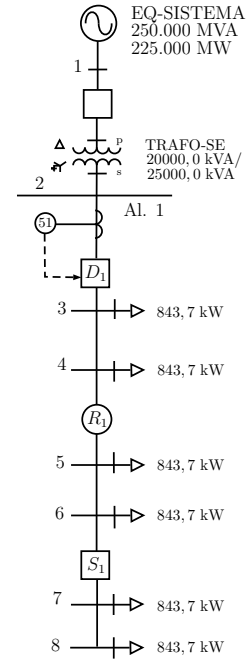


Figura 1: Diagrama unifilar de um alimentador de distribuição urbano radial t pico.

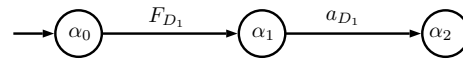


Figura 2: Autômato que representa o funcionamento de um disjuntor.

tado α_0 que representa que o mesmo está fechado. Após a ocorrência do evento F_{D_1} , que representa o comando para o disjuntor abrir, o autômato evolui para o estado α_1 que indica que foi dado o comando de abertura. Finalmente, após a abertura do disjuntor, modelada pelo evento a_{D_1} , o disjuntor abre o circuito, o que é modelado pelo estado α_2 .

3.2 Religador automático

O religador automático é um dispositivo que atua em casos de faltas transitórias ou permanentes que ocorrem em sua zona de proteção. Ele interrompe e religa o circuito, segundo uma seq ncia pré-determinada de aberturas e fechamentos dos seus contatos. No exemplo da figura 1, o religador R_1 inicia sua operação em caso de faltas a jusante da barra 5. O autômato que o modela é apresentado na figura 3. Inicialmente o religador se encontra fechado representado pelo estado inicial ρ_0 . Após a ocorrência dos comandos de abertura F_{R_1} ou F_{S_1} , o religador evolui para o estado de sensibilização ρ_1 . O evento de abertura do religador a_{R_1} leva o religador ao estado ρ_2 em que o circuito está aberto. Transcorrido um tempo pré-determinado t_{1R_1} , o religador passa para o estado de espera ρ_3

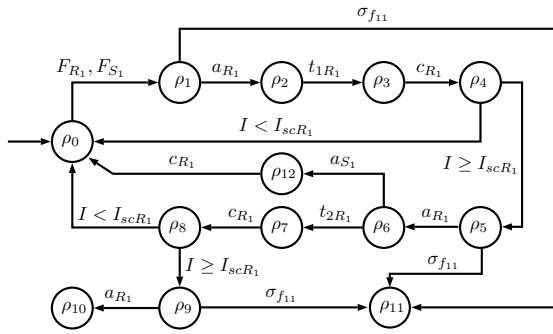


Figura 3: Autômato que representa o funcionamento de um religador automático.

habilitando a ocorrência do evento que comanda o fechamento do mesmo, c_{R1} , na tentativa de restabelecer o fluxo de energia em caso de falta transitória. No estado ρ_4 , ocorre a verificação do valor de corrente. Se a corrente que passa pelo religador for menor do que a corrente de ajuste (valor de pickup) I_{scR1} , então a falta foi transitória e o religador volta ao seu estado inicial. Contudo, se no estado ρ_4 é verificado que o valor da corrente que passa pelo religador ainda é superior ou igual à corrente de ajuste, então o religador passa para o estado ρ_5 e faz uma novo procedimento de abertura e fechamento.

Neste trabalho, foram consideradas duas seqüências de abertura e fechamento para restabelecimento do sistema em caso de faltas transitórias. Assim, após a segunda abertura, o religador encontra-se no estado ρ_6 . Caso, a falta tenha ocorrido a jusante do seccionizador e este esteja operando corretamente, o evento de abertura do seccionizador a_{S1} é observado e o religador é fechado e volta ao estado inicial. Caso a_{S1} não ocorra, então é feito mais um fechamento do religador e se a corrente de defeito ainda é percebida, o religador é aberto definitivamente, modelado pelo estado ρ_{10} . Note que no autômato da figura 3, nos estados ρ_1 , ρ_5 e ρ_9 , é possível ocorrer o evento de falha σ_{f11} , que representa o travamento do religador na posição fechado, levando ao estado religador travado fechado ρ_{11} .

3.3 Seccionizador

O seccionizador é um dispositivo que opera sincronizado com o religador automático, visto que ele não atua em carga. O autômato que o modela é apresentado na figura 4. O estado δ_0 representa o estado inicial seccionizador fechado. Após a ocorrência do comando de abertura F_{S1} , o estado δ_1 , que representa o início da contagem de aberturas do religador, é alcançado. Assim, após a ocorrência de a_{R1} , o estado δ_2 , que indica a ocorrência da primeira abertura do religador, é alcançado. Caso a falta tenha sido de natureza transitória e o religador tenha retornado ao seu estado

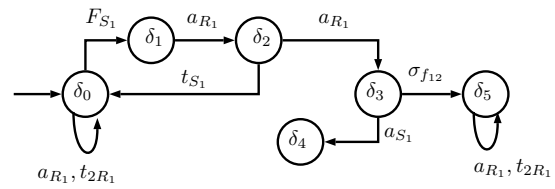


Figura 4: Autômato que modela o funcionamento de um seccionizador.

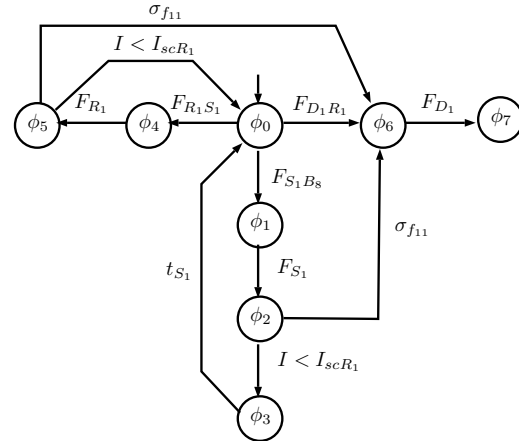


Figura 5: Autômato que representa a coordenação da proteção.

inicial, o seccionizador também retorna ao seu estado inicial após um tempo t_{S1} . Caso contrário, uma nova abertura do religador leva o seccionizador ao estado δ_3 , em que o circuito está aberto pelo religador e, em seguida, ocorre, em funcionamento normal, a abertura do seccionizador a_{S1} levando-o ao estado δ_4 . Note que em δ_3 , é possível também a ocorrência do evento de falha σ_{f12} , que representa o travamento do seccionizador na posição fechado, levando-o ao estado δ_5 .

3.4 Coordenador da proteção

O autômato do coordenador, apresentado na figura 5, modela a coordenação e seletividade cronométrica entre o disjuntor D_1 , religador R_1 e seccionizador S_1 . O estado ϕ_0 é o estado inicial do coordenador. Caso ocorra uma das faltas F_{D1R1} , F_{R1S1} ou F_{S1B8} , que modelam, respectivamente, a ocorrência de falta entre as barras 3 e 4, 5 e 6, ou 7 e 8, o sistema evolui para os estados ϕ_1 , ϕ_4 e ϕ_6 . Dependendo da localização da falta, o coordenador indica qual dispositivo de proteção deve atuar, emitindo o evento que comanda a sua operação. Assim, por exemplo, se ocorre a falta entre as barras 7 e 8, o coordenador indica pela ocorrência de F_{S1} que o religador e o seccionizador devem iniciar suas operações. Note que o evento de falha no religador σ_{f11} nos estados ϕ_2 e ϕ_5 leva o coordenador ao estado ϕ_6 , que habilita o evento de comando para abertura do disjuntor F_{D1} , que

Tabela 1: Tabela de eventos do sistema

Evento	Descrição
$F_{D_1 R_1}$	Falta entre as barras 3 e 4
$F_{R_1 S_1}$	Falta entre as barras 5 e 6
$F_{S_1 B_8}$	Falta entre as barras 7 e 8
F_{D_1}	Comando para D_1 atuar
F_{R_1}	Comando para R_1 atuar
F_{S_1}	Comando para R_1 e S_1 atuarem
$I < I_{scR_1}$	Corrente normal em R_1
t_{S_1}	Tempo de reset de S_1
σ_{f11}	Religador R_1 travado fechado
a_{D_1}	Abertura do disjuntor D_1
a_{R_1}	Abertura do religador R_1
t_{1R_1}	Tempo 1 de operação de R_1
c_{R_1}	Religamento do circuito por R_1
$I \geq I_{scR_1}$	Corrente anormal de curto circuito
t_{2R_1}	Tempo 2 de operação de R_1
a_{S_1}	Abertura do seccionizador S_1
σ_{f12}	Seccionizador S_1 travado fechado
t_{2R_1}	Tempo 2 de operação de R_1

atuará, nesse caso, como proteção de retaguarda.

3.5 Modelo completo do sistema

Uma vez obtidos os autômatos que modelam o comportamento de cada um dos subsistemas, o autômato do sistema completo é obtido fazendo-se a composição paralela desses subsistemas. Assim, denotando por G_{D_1} , G_{R_1} , G_{S_1} e G_C , os autômatos do disjuntor, religador, seccionizador e coordenador, respectivamente, tem-se que o autômato do sistema completo é dado por $G = G_{D_1} \parallel G_{R_1} \parallel G_{S_1} \parallel G_C$. Devido à limitação de espaço, G não será mostrado neste trabalho.

4 Análise da diagnosticabilidade

Nesta seção é feita a análise da diagnosticabilidade da linguagem do sistema com relação aos eventos de falha σ_{f11} e σ_{f12} . Para que as duas falhas sejam diagnosticáveis, o diagnosticador deve ser capaz de identificar a ocorrência da falha em um número limitado de observação de eventos, e ser capaz de determinar qual falha ocorreu. Para tanto, dois diagnosticadores são construídos, sendo um para cada tipo de falha. É importante ressaltar que para a construção de um diagnosticador para um determinado tipo de falha, todas as outras falhas são tratadas como eventos não-observáveis normais, e que a falha é diagnosticada somente quando o diagnosticador alcança um estado certo da ocorrência da falha, isto é, com todos os seus componentes rotulados por Y .

A escolha dos eventos observáveis é outro fator determinante para a diagnosticabilidade da linguagem do sistema. Neste trabalho, é considerado o conjunto de eventos observáveis $\Sigma_o = \{F_{S_1 B_8}, F_{D_1 R_1}, F_{R_1 S_1}, a_{D_1}, a_{S_1}, c_{R_1}, t_{S_1}, I < I_{scR_1}\}$. Note que é suposto observável o local de

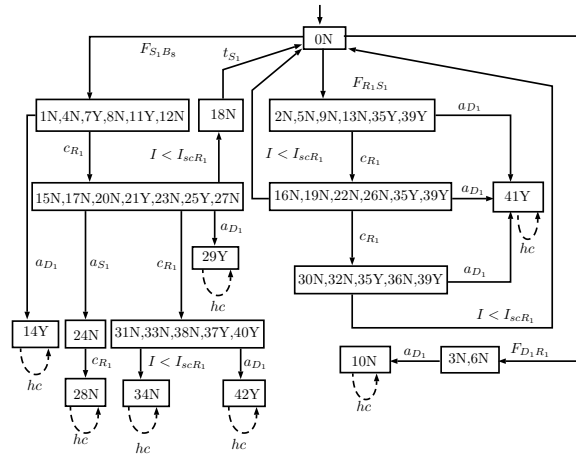


Figura 6: Autômato diagnosticador da falha no religador σ_{f11} .

ocorrência do curto-circuito no sistema. Isso pode ser feito utilizando-se qualquer dispositivo já implementado na rede de distribuição, ou os próprios equipamentos de proteção da linha, uma vez que esses são dotados de sensores de corrente. Assim, caso a corrente ultrapasse em um dos equipamentos um valor determinado, um sinal binário pode ser enviado para o centro de operações indicando que o equipamento percebeu a passagem de uma corrente de defeito. A combinação das observações de correntes anormais nos próprios dispositivos de proteção pode ser utilizada para determinar a localização da falta. Outra observação importante é com relação ao evento $I < I_{scR_1}$. Apesar desse evento estar relacionado à medição da corrente que passa no religador, a sua observação pode ser feita indiretamente utilizando um temporizador no próprio centro de operações. Note que, de acordo com a figura 3, o evento $I < I_{scR_1}$ é observado somente após a ocorrência do evento c_{R_1} e este ocorre somente no restabelecimento do funcionamento normal do religador. Assim, caso seja observado o evento c_{R_1} e após um intervalo de tempo não sejam observados novos eventos de abertura ou fechamento de equipamentos, então a falta era transitória e o religador retornou ao seu estado inicial.

Na figura 6, é mostrado o diagnosticador para a falha σ_{f11} e na figura 7 é mostrado o diagnosticador para a falha σ_{f12} . Em ambos os diagnosticadores podem ser observados autolaços rotulados por hc (*hidden cycles*), indicando que há ciclos escondidos (Basilio et al., 2012). Contudo, esses ciclos não são indeterminados e não estão associados a perda de diagnosticabilidade de L . Além disso, não há ciclos observados de estados incertos e, consequentemente, não há ciclos indeterminados observados, o que mostra que L é diagnosticável com relação a Σ_o e aos tipos de falha $\Sigma_{f1} = \{\sigma_{f11}\}$ e $\Sigma_{f2} = \{\sigma_{f12}\}$.

Para ilustrar o diagnóstico das falhas do sis-

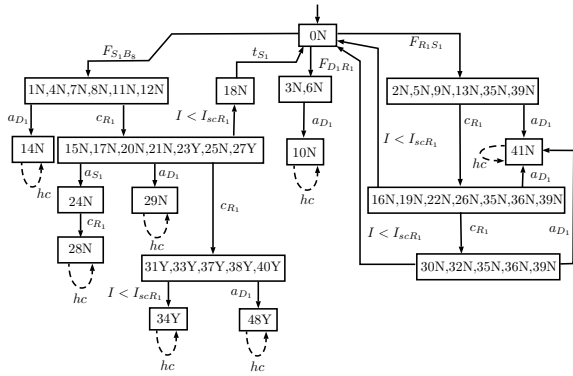


Figura 7: Autômato diagnosticador da falha no seccionizador σ_{f12} .

tema é apresentado a seguir um exemplo em que ambas as falhas ocorrem na mesma sequência de eventos executada pelo sistema.

Exemplo 1 Suponha que seja executada a seguinte sequência de falha $s = F_{S_1B_8}F_{S_1}a_{R_1}t_{1R_1}c_{R_1}[I \geq I_{scR_1}]a_{R_1}\sigma_{f12}t_{2R_1}c_{R_1}[I \geq I_{scR_1}]\sigma_{f11}F_{D_1}a_{D_1}$, que mostra que houve uma falta entre as barras 7 e 8, e ocorrem ambas as falhas de travamento fechado do seccionizador e religador. A sequência observada nesse caso pelos diagnosticadores é $P_o(s) = F_{S_1B_8}c_{R_1}c_{R_1}a_{D_1}$. Note que são alcançados os estados 42Y e 48Y nos diagnosticadores para falha σ_{f11} e σ_{f12} , respectivamente. Portanto, ambas as falhas são diagnosticadas após um número limitado de observação de eventos.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para a obtenção de modelos por autômatos de dispositivos de proteção, e da coordenação e seletividade do sistema de proteção, para o caso de um alimentador de distribuição radial típico. Esses modelos permitem o uso de técnicas de diagnóstico de falhas em sistemas a eventos discretos para realizar o diagnóstico de falhas nos equipamentos de proteção. A metodologia apresentada pode ser estendida para casos mais complexos do que o tratado neste artigo, permitindo o seu uso em sistemas de distribuição com outras topologias e esquemas de proteção mais complexos.

Agradecimentos

Agradecemos à Petrobras, ao CNPq e à FAPERJ pelo suporte financeiro.

Referências

Arora, A., Jagannathan, R. e Wang, Y. (2002). Model-based fault detection in powerline networking, *Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium*, IEEE, pp. 1–8.

Basilio, J. C., Lima, S. T. S., Lafortune, S. e Moreira, M. V. (2012). Computation of minimal event bases that ensure diagnosability, *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications* **22**(3): 249–292.

Calderaro, V., Hadjicostis, C. N., Piccolo, A. e Siano, P. (2011). Failure identification in smart grids based on petri net modeling, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* **58**(10): 4613–4623.

Cassandras, C. G. e Lafortune, S. (2008). *Introduction to Discrete Events Systems*, 2nd edn, Springer, New York, NY : USA.

Coutto Filho, M. d., Rodrigues, M., Souza, J. et al. (1999). Localização de defeitos em sistemas de energia elétrica utilizando sistemas inteligentes, *XV SNPTTE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica* pp. 1–7.

Mason, C. R. (1967). *The art and science of protective relaying*, John Wiley & Sons.

Moreira, M. V., Jesus, T. C. e Basilio, J. C. (2011). Polynomial time verification of decentralized diagnosability of discrete event systems, *Automatic Control, IEEE Transactions on* **56**(7): 1679–1684.

Qiu, W. e Kumar, R. (2006). Decentralized failure diagnosis of discrete event systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans* **36**(2).

Reshmila, S. e Devanathan, R. (2016). Diagnosis of power system failures using observer based discrete event system, *IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation*, IEEE, pp. 131–135.

Sampath, M., Sengupta, R., Lafortune, S., Sinnamohideen, K. e Teneketzis, D. (1995). Diagnosability of discrete-event systems, *Automatic Control, IEEE Transactions on* **40**(9): 1555–1575.

Sun, J., Qin, S.-Y. e Song, Y.-H. (2004). Fault diagnosis of electrical power systems based on fuzzy petri nets, *Power Systems, IEEE Transactions on* **19**(4): 2053–2059.

Wang, L., Chen, Q., Gao, Z., Niu, L., Zhao, Y., Ma, Z. e Wu, D. (2014). Knowledge representation and general petri net models for power grid fault diagnosis, *IET Generation, Transmission & Distribution* **9**(9): 866–873.

Yoo, T.-S. e Lafortune, S. (2002). Polynomial-time verification of diagnosability of partially observed discrete-event systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* **47**(9).