

CODIAGNOSTICABILIDADE EM REDE DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS SUJEITA A ATRASOS E PERDAS DE OBSERVAÇÃO DE EVENTOS

CARLOS E. V. NUNES, MARCOS V. MOREIRA, MARCOS V. S. ALVES, LILIAN K. CARVALHO, JOÃO C. BASILIO*

*COPPE-Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, 21.945-970, RJ, Brasil

Email: carlosevnunes@poli.ufrj.br, moreira@dee.ufrj.br, mvalves@poli.ufrj.br, lilian@dee.ufrj.br, basilio@dee.ufrj.br

Abstract— In general, the failure diagnosis of Discrete-Event Systems (DES) is carried out assuming a perfect communication between sensors and diagnosers. However, in complex industrial systems, communication networks are usually used to provide an efficient way of establishing communication among devices. The use of networks can introduce delays and losses in the communication of events to local diagnosers, leading to an incorrect observation of the trace executed by the system. In this paper, we introduce the definition of network codiagnosability of DES subject to delays and losses of observation of events, and we propose an algorithm to verify this property.

Keywords— Fault codiagnosis, network communication, discrete-event systems, automata

Resumo— Em geral, a diagnose de falhas em Sistemas a Eventos Discretos (SED) é realizada supondo uma perfeita comunicação entre sensores e diagnosticadores. No entanto, em sistemas industriais complexos, redes de comunicação são frequentemente utilizadas por serem um meio eficiente para estabelecer a comunicação entre dispositivos. O uso de redes de comunicação pode introduzir atrasos e perdas na comunicação dos eventos, levando a uma incorreta observação da sequência de eventos ocorrida na planta. Neste artigo, introduzimos a definição de codiagnosticabilidade de SEDs com comunicação em rede sujeita a atrasos e perdas na observação de eventos, e propomos um algoritmo para verificar essa propriedade.

Palavras-chave— Codiagnose de falhas, comunicação em rede, sistemas a eventos discretos, autômatos

1 Introdução

Plantas industriais complexas são, em geral, fisicamente distribuídas com diversos dispositivos trocando informações entre si. Nesse sentido, a tradicional comunicação analógica 4-20mA ou digital 24VCC, é usualmente substituída por comunicação em rede, devido ao seu custo reduzido para implementação e manutenção (Huo et al., 2004).

O uso de redes de comunicação para controle e diagnose de falhas tem sido largamente estudado na literatura (Debouk et al., 2003; Tripakis, 2004; Park and Cho, 2007; Qiu and Kumar, 2008). Embora as redes de comunicação permitam mais flexibilidade e menor custo de integração do sistema, elas introduzem diferentes problemas que devem ser levados em conta para uma operação confiável. Basicamente, dois problemas podem surgir: (i) a perda dos dados transferidos na rede; e (ii) atrasos de comunicação entre os dispositivos. Se qualquer um desses problemas vier a acontecer, o diagnosticador poderá reportar uma decisão errada com relação à ocorrência da falha.

Em Carvalho et al. (2012) e Carvalho et al. (2013), o problema de diagnose de falhas em SED é abordado considerando, respectivamente, perdas intermitentes e perdas permanentes de observação. Contudo, o problema de atrasos na comunicação da ocorrência de eventos não é considerado nesses trabalhos. O problema de atraso na comunicação da ocorrência de eventos em SEDs é abordado em Tripakis (2004) e Park and Cho (2007), na área de controle supervisory, e em Debouk et al. (2003), Qiu and Kumar (2008), Nunes et al. (2015), e Nunes et al. (2016), na área de

diagnose de falhas.

Em Debouk et al. (2003), o problema de diagnose descentralizada de falhas em SEDs sujeitos a atrasos de comunicação é abordado sob os protocolos 1 e 2 de Debouk et al. (2000), e é considerado o atraso de comunicação entre diagnosticadores locais e o coordenador, sendo o coordenador responsável por reordenar os eventos e inferir a ocorrência do evento de falha. Em Qiu and Kumar (2008) é apresentado o problema de diagnose distribuída de falhas em SEDs, considerando que cada diagnosticador local envia suas observações para os outros diagnosticadores, e que nessa troca de informações os eventos podem sofrer atrasos.

Em Nunes et al. (2015) e Nunes et al. (2016), uma nova abordagem para a diagnose descentralizada de falhas em SEDs com comunicação em rede é apresentada, baseada no protocolo 3 de Debouk et al. (2000) em que o atraso de comunicação ocorre entre os sensores da planta e os diagnosticadores locais. É importante ressaltar que em Nunes et al. (2015) e Nunes et al. (2016) o problema de perdas de observação de eventos pelos diagnosticadores locais não é abordado.

Neste artigo, o problema de diagnose descentralizada de falhas em SEDs com comunicação em rede sujeita a atrasos na observação de eventos, apresentado em Nunes et al. (2015) e Nunes et al. (2016), é estendido para abordar o problema de perdas intermitentes de observação de eventos. Assim, neste trabalho são apresentados: (i) a definição de codiagnosticabilidade de SEDs com comunicação em rede sujeita a atrasos e perdas intermitentes na observação de eventos; (ii) um algoritmo para a verificação dessa propriedade; e (iii) exemplos que ilustram os principais resultados.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Definições e notações

Seja $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$ o autômato que modela um SED, em que X é o conjunto de estados, Σ é o conjunto de eventos, $\Gamma : X \rightarrow 2^\Sigma$ é a função de eventos viáveis, $f : X \times \Sigma^* \rightarrow X$ é a função de transição em que Σ^* denota o fecho de Kleene de Σ , X_m é o conjunto de estados marcados e x_0 é o estado inicial do sistema (Cassandras and Lafortune, 2008). A linguagem gerada por G é denotada por L .

Seja K uma linguagem definida sobre Σ^* . Então, o fecho de prefixo de K é denotado por $\bar{K}$. Se $K = \bar{K}$, então K é dita ser prefixo-fechada.

A parte acessível de G , denotada por $Ac(G)$, é o autômato obtido eliminando-se todos os estados de G que não são alcançáveis a partir do estado inicial x_0 e suas respectivas transições, ou seja, $Ac(G) := (X_{ac}, \Sigma, f_{ac}, \Gamma_{ac}, x_0, X_{m,ac})$ em que $X_{ac} = \{x \in X : (\exists s \in \Sigma^*)[f(x_0, s) = x]\}$, $f_{ac} = f|_{X_{ac} \times \Sigma^* \rightarrow X_{ac}}$ é a nova função de transição obtida restringindo o domínio de f para o domínio dos estados acessíveis X_{ac} , e $X_{m,ac} = X_{ac} \cap X_m$. A parte coacessível de G , denotada por $CoAc(G)$, é o autômato obtido eliminando-se todos os estados de G a partir dos quais não é possível alcançar um estado marcado, ou seja, $CoAc(G) := (X_{coac}, \Sigma, f_{coac}, \Gamma_{coac}, x_0, X_m)$ em que $X_{coac} = \{x \in X : (\exists s \in \Sigma^*)[f(x, s) \in X_m]\}$, $f_{coac} = f|_{X_{coac} \times \Sigma^* \rightarrow X_{coac}}$ é a nova função de transição obtida restringindo o domínio de f para os estados coacessíveis X_{coac} , $x_0, coac = x_0$, se $x_0 \in X_{coac}$, ou $x_0, coac$ é indefinido, caso contrário.

A operação de projeção $P_s^l : \Sigma_i^* \rightarrow \Sigma_s^*$, em que $\Sigma_s \subset \Sigma_l$, e a operação de projeção inversa $P_s^{l-1} : \Sigma_s^* \rightarrow \Sigma_i^*$ são definidas de forma usual (Ramadge and Wonham, 1989).

Sejam G_1 e G_2 dois autômatos. A composição produto e a composição paralela entre G_1 e G_2 são denotadas, respectivamente, por $G_1 \times G_2$ e $G_1 || G_2$ (Cassandras and Lafortune, 2008).

2.2 Codiagnosticabilidade de Sistemas a Eventos Discretos

Suponha que o conjunto de eventos de G seja particionado em $\Sigma = \Sigma_o \cup \Sigma_{uo}$, em que Σ_o e Σ_{uo} denotam, respectivamente, o conjunto de eventos observáveis e não-observáveis de Σ , e seja $\Sigma_f \subseteq \Sigma_{uo}$ o conjunto de eventos de falha. Então, a seguinte definição pode ser apresentada.

Definição 1 (sequências normal e de falha) A sequência que não contém eventos de falha é denominada de sequência normal e a sequência que contém pelo menos um evento de falha é denominada de sequência de falha.

O conjunto formado por todas as sequências normais de L é a linguagem prefixo-fechada L_N . Assim, o conjunto formado por todas as sequências de L que contém pelo menos um evento de falha é dado por

$L \setminus L_N$. Note que $L \setminus L_N$ não é necessariamente prefixo-fechada.

Seja G_N o subautômato de G que representa o comportamento normal do sistema com relação ao conjunto de eventos de falha Σ_f . Então, a linguagem gerada por G_N é L_N .

Considere agora o Protocolo 3 para a diagnose descentralizada de falhas apresentado em Debouk et al. (2000), que consiste em um conjunto de n diagnosticadores locais que não se comunicam entre si, e que cada diagnosticador local possui seu próprio conjunto de eventos observáveis $\Sigma_{oi} \subset \Sigma_o$, em que $i = 1, 2, \dots, n$, i.e., o conjunto de eventos de cada diagnosticador local é particionado em $\Sigma_i = \Sigma_{oi} \cup \Sigma_{uo_i}$, em que Σ_{uo_i} denota o conjunto dos eventos não observáveis para o i -ésimo diagnosticador local. Nesse esquema, uma falha é diagnosticada quando pelo menos um dos diagnosticadores locais identifica sua ocorrência. Essa noção de diagnosticabilidade descentralizada é chamada na literatura de codiagnosticabilidade (Qiu and Kumar, 2006). A seguir, a definição de codiagnosticabilidade de uma linguagem L é apresentada.

Definição 2 (Debouk et al., 2000) Sejam L e $L_N \subset L$ linguagens prefixo-fechadas geradas por G e G_N , respectivamente, e $P_{oi} : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_{oi}^*$, $i = 1, \dots, n$, operações de projeção. Então, L é dita ser codiagnosticável com relação às projeções P_{oi} e Σ_f se

$$(\exists z \in N)(\forall s \in L \setminus L_N)(\forall st \in L \setminus L_N, ||t|| \geq z) \Rightarrow$$

$$(\exists i \in \{1, 2, \dots, n\})(P_{oi}(st) \neq P_{oi}(\omega), \forall \omega \in L_N)$$

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

De acordo com a definição 2, L é codiagnosticável com relação a P_{oi} e Σ_f se, e somente se, para todas as sequências st de comprimento arbitrariamente longo após a falha, não existem sequências $s_{N_i} \in L_N$, tais que $P_{oi}(s_{N_i}) = P_{oi}(st)$ para todo $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Neste trabalho, é suposto, sem perda de generalidade, que Σ_f é um conjunto unitário, ou seja, $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$.

3 Codiagnosticabilidade de SEDs com comunicação em rede

3.1 Redes de comunicação para a codiagnose de falhas

Redes de comunicação são largamente utilizadas em sistemas distribuídos devido ao seu baixo custo e facilidade de manutenção. Contudo, as redes podem introduzir o problema de atraso na comunicação e perdas de dados entre os dispositivos. O problema de atrasos na comunicação pode acontecer, por exemplo, devido a uma diferença de velocidade da comunicação de cada canal, ou ainda devido à quantidade de dados transmitidos na rede (Nunes et al., 2016), enquanto que as perdas intermitentes podem ocorrer devido a falhas na rede de comunicação (Carvalho et al., 2012). Esses problemas podem ocasionar uma observação de eventos fora da ordem original de ocorrência, ou ainda

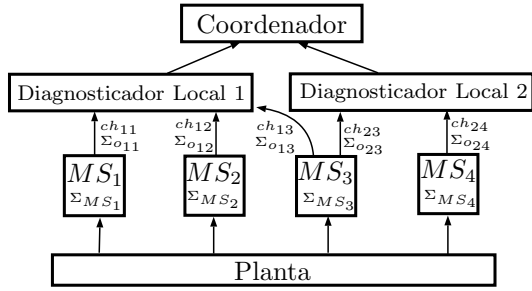


Figura 1: Arquitetura da codiagnose com comunicação em rede.

a não observação de alguns eventos, levando o diagnosticador a detectar erroneamente a ocorrência de um evento de falha.

Em Nunes et al. (2015) e Nunes et al. (2016), é proposto um sistema de codiagnose com comunicação em rede para um sistema que possui diferentes locais de medição LM_j , para $j = 1, 2, \dots, m$, em que cada local de medição LM_j pode detectar um subconjunto $\Sigma_{LM_j} \subset \Sigma_o$. Nesse sistema, parte dos eventos de Σ_{LM_j} são comunicados ao diagnosticador local DL_i por um canal de comunicação exclusivo, ch_{ij} , ou seja, somente os eventos detectados pelo local de medição LM_j podem ser comunicados através do canal ch_{ij} para o diagnosticador local DL_i . Assim, os eventos pertencentes a $\Sigma_{oij} \subseteq \Sigma_{LM_j}$ são transmitidos pelo canal ch_{ij} para o diagnosticador local DL_i . Note que, se não existir um canal de comunicação ch_{yx} entre o local de medição LM_x e o diagnosticador local DL_y , então $\Sigma_{oxy} = \emptyset$. Assim, o conjunto de eventos observáveis de DL_i é dado por $\Sigma_{oi} = \bigcup_{j=1}^m \Sigma_{oij}$. É importante notar que $\Sigma_o = \bigcup_{i=1}^n \Sigma_{oi}$. Na Figura 1 é mostrado o esquema de codiagnose com comunicação em rede proposto em Nunes et al. (2016) para o caso de quatro locais de medição e dois diagnosticadores locais.

As hipóteses apresentadas em Nunes et al. (2016) para o problema de codiagnose de falhas em SEDs sujeitos a atrasos na observação de eventos são apresentadas a seguir.

- H1. O atraso na comunicação de um evento $\sigma \in \Sigma_o$ é medido em passos (Tripakis, 2004), em que um passo   a ocorrência de um evento. O atraso é medido pelo número de eventos que são executados pela planta depois da ocorrência do evento σ e antes de sua observação.
- H2. O atraso de comunicação de eventos é limitado.
- H3. Os canais obedecem a regra *first-in first-out* (FIFO) para a transmissão da ocorrência dos eventos.
- H4. Existe, no máximo, um canal ch_{ij} entre o local de medição LM_j e o diagnosticador local DL_i , e o atraso máximo do canal ch_{ij} , denotado por k_{ij} é previamente conhecido. Se o canal ch_{yx} não existe, então $k_{yx} = 0$.
- H5. O conjunto de eventos Σ_{LM_i} e Σ_{LM_j} são disjuntos para todo $i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$, $i \neq j$.

Neste artigo, o problema da codiagnosticabilidade em SEDs com comunicação em rede sujeita a atrasos e perdas intermitentes na observação de eventos é abordado. Para tanto, mais uma hipótese deve ser considerada com relação às perdas intermitentes de observação.

- H6. A perda de observação de um evento não altera o comportamento da planta.

Note que a hipótese H6 é coerente com a consideração feita neste trabalho de que a perda de observação é originada por um problema na comunicação entre um local de medição e um diagnosticador local, não interferindo, portanto, no comportamento da planta.

3.2 Modelo da planta sujeita a atrasos e perdas intermitentes na observação de eventos

Visando abordar os problemas de atraso e perdas intermitentes de observação de eventos em SEDs com comunicação em rede, será proposta neste trabalho uma solução que consiste de dois passos. No primeiro passo,   construído um autômato G_i , para $i = 1, \dots, n$, cuja linguagem representa todas possíveis observações das sequências executadas pela planta devido aos atrasos nos canais de comunicação ligados ao diagnosticador local DL_i . Em seguida, os aut matos G_i , para $i = 1, \dots, n$, são modificados para representar as perdas intermitentes de observação de eventos.

Para distinguir a ocorrência de um evento $\sigma \in \Sigma_{oij}$, de sua observação pelo i -ésimo diagnosticador local DL_i , é criado um evento σ_{si} , que modela a observação de σ pelo diagnosticador DL_i (Nunes et al., 2016). Assim, $\Sigma_{oij}^s = \{\sigma_{si} : \sigma \in \Sigma_{oij}\}$, denota o conjunto de eventos que podem ser observados pelo diagnosticador DL_i e são comunicados pelo canal ch_{ij} , e $\Sigma_{oi}^s = \bigcup_{j=1}^m \Sigma_{oij}^s$ denota o conjunto de eventos observáveis que são comunicados para o diagnosticador DL_i . Uma vez definido o conjunto Σ_{oi}^s , a seguinte função bijetora pode ser definida $\phi_i : \Sigma_{oi}^s \rightarrow \Sigma_{oi}$, em que, $\phi_i(\sigma_{si}) = \sigma$, $\forall \sigma_{si} \in \Sigma_{oi}^s$.

Para obter o algoritmo que gera o modelo G_i , para $i = 1, 2, \dots, n$,   necessário, antes, obter o autômato A_i , que modela todos os possíveis atrasos na comunicação de todos os eventos da planta para o diagnosticador local DL_i . Para obter o autômato A_i ,   necessário seguir os passos do algoritmo apresentado em Nunes et al. (2015) e Nunes et al. (2016).

Após obter os aut matos A_i , para $i = 1, 2, \dots, n$, podemos, agora, obter o autômato G_i fazendo a composição paralela de G e A_i :

$$G_i = G \parallel A_i = (X_i, \Sigma_i, f_i, \Gamma_i, x_{0i}, \emptyset). \quad (1)$$

Como o objetivo do autômato G_i é representar todas as possíveis observações realizadas por DL_i das sequências geradas pelo sistema, então o conjunto de eventos observáveis de G_i ,   $\Sigma_{io} = \Sigma_{oi}^s$, e o conjunto de eventos não observáveis de G_i   $\Sigma_{iuo} = \Sigma$.

Lema 1 Seja $P_{si}^i : \Sigma_i^* \rightarrow \Sigma_{oi}^s$ uma função de projeção. Então, a projeção da linguagem gerada por G_i ,

$P_{s_i}^i(L(G_i))$, é formada por todas as possíveis ordens de observação dos traços da linguagem L , com relação a $\Sigma_{o_{ij}}$ e k_{ij} .

Prova: A prova será omitida devido à falta de espaço. O exemplo a seguir ilustra a construção do autômato G_i .

Exemplo 1 Seja G o autômato da planta mostrado na figura 2, em que $\Sigma = \{a, b, c, d, \sigma_f\}$, e considere um sistema de codiagnose com comunicação em rede com dois diagnosticadores locais, DL_1 e DL_2 , e três locais de medição, LM_1 , LM_2 e LM_3 . Sejam $\Sigma_{LM_1} = \{a\}$, $\Sigma_{LM_2} = \{b, c\}$ e $\Sigma_{LM_3} = \{d\}$ os conjuntos de eventos dos locais de medição LM_1 , LM_2 e LM_3 , respectivamente. Suponha que os conjuntos de eventos observáveis e não-observáveis pelo diagnosticador local DL_1 sejam $\Sigma_{o_1} = \{a, b, c, d\}$ e $\Sigma_{uo_1} = \{\sigma_f\}$, respectivamente. Suponha também que os eventos observáveis pelo diagnosticador local DL_1 sejam transmitidos pelos canais ch_{11} , ch_{12} e ch_{13} , de modo que, $\Sigma_{o_{11}} = \{a\}$, $\Sigma_{o_{12}} = \{b, c\}$ e $\Sigma_{o_{13}} = \{d\}$. Suponha agora que os conjuntos de eventos observáveis e não-observáveis pelo diagnosticador local DL_2 sejam $\Sigma_{o_2} = \{b, c, d\}$ e $\Sigma_{uo_2} = \{a, \sigma_f\}$, respectivamente. Suponha também que os eventos observáveis pelo diagnosticador local DL_2 sejam transmitidos pelos canais ch_{22} e ch_{23} , de modo que, $\Sigma_{o_{12}} = \emptyset$, $\Sigma_{o_{22}} = \{c, b\}$ e $\Sigma_{o_{23}} = \{d\}$. Seja σ_f o evento de falha e suponha os limites de atraso para cada canal dados por $k_{11} = 1$, $k_{23} = 1$ e $k_{12} = k_{13} = k_{21} = k_{22} = 0$.

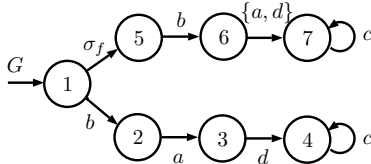


Figura 2: Autômato G

O autômato A_1 é construído seguindo os passos do algoritmo apresentado em Nunes et al. (2015) e Nunes et al. (2016), e é mostrado na Figura 3. O autô-

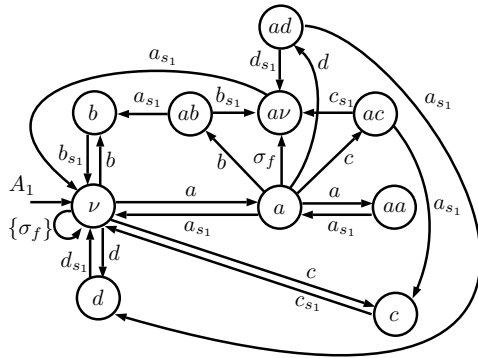


Figura 3: Autômato A_1 .

mato $G_1 = G \| A_1$ é mostrado na figura 4. O conjunto de eventos observáveis e não-observáveis de G_1 são

$\Sigma_{1_o} = \{a_{s1}, b_{s1}, c_{s1}, d_{s1}\}$ e $\Sigma_{1_{uo}} = \{a, b, c, d, \sigma_f\}$, respectivamente.

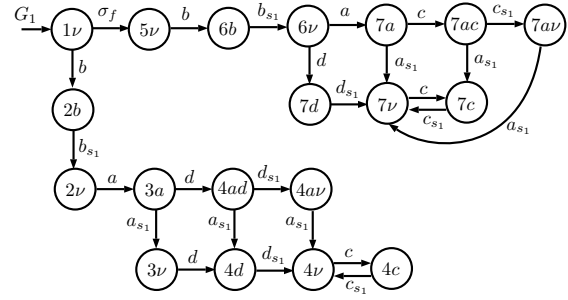


Figura 4: Autômato G_1 .

Uma vez obtidos os autômatos G_i , $i = 1, \dots, n$, que representam todas as possíveis observações da linguagem do sistema devido aos atrasos de comunicação dos eventos, o próximo passo é representar em G_i as perdas intermitentes de observação. Para tanto, será utilizada a função de dilatação introduzida em Carvalho et al. (2012).

Considere a seguinte partição do conjunto de eventos observáveis associados ao diagnosticador local DL_i , $\Sigma_{o_i} = \Sigma_{i,ilo} \cup \Sigma_{i,nilo}$, em que $\Sigma_{i,ilo}$ e $\Sigma_{i,nilo}$ denotam, respectivamente, os conjuntos de eventos sujeitos a perdas intermitentes de observação e que não estão sujeitos a perdas intermitentes de observação. Note que associado à partição de Σ_{o_i} , é possível definir a partição do conjunto de eventos observáveis de G_i , $\Sigma_{o_i}^s = \Sigma_{i,ilo}^s \cup \Sigma_{i,nilo}^s$, em que $\Sigma_{i,ilo}^s = \phi_i^{-1}(\Sigma_{i,ilo})$ e $\Sigma_{i,nilo}^s = \phi_i^{-1}(\Sigma_{i,nilo})$. Considere agora o conjunto de eventos não observáveis $\Sigma_{i,ilo}' = \{\sigma' : \sigma \in \Sigma_{i,ilo}^s\}$, que modela a perda de observação do evento $\sigma \in \Sigma_{i,ilo}^s$ em G_i . Defina $\Sigma_i' = \Sigma_i \cup \Sigma_{i,ilo}'$. Então, a função de dilatação $D_{s_i} : \Sigma_i^* \rightarrow 2^{\Sigma_i'}^*$, é definida de forma recursiva como:

$$D_{s_i}(\epsilon) = \{\epsilon\},$$

$$D_{s_i}(\sigma) = \begin{cases} \{\sigma\}, & \text{se } \sigma \in \Sigma_i \setminus \Sigma_{i,ilo}^s \\ \{\sigma, \sigma'\}, & \text{se } \sigma \in \Sigma_{i,ilo}^s \end{cases}$$

$$D_{s_i}(s_i \sigma) = D_{s_i}(s_i) D_{s_i}(\sigma), \forall s_i \in \Sigma_i^*, \forall \sigma \in \Sigma_i.$$

A operação de dilatação pode ser estendida para linguagens da seguinte forma $D_{s_i}(L) = \bigcup_{s \in L} D_{s_i}(s)$.

Uma vez definida a função de dilatação D_{s_i} , o próximo passo é a obtenção de um autômato cuja linguagem gerada seja igual a $D_{s_i}(L_i)$, em que L_i denota a linguagem gerada por G_i , ou seja, um autômato que representa ao mesmo tempo a mudança de ordem na observação dos eventos devido aos atrasos de comunicação e a perda intermitente da observação dos eventos pertencentes a $\Sigma_{i,ilo}$. Esse autômato é denotado por:

$$G_i' = (X_i, \Sigma_i', f_i', \Gamma_i', x_{0_i}, \emptyset),$$

em que $\Gamma_i'(x_i) = D_{s_i}[\Gamma_i(x_i)]$, para todo $x_i \in X_i$, e $f_i'(x_i, \sigma) = f_i'(x_i, \sigma') = f_i(x_i, \sigma)$, se $\sigma \in \Sigma_{i,ilo}^s$, e

$f'_i(x_i, \sigma) = f_i(x_i, \sigma)$, se $\sigma \in \Sigma_i \setminus \Sigma_{i,ilo}^s$. Note que, se $\Sigma_{i,ilo} = \emptyset$, $G'_i = G_i$.

O exemplo a seguir ilustra a construção de G'_i .

Exemplo 2 Considere a mesma planta do Exemplo 1, porém, suponha agora que o evento 'a' esteja sujeito a perdas intermitentes de observação pelo diagnosticador local DL_1 . Assim, $\Sigma_{1,ilo} = \{a\}$ e $\Sigma_{1,nilo} = \{b, c, d\}$. O autômato $G_{1,dil}$ que gera a linguagem $D_{s_1}(L_1)$ é obtido criando-se transições em G_1 rotuladas pelo evento a'_{s_1} , paralelas a todas as transições rotuladas pelo evento $a_{s_1} \in \Sigma_{1,ilo}^s$. O autômato G'_1 é mostrado na Figura 5.

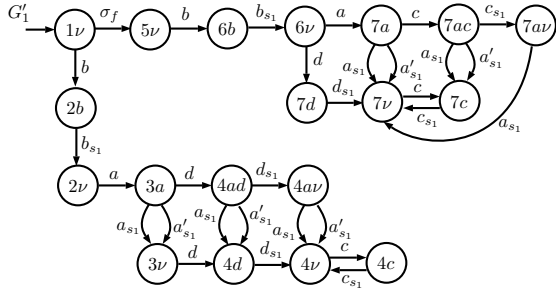


Figura 5: Autômato G'_1 .

3.3 Codiagnosticabilidade em rede de SEDs sujeita a atrasos e perdas de observação de eventos

Seja $P^i : \Sigma_i^* \rightarrow \Sigma^*$ uma função de projeção, e defina a função $\chi_i : \Sigma^* \rightarrow 2^{\Sigma_i^*}$, em que $\chi_i(s) = P^{i-1}(s) \cap L_{A_i}$, sendo L_{A_i} a linguagem gerada por A_i (Nunes et al., 2016). Note que $L_i = \bigcup_{s \in L} \chi_i(s)$, isto é, a função χ_i aplicada a uma sequência s da linguagem gerada pela planta G , gera todas as observações possíveis de s devido aos atrasos de comunicação. Para levar em consideração também as possíveis perdas intermitentes de observação na verificação da codiagnosticabilidade de sistemas com comunicação em rede, é necessário dilatar as sequências de L_i , usando a função de dilatação D_{s_i} , levando à seguinte definição de codiagnosticabilidade em rede de SEDs.

Definição 3 Sejam L e L_N as linguagens prefixo-fechadas geradas por G e G_N , respectivamente. Então L será codiagnosticável em rede com relação a D_{s_i} , χ_i , a projeção $P'_{s_i} : \Sigma_i^* \rightarrow \Sigma_{o_i}^s$, para $i = 1, 2, \dots, n$ e Σ_f se

$$(\exists z \in \mathbb{N})(\forall st \in L \setminus L_N, \|t\| \geq z) \Rightarrow (\exists i \in \{1, 2, \dots, n\}) \\ (P'_{s_i}[D_{s_i}(\chi_i(st))] \cap P'_{s_i}[D_{s_i}(\chi_i(\omega_i))] = \emptyset, \forall \omega_i \in L_N).$$

De acordo com a definição 3, a linguagem L não é codiagnosticável em rede se existe uma sequência de falha st de comprimento arbitrariamente longo após a falha, e existem sequências normais ω_i tais que a troca de ordem da observação de eventos e/ou a perda de observação de eventos cause observações ambíguas em todos os diagnosticadores locais.

4 Algoritmo de verificação

O algoritmo a seguir apresenta um método para a verificação da codiagnosticabilidade em rede de SEDs.

Algoritmo 1 Verificação da codiagnosticabilidade em rede de SEDs.

Entrada: $G'_i = (X_i, \Sigma_i, f'_i, \Gamma'_i, x_{0,i}, \emptyset)$, para $i = 1, \dots, n$.
Saída: $G_V = (X_V, \Sigma_V, f_V, \Gamma_V, x_{0,V}, X_{V_m})$.

- 1: Obtenha o autômato $G'_{i,N} = (X'_{i,N}, \Sigma'_{i,N}, f'_{i,N}, \Gamma'_{i,N}, (x_{0,i}, N), \emptyset)$, em que $\Sigma'_{i,N} = \Sigma'_i \setminus \Sigma_f$, que modela o comportamento normal do autômato G'_i como apresentado em Moreira et al. (2011).
- 2: Obtenha o autômato $G'_{i,F} = (X'_{i,F}, \Sigma'_i, f'_{i,F}, \Gamma'_{i,F}, (x_{0,i}, N), \emptyset)$, que modela o comportamento de falha de G'_i como apresentado em Moreira et al. (2011).
- 3: Defina os seguintes conjuntos:

$$\bar{\Sigma}'_{i,p} = \{\sigma_{p_i} : \sigma \in (\Sigma \cup \Sigma'_{i,ilo}) \setminus \Sigma_f\},$$

e $\Sigma'_{i,p} = \Sigma_{o_i}^s \cup \bar{\Sigma}'_{i,p}$. Construa o autômato $G'_{i,p} = (X'_{i,N}, \Sigma'_{i,p}, f'_{i,p}, \Gamma'_{i,p}, (x_{0,i}, N), \emptyset)$ em que $f'_{i,p}(x_{i,N}, \sigma_{p_i}) = f'_{i,N}(x_{i,N}, \sigma)$ para todo $\sigma \in \Sigma'_{i,N}$ e $x_{i,N} \in X'_{i,N}$.

- 4: Obtenha o autômato $\bar{V}_i = G'_{i,p} \parallel G'_{i,F} = (Y_{V_i}, \Sigma_{V_i}, f_{V_i}, \gamma_{V_i,0}, \emptyset)$, para $i = 1, \dots, n$, em que $\Sigma_{V_i} = \Sigma'_{i,p} \cup \Sigma'_i$. Note que os eventos renomeados do verificador $\bar{V}_p$ são diferentes dos eventos renomeados do verificador $\bar{V}_q$, em que $p \neq q$.
- 5: Encontre todos os caminhos cíclicos $cl_i = (x_{V_i}^k, \sigma_k, x_{V_i}^{k+1}, \sigma_{k+1}, \dots, \sigma_\ell, x_{V_i}^k)$, em que $\ell \geq k > 0$ em $\bar{V}_i$ que satisfaça a seguinte condição:

$\exists j \in \{k, k+1, \dots, \ell\}$ tal que, para algum

$$y_{V_i}^j = (x_i^j, N, y_i^j, F) \wedge (\sigma_j \in \Sigma'_i) \quad (2)$$

em que $x_i^j, y_i^j \in X_i$.

- 6: Obtenha o autômato $V_i = (Y_{V_i}, \Sigma_{V_i}, f_{V_i}, \gamma_{V_i,0}, Y_{V_i,m})$ em que $Y_{V_i,m}$ é formado pelos estados do verificador $\bar{V}_i$ que pertencem às componentes fortemente conexas que contenham caminhos cíclicos cl_i que violam a condição (2).
- 7: Obtenha o autômato verificador $G_V = V_1 \parallel \dots \parallel V_n = (X_V, \Sigma_V, f_V, \gamma_{V,0}, X_{V_m})$, em que $\Sigma_V = \bigcup_{i=1}^n \Sigma_{V_i}$.
- 8: Verifique a existência de caminhos cíclicos $cl = (x_V^k, \sigma_k, x_V^{k+1}, \sigma_{k+1}, \dots, \sigma_\ell, x_V^k)$ em G_V , $\ell \geq k > 0$, que satisfaça a seguinte condição:

$$x_V^q \in X_{V_m}, \forall q \in \{k, k+1, \dots, \ell\},$$

e para algum $q \in \{k, k+1, \dots, \ell\}, \sigma_q \in \Sigma$.

Se a resposta for sim, então L é não codiagnosticável em rede com relação a D_{s_i} , χ_i , P'_{s_i} , para $i = 1, \dots, n$, e Σ_f . Caso contrário, L é codiagnosticável em rede.

Teorema 2 A linguagem L é codiagnosticável em rede com relação a χ_i , P'_{s_i} , para $i = 1, \dots, n$, e Σ_f se, e somente se, não existe um caminho cíclico $cl = (x_V^k, \sigma_k, x_V^{k+1}, \sigma_{k+1}, \dots, x_V^\ell, \sigma_\ell, x_V^k)$, $\ell \geq k > 0$ em G_V satisfazendo à seguinte condição:

$$x_V^q \in X_{V_m}, \forall q \in \{k, k+1, \dots, \ell\}, \text{ e para algum } q \in \{k, k+1, \dots, \ell\}, \sigma_q \in \Sigma. \quad (3)$$

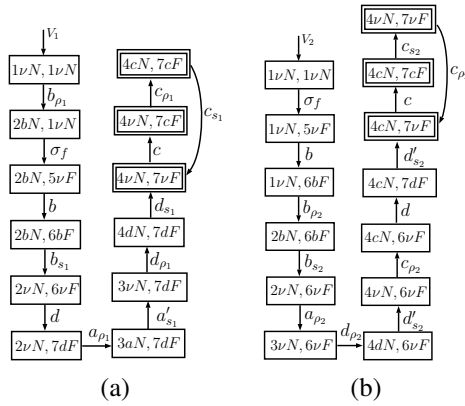


Figura 6: (a) Caminho de V_1 com um caminho cíclico $cl_{1,dil}$ embutido, (b) caminho de V_2 com um caminho cíclico $cl_{2,dil}$ embutido.

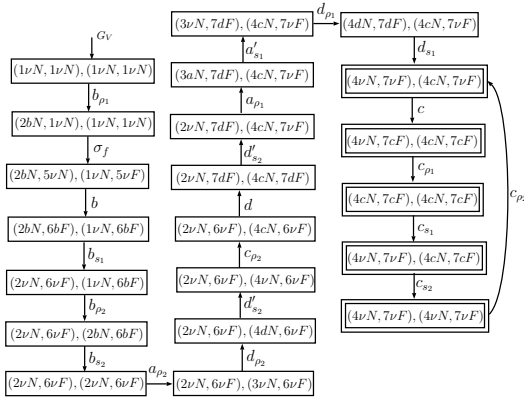


Figura 7: Caminho de $G_{V,dil}$ com um caminho cíclico cl_{dil} embutido que viola a codiagnosticabilidade sujeito a atrasos e perdas de eventos de L .

Prova: A prova será omitida devido à falta de espaço.

Exemplo 3 Para verificar a codiagnosticabilidade em rede do sistema apresentado no exemplo 2, segue-se os passos do algoritmo 1. Assim, os aut matos V_1 e V_2 são obtidos. Devido ao tamanho dos aut matos V_1 e V_2 , na Figura 6 são mostrados, somente, os caminhos que cont m os caminhos cíclicos cl_1 e cl_2 que satisfazem a condição (2). Após a obtenção de V_1 e V_2 ,   possível obter o autômato $G_V = V_1 || V_2$. Na Figura 7 é mostrado somente o caminho de G_V que cont m um caminho cíclico cl associado aos caminhos cíclicos cl_1 e cl_2 . Note que cl é formado por estados marcados e cont m um evento $c \in \Sigma$. Assim, a linguagem L   não-codiagnosticável em rede com relação a D_{S_i} , χ_i , $P'_{S_i} : \Sigma_i^* \rightarrow \Sigma_{O_i}^*$, para $i = 1, 2$, e Σ_f .

5 Conclusão

Neste trabalho, o problema proposto em Nunes et al. (2015) e Nunes et al. (2016)   estendido para tratar, além do atraso de eventos, a perda intermitente de observação de eventos. A definição de codiagnosticabilidade de SEDs com comunicação em rede, sujeita a atrasos e perdas intermitentes na observação de eventos, é introduzida. Uma condição necessária e suficiente para a codiagnosticabilidade em rede   também apresentada.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio do CNPq, Faperj e Petrobras

Referências

- Carvalho, L. K., Basilio, J. C. and Moreira, M. V. (2012). Robust diagnosis of discrete event systems against intermittent loss of observations, *Automatica* **48**(9): 2068–2078.
- Carvalho, L. K., Moreira, M. V., Basilio, J. C. and Lafortune, S. (2013). Robust diagnosis of discrete-event systems against permanent loss of observations, *Automatica* **49**(1): 223–231.
- Cassandras, C. G. and Lafortune, S. (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*, 2nd edn, Springer, New York.
- Debouk, R., Lafortune, S. and Teneketzis, D. (2000). Coordinated decentralized protocols for failure diagnosis of discrete event systems, *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications* **10**(1-2): 33–86.
- Debouk, R., Lafortune, S. and Teneketzis, D. (2003). On the effect of communication delays in failure diagnosis of decentralized discrete event systems, *Discrete Event Dynamic Systems* **13**(3): 263–289.
- Huo, Z., Fang, H. and Ma, C. (2004). Networked control system: State of the art, *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Hangzhou, P.R. China, pp. 1319–1322.
- Moreira, M. V., Jesus, T. C. and Basilio, J. C. (2011). Polynomial time verification of decentralized diagnosability of discrete event systems, *IEEE Trans. on Automatic Control* **56**(7): 1679–1684.
- Nunes, C., Moreira, M. V., Alves, M. V. S. and Basilio, J. C. (2016). Network codiagnosability of discrete-event systems subject to event communication delay, *13th International Workshop on Discrete Event Systems (WODES)*.
- Nunes, C., Moreira, M. V. and Basilio, J. C. (2015). Codiagnosticabilidade robusta a atrasos na da ocorrência de eventos em sistemas a eventos discretos, *XII Brasileiro de Intelig ncia(SBAI)*, pp. 1466–1471.
- Park, S.-J. and Cho, K.-H. (2007). Supervisory control of discrete event systems with communication delays and partial observations, *Systems & Control letters* **56**(2): 106–112.
- Qiu, W. and Kumar, R. (2006). Decentralized failure diagnosis of discrete event systems, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A* **36**(2): 384–395.
- Qiu, W. and Kumar, R. (2008). Distributed diagnosis under bounded delay communication of immediately forwarded local observations, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A* **38**(3): 628–642.
- Ramadge, P. J. and Wonham, W. M. (1989). The control of discrete-event systems, *Proc. of the IEEE* **77**(1): 81–98.
- Tripakis, S. (2004). Decentralized control of discrete-event systems with bounded or unbounded delay communication, *Automatic Control, IEEE Transactions on* **49**(9): 1489–1501.