

Diagnose de falhas em tempo real de sistemas a eventos discretos modelados por redes de Petri rotuladas utilizando redes de Petri rotuladas com prioridades^{*}

Braian Igreja de Freitas^{*} João Carlos Basilio^{*}

^{*} COPPE Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ (e-mail: bfreitas@poli.ufrj.br).

Abstract: The problem of fault diagnosis of discrete event systems concerns the capacity to detect and isolate the occurrence of fault events. In this work, we propose a labeled priority diagnoser Petri net that is obtained from the Petri net of the system to be diagnosed. The diagnoser Petri net transitions are labeled only by observable events and its reachable states have enough information to allow the diagnoser to be sure about the fault occurrence. As in previous works, we assume that the Petri net of the system to be diagnosed does not possess cycles involving places and unobservable transitions. In addition, for a class of Petri nets, the diagnoser will have a structure that does not grow indefinitely due to event observations, making the diagnoser proposed here able to execute the online diagnosis of a class of Petri nets that previous works were only able to diagnose with structures that are likely to grow indefinitely for specific sequences of event observations.

Resumo: O problema da diagnose de falha em sistemas a eventos discretos está associado com a capacidade de se detectar e isolar a ocorrência de eventos de falha. Neste artigo, será proposto um algoritmo para construir uma rede de Petri diagnosticadora rotulada com prioridades a partir da rede de Petri do sistema a ser diagnosticado, cujas transições são rotuladas apenas por eventos observáveis e cujos estados alcançáveis possuem informações necessárias para que o diagnosticador possa ter certeza da ocorrência de falha. Assim como em trabalhos anteriores, supõe-se que a rede de Petri do sistema a ser diagnosticado não possui ciclos envolvendo lugares e transições não observáveis. Além disso, para uma classe de redes de Petri, o diagnosticador proposto terá uma estrutura que não crescerá indefinidamente em decorrência das observações de eventos, fazendo com que o diagnosticador aqui proposto seja capaz de executar o diagnóstico *online* de classes de redes de Petri que trabalhos anteriores somente são capazes de diagnosticar com estruturas passíveis de crescimento indefinido para determinadas sequências de observações de eventos.

Keywords: Discrete Event System; Petri Net; Fault Diagnosis; Labeled Priority Petri Net; State Estimation.

Palavras-chaves: Sistemas a Eventos Discretos; Redes de Petri; Diagnose de Falha; Redes de Petri com Prioridades; Estimação de Estado.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas a eventos discretos (SEDs) são uma classe especial de sistemas cujos espaços de estados são discretos e sua evolução se dá pela ocorrência assíncrona de eventos (Cassandras and Lafortune, 2008). Esse tipo de sistema pode ser usado para modelar diversas aplicações práticas, tais como sistemas de manufatura, sistemas operacionais, sistemas robóticos e de logística.

Entre os formalismos utilizados para modelar SEDs, autómatos e redes de Petri são os mais comumente utilizados

^{*} Este trabalho foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e pelo CNPq, projeto de pesquisa número 309652/2017-0

(Cassandras and Lafortune, 2008; David and Alla, 2010). Embora a estrutura dos autómatos facilite a análise do comportamento do SED que ele modela, autómatos não podem ser usados para descrever o comportamento de SEDs com espaço de estados infinitos. Em contrapartida, embora a análise de SEDs modelados por redes de Petri seja mais difícil, elas possuem a capacidade de modelar SEDs com um número infinito de estados.

A noção de diagnose de falhas de SEDs foi introduzida por Lin (1994) e Sampath et al. (1995); o primeiro baseado em estados e o segundo em eventos. A abordagem baseada em eventos consistem em diagnosticar a ocorrência de um evento de falha (e.g. uma válvula emperra fechada ou aberta) por meio da observação da ocorrência de eventos observáveis, i.e., eventos cujas ocorrências podem ser registradas por sensores. Essa noção se mostrou eficiente na

deteção da ocorrência de eventos não-observáveis sem a necessidade de se introduzir sensores para detectar diretamente a sua ocorrência, reduzindo, dessa forma, os custos de implementação de sensores capazes de diagnosticar os eventos de falha.

Dois problemas são de interesse no que se refere a diagnose de falhas: diagnosticabilidade e diagnose em tempo real. A diagnosticabilidade é uma propriedade do sistema e está associada à capacidade de se inferir se as falhas existentes no sistema podem ser diagnosticadas. A diagnose em tempo real está relacionada à construção de um sistema de diagnose *online* capaz de determinar a ocorrência de falhas concomitantemente com a operação da planta cuja falha se deseja diagnosticar. Nesse contexto, diversos trabalhos que abordam tanto o problema de diagnose *online* quanto a diagnosticabilidade podem ser encontrados na literatura: Debouk et al. (2000); Contant et al. (2006); Qiu and Kumar (2006); Moreira et al. (2011); Carvalho et al. (2013); Cabral et al. (2014); Nunes et al. (2018); Santoro et al. (2017), que utilizam autômatos, e Genc and Lafortune (2003); Lefebvre and Delherm (2007); Ramírez-Treviño et al. (2007); Dotoli et al. (2009); Basile et al. (2009); Cabasino et al. (2011); Liu et al. (2017); Al-Ajeli and Bordbar (2016); Paiva et al. (2021), que usam redes de Petri como formalismo.

Este artigo considera o problema da diagnose em tempo real de SEDs modelados por redes de Petri e propõe uma abordagem mais geral que aquelas propostas por Genc and Lafortune (2003); Lefebvre and Delherm (2007); Ramírez-Treviño et al. (2007); Dotoli et al. (2009); Basile et al. (2009); Cabasino et al. (2011); Liu et al. (2017); Al-Ajeli and Bordbar (2016); Paiva et al. (2021) uma vez que amplia a classe de redes de Petri rotuladas cujos eventos de falha podem ser diagnosticados. Nesse sentido será proposta neste artigo a criação de uma rede de Petri rotulada com prioridade sem transições não-observáveis (livre de λ) capaz de replicar o comportamento da rede de Petri original do sistema. Essa rede de Petri será referida ao longo do artigo como *Rede de Petri Diagnosticadora*, e tem como principal característica o fato dos seus estados que podem ser alcançados a partir da observação de seqüências de transições observáveis da rede de Petri original conterem informação suficiente para permitir que o diagnosticador esteja certo da ocorrência de falhas no sistema. Como em artigos anteriores (Basile et al., 2009; Dotoli et al., 2009; Cabasino et al., 2011; Liu et al., 2017), será exigido que a rede de Petri da planta não tenha ciclos de transições não-observáveis.

Deve ser ressaltado que o diagnosticador aqui proposto não possui as limitações de Dotoli et al. (2009) e Basile et al. (2009), que exigem que cada evento observável rotule apenas uma única transição da rede de Petri da planta, e não possui as limitações das abordagens proposta em Genc and Lafortune (2003) e Cabasino et al. (2011): a primeira abordagem tem a limitação do número de estados do diagnosticador consistente com a observação de uma seqüência de observações poder ser infinito ou crescer em função do comprimento da seqüência observada, o que levaria, no primeiro caso, o diagnosticador a tentar armazenar um número infinito de estados, e no segundo, fazer o diagnosticador calcular um número indeterminado de estados em função do crescimento da seqüência observada,

tornando a diagnose *online* lenta, em ambos os casos; na segunda abordagem, o diagnosticador precisa armazenar as chamadas *marcações básicas e justificativas* consistentes com as observações de eventos, que também podem crescer indefinidamente quando as seqüências observadas crescem, aumentando, então, o tempo de computação. Portanto, a abordagem aqui proposta amplia a classe de redes de Petri rotuladas que podem ser diagnosticadas utilizando redes de Petri limitadas.

Este artigo está estruturado da seguinte forma. Na Seção 2, serão apresentados os fundamentos teóricos utilizados neste trabalho. Em seguida, na Seção 3, será apresentado o conceito de marcações mínimas, fundamental para a construção da rede de Petri diagnosticadora. A Seção 4 apresenta a construção da rede de Petri diagnosticadora e como ela pode ser usada para o diagnóstico de falhas. Após isso, a Seção 5 apresenta uma função capaz de modificar a rede de Petri diagnosticadora para que o diagnosticador possa fazer uma estimação de estados para auxiliar no diagnóstico de falhas. Finalmente, a Seção 6 apresenta uma conclusão do trabalho e possíveis trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uma rede de Petri com marcação é um grafo bipartido ponderado definido pela quintupla $\mathcal{N} = (P, T, Pre, Post, \vec{m}_0)$ (David and Alla, 2010), em que $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ (resp. $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$) é o conjunto finito de m lugares (n transições), Pre (resp. $Post$) é uma matriz $m \times n$ cujo elemento $Pre(i, j)$ (resp. $Post(i, j)$) representa o peso do arco que liga o lugar p_i com a transição t_j (resp. transição t_j com o lugar p_i). O conjunto de entradas de uma transição t_j (resp. um lugar p_i) é denominado lugares (resp. transições) de entrada e é denotado por $I(t_j)$ (resp. $I(p_i)$). Analogamente, definem-se os lugares e transições de saída, que são denotados por $O(t_j)$ e $O(p_i)$, respectivamente. Os lugares da rede são representados por círculos, enquanto as transições são representadas por barras.

O estado atual de uma rede de Petri é representado por um vetor de marcações $\vec{m} = [m(p_1), m(p_2), \dots, m(p_m)]^T$, em que cada elemento $m(p_i)$ associa um lugar $p_i \in P$ com um número de fichas e cada possível valor de \vec{m} representa um diferente estado do SED que a rede de Petri modela, em que cada ficha de um lugar é representada graficamente por um ponto. O vetor \vec{m}_0 representa o vetor de marcação inicial que modela o estado inicial do SED.

Uma transição $t_j \in T$ está habilitada em relação a um vetor de marcação \vec{m} quando os números de fichas dos seus lugares de entrada são maiores ou iguais aos pesos dos arcos que ligam esses lugares a t_j . Quando uma transição t_j está habilitada, ela pode disparar, alterando o número de fichas $m(p_i)$ de cada lugar $p_i \in P$ da rede de Petri para $m'(p_i) = m(p_i) - Pre(p_i, t_j) - Post(p_i, t_j)$.

As transições podem ser agrupadas em seqüências de transições $r \in T^*$, em que T^* contém todas as possíveis seqüências de transições que podem ser obtidas a partir de T , incluindo a seqüência vazia de transições λ . Uma seqüência de transições $r \in T^*$ está habilitada em relação a um vetor de marcação \vec{m} se todas as suas transições podem disparar seqüencialmente na rede de Petri a partir de \vec{m} . O conjunto de todas as seqüências de transições

habilitadas por \vec{m}_0 é denotado por $LT(\mathcal{N})$. A partir de $LT(\mathcal{N})$, é possível definir que uma rede de Petri \mathcal{N} é livre de *deadlocks* se, para toda marcação \vec{m} alcançada após o disparo de uma sequência $r \in LT(\mathcal{N})$, \vec{m} habilita pelo menos uma transição de T . Ao longo do artigo, utilizamos a notação $r_1 \triangleleft r_2$ para indicar que a sequência de transições $r_1 \in T^*$ pode ser obtida removendo algumas transições da sequência r_2 . É importante observar que r_1 não é necessariamente uma subsequência de r_2 .

Para adicionar o conceito de eventos e linguagens às redes de Petri, estende-se sua definição para as redes de Petri rotuladas, definidas pela séptupla $\mathcal{N} = (P, T, Pre, Post, \vec{m}_0, \Sigma, \ell)$ (Cassandras and Lafortune, 2008), em que Σ é o conjunto de eventos da rede de Petri e ℓ é a função de rotulagem de transição que associa a cada transição $t \in T$ um evento $\sigma \in \Sigma$ de tal forma que quando σ ocorre, uma transição habilitada $t \in T$, tal que $\ell(t) = \sigma$, dispara, modelando, assim, a ocorrência de σ . É importante ressaltar que, neste artigo, será suposto que a ocorrência de um evento causa o disparo de apenas uma transição da rede, mesmo que múltiplas transições rotuladas pelo evento estejam habilitadas. A função ℓ pode ser estendida para sequências de transições $r \in T^*$ (resp. conjunto de sequências de transições $T' \subseteq T^*$), resultando em uma sequência de eventos $\ell(r) = s \in \Sigma^*$ (resp. conjunto de sequência de eventos $\ell(T') = \Sigma' \subseteq \Sigma^*$), em que Σ^* é o fecho de Kleen, que contém todas as possíveis sequências de eventos, incluindo a sequência vazia de eventos ϵ . A linguagem de uma rede de Petri definida pelo conjunto de sequências de eventos é dada por $L(\mathcal{N}) = \ell(LT(\mathcal{N}))$.

Dados dois conjuntos de eventos Σ_a e Σ_b , em que $\Sigma_b \subseteq \Sigma_a$, a projeção natural $P : \Sigma_a^* \rightarrow \Sigma_b^*$ é definida como: (i) $P(\epsilon) = \epsilon$, (ii) $P(\sigma)$ é igual a σ , se $\sigma \in \Sigma_b$, ou ϵ , se $\sigma \in \Sigma_a \setminus \Sigma_b$, (iii) $P(s\sigma) = P(s)P(\sigma)$, para $s \in \Sigma_a^*$ e $\sigma \in \Sigma_a$. A projeção inversa é definida como $P^{-1}(s) = \{w \in \Sigma_a^* : P(w) = s\}$. Tanto a projeção quanto a projeção inversa pode ser estendida para linguagens. Adicionalmente, uma projeção semelhante pode ser realizada em relação a sequências de transições e conjuntos de sequências de transições, na qual para dois conjuntos de transições T_a e T_b , em que $T_b \subseteq T_a$, a função $PT : T_a^* \rightarrow T_b^*$ projeta as transições do conjunto T_a^* para o conjunto T_b^* .

Neste artigo, o conjunto de eventos Σ será particionado em $\Sigma = \Sigma_o \cup \Sigma_{uo}$, em que Σ_o e Σ_{uo} são os conjuntos de eventos observáveis e não observáveis, respectivamente. Uma partição semelhante pode ser feita para o conjunto de transições T particionado-o em um conjunto de transições observáveis T_o e de transições não observáveis T_{uo} que são rotuladas por eventos de Σ_o e Σ_{uo} , respectivamente. As transições observáveis e não observáveis são graficamente representadas por barras largas e barras finas, respectivamente. Uma rede de Petri que não contém nenhuma transição não observável é chamada de rede de Petri livre de λ .

Como neste artigo será suposto que a ocorrência de um evento causa apenas o disparo de uma única transição rotulada pelo evento que ocorreu, então se todas as transições de um conjunto de transições $T_C = \{t_1, t_2, \dots, t_k\} \subseteq T$ rotuladas pelo mesmo evento $\sigma_C \in \Sigma$ estiverem habilitadas pelo vetor de marcação \vec{m} durante a ocorrência de σ_C , não seria possível concluir qual das transições de T_C deveria

disparar para modelar a ocorrência de σ_C . A esse problema dá-se o nome chamado de conflito de eventos e denotado por $\langle \sigma_C, T_C, \vec{m} \rangle$.

Uma alternativa para resolver o problema de conflito de eventos é a adição de relações de prioridades entre as transições da rede de Petri rotulada. Portanto, este artigo também utiliza as redes de Petri rotuladas com prioridades, que é definida pela ócupla $\mathcal{N} = (P, T, Pre, Post, \vec{m}_0, \Sigma, \ell, \rho)$ (Best and Koutny, 1992), em que $\rho \subseteq T \times T$ é um conjunto de relações de prioridades em que cada elemento é uma dupla de transições $(t_1, t_2) \in T \times T$ que indica que a transição t_2 tem mais prioridade para disparar do que t_1 . Logo, se as transições t_1 e t_2 são rotuladas pelo mesmo evento σ e estão habilitadas quando σ ocorre, somente a transição t_2 poderá disparar para modelar a ocorrência de σ , resolvendo o conflito de eventos entre t_1 e t_2 .

Seja $\Sigma_f \subseteq \Sigma_{uo}$ (resp. $T_f \subseteq T_{uo}$) o conjunto de eventos (resp. transições) de falha associados com a linguagem $L(\mathcal{N})$ e suponha, sem perda de generalidade, que Σ_f só contém um evento, *i.e.*, $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$ (Santoro et al., 2017). O problema de diagnose de falhas de SEDs consiste na capacidade de ser sempre capaz de concluir sobre a ocorrência do evento σ_f após a observação da ocorrência de um número finito de eventos observáveis de Σ_o . Em outras palavras, dado o conjunto $\Psi(\Sigma_f) = \{s \in L(\mathcal{N}) : (\exists u \in (\Sigma \setminus \Sigma_f)^*) [s = u\sigma_f]\}$ de todas as sequências de eventos de $L(\mathcal{N})$ que terminam com σ_f , as ocorrências de falha em $L(\mathcal{N})$ sempre poderão ser diagnosticadas se, para cada sequência de transições $r \in LT(\mathcal{N})$ que pode disparar em \mathcal{N} tal que $\ell(r) \in \Psi(\Sigma_f)$, existir um número positivo $n_r \in \mathbb{N}$ tal que para toda sequência de transições $u \in T^*$ que pode disparar em \mathcal{N} que possui mais de n_r transições, a observação da sequência de eventos que rotula ru só pode ser igual às observações de sequências de eventos $w \in L(\mathcal{N})$ na rede de Petri que também possuem o evento de falha. Formalmente, a definição de diagnosticabilidade de um SED modelado por uma rede de Petri rotulada é dada a seguir (Cabasino et al., 2012).

Definição 1. Uma linguagem $L(\mathcal{N})$ gerada por uma rede de Petri rotulada $\mathcal{N} = (P, T, Pre, Post, \vec{m}_0, \Sigma, \ell)$ livre de *deadlocks* é diagnosticável em relação a $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$ e a projeção $P_o : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$ se a seguinte condição for verdadeira:

$$(\forall r \in LT(\mathcal{N})) (\exists n_r \in \mathbb{N}) (\forall u \in T^*)$$

$$(((\ell(r) \in \Psi(\Sigma_f)) \wedge (ru \in LT(\mathcal{N})) \wedge (|u| \geq n_r)) \Rightarrow D),$$

em que a condição de diagnosticabilidade D é dada por:

$$D : ((\forall \omega \in P_o^{-1}(\ell(ru)) \cap L(\mathcal{N})) (\sigma_f \in \omega)).$$

Note que, para que a linguagem de uma rede de Petri não seja diagnosticável, basta ter uma sequência $r \in LT(\mathcal{N})$ que termine com uma transição rotulada por σ_f tal que toda sequência $ru \in LT(\mathcal{N})$ que possa ocorrer seja tal que a sua observação, *i.e.*, $P_o(\ell(ru))$, possa ser confundida com a observação de uma outra sequência de eventos $\omega \in L(\mathcal{N})$ que não possui o evento de falha.

3. MARCAÇÕES MÍNIMAS

Esta seção apresenta os conceitos de marcações mínimas que serão usadas para a construção da rede de Petri diagnosticadora proposta neste artigo.

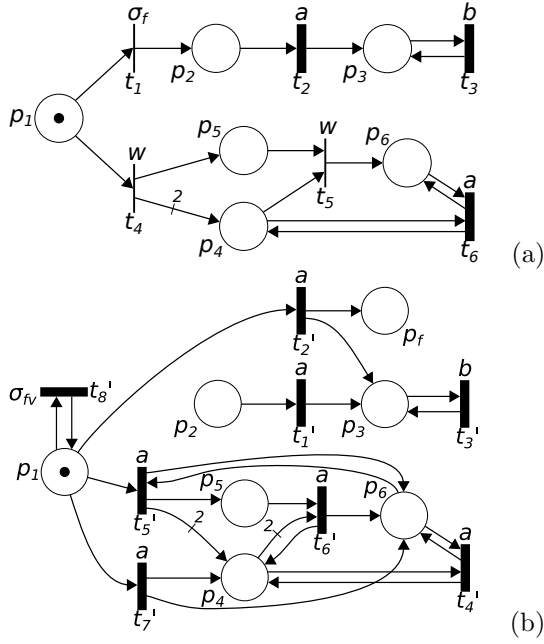


Figura 1. Rede de Petri rotulada para os Exemplos 1, 2, 3 e 4 (a) e a sua rede de Petri diagnosticadora (b).

Definição 2. Seja $\mathcal{N} = (P, T, Pre, Post, \vec{m}_0, \Sigma, \ell)$ uma rede de Petri rotulada, em que $T = T_o \cup T_{uo}$, e seja $t \in T$ uma dada transição de \mathcal{N} . Um vetor de marcação \vec{m}_{min} será uma marcação mínima de t se existir uma sequência mínima de transições não observáveis $r_{uo} \in T_{uo}^*$ tal que $\vec{m}_{min}[r_{uo}t]$ e que satisfaz a seguinte expressão:

$$(\forall \vec{m}_b \in \mathbb{Z}_+^{n_P})(\forall r_b \in T_{uo}^*),$$

$$(((\vec{m}_b \leq \vec{m}_{min}) \wedge (r_b \triangleleft r_{uo}) \wedge (\vec{m}_b[r_b t])) \implies D)$$

em que $D : (\vec{m}_b = \vec{m}_{min} \wedge r_b = r_{uo})$.

Em outras palavras, um vetor de marcação \vec{m}_{min} será uma marcação mínima de t se existir uma sequência de transições não observáveis $r_{uo} \in T_{uo}^*$ tal que \vec{m}_{min} habilita $r_{uo}t$ e não existir nenhuma outro par formado por um vetor de marcação e uma sequência de transições não observáveis que possuem menos elementos que \vec{m}_{min} e r_{uo} e que habilitam t . Portanto, \vec{m}_{min} ser uma marcação mínima de t significa que a marcação possui somente as fichas estritamente necessárias para habilitar a transição t após o disparo de uma sequência mínima de transições não observáveis. É importante ressaltar que um vetor de marcação não precisa ser alcançável a partir do vetor de marcação inicial de \mathcal{N} para que ele possa ser considerado uma marcação mínima.

Exemplo 1. Considere a rede de Petri \mathcal{N} da Figura 1(a). Ambos os vetores de marcação $\vec{m}_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ e $\vec{m}_2 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ são marcações mínimas de t_2 associadas com as sequências de transições não observáveis t_1 e λ , respectivamente. Note que o vetor de marcação $\vec{m}_3 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ não pode ser considerado uma marcação mínima de t_2 , uma vez que a única sequência de transições não observáveis mínima cujo disparo a partir de \vec{m}_3 habilita t_2 é λ e o vetor \vec{m}_2 , cujo número de fichas é menor do que o de \vec{m}_3 , é uma marcação mínima associada com λ . \square

Note que se a obtenção de todas as marcações mínimas de uma transição $t \in T$ for possível, essas marcações mínimas enumerarão todos os possíveis grupos de fichas necessárias para disparar t indiretamente após o disparo de transições não observáveis, permitindo assim considerar todas as possibilidades de se disparar a transição t indiretamente após o disparo de transições não observáveis.

O exemplo a seguir ilustra a obtenção de todas as marcações mínimas associadas a uma transição.

Exemplo 2. Considere a rede de Petri \mathcal{N} da Figura 1(a). Suponha que se deseje encontrar todas as marcações mínimas da transição t_6 e suas sequências de transições não observáveis associadas.

A primeira marcação mínima que pode ser encontrada é a marcação mínima trivial $\vec{m}_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T$ associada com a sequência λ , que contém as fichas necessárias para disparar t_6 sem o disparo de outras transições não observáveis.

Como as transições t_4 e t_5 são as únicas cujos disparos adicionam fichas aos lugares de entrada de t_6 , i.e., $I(t_6) = \{p_4, p_5\}$, então todas as marcações mínimas associadas com sequências mínimas diferentes de λ devem terminar com t_4, t_5 , ou uma combinação entre as transições t_4 e t_5 . Para computar essas marcações mínimas, é necessário encontrar todas as sequências mínimas de transições não observáveis que contribuem para o disparo de t_4 e t_5 , para que suas combinações com t_4 e t_5 resultem em todas as sequências mínimas que habilitam t_6 diferentes de λ .

Vamos considerar, inicialmente, a transição t_4 . Note que não existem transições não observáveis que adicionem fichas ao lugar p_1 . Portanto, não existem transições que contribuam para o disparo de t_4 . Assim, a única marcação mínima que é encontrada a partir de t_4 é $\vec{m}_2 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$, que habilita t_6 após o disparo de t_4 .

Considere agora a transição t_5 . Note que o disparo da transição t_4 pode contribuir para o disparo da transição t_5 . Portanto, a partir de t_5 , é possível encontrar duas marcações mínimas $\vec{m}_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 1 \ 0]^T$ e $\vec{m}_4 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ que estão associadas com as sequências t_5 e t_4t_5 , respectivamente.

Finalmente, ao considerarmos a combinação entre as transições t_4 e t_5 , note que o disparo da transição t_4 habilita a transição t_5 . Portanto, para habilitar t_4 e t_5 , só é necessária uma ficha em p_1 para habilitar t_4 . A partir dessa combinação, a função encontra novamente a marcação mínima \vec{m}_4 associada com t_4t_5 . \square

Observação 1. Uma maneira de se obter todas as marcações mínimas associadas a uma transição t e suas sequências de transições não observáveis é utilizando-se a função *FAM* (de Freitas, 2021, Algoritmo 2). É importante ressaltar que a função *FAM* só é capaz de achar as marcações mínimas de redes de Petri que não possuem ciclos formados apenas por lugares e de transições não observáveis. \square

4. REDE DE PETRI DIAGNOSTICADORA

Neste artigo, o problema de diagnóstico *online* de falhas de redes de Petri rotuladas $\mathcal{N} = (P, T, Pre, Post, \vec{m}_0, \Sigma, \ell)$ é resolvido criando redes de Petri $\mathcal{N}^D = (P_D, T_D, Pre_D, Post_D, \vec{m}_{0,D}, \Sigma_D, \ell_D, \rho_D)$, rotuladas com prioridades e li-

vres de λ que serão referidas aqui como redes de Petri diagnosticadoras. As redes de Petri diagnosticadoras possuem propriedades similares às das redes de Petri a serem diagnosticadas, mesmo sem a utilização de transições não observáveis.

Duas hipóteses são feitas em relação à rede de Petri a ser diagnosticada:

H1. A rede de Petri é diagnosticável;

H2. A rede de Petri a ser diagnosticada não possui ciclos que contenham apenas lugares e de transições não observáveis.

A ideia por trás da construção da rede de Petri diagnosticadora é que, como a rede de Petri diagnosticadora e a rede de Petri a ser diagnosticada possuem propriedades similares, a observação de uma sequência de eventos observáveis no sistema que a rede de Petri modela pode ser associada com sequências de transições que podem disparar na rede de Petri diagnosticadora. Além disso, a partir dos vetores de marcação alcançados na rede de Petri diagnosticadora por essas sequências de transições, será possível concluir se a falha ocorreu, pode ter ocorrido, ou não ocorreu.

Note que a operação de diagnóstico acima requer a análise de múltiplos vetores de marcação alcançados na rede de Petri diagnosticadora, o que pode diminuir a velocidade do diagnóstico da falha. Este problema ocorre pois múltiplas transições associadas com o mesmo evento podem estar habilitadas na rede de Petri diagnosticadora, *i.e.*, o problema ocorre por causa dos conflitos de eventos que a rede de Petri diagnosticadora possui. Para resolver este problema, portanto, para cada conflito entre eventos que ocorre após uma observação de um evento no sistema real, o diagnosticador modifica a rede de Petri diagnosticadora de tal forma que ela não possuirá mais o conflito entre eventos e o único estado alcançado na rede de Petri diagnosticadora após a observação do evento representará uma estimativa dos estados da rede de Petri diagnosticadora original, permitindo o diagnóstico da falha através da análise de apenas um vetor de marcação.

A construção e utilização do diagnosticador aqui proposto podem ser divididas nas seguintes etapas:

- (1) Utilizando os conceitos de marcações mínimas, construir a rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} a partir da rede de Petri a ser diagnosticada \mathcal{N} ;
- (2) Uma vez construída a rede de Petri diagnosticadora, o diagnóstico *online* é realizado considerando que a marcação atual de \mathcal{ND} é igual à sua marcação inicial, *i.e.*, $\vec{m}_D = \vec{m}_{0,D}$;
- (3) Quando um evento $\sigma_o \in \Sigma_o$ dispara, se existir um conflito de eventos em \vec{m}_D envolvendo o evento σ_o , \mathcal{ND} é modificada para resolver o conflito. Após isso, a única transição $t' \in T_D$ de \mathcal{ND} rotulada por σ_o e habilitada dispara, mudando a marcação de \vec{m}_D ;
- (4) Analise \vec{m}_D para concluir sobre a ocorrência de falha;
- (5) Retorne para a etapa 3.

A construção da rede de Petri diagnosticadora é apresentada em de Freitas (2021, Algoritmo 3), em que a rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} é criada como uma rede que contém todos os lugares de \mathcal{N} e suas marcações iniciais. \mathcal{ND} também contém um lugar adicional p_f , cuja marcação

Tabela 1. Relações entre as transições observáveis ou de falha, marcações mínimas e sequências associadas de \mathcal{N} e as transições de \mathcal{ND} .

$t \in T_o \cup T_f$	\vec{m}_{min}	$r_{uo} \in T_{uo}^*$	$t' \in T_D$
t_2	$[0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$	λ	t'_1
	$[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$	t_1	t'_2
t_3	$[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0]^T$	λ	t'_3
t_6	$[0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$	λ	t'_4
	$[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]^T$	t_4	t'_5
	$[0\ 0\ 0\ 2\ 1\ 0]^T$	t_5	t'_6
	$[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$	$t_4 t_5$	t'_7
t_1	$[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$	λ	t'_8

é tal que quando p_f contém uma ficha, é possível afirmar que um evento de falha ocorreu; portanto, o conjunto de lugares de \mathcal{ND} é $P_D = P \cup \{p_f\}$.

Para cada transição observável $t_o \in T_o$, o algoritmo cria múltiplas transições $t'_o \in T_D$ em \mathcal{ND} a partir das marcações mínimas \vec{m}_{min} de t_o e suas sequências mínimas associadas $r_{uo} \in T_{uo}^*$ em que $\ell_D(t'_o) = \ell(t_o)$. O disparo de cada transição t'_o causa a mesma mudança de fichas em \mathcal{ND} do que o disparo da sequência $r_{uo} t_o \in T^*$ cause em \mathcal{N} . Além disso, se t_{uo} contém uma transição rotulada pelo evento de falha, o disparo de t'_o também adicionará uma ficha ao lugar p_f para indicar que a falha ocorreu. Por último, a rede de Petri diagnosticadora também possui as transições especiais t_{fv} associadas com o evento especial σ_{fv} , que consomem o mesmo número de fichas que as marcações mínimas das transições associadas com o evento de falha e são tais que, quando habilitadas, indicam que o evento de falha pode vir a ocorrer antes da observação de um evento que permita o diagnóstico da falha. Note que o conjunto de eventos de \mathcal{ND} é $\Sigma_D = \Sigma_o \cup \{\sigma_{fv}\}$.

Exemplo 3. Considere a rede de Petri da Figura 1(a). Para cada uma das transições observáveis t_2 , t_3 e t_6 , o algoritmo encontra as suas marcações mínimas e sequências de transições não observáveis associadas para criar as transições de \mathcal{ND} cujos disparos modelam os disparos de sequências de transições de \mathcal{N} envolvendo sequências de transições não observáveis e transições observáveis. Após isso, a função encontra todas as marcações mínimas da única transição associada com o evento de falha σ_f para criar as transições especiais rotuladas por σ_{fv} .

A rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} resultante após a execução do procedimento acima é mostrada na Figura 1(b). As relações entre transições observáveis ou de falha, marcações mínimas e sequências associadas de \mathcal{N} que geram as transições de \mathcal{ND} são apresentadas na Tabela 1. \square

Como os disparos das transições t'_o da rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} são capazes de modelar todas as possíveis formas de se disparar sequências de transições $r_{uo} t_o$ de \mathcal{N} , em que $r_{uo} \in T_{uo}^*$ é mínimo, $t_o \in T_o$ e $\ell_D(t'_o) = P_o(\ell(r_{uo} t_o))$, então para qualquer sequência de transições $r \in T^*$ que possa disparar em \mathcal{N} , sempre haverá uma sequência de transições $r' \in T_D$ tal que $\ell_D(r') = P_o(\ell(r))$. Portanto, a linguagem de \mathcal{ND} contém todas as sequências de eventos da projeção observável de \mathcal{N} , *i.e.*, $P_o(L(\mathcal{N})) \subseteq L(\mathcal{ND})$. É importante ressaltar que se as transições especiais rotuladas por σ_{fv} de \mathcal{ND} forem desconsideradas, a linguagem de \mathcal{ND} será igual à projeção

observável da linguagem de \mathcal{N} . A partir dessa afirmação, é possível enunciar os seguintes teoremas.

Teorema 1. Seja \mathcal{N} uma rede de Petri e seja \mathcal{ND} a rede de Petri diagnosticadora obtida a partir de \mathcal{N} . Para toda sequência de eventos observáveis $s_o \in P_o(L(\mathcal{N}))$ tal que $(\forall s \in P_o^{-1}(s_o) \cap L(\mathcal{N}), \sigma_f \in s)$, o disparo de qualquer sequência de transições $r_D \in LT(\mathcal{ND})$, tal que $\ell_D(r_D) = s_o$, resulta em um vetor de marcação tal que o lugar $p_f \in P_D$ possui pelo menos uma ficha. ■

Teorema 2. Seja \mathcal{N} uma rede de Petri e seja \mathcal{ND} a rede de Petri diagnosticadora obtida a partir de \mathcal{N} . Para toda sequência de eventos observáveis $s_o \in P_o(L(\mathcal{N}))$ tal que $(\exists s \in P_o^{-1}(s_o) \cap L(\mathcal{N}), \sigma_f \in s)$, existe uma sequência de transições $r_D \in LT(\mathcal{ND})$, tal que $\ell_D(r_D) = s_o$, cujo disparo resulta em um vetor de marcação que habilita uma transição rotulada por σ_{fv} ou é tal que o lugar $p_f \in P_D$ possui pelo menos uma ficha. ■

A partir do Teorema 1, é possível afirmar que a falha ocorreu se, após a observação da sequência de eventos observáveis $s_o \in \Sigma_o^*$, todas as marcações da rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} que podem ser alcançadas pelos disparos de sequências de transições $r \in T_D^*$, tais que $\ell_D(r) = s_o$, possuem fichas no lugar p_f . De acordo com o Teorema 2, é possível inferir que a falha pode ter ocorrido quando a marcação alcançada por pelo menos uma sequência $r \in T_D^*$, tal que $\ell_D(r) = s_o$, possui fichas no lugar p_f ou habilita uma transição rotulada pelo evento σ_{fv} . Finalmente, se nenhuma das condições acima forem verdadeiras, o é possível afirmar que a falha não ocorreu. O exemplo a seguir ilustra os resultados apresentados nos Teoremas 1 e 2.

Exemplo 4. Considere novamente a rede de Petri \mathcal{N} da Figura 1(a) e a sua rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} da Figura 1(b). Antes da observação de qualquer evento no sistema, note que a marcação inicial de \mathcal{ND} habilita a transição $t'_8 \in T_D$ rotulada por σ_{fv} . Portanto, é possível que a falha tenha ocorrido antes de qualquer observação de eventos no sistema, o que é verdade, pois a transição de falha $t_1 \in T$ pode disparar antes da observação de qualquer evento. É importante ressaltar que, como as transições rotuladas por σ_{fv} nunca disparam, elas foram projetadas de tal forma que os seus disparos não mudam a marcação da rede.

Caso o evento a seja observado no sistema, as transições t'_2 e t'_7 de \mathcal{ND} podem disparar. Note que o disparo de t'_2 adiciona fichas ao lugar p_f , enquanto o disparo de t'_7 não adiciona fichas a p_f ; portanto, só é possível afirmar que a falha pode ter ocorrido após a observação de a . Se o evento b for observado depois da observação do evento a , a única sequência de transições que pode ter disparado na rede de Petri diagnosticadora é a sequência $t'_2 t'_3$, que adiciona uma ficha a p_f . Nesse caso, como o vetor de marcação obtido após o disparo de $t'_2 t'_3$ é o único consistente com a observação de eventos ab , é possível afirmar que a falha ocorreu. □

5. DIAGNOSE DE FALHAS USANDO A REDE DE PETRI DIAGNOSTICADORA

Para se realizar a diagnose de falhas usando apenas os Teoremas 1 e 2, é necessária a análise de múltiplos vetores de marcação da rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} , estados

esses que são alcançados por sequências de transições consistentes com a observação de eventos. Tal análise pode se tornar difícil pois o número de marcações que precisam ser analisadas pode crescer indefinidamente à medida que mais eventos são observados. Uma forma de se resolver esse problema é aplicar técnicas de estimação de estados de redes de Petri rotuladas livres de λ para analisar os estados alcançados da rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} .

Apesar de existirem trabalhos que abordam propostas para essas técnicas de estimação de estados tanto para redes e Petri rotuladas quanto para as livres de λ (Giua et al., 2005), essas técnicas não são aplicáveis para a maioria das redes de Petri diagnosticadoras geradas no contexto deste artigo. Portanto, uma nova abordagem será aqui proposta, que modifica \mathcal{ND} com o intuito de resolver os conflitos de eventos de tal forma que cada sequência de eventos observáveis em \mathcal{N} só poderá ser associada a uma única sequência de transições da rede de Petri diagnosticadora resultante, cujo disparo resulta em apenas uma marcação que modela múltiplas marcações da rede de Petri diagnosticadora original. Note que essa única marcação é tal que as propriedades dos Teoremas 1 e 2 continuam válidas para a rede de Petri diagnosticadora resultante.

É importante ressaltar que para cada ocorrência de um evento $\sigma_C \in \Sigma_D$ que causa um conflito de eventos envolvendo um conjunto de transições $T_C \subseteq T_D$, a classe de conflitos de eventos envolvendo estritamente T_C e σ_C é resolvida, possibilitando a resolução de conflitos de eventos da rede de Petri diagnosticadora durante o diagnóstico *online*. Portanto, o método apresentado no Exemplo 4 para o diagnóstico de falhas utilizando a rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} pode ser alterado de tal forma que, quando o evento $\sigma_o \in \Sigma_o$ observado no sistema puder habilitar um conjunto de transições T_C com mais de uma transição, o diagnosticador resolve o conflito envolvendo as transições de T_C . Essa resolução dos conflitos de T_C garante que a rede de Petri diagnosticadora resultante só tenha uma transição $t_C \in T_D$ rotulada por σ_o e habilitada pela marcação atual, em que t_C pode ser disparada na rede de Petri resultante para modelar a ocorrência de σ_o .

Exemplo 5. Considere a rede de Petri \mathcal{N} da Figura 2(a) e a sua rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} da Figura 2(b). Se observarmos a ocorrência do evento a em \mathcal{N} , ambas as transições t'_1 e t'_2 rotuladas por a estão habilitadas em \mathcal{ND} , o que significa que uma delas pode disparar para modelar a ocorrência de a . Para resolver esse problema, é construída, a partir da Figura 2(b), a rede de Petri diagnosticadora \mathcal{ND} da Figura 3(a), resolvendo-se o conflito entre t'_1 e t'_2 através da criação de uma nova transição t'_{10} em \mathcal{ND} que possui mais prioridade para disparar que t'_1 e t'_2 , *i.e.*, $(t'_1, t'_{10}), (t'_2, t'_{10}) \in \rho_D$, e cujo disparo consome o número de fichas necessário para habilitar ambas as transições t'_1 e t'_2 , que, neste caso, é uma ficha no lugar p_1 . O disparo da transição t'_{10} modela que uma das transições t'_1 e t'_2 disparou sem especificar qual delas disparou; portanto, o disparo de t'_{10} deve adicionar uma ficha ao lugar p_2 ou uma ficha ao lugar p_4 de \mathcal{ND} da Figura 2(b). Para modelar que \mathcal{ND} possui uma ficha em p_2 ou uma ficha em p_4 , foi adicionado o lugar p_7 tal que cada ficha de p_7 representa que \mathcal{ND} possui uma ficha em p_2 ou p_4 . Após

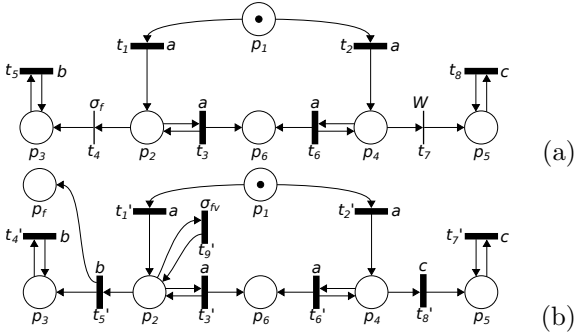


Figura 2. Rede de Petri rotulada considerada nos Exemplo 5 (a) e a sua rede de Petri diagnosticadora (b).

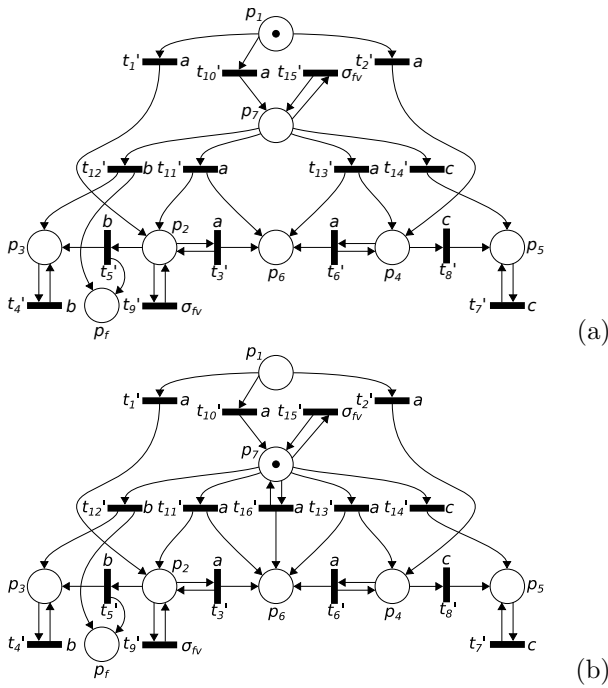


Figura 3. Rede de Petri diagnosticadora da Figura 2(b) após a resolução do conflito de eventos entre as transições t'_1 e t'_2 (a) e, posteriormente, após a solução do conflito entre t'_{11} e t'_{13} (b).

isso, a função faz com que o disparo de t'_{10} adicione uma ficha ao lugar p_7 .

Como cada ficha do lugar p_7 representa que $\mathcal{N}\mathcal{D}$ possui uma ficha em p_2 ou p_4 , então as fichas de p_7 podem contribuir para os disparos das transições t'_3 , t'_5 , t'_6 , t'_8 e t'_9 , que consomem fichas dos lugares p_2 e p_4 . Para modelar o disparo dessas transições consumindo fichas do lugar p_7 , a função cria as transições t'_{11} , t'_{12} , t'_{13} , t'_{14} e t'_{15} como cópias de t'_3 , t'_5 , t'_6 , t'_8 e t'_9 , respectivamente. Note que os disparos das transições criadas adicionam as mesmas fichas que os disparos das transições que as geraram, com exceção da transição t'_{15} , que é rotulada pelo evento especial σ_{fv} e cujo disparo não pode alterar o vetor de marcação da rede.

Após a resolução do conflito entre t'_1 e t'_2 , note que a única transição rotulada pelo evento a que pode disparar na nova rede de Petri $\mathcal{N}\mathcal{D}$ (Figura 3(a)) é a transição t'_{10} , cujo disparo move a ficha de p_1 até p_7 . Note que uma ficha no lugar p_7 habilita a transição t'_{15} rotulada pelo evento especial σ_{fv} ; portanto, é possível afirmar que a falha

pode vir a ocorrer antes da observação de um evento que confirme a sua ocorrência. Nesse sentido, é possível que a sequência de transições $t_1 t_4$ possa ter ocorrido em \mathcal{N} dada a observação do evento a , em que a transição t_4 é associada com o evento de falha.

Se o evento a for observado novamente após a primeira ocorrência do evento a , $\mathcal{N}\mathcal{D}$ terá um novo conflito de eventos envolvendo as transições t'_{11} e t'_{13} . Para resolver esse conflito, a rede de Petri $\mathcal{N}\mathcal{D}$ da Figura 3(a) é modificada para a rede de Petri diagnosticadora da Figura 3(b), na qual a função cria uma transição t'_{16} tal que $(t'_{11}, t'_{16}), (t'_{13}, t'_{16}) \in \rho_D$ e cujo disparo modela que t'_{11} ou t'_{13} disparou, significando que $\mathcal{N}\mathcal{D}$ teria fichas nos lugares p_2 e p_6 ou fichas nos lugares p_4 e p_6 após o disparo de t'_{16} . Note que cada ficha do lugar p_7 já representa que $\mathcal{N}\mathcal{D}$ tem uma ficha em p_2 ou p_4 ; portanto, é possível que as possibilidades de fichas que são geradas após o disparo da transição t'_{16} possam ser reduzidas pelas possibilidades que o lugar p_7 representa, o que permitiria que o disparo da transição t'_{16} adicionasse fichas ao lugar p_7 para indicar que a rede possui uma ficha em p_4 ou p_6 após o disparo de t'_{16} . Como tal redução é possível, faz-se com que o disparo da transição t'_{16} adicione uma ficha no lugar p_7 para indicar que a rede possui uma ficha em p_4 ou p_6 . Após a redução, note que o disparo da transição t'_{16} ainda não modela a adição de uma ficha ao lugar p_6 que o disparo de ambas as transições t'_{11} e t'_{13} causam. Como os disparos de ambas as transições t'_{11} e t'_{13} adicionam fichas ao lugar p_6 , o disparo da transição t'_{16} também adiciona uma ficha ao lugar p_6 .

Após a segunda modificação de $\mathcal{N}\mathcal{D}$, todos os seus conflitos de eventos foram resolvidos. Além disso, a segunda observação do evento a causa o disparo da transição t'_{16} , adicionando uma ficha ao lugar p_6 . Se o evento b ocorrer após a segunda ocorrência do evento a , a única transição que pode disparar em $\mathcal{N}\mathcal{D}$ para justificar a ocorrência de b é a transição t'_{12} , cujo disparo adiciona uma ficha ao lugar p_f , indicando que a falha ocorreu. Note que a diagnose da ocorrência da falha foi correta, pois a única forma de se observar a sequência de eventos aab em \mathcal{N} é disparando a sequência de transições $t_1 t_3 t_4 t_5$, que contém a transição t_4 associada com o evento de falha. É importante ressaltar que, após a resolução dos conflitos de eventos, só foi necessária a análise de um vetor de marcação de $\mathcal{N}\mathcal{D}$ para realizar o diagnóstico de falhas. \square

Note que as reduções das possibilidades feitas a partir dos lugares criados anteriormente são fundamentais, pois elas evitam a criação de mais lugares para representar possibilidades de fichas. Tal redução também garante que todos os conflitos de eventos possam ser resolvidos em uma classe de redes de Petri diagnosticadora, permitindo o diagnóstico *online* de falhas de redes de Petri utilizando estruturas que não crescem indefinidamente conforme eventos são observáveis. É importante ressaltar que essa classe de redes de Petri que podem ser diagnosticadas com estruturas limitadas incluem redes de Petri que outros trabalhos, como Cabasino et al. (2011), só são capazes de diagnosticar com estruturas que crescem indefinidamente conforme eventos são observados.

Observação 2. Um algoritmo para a resolução dos conflitos entre eventos descrito no Exemplo 5 foi proposto em de Freitas (2021, Algoritmo 4). \square

6. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi apresentada uma nova abordagem para o diagnóstico *online* de falhas de SEDs modelados por redes de Petri rotuladas capaz de usar redes de Petri diagnosticadoras rotuladas com prioridades e livres de λ para determinar as ocorrências de eventos de falhas durante as operações de sistemas. Além disso, para uma classe de redes de Petri, o diagnosticador proposto neste artigo consegue realizar o diagnóstico de falhas utilizando uma estrutura limitada que outros trabalhos, como Cabasino et al. (2011), só são capazes utilizando estruturas que crescem indefinidamente conforme eventos são observados.

Em relação a trabalhos futuros, a diagnose *online* de falhas utilizando os conceitos apresentados pode ser otimizada. Em de Freitas (2021), por exemplo, foi mostrado que é possível resolver os conflitos de eventos da rede de Petri diagnosticadora durante a computação *offline* do diagnosticador para uma classe de redes de Petri, otimizando o diagnóstico *online*.

Outro possível trabalho futuro é utilizar os conceitos apresentados para resolver o problema de diagnosticabilidade de SEDs modelados por redes de Petri. Estudos preliminares apresentaram a possibilidade de se utilizar a rede de Petri diagnosticadora para concluir sobre a diagnosticabilidade da rede de Petri que a gerou.

REFERÊNCIAS

- Al-Ajeli, A. and Bordbar, B. (2016). Fourier-motzkin method for failure diagnosis in petri net models of discrete event systems. In *2016 13th International Workshop on Discrete Event Systems (WODES)*, 165–170. IEEE.
- Basile, F., Chiacchio, P., and De Tommasi, G. (2009). An efficient approach for online diagnosis of discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(4), 748–759.
- Best, E. and Koutny, M. (1992). Petri net semantics of priority systems. *Theoretical Computer Science*, 96(1), 175–215.
- Cabasino, M.P., Giua, A., Lafortune, S., and Seatzu, C. (2012). A new approach for diagnosability analysis of petri nets using verifier nets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57(12), 3104–3117.
- Cabasino, M.P., Giua, A., Poggi, M., and Seatzu, C. (2011). Discrete event diagnosis using labeled petri nets. an application to manufacturing systems. *Control Engineering Practice*, 19(9), 989–1001.
- Cabral, F.G., Moreira, M.V., Diene, O., and Basilio, J.C. (2014). A petri net diagnoser for discrete event systems modeled by finite state automata. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 60(1), 59–71.
- 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*. Springer, New York, 2 edition.
- Contant, O., Lafortune, S., and Teneketzis, D. (2006). Diagnosability of discrete event systems with modular structure. *Discrete Event Dynamic Systems*, 16(1), 9–37.
- David, R. and Alla, H. (2010). *Discrete, continuous, and hybrid Petri nets*, volume 1. Springer.
- de Freitas, B.I. (2021). *Online Fault Diagnosis of Discrete Event Systems Modeled by Labeled Petri Nets Using Labeled Priority Petri Nets*. Master's thesis, UFRJ/COPPE - Programa de Engenharia Elétrica, Brasil.
- Debouk, R., Lafortune, S., and Teneketzis, D. (2000). Coordinated decentralized protocols for failure diagnosis of discrete event systems. *Discrete Event Dynamic Systems*, 10(1), 33–86.
- Dotoli, M., Fanti, M.P., Mangini, A.M., and Ukovich, W. (2009). On-line fault detection in discrete event systems by petri nets and integer linear programming. *Automatica*, 45(11), 2665–2672.
- Genc, S. and Lafortune, S. (2003). Distributed diagnosis of discrete-event systems using petri nets. In *International Conference on Application and Theory of Petri Nets*, 316–336. Springer.
- Giua, A., Corona, D., and Seatzu, C. (2005). State estimation of λ -free labeled petri nets with contact-free nondeterministic transitions. *Discrete Event Dynamic Systems*, 15(1), 85–108.
- Lefebvre, D. and Delherm, C. (2007). Diagnosis of des with petri net models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(1), 114–118.
- Lin, F. (1994). Diagnosability of discrete event systems and its applications. *Discrete Event Dynamic Systems*, 4(2), 197–212.
- Liu, B., Ghazel, M., and Toguyéni, A. (2017). On-the-fly and incremental technique for fault diagnosis of discrete event systems modeled by labeled petri nets. *Asian Journal of Control*, 19(5), 1659–1671.
- Moreira, M.V., Jesus, T.C., and Basilio, J.C. (2011). Polynomial time verification of decentralized diagnosability of discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(7), 1679–1684.
- Nunes, C.E., Moreira, M.V., Alves, M.V., Carvalho, L.K., and Basilio, J.C. (2018). Codiagnosability of networked discrete event systems subject to communication delays and intermittent loss of observation. *Discrete Event Dynamic Systems*, 28(2), 215–246.
- Paiva, P.R., de Freitas, B.I., Carvalho, L.K., and Basilio, J.C. (2021). Online fault diagnosis for smart machines embedded in industry 4.0 manufacturing systems: A labeled petri net-based approach. *IFAC Journal of Systems and Control*, 100146.
- Qiu, W. and Kumar, R. (2006). Decentralized failure diagnosis of discrete event systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 36(2), 384–395.
- Ramírez-Treviño, A., Ruiz-Beltrán, E., Rivera-Rangel, I., and Lopez-Mellado, E. (2007). Online fault diagnosis of discrete event systems. a petri net-based approach. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(1), 31–39.
- Sampath, M., Sengupta, R., Lafortune, S., Sinnamohideen, K., and Teneketzis, D. (1995). Diagnosability of discrete-event systems. *IEEE Transactions on automatic control*, 40(9), 1555–1575.
- Santoro, L.P., Moreira, M.V., and Basilio, J.C. (2017). Computation of minimal diagnosis bases of discrete-event systems using verifiers. *Automatica*, 77, 93–102.