

SUPERVISORES DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS COM ADAPTAÇÃO TEMPORAL

EDUARD M. M. COSTA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA, FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA – ÁREA I

AV. SANTIAGO DE COMPOSTELA, 216 – IGUATEMI, SALVADOR, BA

E-MAILS: edmonty@ig.com.br, montgomery@areal.br

Resumo— Nesse artigo é utilizado o autômato com temporização variável para sintetizar supervisores de sistemas a eventos discretos temporizados que apresentam tempos de vida dos eventos variáveis. Através de uma formulação proposta, aqui é introduzido o conceito de supervisores temporalmente adaptativos, os quais são utilizados para se sincronizar com as variações causadas por desgastes de recursos e outros problemas inerentes aos sistemas. O formalismo utilizado para a síntese de supervisores é a álgebra de dióides e as matrizes de incidência.

Abstract – This paper utilize the time varying automaton to synthesizes supervisors for timed discrete event systems that present variations in event lifetime. Through proposed formulation, here is introduced the concept of timely adaptive supervisors, which are utilized to synchronize themselves with the variations caused by wear and tear of resources and other problems of these systems. The formalism used for supervisor synthesis is the dioid algebra and the incidence matrix.

Palavras-chave— Autômatos Temporizados, Controle Supervisório, Sistemas a Eventos Discretos.

Introdução

Os Sistemas a Eventos Discretos (SEDs) [1] são aqueles que apresentam sua evolução dinâmica descrita pela ocorrência de eventos físicos, os quais alteram seu estado. Estes estão presentes em aplicações como sistemas de manufatura e supervisão de tráfego aéreo e ferroviário. Seu estudo requer a utilização de uma representação adequada que permita projetar um agente de controle automático, denominado de supervisor, o qual interage com o SED definindo as ações de controle para habilitar ou inibir eventos, realizando uma tarefa especificada.

A formalização do problema de controle de SEDs utilizando autômatos e linguagens formais [2] é denominada de Teoria de Controle Supervisório (TCS) [3], a qual formaliza a síntese do supervisor tomando como base o modelo do SED e uma especificação funcional. Esta abordagem é aplicada ao tratamento do funcionamento lógico do SED e sua aplicação garante condições específicas para construir supervisores onde é necessário determinar a evolução lógica do SED, sem definir instantes de tempo exatos da ocorrência dos eventos, nem o tempo total para a realização das tarefas. Assim, nada se pode dizer sobre o tempo de execução de uma tarefa, nem os instantes exatos da aplicação de controle aos eventos. Logo, não satisfaz condições para aplicações em tempo real.

A formalização para sintetizar supervisores de SEDs temporizados exige que sua descrição seja feita através de um paradigma que relaciona o tempo às ocorrências dos eventos. Dentre as alternativas utilizadas para incluir uma representação temporal aos SEDs, encontra-se a abordagem de [4], que inclui o

evento ‘tick’, o qual ocorre sincronizado ao relógio global, tendo como problema o aumento no número de estados e transições do modelo. O tratamento destes sistemas baseados neste modelo necessita da definição de vários conjuntos de eventos, bem como formalismos utilizando grafos de transições de atividades (GTA) [5] e grafos de transições temporizadas (GTT) [6], não se aplicando a SEDs temporizados que necessitam de sincronização.

A não utilização do evento ‘tick’ definida pela inclusão da representação diretamente no modelo é tratada em [7], onde o SED é modelado por um grafo de eventos temporizado, utilizando a álgebra de dióides [8,9,10]. Essa álgebra também é utilizada em avaliação de desempenho de SEDs temporizados [11], utilizando as séries formais [12,13] que permitem a descrição da linguagem reconhecida pelo SED modelado por um autômato (max,+) [11], bem como para determinar caminhos em SEDs através da matriz de incidência [14]. Sua utilização em conjunto com as matrizes de incidência permitem sintetizar supervisores de SEDs não temporizados [15] e temporizados [16]. Assim, esse formalismo permite reescrever os problemas de controle de [3,4], como visto em [17], sendo aplicado a SEDs determinísticos e com número finito de estados.

Em muitos casos, com a utilização dos autômatos (max,+), o modelo do SED se apresenta não determinístico devido à sua própria evolução. Geralmente, são sistemas que apresentam variações nos tempos de vida dos eventos, como por exemplo: sistemas que apresentem desgastes nos recursos. Esta classe de sistema pode ser modelada através do autômato com temporização variável (ATV) [18], e a estruturação de controle pode ser formulada pela a-

bordagem de [17] para sintetizar supervisores [19,20].

Aqui é apresentada a utilização do ATV na formulação do conceito de supervisores temporalmente adaptativos, a qual é determinada via formalismo de [17]. Dessa forma, nas Seções seguintes, são apresentados os conceitos necessários ao entendimento do artigo e a formulação proposta, com a apresentação de um exemplo ilustrativo.

Conceitos

2.1 Álgebra de Dióides

Definição 1 Um dióide é um conjunto D dotado de duas operações: \oplus (adição) e \otimes (multiplicação), cuja principal característica é a idempotência (a soma de dois elementos iguais é o mesmo elemento).

Um dióide é comutativo se \otimes é comutativa. Se $D = \mathbf{R}_{\max} = \mathbf{R} \cup \{-\infty\}$, então $e = -\infty$, $e=0$, \oplus é a operação \max (máximo) e \otimes é a operação $+$ (soma). Nesse caso, D é comutativo e denomina-se a álgebra de $(\max,+)$, onde os elementos $e = -\infty$, $e=0$ satisfazem:

$$\forall a \in \mathbf{R}, a \oplus e = a \oplus (-\infty) = \max \{a, -\infty\} = a = \max \{-\infty, a\} = (-\infty) \oplus a = e \oplus a \quad (1)$$

e

$$\forall a \in \mathbf{R}, a \otimes e = a + 0 = a = 0 + a = e \otimes a \quad (2)$$

Assim, para dois elementos quaisquer $a, b \in D$, com $D = \mathbf{R}_{\max}$, tem-se

$$a \otimes b = a + b = b + a = b \otimes a \quad (3)$$

de onde se vê que $D = \mathbf{R}_{\max}$ é um dióide comutativo.

Na álgebra $(\max,+)$, D pode ser definido sobre matrizes quadradas de dimensão n , isto é,

$$D = \mathbf{R}_{\max}^{n \times n} \quad (4)$$

As propriedades do dióide $(\max,+)$ são igualmente satisfeitas, considerando que para duas matrizes $\mathbf{A}, \mathbf{B} = \mathbf{R}_{\max}^{n \times n}$,

$$(\mathbf{A} \oplus \mathbf{B})_{i,j} = \mathbf{A}_{i,j} \oplus \mathbf{B}_{i,j} \quad (5)$$

$$(\mathbf{A} \otimes \mathbf{B})_{i,j} = \bigoplus_{k=1}^n (\mathbf{A}_{i,k} \otimes \mathbf{B}_{k,j}) \quad (6)$$

2.2 Autômatos com Temporização Variável

Definição 2 Um autômato finito ATV sobre um alfabeto Σ é uma sextupla $ATV = (Q; \Sigma; q_0; t_0; t_i; t_f)$ em que:

- $Q = \{q_0, \dots, q_n\}$ é um conjunto de estados;
- $\Sigma = \{\sigma_1, \dots, \sigma_m\}$ é um alfabeto;
- q_0 é o estado inicial;
- $t_0: q_0 \rightarrow \mathbf{R}_{\max}$ é a função de atraso inicial;
- $t_i: t_{i-1} \times Q \times \Sigma \times Q \rightarrow \mathbf{R}_{\max}$ é a função de tempo de transição dependente do último tempo decorrido e
- $t_f: t_{i-1} \times Q \rightarrow \mathbf{R}_{\max}$ é a função de atraso final dependente do último tempo decorrido.

Um ATV é representado graficamente por vértices formados pelo conjunto Q e pelos arcos:

1. Internos, $q_j \xrightarrow{\sigma} q_{j+1}, \forall q_j, q_{j+1} \in Q$ e $\sigma \in \Sigma$ tais que $t_i \neq \epsilon$. O arco $q_j \xrightarrow{\sigma} q_{j+1}$, é valorado por

$$t_i = f(t_{i-1}) \quad (7)$$

tal que o tempo de transição t_i do arco que aponta de q_a para q_b é uma função f do tempo decorrido anteriormente t_{i-1} pela ocorrência de um dado evento, e que levou o autômato de q_c para q_a ;

2. O arco de entrada $\rightarrow q_0$, valorado por $t_0 \neq \epsilon$;
3. Os arcos de saída $q_j \rightarrow$, valorados por $t_f, \forall q_f \in Q$, tais que

$$t_f = f(t_{i-1}) \neq \epsilon \quad (8)$$

com t_f definido de forma igual à t_i .

Exemplo 1 Seja $\Sigma = \{\alpha, \beta\}$. O autômato com $Q = \{1, 2, 3\}$, $t_0 = 2$, funções de tempos das transições $f_1 = t^2 - t$, $f_2 = 3t$, $f_3 = 4$, $f_4 = 1 + 2t$ e função de atraso final $f_5 = 5 - 2t$ (os outros valores de f são ϵ) é visto na Figura 1. O valor de t é interpretado como t_{i-1} , isto é, o último tempo decorrido para atingir um dado estado. Assim, o tempo de cada transição em um instante de tempo definido é calculado em relação ao tempo decorrido para atingir o último estado alcançado do ATV. Assim, o valor do primeiro tempo de vida da transição no arco $q_1 \xrightarrow{\alpha} q_2$ é $t_1 = f_1(2) = 2$, pois $t_0 = 2$. t_1 é o tempo mínimo para a ocorrência do evento α que muda o estado do ATV de q_1 para q_2 . O tempo final para reconhecer a palavra vazia ϵ é $t_f = f_5(2) = 4$, tal que seu reconhecimento tem um tempo total $t = 6$. Na ocorrência de α , o ATV vai para o estado 2, onde o tempo de transição para α é $t_2 = f_2(2) = 6$ e para β é $t_2 = f_4(2) = 5$. Se ocorre α , o ATV vai para o estado 3, onde o tempo de transição para β é $t_3 = f_3(5) = 4$. Ainda no estado 2, se ocorre β , o ATV vai para o estado 1, cujo tempo de transição para α é $t_3 = f_1(6) = 30$ e para reconhecer a palavra $\alpha\beta$, o atraso final é $t_f = 4,6$, tal que seu reconhecimento tem um tempo total $t = 13,6$.

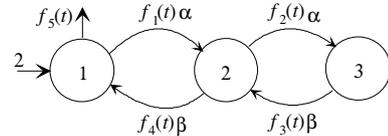


Figura 1: Autômato com Temporização Variável

Observa-se que o reconhecimento de uma palavra se dá quando um estado marcado é atingido e o tempo de atraso final é transcrito. Este reconhecimento pode ser descrito por meio das seqüências de eventos através dos datadores, definidos a seguir:

Definição 3 Um datador é um mapa $Y: \Sigma \rightarrow \mathbf{R}_{\max}$; onde Y é o tempo que um ATV leva para percorrer uma seqüência $s = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n \in \Sigma^*$.

Definição 4 Um datador Y é dito reconhecível se existir um ATV tal que $(y/s) \neq \epsilon$.

O datador define os tempos das palavras de Σ^* [12].

2.2.1 ATV e Séries Formais

A utilização das séries formais para definir a evolução dos ATV é similar aos autômatos (max,+). Assim, tem-se:

Definição 5 Uma linguagem temporizada $L=\{t_s, t_s', \dots\}$, com $s, s', \dots \in \Sigma^*$ e $t_s, t_s', \dots \in \mathbb{R}_{\max}$, pode ser representada por uma série $Y_{\mathbb{R}_{\max} \langle \Sigma \rangle} = \bigoplus_{s \in \Sigma^*} (y|s)s$, em que $\mathbb{R}_{\max} \langle \langle \Sigma \rangle \rangle$ é o semi-anel das séries formais com coeficientes em \mathbb{R}_{\max} e variáveis não comutativas em Σ .

Exemplo 2 Dado o alfabeto $\Sigma = \{\alpha, \beta\}$, a linguagem $L = \{3\epsilon, 4\alpha, 2\alpha\beta, 3\beta\alpha\}$ é representada por

$Y_{\mathbb{R}_{\max} \langle \langle \Sigma \rangle \rangle} = 3\epsilon \oplus 4\alpha \oplus 2\alpha\beta \oplus 3\beta\alpha = 3 \oplus 4\alpha \oplus 2\alpha\beta \oplus 3\beta\alpha$ pois $\epsilon \otimes L = \epsilon$, $\forall L \subseteq \Sigma^*$. Esta série representa a linguagem reconhecida por um ATV, onde $(y|s)$ denota o coeficiente da palavra s que é igual 'e' se s não é reconhecida por ATV.

Y pode ser escrita por meio de uma série formal sobre Σ com coeficientes em $\mathbb{R}_{\max} \langle \langle \Sigma \rangle \rangle$. Isto é,

Definição 6 A linguagem de um ATV é definida por uma série formal como $L(ATV) = \bigoplus_{s \in \Sigma^*} (y|s)s$, em que $(y|s) \in \mathbb{R}_{\max}$ denota o datador da palavra s .

Exemplo 3 Considerando o ATV do Exemplo 1, a série formal $Y_{\mathbb{R}_{\max} \langle \langle \Sigma \rangle \rangle}$ identificada com sua linguagem $L(ATV)$ admite a expressão racional

$$Y_{\mathbb{R}_{\max} \langle \langle \Sigma \rangle \rangle} = 6 \oplus 13,6\alpha\beta \oplus 74,95\alpha\beta\alpha\beta \oplus 27,78\alpha\alpha\beta\beta \oplus \dots$$

2.3 Matrizes de Incidência

Definição 7 Para um ATV define-se a matriz de incidência temporizada, denotada por \mathbf{A} , como

$$\mathbf{A} = [a_{i,j}], a_{i,j} = \begin{cases} f(t_{\sigma}) & \text{se } \exists \sigma \text{ do estado } i \text{ para o estado } j; \\ \epsilon & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

em que $f(t_{\sigma})$ é a função do tempo de vida do evento σ que leva o ATV do estado i para j . Se mais de um evento é definido do estado i para j , então $a_{i,j} = \bigoplus_{\sigma} f(t_{\sigma})\sigma^k$. O estado inicial é o estado 1, representado pelo vetor linha $\theta(\mathbf{A}) = [t_0 \ \epsilon \ \dots \ \epsilon]$, e os estados marcados são representados pelo vetor coluna $\phi(\mathbf{A}) = [f(t_{j_1}) \ f(t_{j_2}) \ \dots \ f(t_{j_m})]^T$.

Nessa representação, se um estado k não é marcado, $f(t_{j_k}) = \epsilon$. A notação θ_j se refere a j -ésima coluna do vetor θ , e ϕ_i se refere a i -ésima linha de ϕ .

A construção das linguagens das matrizes de incidência necessita da seguinte definição:

Definição 8 Seja \mathbf{A} uma matriz de incidência. A matriz $\mathbf{A}^n = \mathbf{A} \otimes \mathbf{A} \otimes \dots \otimes \mathbf{A}$, é uma matriz de caminhos, onde cada elemento $a_{i,j}^n$ representa um ou mais caminhos de comprimento n , formado por símbolos do alfabeto Σ , que levam o autômato que ela representa, do estado i para o estado j , com um tempo

total $f(t_s) = f(t_{\sigma_1}) \otimes \dots \otimes f(t_{\sigma_n})$, $s = \sigma^1 \dots \sigma^n$. Os vetores de estado inicial e de estados marcados da matriz de caminhos \mathbf{A}^n são os mesmos de \mathbf{A} .

Se não há um caminho com n eventos que muda o estado do ATV de i para j , então $a_{i,j}^n = \epsilon$. \mathbf{A}^n contém palavras s de comprimento n , formadas de eventos controláveis e não controláveis, que são percorridas em um tempo $f(t_s) = f(t_{\sigma_1}) \otimes \dots \otimes f(t_{\sigma_n})$.

Exemplo 4 O ATV da Figura 2, tem

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \epsilon & 2t\alpha \\ (2-t)\beta & \epsilon \end{bmatrix}, \quad \theta(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} 2 & \epsilon \end{bmatrix}, \\ \phi(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} 3t \\ \epsilon \end{bmatrix}.$$

Sua matriz de caminhos \mathbf{A}^2 é

$$\mathbf{A}^2 = \mathbf{A} \otimes \mathbf{A} = \begin{bmatrix} ((2t_1) + (t_2-2))\alpha\beta & \epsilon \\ \epsilon & ((t_2-2) + (2t_3))\beta\alpha \end{bmatrix}$$

com $\theta(\mathbf{A}^2) = \theta(\mathbf{A})$ e $\phi(\mathbf{A}^2) = \phi(\mathbf{A})$. Em \mathbf{A}^2 cada seqüência é uma palavra de comprimento 2, que muda o estado do ATV de i para j . Observe que cada elemento (i, j) de \mathbf{A}^2 não contém uma equação apenas em t , pois cada tempo t_i é calculado separadamente, de acordo com a evolução do ATV.

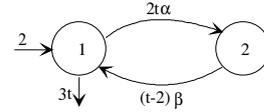


Figura 2: Autômato para exemplo de \mathbf{A}^n

Com essa definição, tem-se:

Definição 9 Para uma matriz de incidência \mathbf{A} , sua linguagem é definida como

$$L(\mathbf{A}) = \bigoplus_i (\theta_i(\mathbf{A}) \otimes \mathbf{A}^*) = \bigoplus_i \bigoplus_{j=1}^n (\theta_i(\mathbf{A}) \otimes a_{i,j}^*), \quad (9)$$

onde $\theta_i(\mathbf{A})$ é o elemento da primeira coluna do vetor de estado inicial $\theta(\mathbf{A})$ e $a_{i,j}^i$ é o elemento da linha 1, coluna j da matriz de caminhos temporizada \mathbf{A}^i .

A linguagem marcada é definida como:

Definição 10 Para uma matriz de incidência \mathbf{A} , sua linguagem marcada é definida como

$$L_m(\mathbf{A}) = \bigoplus_i (\theta_i(\mathbf{A}) \otimes \mathbf{A}^i \otimes \phi(\mathbf{A})) = \bigoplus_i \bigoplus_{j=1}^n (\theta_i(\mathbf{A}) \otimes a_{i,j}^i \otimes \phi_j(\mathbf{A})), \quad (10)$$

onde $\theta_i(\mathbf{A})$ é o elemento da primeira coluna do vetor de estado inicial $\theta(\mathbf{A})$, $a_{i,j}^i$ é o elemento da linha 1, coluna marcada j da matriz de caminhos \mathbf{A}^i e $\phi_j(\mathbf{A})$ é o elemento da j -ésima linha do vetor $\phi(\mathbf{A})$.

Exemplo 5 Para determinar a linguagem do ATV visto na Figura 2, utilizam-se \mathbf{A} , \mathbf{A}^2 encontrada no Exemplo 4, e calcula-se

$$\mathbf{A}^3 = \begin{bmatrix} \epsilon & ((2t_1) + (t_2-2) + (2t_3)) \alpha \beta \alpha \\ ((t_2-2) + (2t_3) + (t_4-2)) \beta \alpha \beta & \epsilon \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

em que, para cada uma dessas matrizes, os elementos da primeira linha definem as palavras de comprimento 1, 2, 3, ..., da linguagem de \mathbf{A} . Calculando os tempos t_i , têm-se $t_1 = 2$, $t_2 = 4$, $t_3 = 4$, $t_4 = 4, \dots$. Substituindo esses valores e multiplicando essas matrizes por $\theta_1(\mathbf{A})$, encontra-se $L(\mathbf{A}) = \{2\epsilon, 6\alpha, 8\alpha\beta, 12\alpha\beta\alpha, \dots\}$. L_m é determinada pelas palavras da linha 1 de \mathbf{A}^i , multiplicadas por $\theta_1(\mathbf{A})$ e $\phi_k(\mathbf{A})$, cujo valor é calculado em relação ao último tempo decorrido, resultando em $L_m(\mathbf{A}) = \{8\epsilon, 16\alpha\beta, \dots\}$.

Para a matriz de incidência, têm-se também:

Definição 11 Uma linha j de uma matriz de incidência \mathbf{A} é acessível se para algum $i \in \mathbb{N}^*$, $\theta(\mathbf{A}) \otimes \mathbf{A}^i \otimes \pi \neq \epsilon$, em que π é um vetor coluna onde $\pi_j = e$, e os demais elementos $\pi_k = \epsilon, k \neq j$.

Definição 12 Uma linha i de uma matriz de incidência \mathbf{A} é coacessível se para algum $k \in \mathbb{N}^*$, $\nu \otimes \mathbf{A}^k \otimes \phi(\mathbf{A}) \neq \epsilon$, em que ν é um vetor linha onde $\nu_i = e$, e os demais elementos $\nu_k = \epsilon, k \neq i$.

A composição síncrona de ATVs utiliza a mesma definição de [18,19,20], onde o algoritmo da construção é apresentado em [24].

Síntese do Supervisor Temporalmente Adaptativo

Na modelagem via autômato $(\max,+)$ de um SED temporizado se considera que os tempos de habilitação dos eventos têm um valor mínimo (tempo de vida do evento), os quais podem ser atrasados, mas não reduzidos. Considerando que, em alguns casos seja necessário modificar os tempos de vida dos eventos para cada execução do SED mantendo a mesma especificação lógica, torna-se necessário definir novas especificações de comportamento (com os tempos de vida diferentes) e gerar um novo supervisor para cada uma delas. Isto torna a tarefa inviável, caso estas modificações sejam repetidas para cada pequena tarefa realizada. Por exemplo, ligar e desligar uma máquina, considerando que cada vez que se desliga, é necessário ter um tempo maior para religá-la e o tempo para desligar é menor. Tal situação pode ser formulada em termos de funções nos arcos que definam os novos tempos de vida para cada execução, o que pode ser representada por um ATV.

A formalização de um supervisor temporalmente adaptativo é baseada na estrutura de síntese de supervisores baseada nas matrizes de incidência de [17,19,20,24]. Assim, com esta formulação, tem-se:

Definição 19 Um supervisor temporalmente adaptativo \mathbf{S} para um SED temporizado G com linguagem $L(G)$, é um supervisor cuja dinâmica é descrita por uma linguagem temporizada $L(\mathbf{S})$, tal que, $\forall s \in \Sigma^* t_{s,s} \in L(G)$, se $\exists t_{s',s}, t_{s'',s}, \dots \in L(\mathbf{S}) \Rightarrow t_{s'} \geq t_s, t_{s''}$

$\geq t_s, \dots$ em que t_s é o tempo de vida da palavra s em G , e $t_{s'} \neq t_{s''} \neq \dots$ são os tempos de vida da palavra s em \mathbf{S} , e $\forall t_{s,s} \in L(G) | t_{s,s} = t_{\sigma'}^1 \sigma'^1 \dots t_{\sigma''}^n \sigma''^n$, com $t_s = \bigoplus_{i=1}^n t_{\sigma'}^i$, se $\exists t_{s',s}, t_{s'',s}, \dots \in L(\mathbf{S})$, então:

$$t_s = \bigoplus_{i=1}^n t_{\sigma'}^i, t_{\sigma'}^i \geq t_{\sigma''}^i, t_{\sigma''}^i \geq t_{\sigma'}^i, \dots \quad (11)$$

em que t_{σ} é o tempo de vida do evento σ da palavra s em G , e $t_{\sigma'} \neq t_{\sigma''} \neq \dots$ são os tempos de vida dos eventos σ da palavra s em \mathbf{S} .

Dessa definição, o supervisor temporalmente adaptativo pode conter algumas das seqüências de eventos do SED, as quais têm seus tempos de vida maiores ou iguais ao respectivo tempo de vida das palavras originais. Naturalmente, a representação de um supervisor temporalmente adaptativo pode ser feita por um autômato $(\max,+)$, mas esta pode crescer indefinidamente, dependendo da linguagem temporizada a ser gerada. Este problema pode ser evitado utilizando o ATV.

Definida a especificação de comportamento, a síntese do supervisor prevê as condições para evitar situações não desejadas na execução do SED, inclusive avaliando as condições para que a linguagem supervisionada $L(\mathbf{S}/G)$ não defina que tempos de vida de eventos sejam reduzidos para aquém do tempo de vida original [19,20]. Assim, tem-se [24,25,26]:

Proposição 1 Dado um SED temporizado modelado por um autômato $(\max,+)$ e uma especificação de comportamento definida por um ATV, um supervisor \mathbf{S} que seja adaptativo em relação aos tempos de vida dos eventos do SED pode ser sintetizado.

Como a síntese do supervisor temporalmente adaptativo segue a mesma formulação do algoritmo de síntese de [19,20], se para um SED temporizado modelado por um autômato $(\max,+)$ e uma tarefa desejada um supervisor é factível, este é garantido ser temporalmente adaptativo de acordo com a Proposição 1.

Exemplo 6 Considere um sistema com uma furadeira e peças a serem perfuradas (Figura 3).

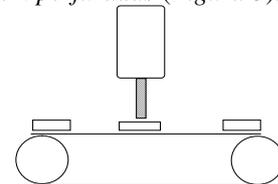


Figura 3: Um pequeno sistema com uma furadeira e uma esteira.

Para uma peça ser perfurada, esperam-se 2 unidades de tempo (ut). Com sua perfuração (evento α) o SED retorna ao estado inicial (evento β) com 1 ut, podendo iniciar nova perfuração ou finalizar o trabalho (2 ut). Para cada perfuração, a temperatura da broca aumenta 11 °C. Com o tempo de uma nova peça entrar na fila para ser perfurada, a temperatura cai 1 °C. Sempre que a broca atinge passa dos 100 °C, ela

pode quebrar e deve ser trocada, gastando 2 ut (evento κ). Após a troca, o sistema retorna ao estado inicial (evento η), gastando mais 1 ut. Como geralmente é construído o modelo em termos de um autômato (max,+), não são consideradas estas variações de temperatura (Figura 4).

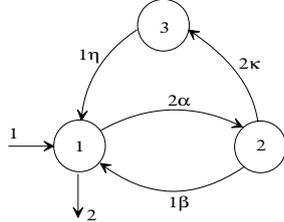


Figura 4: Modelo do sistema da furadeira.

Este modelo tem a seguinte representação matricial:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \epsilon & 2\alpha & \epsilon \\ 1\beta & \epsilon & 2\kappa \\ 1\eta & \epsilon & \epsilon \end{bmatrix} \quad \theta(\mathbf{A}) = [1 \ \epsilon \ \epsilon] \quad \phi(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} 2 \\ \epsilon \\ \epsilon \end{bmatrix}$$

Neste modelo, a temperatura para a broca ter rompimento (100°C) é alcançada quando são perfuradas 9 peças. Considerando que a temperatura inicial da broca é 10°C , define-se uma especificação de comportamento para garantir um tempo de vida maior à broca. Assim, descreve-se este comportamento de acordo como a seguir:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \epsilon & f_1\alpha & \epsilon \\ f_2\beta & \epsilon & f_3\kappa \\ f_4\eta & \epsilon & \epsilon \end{bmatrix} \quad \theta(\mathbf{E}) = [1 \ \epsilon \ \epsilon] \quad \phi(\mathbf{E}) = \begin{bmatrix} 2 \\ \epsilon \\ \epsilon \end{bmatrix}$$

cujo ATV é visto na Figura 5.

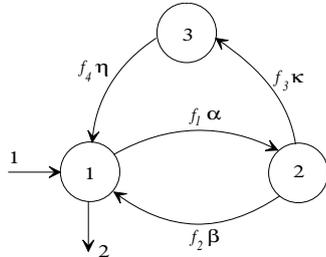


Figura 5: Especificação de comportamento para o sistema da furadeira.

Nesta especificação as funções de tempo de vida são: $f_1 = t + 2$; $f_2 = t$; $f_3 = 3t$; $f_4 = 1$, as quais garantem que para uma peça ser perfurada, as seguintes condições sejam satisfeitas:

1. Deve haver um tempo de espera sempre maior, garantindo uma queda na temperatura da broca;
2. O retorno ao estado inicial também ajude a garantir esta queda e
3. Uma peça quebrada gaste um tempo três vezes maior que o último passado, de forma a esfriar a peça antes de ser trocada.

O tempo de retorno às atividades é $t = 1$, pois com uma nova broca, o sistema reinicia seu processamento normalmente. Para este caso, deve-se observar que as funções são sempre maiores que os valores dos tempos de vida dos eventos originais do modelo.

Assim, o supervisor sintetizado tem exatamente a mesma estrutura da especificação definida e garante que o sistema se adapte para que a temperatura não se eleve a ponto de atingir os 100°C . Também, deve-se ver que para este supervisor, os valores dos tempos de vida de α e β , bem como as temperaturas iniciais T_i (antes de iniciar a perfuração) e finais T_f (após a perfuração) da broca a cada perfuração são dadas de acordo com a seguinte tabela:

α	β	T_i	T_f
2s	2s	10°C	21°C
4s	4s	19°C	30°C
6s	6s	$26,6^\circ\text{C}$	$37,6^\circ\text{C}$
8s	8s	$33,2^\circ\text{C}$	$44,2^\circ\text{C}$
10s	10s	$38,2^\circ\text{C}$	$49,2^\circ\text{C}$
12s	12s	$42,2^\circ\text{C}$	$53,2^\circ\text{C}$
14s	14s	$45,6^\circ\text{C}$	$55,6^\circ\text{C}$
16s	16s	$45,6^\circ\text{C}$	$56,6^\circ\text{C}$
18s	18s	$45,4^\circ\text{C}$	$56,4^\circ\text{C}$

⋮

em que se observa que após 16 ut para retorno ao estado inicial, a temperatura da broca tende a cair cada vez mais. Logo, para não haver um atraso crescente inutilmente, f_2 pode ser definida por

$$f_2 = \begin{cases} t, & \text{se } f_1 \leq 16; \\ 16, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

o que garante um supervisor temporalmente adaptativo e estável para o sistema, e que aumenta o tempo de vida da broca, permitindo utilizá-la para o processamento de mais peças (embora o tempo gasto para o processamento da mesma quantidade de peças seja ampliado).

Conclusão

Esse artigo introduziu a aplicação do ATV à síntese de supervisores temporalmente adaptativos para sistemas a eventos discretos temporizados utilizando o mesmo formalismo de [17, 19, 20].

Com esta formalização, sistemas que utilizam recursos que sofrem avarias devido a situações de desgastes, elevação de temperatura, entre outras, podem elevar seus tempos de vida e de utilização no processamento de tarefas, o que reduz custos, embora aumentem o tempo de processamento em determinadas atividades. Com este formalismo, viu-se a importância dos ATVs na síntese de supervisores de SEDs, onde o exemplo apresentado mostra uma simples aplicação com grande validade, onde se pode ver que os recursos do sistema têm uma ampliação em seus tempos de atividades devido a um breve estudo feito sobre o mesmo.

Agradecimentos

O autor agradece à Faculdade Área1 e ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM) da UFBA, pelos apoios recebidos em suas pesquisas.

Referências Bibliográficas

- [1] P.J.G. Ramadge and W.M. Wonham. Supervision of discrete event processes. *Proc. of 21st Conf. on Decision and Control*, pages 1228–1229, 1982.
- [2] J.E. Hopcroft and J.D. Ullman. *Introduction to Automata Theory, Languages and Computation*. Addison-Wesley, USA, 1979.
- [3] P.J.G. Ramadge and W.M. Wonham. The control of discrete event systems. *Proc. of the IEEE*, 77(1):81–98, 1989.
- [4] B.A. Brandin and W.M. Wonham. Supervisory control of timed discrete-event systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 39(2):329–342, 1994.
- [5] J.S. Ostroff and W.M. Wonham. A framework for real-time discrete event control. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 35(4):386–397, April 1990.
- [6] M.S. Lawford. *Model Reduction of Discrete Real-Time Systems*. PhD thesis, University of Toronto, 1997.
- [7] D.D. Cofer and V.K. Garg. *Supervisory Control of Timed Event Graphs*. IEEE - 0-7803-2129-4/94, 1994
- [8] S. Gaubert. *Théorie des Systèmes Linéaires dans les Dioïdes*. Thèse de Doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. 1992.
- [9] G. Cohen and D. Dubois and J.P. Quadrat and M. Viot. *A Linear System Theoretic view of Discrete Event Process and its use for Performance Evaluation in Manufacturing*. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 30(3):210-220, March, 1985.
- [10] F. Baccelli and G. Cohen and G.J. Olsder and J.P. Quadrat. *Synchronisation and Linearity. An Algebra for Discrete Event Systems*. John Wiley Sons, 1992.
- [11] S. Gaubert. Performance evaluation of (max,+) automata. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(12):2014–2025, December 1995.
- [12] J. Berstel and C. Reutenauer. *Rational Series and their Languages*. Springer, 1988.
- [13] I. Klimann. *Langages, Séries et Contrôle de Trajectoires*. PhD thesis, l'Université Denis Diderot - Paris 7, Juin 1999.
- [14] A. Gill. *Introduction to the Theory of Finite-State Machines*. McGraw-Hill Electronic Sciences Series. McGRAW-HILL Book Company, 1962.
- [15] E.M.M. Costa, A.M.N. Lima. Síntese de supervisores de sistemas a eventos discretos utilizando dióides. *Anais do V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*, 2001.
- [16] E.M.M. Costa, A.M.N. Lima. Síntese de supervisores de sistemas a eventos discretos temporizados. *Anais do V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*, 2001.
- [17] E.M.M. Costa. *Síntese de Supervisores de Sistemas a Eventos Discretos Temporizados e Não Temporizados*. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba –UFPB - Campus II, Campina Grande, Paraíba, Brasil. Novembro de 2001.
- [18] E.M.M. Costa. *Autômatos com Temporização Variável: Um novo Formalismo para Representação de Sistemas Temporizados*. Ciência e Engenharia, Universidade Federal de Uberlândia. Julho/Dezembro de 2002.
- [19] E.M.M. Costa. *Síntese de Supervisores de Sistemas a Eventos Discretos Temporizados Utilizando Autômatos com Temporização Variável*. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA2002), Natal, RN. Setembro de 2002.
- [20] E.M.M. Costa. *Autômatos com Temporização Variável e Aplicação à Síntese de Supervisores de Sistemas a Eventos Discretos Temporizados*. Anais do III Seminário Nacional de Controle e Automação (III SNCA), Salvador, BA. Junho de 2003.
- [21] R. Alur. Timed automata. *Proc. NATO-ASI Summer School, Antalya, Turkey*, 1997.
- [22] R. Alur and D. Dill. A theory of timed automata. *Theoretical Computer Science*, (126):183–235, 1994.
- [23] R. Alur and D. Dill. Automata for modeling real-time systems. *Proc. 17th International Colloquium on Automata, Languages and Programming, Lectures Notes on Computer Science, New York: Springer Verlag*, 443:322–335, 1990.
- [24] E.M.M. Costa. Relatório Parcial de Bolsa DCR/CNPq. Universidade Federal da Bahia, 2002.
- [25] E.M.M. Costa and A.M.N. Lima, Synthesis of Supervisors For Time-Varying Discrete Event Systems. *Revista Controle e Automação*, No. 4, Vol 15, 2004.
- [26] E.M.M. Costa, Utilizando Autômatos com Temporização Variável como Representação de Supervisores Temporalmente Adaptativos. *Revista Eletrônica Diálogos e Ciência*. FTC, Feira de Santana, BA, Ano I, no. 3, Julho de 2003.