

Aplicação de Redes de Petri Auto-Modificáveis
em Sistemas de Manufatura

EDSON MITSUO SASAKI

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo
1996

OK

EDSON MITSUO SASAKI

Aplicação de Redes de Petri Auto-Modificáveis
em Sistemas de Manufatura

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Eiji Miyagi

São Paulo
1996

A G R A D E C I M E N T O S

Ao orientador Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi pela sua constante supervisão e incentivo.

A todos os membros do Laboratório de Automação e Sistemas do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP pelas valiosas sugestões e críticas.

Ao Banco Itau S.A. pelo constante estímulo ao meu desenvolvimento profissional.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010073

S U M Á R I O

Lista de Figuras

Resumo

1. OBJETIVOS 1

2. INTRODUÇÃO 2

3. FALHAS E MANUTENÇÃO EM SM 5

4. REDES DE PETRI E SUA APLICAÇÃO EM SM 11

4.1. Redes de Petri (RdP) 12

4.1.1. Definições 13

4.1.2. Propriedades 18

4.1.2.1. Alcançabilidade 18

4.1.2.2. Limitação (Boundness) 18

4.1.2.3. Vivacidade (Liveness) 19

4.1.2.4. Reversibilidade 20

4.1.3. Métodos de Análise 20

4.1.3.1. Árvore de Alcançabilidade (Reachability tree) .. 20

4.1.3.2. Matriz de Incidência e Equação de Estados 20

4.2. Variações de RdP em SM 22

4.2.1. RdP Condição-Evento 22

4.2.2. RdP Lugar-Transição 24

4.2.3. RdP Colorida 26

4.2.4. RdP Temporizadas 34

4.3. Análise das Soluções Existentes 36

5. REDES DE PETRI AUTO-MODIFICÁVEIS (RdPAM) 38

5.1. Definições 38

5.2. Discussão Sobre a RdPAM 46

6. APLICAÇÃO DE RdPAM 49

6.1. Análise dos Resultados 62

7. CONCLUSÃO 64

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 65

LISTA DE FIGURAS

Fig.	4-1 Representação gráfica de $Pre(p_i, t_j) = a$	16
Fig.	4-2 Representação gráfica de $Post(p_i, t_j) = b$	16
Fig.	4-3 Transição t_1 habilitada	16
Fig.	4-4 Após o disparo da transição t_1	17
Fig.	4-5 Aplicação em um SM simples	17
Fig.	4-6 Interpretação para a RdPCE	23
Fig.	4-7 Exemplo de uma RdPLT	25
Fig.	4-8 Sistema para ilustrar a utilização da RdPC	30
Fig.	4-9 Modelo em RdPC da Fig. 4-8	32
Fig.	5-1 $Pre(p, q, t)$	41
Fig.	5-2 $Post(p, q, t)$	42
Fig.	5-3 Exemplo para a aplicação da equação (5.1)	43
Fig.	5-4 Problema do Leitor e Gravador	45
Fig.	5-5 Possibilidade de transições desconectadas	46
Fig.	5-6 Transições desconectadas geradas pela modelagem	47
Fig.	6-1 Exemplo para a aplicação da RdPAM	49
Fig.	6-2 Modelo em Rdp do sistema da Fig. 6-1	50
Fig.	6-3 Modelo em RdPAM do sistema da Fig. 6-1	52
Fig.	6-4 Configuração do SM	56
Fig.	6-5 RdPAM do SM proposto	57
Fig.	6-6 Detalhe na manutenção periódica da máquina D	60
Fig.	6-7 Manutenção preditiva da máquina E_1	61

R E S U M O

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos aplicando Redes de Petri (RdP) e suas variações para o projeto, análise e controle de Sistemas de Manufatura (SM).

Devido à grande complexidade de SM e dos sub-sistemas que os compõem, estes sistemas estão sujeitos a paradas em função do mal-funcionamento de um ou mais componentes, além de paradas para manutenção. Esse aspecto não é comumente considerado nos trabalhos aplicando RdP em SM.

Por este motivo, o autor introduz Redes de Petri Auto-Modificáveis (RdPAM) como uma ferramenta para o controle de SM. As RdPAM apresentam a característica de mudar suas regras de disparo em função do estado atual do sistema permitindo que o controle do sistema se adapte às ocorrências previstas. Para o desenvolvimento deste trabalho, o autor apresenta conceitos relativos a manutenção aplicáveis a SM e as várias abordagens de RdP e as suas aplicações em SM.

A definição formal de RdPAM proposta por Valk é introduzida e finalmente são discutidos alguns exemplos que mostram a aplicabilidade da RdPAM no controle de SM de modo a incorporar a possibilidade de ocorrência de paradas, sejam elas devido a manutenção ou falha.

1. OBJETIVOS

Aplicar uma extensão à definição de Redes de Petri (RdP) sugerida por VALK (1978) para o projeto e controle de Sistemas de Manufatura (SM). Esta abordagem, conhecida como Rede de Petri Auto-Modificável (RdPAM), apresenta como característica a capacidade de modificar suas próprias regras de disparo. Esta característica será explorada para descrever procedimentos de recuperação de situações anormais devido a ocorrência de quebra ou manutenção de equipamentos e que são executados até que seja restabelecido o funcionamento normal do sistema permitindo a flexibilidade citada por KATKUNTE (1986) ao se contornar situações de parada de equipamentos. Finalmente serão apresentadas exemplos que mostrem a aplicabilidade desta abordagem.

2. INTRODUÇÃO

Segundo ITO (1991), o projeto de sistemas baseados no conceito de automação total está dando lugar para o conceito de SM projetados pelo homem e para o homem (Man-Made Anthropocentric Systems - MMAS), ou seja são consideradas as relações entre a automação flexível e o ser humano. Este conceito está se mostrando mais adequado à sociedade atual e em um futuro próximo por considerar prioritário a produção de itens que atendam às necessidades do ser humano em ambientes de trabalho adequados ao mesmo.

De modo geral, a flexibilidade na manufatura (flexibilização de máquinas e processos) permite responder adequadamente (e rapidamente) às necessidades (maior produtividade e alta qualidade) de produção exigidas pelo mercado (HAYS; JAIKUMAR, 1988).

Entretanto, o projeto de SM considerando o ser humano como parte deste deve considerar também aspectos de segurança, ergonomia e outros de difícil quantificação como o conforto dos operadores por exemplo. Mesmo a avaliação de parâmetros de conforto vêm merecendo a atenção de pesquisadores (MORITA et al., 1993) no sentido de se avaliar corretamente o que é ter por exemplo, conforto térmico, uma vez que este tipo de noção é dependente da avaliação pessoal.

Os SM envolvem vários componentes que interagem entre si para a produção de um ou vários produtos ou parte deste(s). A abordagem correntemente usada com Rdp considera a modelagem de um sistema sem falhas, ou seja, admite-se que as máquinas que compõem o sistema estão funcionando

Neste contexto, as Redes de Petri (Rdp) têm se mostrado uma poderosa ferramenta de modelagem de sistemas concorrentes assíncronos. Dentre as várias áreas de aplicação de Rdp processamento distribuído, hardware e software de sistemas. VALETTE (1986) e KAMATH; VISWANADHAM (1986) aplicam Rdp em SM. De fato, pesquisadores como PETERSON (1981) e REISIG (1985) afirmam que as Rdp podem ser aplicadas a diferentes sistemas utilizando-se interpretações adequadas.

estudo de sistemas derivam das teorias de controle (técnicas baseadas no conceito de sistemas dinâmicos de variáveis contínuas) que baseiam-se fundamentalmente em modelos matemáticos descritos por equações diferenciais. Entretanto, nas últimas décadas, pesquisadores como CASSANDRAS; RAMADGE (1990) e CAO; HO (1990) passaram a considerar técnicas de descrição de sistemas a eventos discretos (teoria das filas, cadeias de Markov, autômatos e máquina de estados finitos, Redes de Petri, etc.) para a modelagem e análise desta classe de sistemas dinâmicos.

corretamente ou estão disponíveis quando necessário. A realidade é um pouco diferente, podendo ocorrer quebra de equipamentos, desgaste de componentes com consequente perda na qualidade da tarefa realizada. Além disso, existem as manutenções periódicas que envolvem a parada de alguns componentes do sistema. É fundamental que estas situações sejam previstas na modelagem de MMS.

Com base no exposto anteriormente, adotou-se a seguinte metodologia neste trabalho:

- estudo e classificação de falhas e manutenção em SM
- levantamento das variações de Rdf existentes
- caracterização de SM, automação de processos discretos e teoria de sistemas a eventos discretos
- análise das prováveis soluções de manutenção de sistemas e modelagem com Rdf para a área de manufatura
- análise das propriedades da RdpAM
- aplicação da RdpAM em sistemas reais
- estudo de casos, conclusão e análise dos resultados

3. FALHAS E MANUTENÇÃO EM SM

Segundo NEPOMUCENO (1989), 'dá-se o nome genérico de "falha" quando a aptidão de um item qualquer termina, não sendo mais exercida a função que lhe compete'. Outros termos utilizados para o termo falha são "pane", "quebra", "ruptura", "enguiço" e várias outras denominações, dependendo do hábito do operador.

De uma maneira geral, as falhas podem ser de dois tipos:

- Falha de desempenho, que esta ligada a diminuição da eficiência do equipamento, ou seja, velocidade de produção, qualidade do produto final, etc.

- Falha catastrófica, que darão origem ao término abrupto da aptidão de um sistema de cumprir suas funções.

Como existem equipamentos, instrumentos, sistemas, conjuntos e instalações das mais variadas modalidades e tipos, o conceito de falha, ruptura, defeito ou outra denominação qualquer depende do enfoque que é dado, uma vez que o efeito de um evento que determine a perda de desempenho do dispositivo com efeitos negativos na capacidade funcional da instalação de maneira global, pode se apresentar de inúmeras maneiras.

máquina não terá a sua funcionalidade. que executa movimentos em coordenadas XYZ queimam, a elétricos que controlam a movimentação de um manipulador necessárias. Por exemplo, se um dos vários motores competem, originando a execução incompleta das funções capaz de executar apenas uma parte das funções que lhe

- Falha Parcial - Quando o componente ou dispositivo é

máquina queimar, temos uma falha global. uma fonte que alimenta todos os motores elétricos de uma exercida pelo componente ou dispositivo. Por exemplo, se

- Falha Global - Quando ocorre ausência total da função

As falhas podem, ainda, ser classificadas em dois tipos:

durante longo período.

funcionar adequadamente logo depois, permanecendo assim dispositivo durante curto espaço de tempo, voltando a ausência da função executada pelo componente ou

- Falhas Intermitentes - Tais falhas dão origem a uma defeituosos.

que haja substituição do componente ou dos componentes ou vários componentes do sistema fica comprometido, até

- Falhas permanentes - No qual o desempenho adequado de um

classes:

Considerando os SM, podemos dividir as falhas em duas

Toda e qualquer falha acontece por uma razão bem determinada. Embora possam existir "fatores aleatórios independentes da vontade humana", deve-se considerar a

àquelas para as quais o mesmo foi projetado. implícita tensões (elétricas, mecânicas, etc) superiores componente ou dispositivo com um regime de trabalho que

- Uso inadequado - Tal tipo consiste em utilizar o

mediante um programa de manutenção preditiva. projeto. Tais falhas podem ser previstas e evitadas de conformidade com o que foi previsto durante a fase de normal de componentes que, devido ao uso, desgastaram-se

- Desgaste - Tais falhas são originadas pelo acionamento

diferentes, permitindo a seguinte classificação:
Além do mais, a falha pode se desenvolver de maneiras

informação ou sinal prévio.

- Falhas Abruptas - São aquelas que não são passíveis de previsão, acontecendo abruptamente independentemente de catástrofica.

sejam tomadas providências antes de atingir a fase através de ensaios ou exames periódicos, permitindo que

- Falhas evolutivas - Falhas que podem ser previstas

podendo ser:

ser classificadas segundo a velocidade com que aparecem, Tanto as falhas permanentes quanto as intermitentes podem

NEPOMUCENO (1989) cita uma classificação geralmente utilizada para a manutenção: manutenção corretiva e manutenção periódica. A manutenção corretiva consiste em

a produção entraria em colapso. utilização, material sendo trabalhado, etc.; caso contrário, períodos que variam de acordo com o equipamento, Portanto há a necessidade de reparos e consertos em fraturas e uma série de incidentes durante a produção. etc. Em todos aparece o problema de desgaste, quebra, podem ser máquinas com comando numérico, robôs, esteiras, necessitam equipamentos para a produção. Esses equipamentos De uma maneira geral, fábricas e instalações industriais

falhas nos equipamentos. equipamentos são defeitos de fabricação que podem gerar flutuações). Trinças e fissuras em peças componentes de tensões (mecânicas ou elétricas ao se ignorar tensões exemplo, uma falha de projeto seria a sub-avaliação de projeto, construção, fabricação ou montagem inadequada. Por defeitos prematuros que são originados por deficiência de deteriorações diversas. Existe no entanto uma série de operação e que podem ser considerados como formas de Vimos até agora defeitos e falhas que são originados na responsável pela situação.

possibilidade de ocorrência de inépcia da pessoa

eliminar uma falha que ocorreu de maneira inesperada (quebra de uma correia, eixo engripado, etc). A manutenção periódica consiste em parar o equipamento para a verificação do estado de seus componentes. Na mesma obra o autor defende uma outra classificação de manutenção como sendo dividida em três níveis: nível I, nível II e nível III. O nível I é o mais simples e corresponde a simplesmente conservar o equipamento funcionando. O nível II consiste na conhecida manutenção preventiva clássica que consiste na substituição de peças em períodos regulares, assim como a execução de reparos e consertos devido a quebras ou falhas inesperadas. O nível III consiste numa técnica diferente, pela qual a manutenção é executada no momento adequado e antes que ocorra a quebra ou falha qualquer. Tal técnica consiste a denominada "manutenção preditiva".

A manutenção, como executada habitualmente consiste simplesmente em substituir peças ou componentes que se desgastaram e que levaram a máquina a uma parada, por falha ou pane num ou mais componentes. A manutenção preditiva apresenta a vantagem de predizer o estado dos componentes, informando quando os mesmos apresentarão falha, dentro de uma boa margem de certeza. Para isso é necessário realizar um diagnóstico. Através do diagnóstico é possível identificar o estado de um determinado componente, quando o mesmo apresentará falha e como programar a sua substituição

As técnicas atualmente utilizadas no projeto, controle e análise de SM envolvem o uso de modelos de Rdf ou suas variantes, entre outras. Aliada à necessidade de aumentar a disponibilidade, manutenção e confiabilidade apresentaremos uma modificação à Rdf que permita ao projetista considerar estes conceitos em SM.

Dentro deste escopo de gerenciamento da manutenção e com o surgimento de sistemas sofisticados e integrados, onde são utilizados vários equipamentos trabalhando em conjunto, como em SM, o desafio da manutenção em traçar, organizar e administrar a ocorrência de falhas bem como recuperação destes, se torna cada vez maior. Assim, manter a disponibilidade de SM, minimizando os trabalhos de emergência e não planejados passa a ser uma consideração importante no controle destes sistemas.

1989).

O diagnóstico depende muito dos equipamentos utilizados e do conhecimento das técnicas para a obtenção de dados relativos aos parâmetros a serem observados. Para a obtenção destes parâmetros utilizam-se células de carga, termômetros especiais, transdutores de vibração além de testes ultra-sônicos, análises de sinais, etc. (NEPOMUCENO,

antes da ocorrência da situação crítica que leva à quebra e consequente parada do equipamento.

Os componentes do sistema de manufatura apresentam concorrência e/ou paralelismo, ou seja, as atividades de um componente podem ocorrer simultaneamente com a atividade de outros componentes. Por exemplo, enquanto um torno trabalha uma peça, uma nova peça chega ao magazine de onde um robô irá retirá-la para carregar outro torno que está livre.

Os SM são muito complexos e envolvem muitos componentes interagindo entre si (máquinas, robôs, magazines, ferramentas, moldes, veículos de transporte, materiais, etc). Cada componente pode ser tão complexo quanto sua interação com outros componentes do sistema. No entanto, cada um deles possui o seu próprio "estado". Em SM isso seria visto como, por exemplo, um robô que pode estar livre (à espera para carregar ou descarregar peças num torno), pode estar parado para manutenção ou pode estar ocupado (carregando ou descarregando peças num torno).

Existem várias técnicas de modelagem de sistemas utilizadas em sistemas a eventos discretos. Dentre elas CAO; HO (1990) citam teoria das filas, cadeias de Markov, autômatos e máquina de estados finitos, Redes de Petri, etc. Dentre os sistemas a eventos discretos citados por CASSANDRAS; RAMADGE (1990) temos os SM.

4. REDES DE PETRI E SUA APLICAÇÃO EM SM

A RDP foi concebida originalmente para a modelagem e análise de sistemas que apresentam componentes interagindo e com atividades concorrentes.

4.1. Redes de Petri (RDP)

A seguir descreveremos as RDP e algumas de suas formas de interpretação e/ou variações.

Esta sessão enfocará a abordagem feita através de RDP com o objetivo de se projetar e controlar SM. Segundo VALETTE (1986), o uso de RDP pode permitir a realização do controle do SM através do modelo obtido. As RDP possuem várias formas de interpretação de sua estrutura e seus elementos para melhorar a representação de sistemas específicos ou mesmo incluem novos elementos de modo a permitir a análise de desempenho destes sistemas na fase de projeto. Para controle de sistemas também existem metodologias e técnicas para a efetiva aplicação das RDP.

A concorrência existente nos SM exige que se tenha uma sincronização das atividades dentro do sistema. Assim, por exemplo, ocorre com as atividades de um robô para carregar e descarregar peças em vários equipamentos, magazines e esteiras.

Os SM são muito complexos e compostos de várias unidades interagindo entre si e assim, as ferramentas para modelagem, representação e análise de sistemas exclusivamente sequenciais não são suficientes. Além disso, as Rdp incorporam conceitos fundamentais que podem ser usados como base para outros modelos (Rdp Colorida, Rdp Temporizada, Rdp Auto-Modificável, etc.) desenvolvidos para tratar este tipo de sistema.

4.1.1. Definições

Segundo MARTINEZ (1986), uma Rdp pode ser identificada como um grafo direcionado e bipartido

$$C = (P, T, Pre, Post), \text{ onde}$$

$P =$ conjunto de lugares = $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}, n \geq 1$

$T =$ conjunto de transições = $\{t_1, t_2, \dots, t_m\}, m \geq 1$

$$P \cap T = \emptyset \text{ (P e T formam os nós de C)}$$

Pre e Post são funções definidas como

$$Pre: P \times T \rightarrow \mathbb{N}, \text{ função de entrada}$$

$$Post: P \times T \rightarrow \mathbb{N}, \text{ função de saída}$$

Assim, um lugar p é um lugar de entrada de uma transição t se $\text{Pre}(p, t) \neq 0$ e p é um lugar de saída de uma transição t se $\text{Post}(p, t) \neq 0$.

A representação gráfica de uma Rdp tem dois tipos de nós. Um círculo é usado para representar um lugar e uma barra é usada para representar uma transição.

Arcos direcionados conectam lugares e transições. Alguns arcos direcionados conectam lugares a transições e outros arcos direcionados conectam transições a lugares. Um arco direcionado de um lugar p à uma transição t define o lugar p como sendo uma entrada da transição t ($\text{Pre}(p, t) \neq 0$). Da mesma forma um lugar de saída p é indicado por um arco direcionado da transição t para o lugar p ($\text{Post}(p, t) \neq 0$).

Se $\text{Pre}(p, t) = 0$ ou $\text{Post}(p, t) = 0$, então não existe arco ligando p a t e nem ligando t a p . $\text{Pre}(p, t)$ e $\text{Post}(p, t)$ fornecem o peso dos arcos. Os arcos possuem rótulos que indicam o seu peso.

Uma marcação M de uma Rdp $C = (P, T, \text{Pre}, \text{Post})$ é definida como

$M: P \rightarrow \mathbb{N}$, onde $\mathbb{N} =$ conjunto dos números naturais

Uma transição t_1 em uma RDP C com marcação M pode disparar se a transição t_1 estiver habilitada. Disparando uma transição habilitada t_1 resulta na nova marcação M' onde

$$M(p) \geq \text{Pre}(p, t_1), \forall p \in P$$

Pre, Post) com marcação M se

Uma transição t_j é dita habilitada em uma RDP $C = (P, T,$

esteja habilitada.

A movimentação das marcas através da RDP representa o comportamento dinâmico do sistema modelado. Esta movimentação é executada com o disparo de transições. Para que haja o disparo de transições é preciso que a transição

esta RDP de rede de capacidade infinita.

Na representação gráfica da RDP, as marcas são representadas por pequenos pontos nos círculos que representam os lugares. Nesta definição um lugar pode acomodar um número infinito de marcas. MURATA (1989) chama

M define marcas para cada lugar na rede. M também pode ser visto como um vetor cujo i -ésimo componente M_i representa o número de marcas n_i definido em p_i .

$$M'(p) = M(p) - \text{Pre}(p, t_1) + \text{Post}(p, t_1), \forall p \in P$$

Assim, a transição t_j abaixo só estará habilitada se houver pelo menos a marcas no lugar p_1

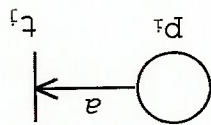


Fig. 4-1 Representação gráfica de $\text{Pre}(p_1, t_j) = a$

Se houver disparo da transição t_j abaixo, b marcas serão passadas para p_1

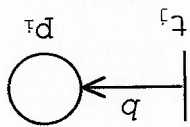


Fig. 4-2 Representação gráfica de $\text{Post}(p_1, t_j) = b$

Por exemplo, considere os lugares p_1, p_2 e a transição t_1 como descrito abaixo. A transição t_1 está habilitada pois $M(p_1) \geq \text{Pre}(p_1, t_1)$

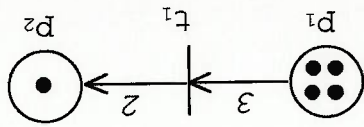


Fig. 4-3 Transição t_1 habilitada

Após o disparo da transição t_1 temos

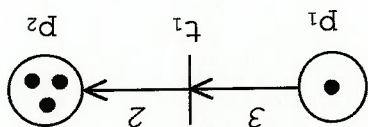


Fig. 4-4 Após o disparo da transição t_1

A seguir apresenta-se um exemplo simples de aplicação em um sistema de manufatura. Trata-se de uma máquina que processa peças que chegam à ela. As peças são processadas e em seguida passam para um estágio seguinte

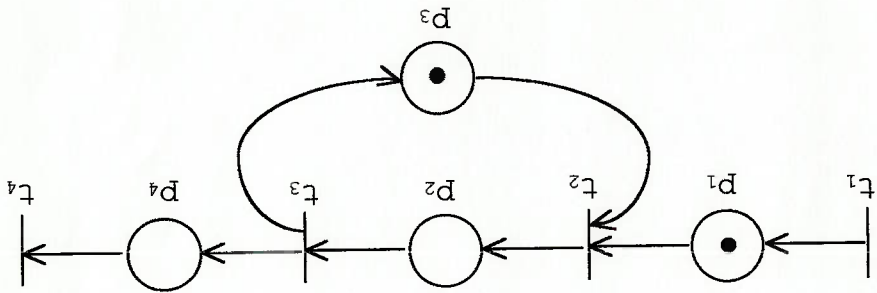


Fig. 4-5 Aplicação em um SM simples

Descrição das transições e lugares:

t_1 : Chegada de uma peça

t_2 : Começa o processamento da peça

t_3 : Processamento completo

t_4 : A peça é enviada para um estágio seguinte

Uma RDP C é dita k-limitada ou simplesmente limitada se o número de marcas em cada lugar não exceder um número finito

4.1.2.2. Limitação (Boundness)

A sequência de disparos de transições vai gerar uma sequência de marcações. Uma marcação M_n é dita alcançável a partir de uma marcação inicial M_0 se existir uma sequência de disparos que transforme M_0 em M_n .

4.1.2.1. Alcançabilidade

A seguir descreveremos algumas propriedades básicas consideradas por MURATA (1989) e PETERSON (1981) para a análise do modelo de um sistema em RDP.

4.1.2. Propriedades

- p_1 : A peça está aguardando a máquina ficar ociosa para ser trabalhada
- p_2 : A peça está sendo trabalhada
- p_3 : A máquina está ociosa, aguardando uma nova peça
- p_4 : Peça trabalhada

Um problema que pode ocorrer na alocação de recursos em um SM é o "deadlock". Considere o exemplo simples onde uma máquina está processando uma peça e um robô, usado para carregar e descarregar a máquina, está segurando uma nova peça para ser processada. Neste caso o robô não conseguirá carregar a nova peça até que a peça que está na máquina seja descarregada e esta não pode ser descarregada porque o robô não está livre. Neste caso o sistema está em deadlock. Uma Rdf C com marcação inicial M_0 é dita viva (live) se, independente da marcação M alcançada a partir de M_0 , é possível disparar qualquer transição da rede seguindo alguma sequência de disparos.

4.1.2.3. Vivacidade (Liveness)

Os lugares em Rdf podem representar buffers onde são armazenadas peças e máquinas que podem estar processando as mesmas. Verificando-se que a Rdf é limitada ou segura, garante-se que não haverá transbordamento dos buffers ou máquinas.

For I-limitada.

k para qualquer marcação. Uma Rdf C é dita segura (safe) se

Neste caso utiliza-se a representação matricial da RDP para estudo das propriedades. Pre e Post podem ser representados matricialmente como

4.1.3.2. Matriz de Incidência e Equação de Estados

É um grafo que descreve explicitamente todos os estados gerados a partir de cada disparo. Segundo MURATA (1989), permite verificar propriedades como limitação, alcançabilidade e vivacidade.

4.1.3.1. Árvore de Alcançabilidade (Reachability tree)

Os métodos de análise permitem a determinação das propriedades do modelo de SM em RDP.

4.1.3. Métodos de Análise

Uma RDP C com marcação inicial M_0 é dita reversível se para cada marcação M alcançável a partir de M_0 , M_0 é alcançável a partir de M. Assim, uma RDP reversível pode sempre voltar a sua marcação inicial.

4.1.2.4. Reversibilidade

t_i disparará

um 1 na posição i significa que a transição

onde $m - 1$ elementos são zero e

$$u_k = \begin{bmatrix} t_1 \\ u_{11} \\ \vdots \\ t_m \\ u_{m1} \end{bmatrix} \quad m \times 1, \quad u_{i1} \in \mathbb{IN}$$

O vetor de controle u_k é definido como

$$M = \begin{bmatrix} p_1 & m_{11} \\ \vdots & \vdots \\ p_n & m_{n1} \end{bmatrix} \quad n \times 1, \quad m_{i1} \in \mathbb{IN}$$

Uma marcação M pode ser escrita como

$$\Delta^{n \times m} = \text{Post}^{n \times m} - \text{Pre}^{n \times m}$$

A matriz de incidência Δ é dado por

$$\text{Post} = \begin{bmatrix} p_1 & w_{11} & \dots & w_{1m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ p_n & w_{n1} & \dots & w_{nm} \end{bmatrix} \quad n \times m, \quad w_{ij} \in \mathbb{IN}$$

$$\text{Pre} = \begin{bmatrix} p_1 & w_{11} & \dots & w_{1m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ p_n & w_{n1} & \dots & w_{nm} \end{bmatrix} \quad n \times m, \quad w_{ij} \in \mathbb{IN}$$

PETERSON (1981) sugere a utilização da Rdp para a modelagem de condições e eventos. REISIG (1985) define a RdPCE e a aplica em sistemas condição-evento. Os lugares representam condições e as transições representam eventos. Uma marca em

4.2.1. Rdp Condição-Evento

A seguir investigaremos algumas variações de Rdp aplicadas em SM onde verificaremos aspectos básicos de cada uma e finalmente analisá-las em 4.3.

4.2. Variações de Rdp em SM

$$\Delta \cdot x = M_d - M_0$$

Para sabermos se um estado M_d é atingível devemos descobrir se existe uma sequência de disparos de transições tal que a partir de M_0 cheguemos à M_d . Para isso é preciso resolver o seguinte conjunto de equações algébricas obtidas de (4.1)

$$M' = M + \Delta \cdot u_k \quad (4.1)$$

Uma equação de estados com marcação M pode ser escrita como

um lugar significa que a condição é verdadeira e a ausência de marca significa que a condição é falsa.

REISIG (1985) introduz o conceito de "case" como sendo um subconjunto de lugares marcados $M(p) \neq 0$ no modelo do sistema. Assim uma transição t_j pode disparar em um case C se e somente se os lugares de entrada de t_j pertencem a C e os lugares de saída de t_j não pertencem a C . Quando t_j dispara, os lugares de entrada deixam de conter marcas, ou seja, não estão com a condição válida, e os lugares de saída passam a ter marcas, ou seja, passam a ter a condição que representam como sendo válida.

Segundo a definição acima, uma transição t_j não poderá disparar se um de seus lugares de saída tiver a condição válida. Por exemplo, a transição t_1 da Fig. 4-6 não disparará em uma RdPCE

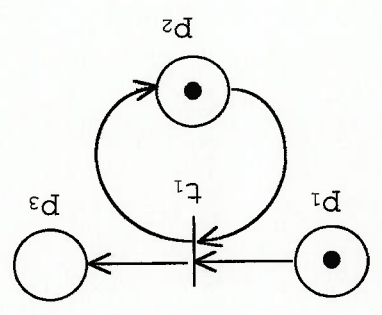


Fig. 4-6 Interpretação para a RdPCE

Segundo VALETTE (1986), as RdPCE podem ser utilizadas no controle local de máquinas, ou seja, em PLCs (Programmable

Logic Controllers) e dispositivos especiais para o controle de robôs e máquinas ferramentas.

4.2.2. Rdf Lugar-Transição

Os lugares em uma Rdf Lugar-Transição (RdPLT) podem ter um número maior ou igual a zero de marcas, mas não superior a um certo número denominado "capacidade" do lugar. MURATA (1989) chama esta Rdf de rede de capacidade finita. Numa rede com apenas um arco entre cada lugar e transição, uma transição t_j pode disparar se $Pre(p_i, t_j) \neq 0$, $M(p_i) \geq k_1$ e $Post(p_i, t_j)$, onde k_1 é a capacidade do lugar p_i .

Na Fig. 4-7 temos um exemplo aplicado a SM para ilustrar o uso da RdPLT. São duas máquinas (M_1 e M_2) onde M_1 produz peças que são armazenadas em um buffer e M_2 processa as peças que se encontram no buffer. A capacidade máxima do buffer é de 5 peças.

Descrição das transições e lugares:

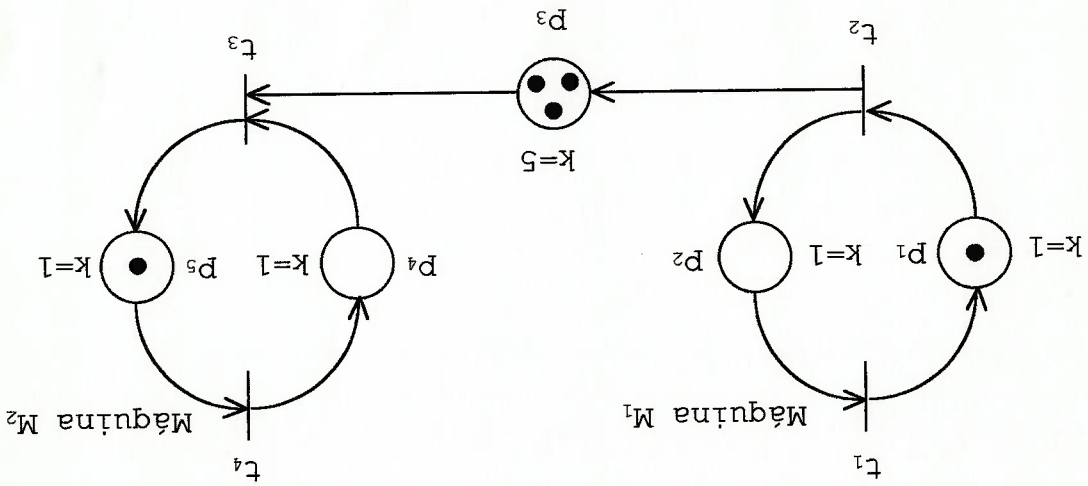
t_1 : Início da produção da peça

t_2 : Fim da produção da peça e depósito no buffer

Segundo VALETTE (1986), RdPLT são adequadas a coordenação de SM porque os lugares podem ser interpretados diretamente como máquinas, peças, ferramentas, magazines, etc.

- p_1 : Máquina M_1 produzindo peça
- p_2 : Máquina M_1 ociosa
- p_3 : Peças no buffer
- p_4 : Máquina M_2 ociosa
- p_5 : Máquina M_2 processando uma peça

Fig. 4-7 Exemplo de uma RdPLT



- t_3 : Retirada de uma peça do buffer e início do processamento
- t_4 : Fim do processamento da peça

4.2.3. Rdp Colorida

Uma das vantagens dos modelos em Rdp é fornecer uma representação gráfica do processo que ocorre dentro de um sistema. Segundo KOCHIKAR (1992), para sistemas reais, entretanto, o modelo necessário para sua representação pode ser muito grande, anulando esta vantagem. A Rdp Colorida (RdPC) foi proposta para superar esta limitação. As RdPC permitem representações gráficas compactas, agrupando nós similares (lugares e transições).

Assim, usando a mesma definição utilizada por ALTA et al. (1985), uma RdPC é definida como uma 6-tupla mostrada abaixo

$$\text{RdPC} = (P, T, C, \text{Pre}, \text{Post}, M_0), \text{ onde}$$

$P =$ conjunto de lugares $= \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, n \geq 1$

$T =$ conjunto de transições $= \{t_1, t_2, \dots, t_m\}, m \geq 1$

$P \cap T = \emptyset$ ($P \cup T$ formam os nós da RdPC)

$C =$ conjunto de cores $= \{c_1, c_2, \dots, c_k\}, k \geq 1$

$C(p)$ e $C(t)$, conjunto de cores do lugar p e da transição t , respectivamente

Suponha que $\text{Pre}(p_1, t_2)(c_3) = 2$. Isto significa que são necessários duas marcas de cor c_3 em p_1 para habilitar t_2 e

$$c(p).$$

onde $\text{sum}[c(p)]$ representa um conjunto com elementos de

$$\text{Pre}(p, t) \text{ e } \text{Post}(p, t) : c(t) \rightarrow \text{sum}[c(p)], \forall (p, t) \in P \times T$$

definidas em $P \times T$, tal que

Pre e Post são, respectivamente, funções de entrada e saída

de cores associadas.

Assim, um lugar pode ser marcado por elementos de um subconjunto de cores (nenhum, um ou vários itens de cada cor). Assim como nos lugares, as transições têm um conjunto

$$c(p) = \begin{matrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{matrix} \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & \dots & c_{nk} \end{bmatrix}, \quad c_{1j} \in \mathbb{N}, \quad \begin{matrix} c_1 & \dots & c_k \end{matrix}$$

$$c(t) = \begin{matrix} t_1 \\ \vdots \\ t_m \end{matrix} \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \dots & c_{mk} \end{bmatrix}, \quad c_{1j} \in \mathbb{N}, \quad \begin{matrix} c_1 & \dots & c_k \end{matrix}$$

cores $c(t) \subseteq c$. Ou seja,

$c(p) \subseteq c$ e a cada $t \in T$ está associado um conjunto de

Para cada $p \in P$ está associado um subconjunto de cores

p_1 é um lugar de entrada de t_2 . Em uma situação análoga suponha que $\text{Post}(p_4, t_3)(c_2) = 1$. p_4 recebe uma marca de cor c_2 quando a transição t_3 dispara e p_4 é lugar de saída de t_3 .

A marcação inicial M_0 é uma função definida em P tal que

$$M_0(p) : C(p) \rightarrow \mathbb{N}, \forall p \in P$$

Assim,

$$M_0(p)(c) = \begin{matrix} p_1 & \dots & p_n \\ n_{11} & \dots & n_{n1} \\ \vdots & & \vdots \\ n_{1k} & \dots & n_{nk} \end{matrix} \quad , \quad n_{ij} \in \mathbb{N}$$

A marcação de uma RdPC é uma função M definida em P tal que

$$M(p) : C(p) \rightarrow \mathbb{N}, \forall p \in P$$

Ou seja,

$$M(p)(c) = \begin{matrix} p_1 & \dots & p_n \\ n_{11} & \dots & n_{n1} \\ \vdots & & \vdots \\ n_{1k} & \dots & n_{nk} \end{matrix} \quad , \quad n_{ij} \in \mathbb{N}$$

$M(p)(c)$ e $M_0(p)(c)$ dão o número de marcas de cada cor para o lugar p na marcação corrente e inicial, respectivamente.

A RdpC, como as Rdp, são representadas por grafos

orientados onde os lugares são representados por círculos e

as transições por barras.

A função $Pre(p, t)$ específica o peso do arco que liga um lugar a uma transição (p, t) é igual a zero se não há nenhum arco). A função $Post(p, t)$ específica o peso do arco que liga uma transição a um lugar (p, t) é igual a zero se não há arco).

O estado do sistema muda com o disparo de uma transição em função de uma determinada cor. Assim, a transição t está habilitada em relação a uma determinada cor c se a marcação corrente M é tal que

$$M(p)(c) \geq Pre(p, t)(c), \forall p \in P$$

Quando a transição estiver habilitada, esta pode disparar. Esse disparo acontece em duas fases:

1) Remove-se $Pre(p, t)(c)$ marcas de cor c de cada lugar p de entrada

2) Adiciona-se $Post(p, t)(c)$ marcas de cor c para cada lugar p de saída

A representação gráfica da RdPC consiste de lugares e transições, e como em Rdp, os lugares caracterizam estados

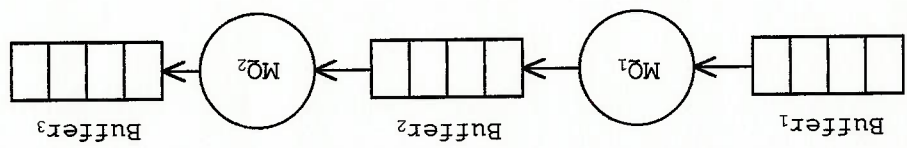
Cores compostas surgem da necessidade de se caracterizar um elemento com dois ou mais atributos. Por exemplo, as cores $(peça_i, m_q_j) \in PCAS \times MQ$ podem caracterizar o estado da peça $peça_i$ em relação a máquina m_q_j .

$MQ = \{m_{q_1}, m_{q_2}, \dots, m_{q_n}\}$, subconjunto de cores associada a cada máquina

$PCAS = \{peça_1, peça_2, \dots, peça_n\}$, subconjunto de cores associada a cada peça

Todas as peças passam na mesma ordem em todas as máquinas. Há um buffer na entrada de cada máquina e um buffer na saída do sistema. Pode-se realizar a modelagem do sistema considerando as seguintes interpretações

Fig. 4-8 Sistema para ilustrar a utilização da RdPC



Para ilustrar a apresentação formal utilizaremos o exemplo de MARTINEZ et al. (1986). O sistema de manufatura apresentado por MARTINEZ et al. (1986) pode produzir dois tipos de peças, PCA_1 e PCA_2 usando duas máquinas, MQ_1 e MQ_2 como mostrado na Fig. 4-8

enquanto que as transições representam possíveis evoluções desses estados. Um lugar pode ser marcado com elementos de um subconjunto de cores (nenhum, um ou vários itens de cada cor). As marcas de um lugar serão chamadas marcas coloridas ou simplesmente cores. A marcação de um lugar pode ser representado pela soma de cores, por exemplo

$$M(p) = 2(\text{peça}_1, m_{q_1}) + 3(\text{peça}_2, m_{q_2})$$

Como em lugares, um subconjunto de cores é associado a cada transição. O estado do sistema muda com o disparo de uma transição em relação a uma dada cor. As condições para habilitação de uma transição e as regras de disparo dependem de funções lineares que rotulam os arcos da rede. Essas funções indicam que cores devem marcar cada lugar de modo que a transição dispare e que cores devem ser adicionados ou removidos de um lugar. A figura abaixo mostra o modelo em RdPC do sistema de manufatura proposto na Fig. 4-8

Agora é preciso representar a sequência de peças através das máquinas (scheduling), e a ordem das máquinas visitadas por cada peça (routing).

A sequência das peças pode ser descrita por:

$$sch\langle pe\dot{c}a_1, m\dot{q}_j \rangle = \langle pe\dot{c}a_{j+1}, m\dot{q}_j \rangle$$

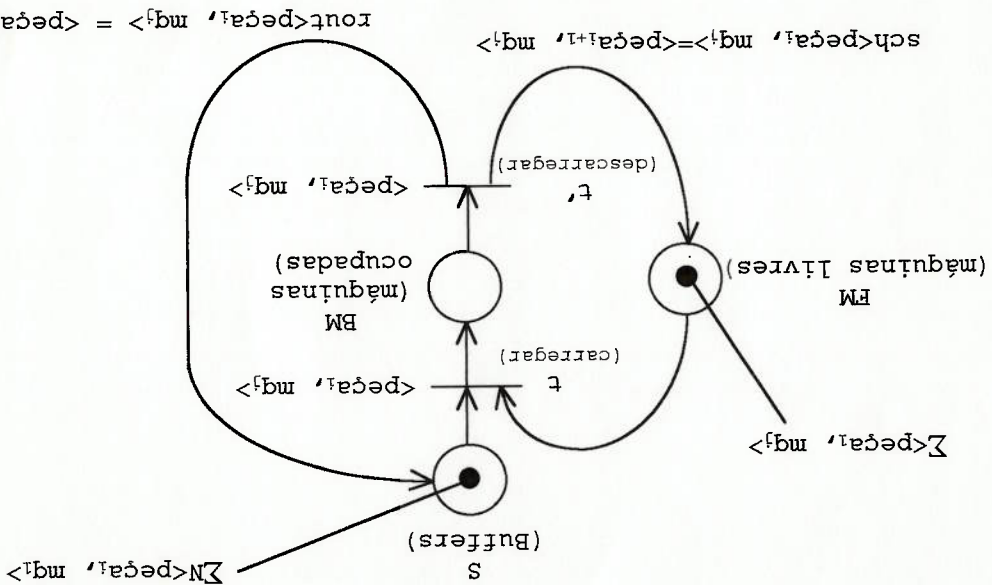


Fig. 4-9 Modelo em RdPC da Fig. 4-8

A ordem em que as máquinas são visitadas são muito simples neste exemplo. A ordem das máquinas visitadas pelas peças pode ser definida pela função

$$rout\langle pe\dot{c}a_1, m\dot{q}_j \rangle = \langle pe\dot{c}a_1, m\dot{q}_{j+1} \rangle$$

A marcação inicial do lugar S (buffers), $M_0(S) = \sum N\langle pe\dot{c}a_1, m\dot{q}_1 \rangle$, significa que todas as peças estão esperando pela máquina MQ_1 em Buffer₁. A marcação inicial do lugar FM (máquinas livres), $M_0(FM) = \sum\langle pe\dot{c}a_1, m\dot{q}_j \rangle$, significa que todas as máquinas estão livres e estão esperando por uma peça.

Esta marcação inicial habilita a transição t em relação a $\text{cor} \langle \text{peça}_1, \text{mq}_1 \rangle$. Ao disparar a transição t com respeito a $\text{cor} \langle \text{peça}_1, \text{mq}_1 \rangle$, uma peça PCQA_1 é carregada na máquina MQ_1 (o lugar BM (máquinas ocupadas) irá conter a $\text{cor} \langle \text{peça}_1, \text{mq}_1 \rangle$). Esta máquina será então descarregada pelo disparo da transição t' com respeito a $\text{cor} \langle \text{peça}_1, \text{mq}_1 \rangle$.

Uma $\text{cor} \langle \text{sch} \langle \text{peça}_1, \text{mq}_1 \rangle = \langle \text{peça}_2, \text{mq}_2 \rangle$ é adicionada ao lugar FM (a máquina MQ_1 está preparada para receber uma peça tipo PCQA_2) e outra $\text{cor} \langle \text{rout} \langle \text{peça}_1, \text{mq}_1 \rangle = \langle \text{peça}_1, \text{mq}_2 \rangle$ é adicionada ao lugar S (uma PCQA_1 está pronta para entrar na máquina MQ_2). Assim, pelo disparo sucessivo de t e t' , tem-se o modelamento do sistema de manufatura.

É importante notar que o número de máquinas e peças ainda não foi especificado. Em um sistema com n_m máquinas e n_p tipos de peças será definido pelos índices $i \in [1, n_p]$ e $j \in [1, n_m]$. As duas funções sch e rout podem ser definidos de tal modo que

$$\text{sch} \langle \text{peça}_{np}, \text{mq}_j \rangle = \langle \text{peça}_1, \text{mq}_j \rangle$$

$$\text{rout} \langle \text{peça}_i, \text{mq}_m \rangle = \langle \text{peça}_i, \text{mq}_1 \rangle$$

dando um comportamento cíclico ao sistema.

4.2.4. Rdp Temporizadas

Com o objetivo de se avaliar o desempenho de sistemas modelados através de Rdp foi introduzido o conceito de atraso associado a transição e/ou lugar do modelo. Tal modelo pode ser uma Rdp Temporizada (RdPT) se os atrasos são determinísticos ou pode ser uma Rdp Estocástica (RdPE) (veja MARSAN (1990)) se os atrasos são determinados probabilisticamente. Na nova definição é adicionado o vetor de tempo

$$T: P \rightarrow \mathcal{J}$$

que associa um tempo que pode ser determinístico ou estocástico para cada lugar $p \in P$.

A sequência de disparos ocorre como se segue:

- (a) cada lugar de entrada tem um número de marcas pelo menos igual ao peso do arco que vai daquele lugar para a transição t , isto é

$$M(p) \geq \text{Pre}(p, t), \forall p \in P$$

- (b) os tempos decorridos para cada lugar de entrada dada pelo vetor T

$$S_s = \langle M_s, L_s \rangle$$

O vetor de estados de uma RdPT é dada por

$$\forall p \text{ tal que } M'(p) \neq M(p), L'(p) = 0$$

atualizado da seguinte forma

O vetor L que indica a quanto tempo um lugar está marcado é

onde M' é o estado seguinte ao estado M

$$M'(p) = M(p) - \text{Pre}(p, t) + \text{Post}(p', t), \forall p \in P$$

isto é

Uma transição habilitada dispara segundo regras de disparo - são removidas um número de marcas dos lugares de entrada igual ao peso do arco que vai do lugar à transição e são depositados em cada um dos lugares de saída um número de marcas iguais aos pesos dos correspondentes arcos de saída,

$$\mathfrak{T}(p) = \text{tempo determinístico associado a } p.$$

onde $L(p) = a$ quanto tempo p está marcado,

$$\forall p \in P \text{ tal que } \text{Pre}(p, t) \neq 0, L(p) \geq \mathfrak{T}(p)$$

4.3. Análise das Soluções Existentes

Dentre as vantagens da abordagem através de Rdp para a modelagem de SM, MARTINEZ (1986) e KAMATH; VISWANADHAM (1986) citam a sua natureza gráfica, a possibilidade de análise qualitativa e quantitativa do modelo e a possibilidade de implementação do controle de SM.

A representação gráfica da Rdp permite a criação de modelos que facilitam o diálogo entre projetistas e técnicos que irão projetar, implementar e manter o controle de SM. A concorrência e sincronização entre subsistemas podem ser naturalmente modelados em comparação a outras técnicas como máquina de estado.

Outro aspecto da modelagem através de Rdp é a possibilidade de se usar métodos formais para analisar o modelo e verificar a validade do mesmo. Isto é feito através de propriedades do modelo obtido. Dentre elas podemos citar a limitação, vivacidade, etc. (veja 4.1.2).

Segundo MARTINEZ et al. (1986), a abordagem através da Rdp pode levar a modelos cuja representação gráfica não seja viável por apresentar vários lugares e transições. Isto frequentemente ocorre em SM.

A aplicação de Rdp e suas variações discutidas anteriormente considerando o controle de SM onde seja necessário prever paradas para manutenções pode levar a representações maiores que aquelas já obtidas sem a previsão de manutenções. Além disso, falhas e manutenções em SM não são comumente considerados nestes variações.

5. REDES DE PETRI AUTO-MODIFICÁVEIS (RdPAM)

Rede de Petri Auto-Modificável é uma variação da RdP que envolve arcos cujos pesos estão relacionados com a quantidade de marcas em lugares pré-definidos. Se um arco tem peso q , isto significa que ao se disparar uma transição conectada a este arco, q marcas são movidas para/de um lugar. Mas se q representa a quantidade de marcas de um outro lugar qualquer $p \in P$ (conjunto de lugares), então o número de marcas a serem movidos é igual ao número de marcas em p . Ou seja, existe uma dependência entre a marcação atual e a evolução do sistema. Desta maneira uma rede auto-modificável é uma RdP capaz de modificar suas próprias regras de disparo.

5.1. Definições

Segundo a definição de VALK (1978), uma RdP Auto-Modificável (RdPAM) $N = (P, T, Pre, Post, M_0)$ é definida como

P = conjunto de lugares = $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n \geq 1$
 T = conjunto de transições = $\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $m \geq 1$
 $P \cap T = \emptyset$ ($P \cup T$ formam os nós da RdPAM)
 M_0 = marcação inicial da RdPAM N

onde $P_1 = P \cup \{1\}$ e $1 \notin P$

Post: $P \times P_1 \times T \rightarrow \text{IN}$

Pre: $P \times P_1 \times T \rightarrow \text{IN}$

segundo VALK (1978), Pre e Post são definidos como

respectivamente.

lugar a uma transição ou uma transição a um lugar, MARTINEZ et al. (1986) fornecem o peso do arco que liga um parâmetros: p e t . As funções $\text{Pre}(p, t)$ e $\text{Post}(p, t)$ de os mesmos nomes Pre e Post (no caso possuem dois definição usada por MARTINEZ et al. (1986) apesar de usar a função de saída $O(t)$. O mesmo também não ocorre na entre lugares e arcos é dado pela função de entrada $I(t)$ e não ocorre na definição de PETERSON (1981) onde as relações peso do arco com a marcação de um lugar pré-definido, o que do conceito de Pre e Post que incorpora a dependência do relacionamento entre lugares e transições é feito através

$M_0(p)$ é a marcação inicial do lugar $p \in P$.

(conjunto dos números naturais)

que pode ser escrita como $M_0 = \begin{pmatrix} M_0(p_1) \\ \vdots \\ M_0(p_n) \end{pmatrix}$, $M_0(p) \in \text{IN}$

Pre e Post são funções onde o primeiro parâmetro representa um lugar (de entrada no caso de Pre e de saída no caso de Post) da transição indicada no terceiro parâmetro. O segundo parâmetro representa um lugar ou simplesmente 1 (um). Se o parâmetro for um lugar, o peso do arco será dado pela marcação do lugar especificado e $Pre(p, q, t)$ e $Post(p, q, t)$ retornam 1. Se o parâmetro for um, o peso do arco é o valor da função $Pre(p, 1, t)$ no caso de lugar de entrada ou $Post(p, 1, t)$ no caso de lugar de saída. O terceiro parâmetro representa uma transição.

Em resumo Pre e Post podem ser expressos como

$$Pre(p, q, t) = \begin{cases} 1, & q \in P \\ w, & q = 1 \end{cases}$$

$$Post(p, q, t) = \begin{cases} 1, & q \in P \\ w, & q = 1 \end{cases}$$

onde $w \in \mathbb{N}$ ($w =$ peso constante)

Quando não houver arco de um lugar p para uma transição t ou de uma transição t para um lugar p , com ou sem peso dependente da marcação de um lugar q , $Pre(p, q, t)$ e $Post(p, q, t)$ serão iguais a 0 (zero).

N é chamada de Rdf Auto-Modificável Posterior (RdPAMP) se Pre é definido como

ou seja, os arcos de entrada das transições não têm dependência com a marcação de outros lugares na rede.

$$\text{Pre: } P \times \{1\} \times T \rightarrow IN$$

N se reduz a uma Rdp se Pre e Post forem definidos como

$$\text{Pre: } P \times \{1\} \times T \rightarrow IN$$

$$\text{Post: } P \times \{1\} \times T \rightarrow IN$$

ou seja, será uma rede cujos arcos não tenham pesos dependentes da marcação de algum lugar da rede.

A representação gráfica de uma RdpAM N é um gráfico bipartido obtido pela representação de cada $(p, q, t) \in P \times P_1 \times T$ tal que $\text{Pre}(p, q, t)$ é representado como na Fig. 5-1

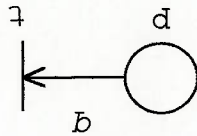


Fig. 5-1 $\text{Pre}(p, q, t)$

e $\text{Post}(p, q, t)$ é representado como na Fig. 5-2

Para interpretar a equação (5.1) usaremos o exemplo da Fig.

$$M(p) \geq \sum_{q \in P_1} \text{Pre}(p, q, t) \cdot V_M(q), \quad \forall p \in P \quad (5.1)$$

M se

Uma transição $t \in T$ está habilitada para uma dada marcação

$\mathbb{N} =$ conjunto dos números naturais

onde $P_1 = P \cup \{1\}$

$$V_M(q) = \begin{cases} 1, & q = 1 \\ M(q), & q \in P \end{cases}$$

Dada uma marcação M , define-se $V_M: P_1 \rightarrow \mathbb{N}$, tal que

$$M: P \rightarrow \mathbb{N}$$

A marcação M de uma RdPAM é uma função definida como

O rótulo $q = 1$ pode ser omitido.

Fig. 5-2 Post(p, q, t)

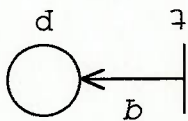
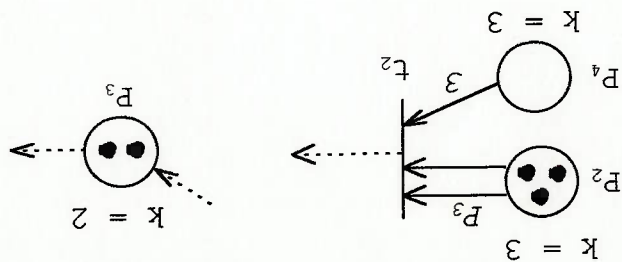


Fig. 5-3 Exemplo para a aplicação da equação (5.1)

Da Fig. 5-3 tiramos que $V_M(1) = 1$, $V_M(p_2) = 3$, $V_M(p_3) = 2$, $V_M(p_4) = 0$. Para verificarmos se t_2 está habilitada aplicaremos a equação (5.1) nos lugares representados na

Fig. 5-3.



Para p_2 :
$$M(p_2) \geq \sum_{q \in P_1} \text{Pre}(p_2, q, t_2) \cdot V_M(q)$$

$$M(p_2) \geq \text{Pre}(p_2, 1, t_2) \cdot V_M(1) + \text{Pre}(p_2, p_1, t_2) \cdot V_M(p_1) + \dots + \text{Pre}(p_2, p_n, t_2) \cdot V_M(p_n)$$

$$3 \geq 1 \cdot 1 + 1 \cdot 2$$

$$M(p_2) \geq \text{Pre}(p_2, 1, t_2) \cdot V_M(1) + \text{Pre}(p_2, p_3, t_2) \cdot V_M(p_3)$$

$$M(p_2) \geq \text{Pre}(p_2, 1, t_2) \cdot V_M(1) + \text{Pre}(p_2, p_1, t_2) \cdot V_M(p_1) + \dots + \text{Pre}(p_2, p_n, t_2) \cdot V_M(p_n)$$

$$3 \geq 0$$

Para p_3 :
$$M(p_3) \geq \sum_{q \in P_2} \text{Pre}(p_3, q, t_2) \cdot V_M(q)$$

$$M(p_3) \geq \text{Pre}(p_3, 1, t_2) \cdot V_M(1) + \text{Pre}(p_3, p_1, t_2) \cdot V_M(p_1) + \dots + \text{Pre}(p_3, p_n, t_2) \cdot V_M(p_n)$$

Para p_4 :
$$M(p_4) \geq \sum_{q \in P_3} \text{Pre}(p_4, q, t_2) \cdot V_M(q)$$

$$M(p_4) \geq \text{Pre}(p_4, 1, t_2) \cdot V_M(1) + \text{Pre}(p_4, p_1, t_2) \cdot V_M(p_1) + \dots + \text{Pre}(p_4, p_n, t_2) \cdot V_M(p_n)$$

$$M(p_4) \geq \text{Pre}(p_4, 1, t_2) \cdot V_M(1)$$

$$0 \leq 3.1 = 3$$

O lugar p_4 não permite habilitar a transição t_2 .

A transição é disparável se não houver contato, da mesma forma que uma RdPCE (discutida no capítulo 4.2.1).

Ao haver o disparo de uma transição $t \in T$, passa-se de uma marcação M para uma marcação M' , ou seja,

$$M \xrightarrow{t} M'$$

t deve estar habilitada em M e

$$M'(p) = M(p) - \sum_{q \in E_1} \text{Pre}(p, q, t) \cdot V_M(q) + \sum_{q \in E_1} \text{Post}(p, q, t) \cdot V_M(q) \quad \forall p \in P \quad (5.2)$$

VALK (1978) sugere também uma definição matricial para uma RdPAM como sendo $N = (P, T, B, F, M_0)$, onde P, T, M_0 são definidos como antes e, B e F são definidos como

$$B: P \times T \rightarrow IN$$

$$F: P \times T \rightarrow IN$$

e para uma dada marcação M são expressos como

$$B_M(p, t) = \sum_{q \in R} \text{Pre}(p, q, t) \cdot V_M(q)$$

$$F_M(p, t) = \sum_{q \in R} \text{Post}(p, q, t) \cdot V_M(q)$$

A matriz Δ_M chamada de matriz de incidência da RdPAM N na marcação M é definida por

$$\Delta_M = F_M - B_M$$

Na Fig. 5-4 apresentamos o exemplo proposto por VALK (1978) onde foi modelado o problema de leitura e escrita através de RdPAM para ilustrar a sua aplicação.

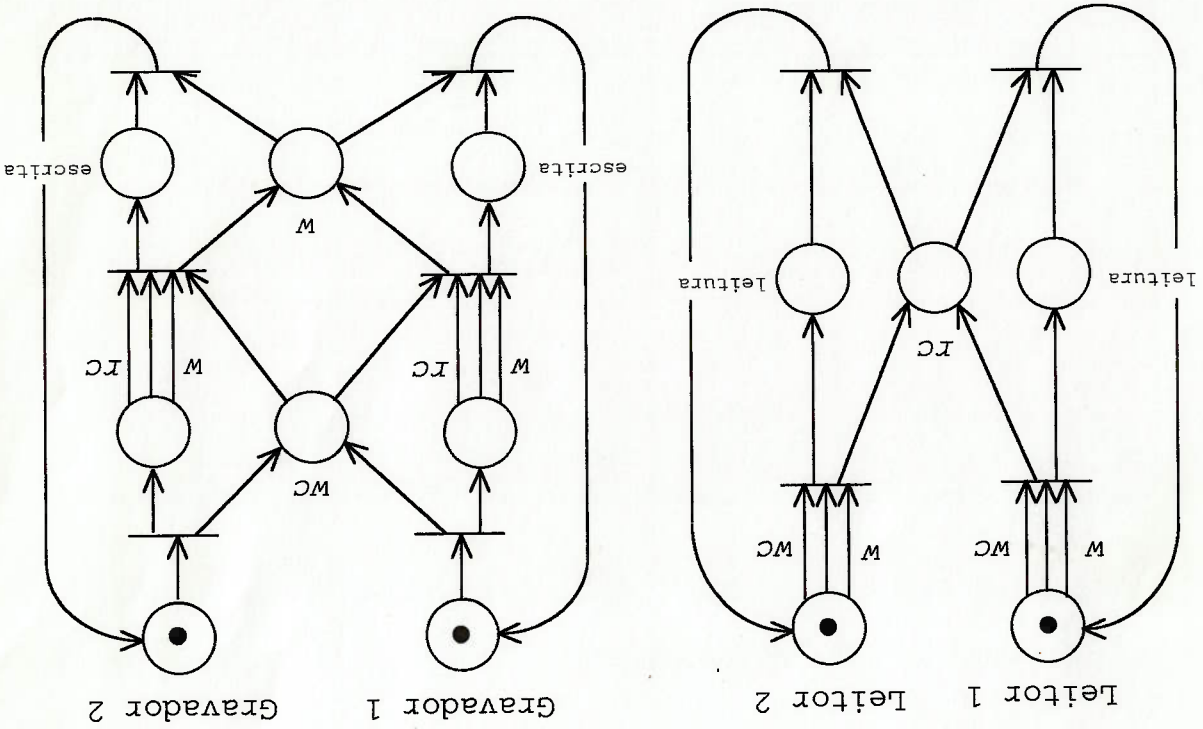


Fig. 5-4 Problema do Leitor e Gravador

Os lugares rc e wc representam contadores de leitores e contadores de gravadores, respectivamente. Assim, sempre que um leitor está lendo, nenhum gravador pode fazer uma escrita. Enquanto um gravador está fazendo uma escrita, nenhum leitor pode ler e nenhum outro gravador pode fazer uma escrita.

5.2. Discussão Sobre a RdPAM

Como podemos ver no exemplo de aplicação da RdPAM na Fig. 5-4 houve a geração de dois segmentos disjuntos mas relacionados através dos pesos dos arcos. Além disso, a definição poderia permitir o modelamento de tal forma que aparecessem transições e lugares desconectados. Discutiremos esses dois aspectos a seguir.

A possibilidade de se ter o peso de arcos baseado na marcação de lugares específicos pode levar a situação ilustrada na Fig. 5-5.

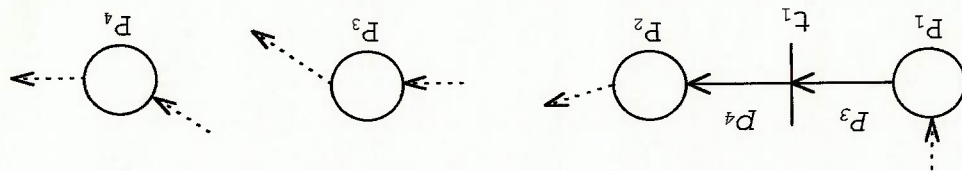


Fig. 5-5 Possibilidade de transições desconectadas

Supondo que $M(p_3)$ e $M(p_4)$ podem ser zero ou 1 (um), surgem as seguintes situações ilustradas na Fig. 5-6 a partir da

Fig. 5-5.

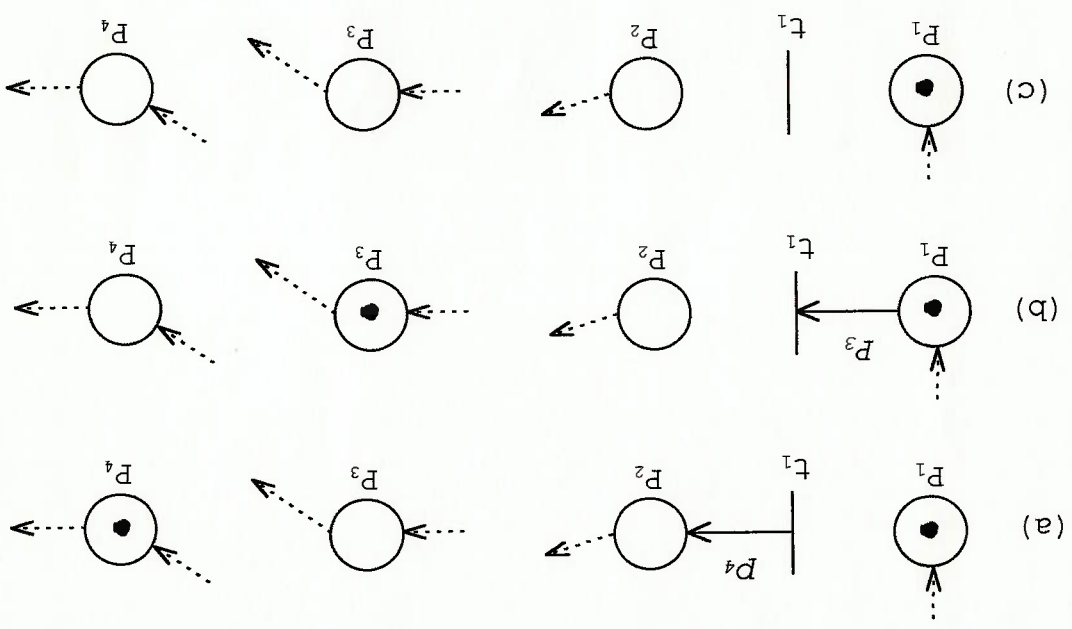


Fig. 5-6 Transições desconectadas geradas pela modelagem

utilizando (5.1) na transição t_1 temos para a situação (a):

$$M(p_1) \geq \text{pre}(p_1, t_1) + \text{pre}(p_1, p_1, t_1) \cdot V_M(p_1) + \dots + \text{pre}(p_1, p_n, t_1) \cdot V_M(p_n)$$

$$1 \geq 0$$

ou seja, nesta situação t_1 estará sempre habilitada pois $M(p_1) \geq 0$. Ela será disparável se $M(p_2) = 0$.

Para a situação (b) teremos:

$$M(p_1) \geq \text{pre}(p_1, t_1) + \text{pre}(p_1, p_1, t_1) \cdot V_M(p_1) + \dots + \text{pre}(p_1, p_n, t_1) \cdot V_M(p_n)$$

$$M(p_1) \geq \text{pre}(p_1, p_3, t_1) \cdot V_M(p_3)$$

Do ponto de vista da definição matricial de uma RdPAM apresentado anteriormente não há impedimento para a existência de segmentos disjuntos no modelo.

Para a situação (c) teremos o mesmo resultado da situação (a), mas com a diferença que no lugar p_2 não aparecerão marcas originadas de t_1 .

ou seja, nesta situação a transição t_1 está habilitada.

1 ≥ 1.1

6. APLICAÇÃO DE RDPAM

As características apresentadas pelas redes auto-modificáveis sugerem a aplicação deste tipo de rede no controle de SM de modo a se atuar em casos de exceções que possam ocorrer no funcionamento normal de sistemas modelados por uma Rdp (usando uma analogia a modelagem de sistemas contínuos onde são utilizados feedbacks para a correção de parâmetros de entrada). Em SM isto poderia ser traduzido com a modelagem considerando falhas e manutenção em elementos de SM (esteiras, robôs, tornos, etc.).

Suponha um sistema onde um robô R_1 pega peças de um magazine de entrada M_E e carrega a máquina M_1 ou M_2 . Depois que a máquina M_1 ou M_2 processa a peça o robô R_1 retira a peça da máquina e a deposita no magazine de saída M_S . A Fig. 6-1 ilustra o sistema.

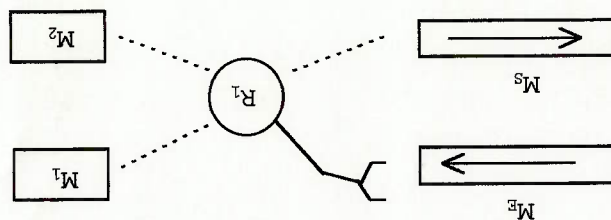


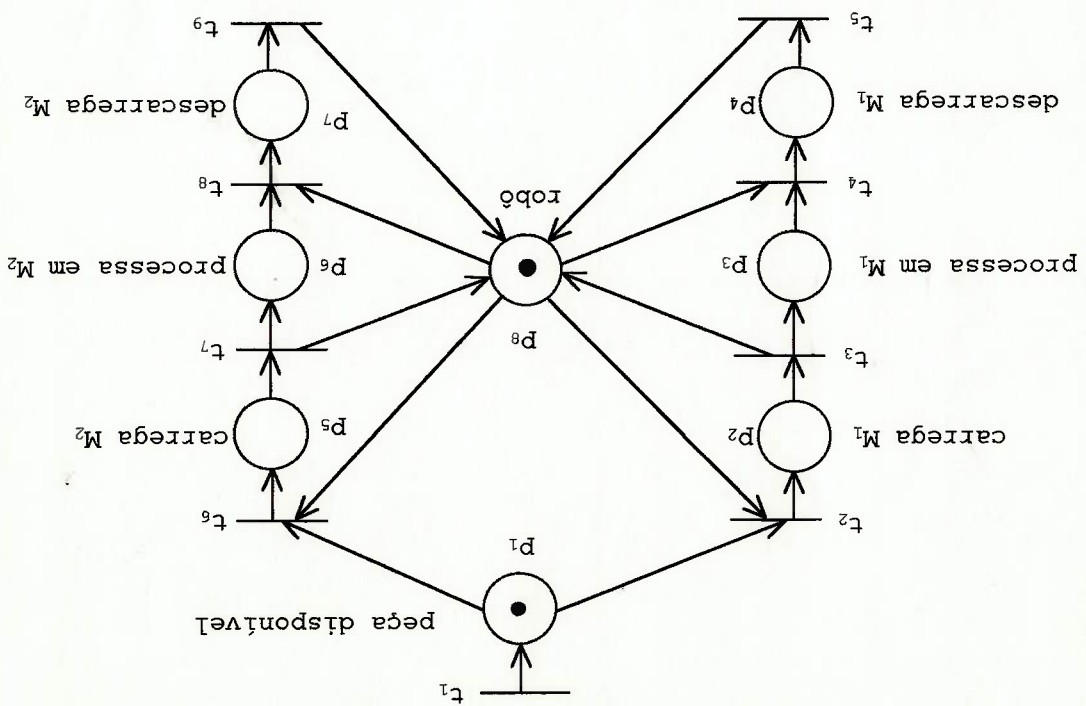
Fig. 6-1 Exemplo para a aplicação da RDPAM

Uma primeira abordagem para a Rdp correspondente ao sistema ilustrado na Fig. 6-1 seria a seguinte

- t₁: Chegada de peça para processamento
- t₂: Carregamento da máquina M₁
- t₃: Início do processamento da peça
- t₄: Descarregamento da máquina M₁
- t₅: Saída da peça processada
- t₆: Carregamento da máquina M₂
- t₇: Início do processamento da peça
- t₈: Descarregamento da máquina M₂
- t₉: Saída da peça processada
- P₁: Peça disponível em M_p

Descrição das transições e lugares:

Fig. 6-2 Modelo em Rdf do sistema da Fig. 6-1



Em relação ao modelo anterior foram incorporados alguns arcos cujo peso está relacionado com a marcação dos lugares MQ1 e MQ2 que representam a máquina M_1 e M_2 indistinguíveis, respectivamente. Assim, se a máquina M_1 (M_2) não pode processar mais peças o robô não poderá mais carregar a máquina M_1 (M_2). Se o robô já estiver segurando a peça para carregar uma das máquinas e esta ficar indisponível, o robô colocará a peça no magazine de retorno R. Do magazine R a

Veamos uma abordagem envolvendo a aplicação de RDPAM ao mesmo sistema apresentado anteriormente considerando que tanto a máquina M_1 quanto a máquina M_2 podem parar por algum motivo tal como para troca de algum componente ou falha de algum dispositivo da máquina. A

Com este modelo o controle do sistema não tem nenhuma informação a respeito do estado dos equipamentos. Ele parte do princípio que estão funcionando adequadamente e estão executando suas tarefas sem problemas.

- p_2 : Robô carregando máquina M_1
- p_3 : Máquina M_1 trabalhando a peça
- p_4 : Robô descarregando a peça da máquina M_1
- p_5 : Robô carregando máquina M_2
- p_6 : Máquina M_2 trabalhando a peça
- p_7 : Robô descarregando a peça da máquina M_2
- p_8 : Robô livre

peça pode voltar para ser processada posteriormente. Os lugares MF1 e MF2 representam as máquinas M₁ e M₂, respectivamente, operando normalmente.

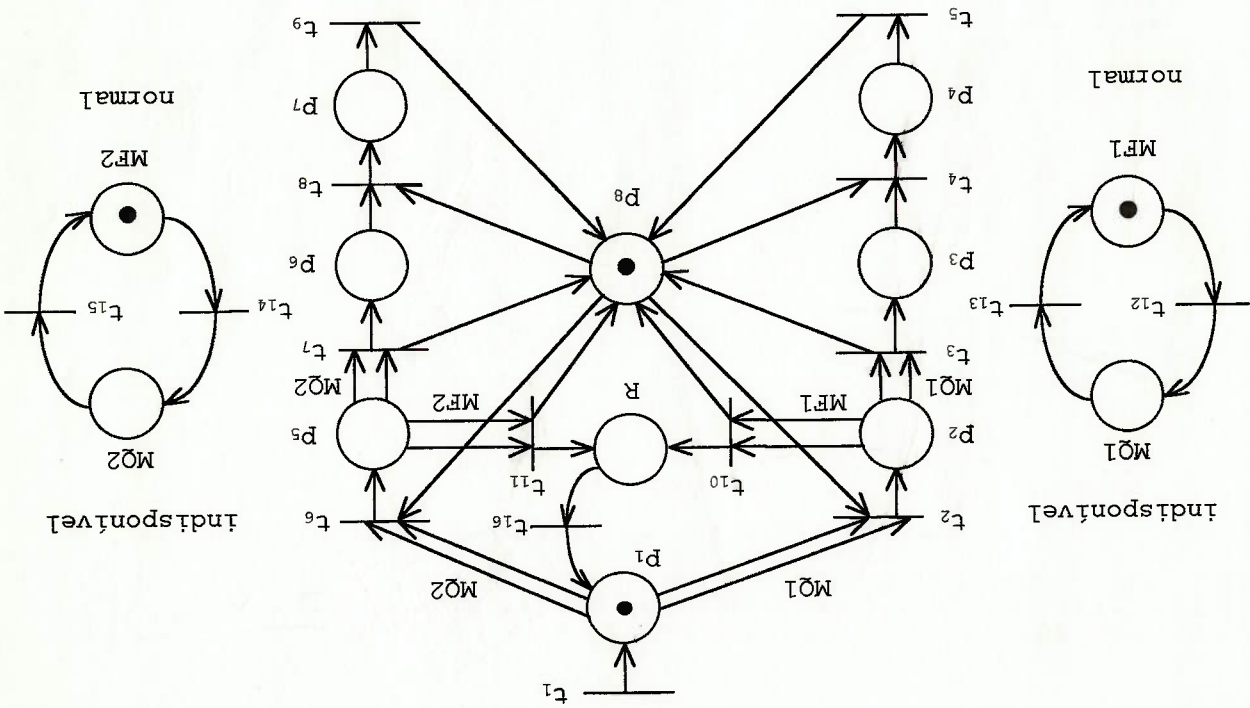


Fig. 6-3 Modelo em RdPAM do sistema da Fig. 6-1

A descrição das transições e lugares para o modelo em RdPAM do sistema fica da seguinte forma:

- t₁: Chegada de peça para processamento
- t₂: Carregamento da máquina M₁
- t₃: Início do processamento da peça
- t₄: Descarregamento da máquina M₁
- t₅: Saída da peça processada
- t₆: Carregamento da máquina M₂

- t₇: Início do processamento da peça
- t₈: Descarregamento da máquina M₂
- t₉: Saída da peça processada
- t₁₀: Transferência da peça que iria para a máquina M₁ para o magazine de retorno R
- t₁₁: Transferência da peça que iria para a máquina M₂ para o magazine de retorno R
- t₁₂: Máquina M₁ passa a não operar adequadamente
- t₁₃: Máquina M₁ passa a operar normalmente
- t₁₄: Máquina M₂ passa a não operar adequadamente
- t₁₅: Máquina M₂ passa a operar normalmente
- t₁₆: Volta da peça para o magazine de entrada M_E
- F₁: Peça disponível em M_E
- p₂: Robô carregando máquina M₁
- p₃: Máquina M₁ trabalhando a peça
- p₄: Robô descarregando a peça da máquina M₁
- p₅: Robô carregando máquina M₂
- p₆: Máquina M₂ trabalhando a peça
- p₇: Robô descarregando a peça da máquina M₂
- p₈: Robô livre
- R: Peça devolvida ao magazine de retorno
- MQ1: Máquina M₁ inoperante
- MQ2: Máquina M₂ inoperante
- MF1: Máquina M₁ operando normalmente
- MF2: Máquina M₂ operando normalmente

A linha de processamento C consiste de 18 estágios e as peças em C são deslocados a cada 12 minutos. Depois do último estágio as peças chegam a saída de C.

Quando uma peça chega na saída de B_1 , o robô R_1 transfere-a para a linha de processamento C. Mas R_1 não começa esta operação enquanto existir uma peça na entrada de C porque a capacidade da entrada de C é 1 (un).

Uma peça é carregada na máquina A_1 e é processada por 46 minutos, esta peça, então, é passada para a máquina B_1 onde é processada por mais 46 minutos e colocada na saída de B_1 . Se ainda houver uma peça na saída de B_1 , a máquina B_1 manterá a peça que estiver carregando mesmo que já tenha terminado seu processamento. Se ainda houver uma peça em B_1 , a máquina A_1 manterá a peça que esteja com ela, mesmo que tenha terminado seu processamento.

Este SM consiste de 5 estágios de produção denominados de A, B, C, D e E. As peças são fornecidas ao conjunto de máquinas A sempre que estas estiverem disponíveis.

Vejam agora o sistema real estudado por HASEGAWA et al. (1987) mostrado na Fig. 6-4.

As máquinas E_1 , E_2 e E_3 trabalham com lotes, processando 24 peças de uma vez em 300 minutos. As peças são carregadas do buffer S_2 pelo robô R_2 . Inicialmente 24 peças são carregadas em E_1 , as próximas 24 peças são carregadas em E_2 e as seguintes 24 peças são carregadas em E_3 , e novamente a máquina E_1 é carregada e assim sucessivamente. O processo em cada máquina se inicia quando chegam as 24 peças de um lote. As peças processadas pelas máquinas E_1 , E_2 e E_3 são descarregadas pelo robô R_2 . Depois de processado o lote, as máquinas podem receber novas peças.

A peça na saída de D é transferida para o buffer S_2 com capacidade de 24 pelo robô R_2 . Contudo, o robô não faz a transferência se S_2 estiver cheio.

A máquina D divide a peça em duas e libera a primeira parte depois de 6 minutos e a segunda depois de 13 minutos. A máquina D deve ter 1 (uma) hora de manutenção rotineira a cada 8 horas de trabalho.

As peças em S_1 são transferidas uma a uma para a entrada da máquina D pelo robô R_1 quando a entrada de D não está cheia.

O robô R_1 transfere a peça da saída de C para o buffer S_1 que tem capacidade 40. Contudo, o robô R_1 não começa a transferência enquanto S_1 está cheio de peças.

A_1 : peça sendo processada em A_1
 B_1 : peça sendo processada em B_1
 A_1B_1 : peça na saída da máquina B_1

seguir descrevemos os lugares do modelo obtido:

A Fig. 6-5 mostra o modelo em RDPAM do SM da Fig. 6-4. A

tarefas do sistema. de longa duração em comparação aos tempos das outras um acúmulo de peças em S_2 pois o processo em lote de E_1 é máquina D processa as peças acumuladas em S_1 e pode ocorrer funcionamento normal do sistema. Depois da manutenção, a acúmulo de peças em S_1 até que seja restabelecido o Como a máquina D entra em manutenção periódica, ocorre um

Fig. 6-4 Configuração do SM

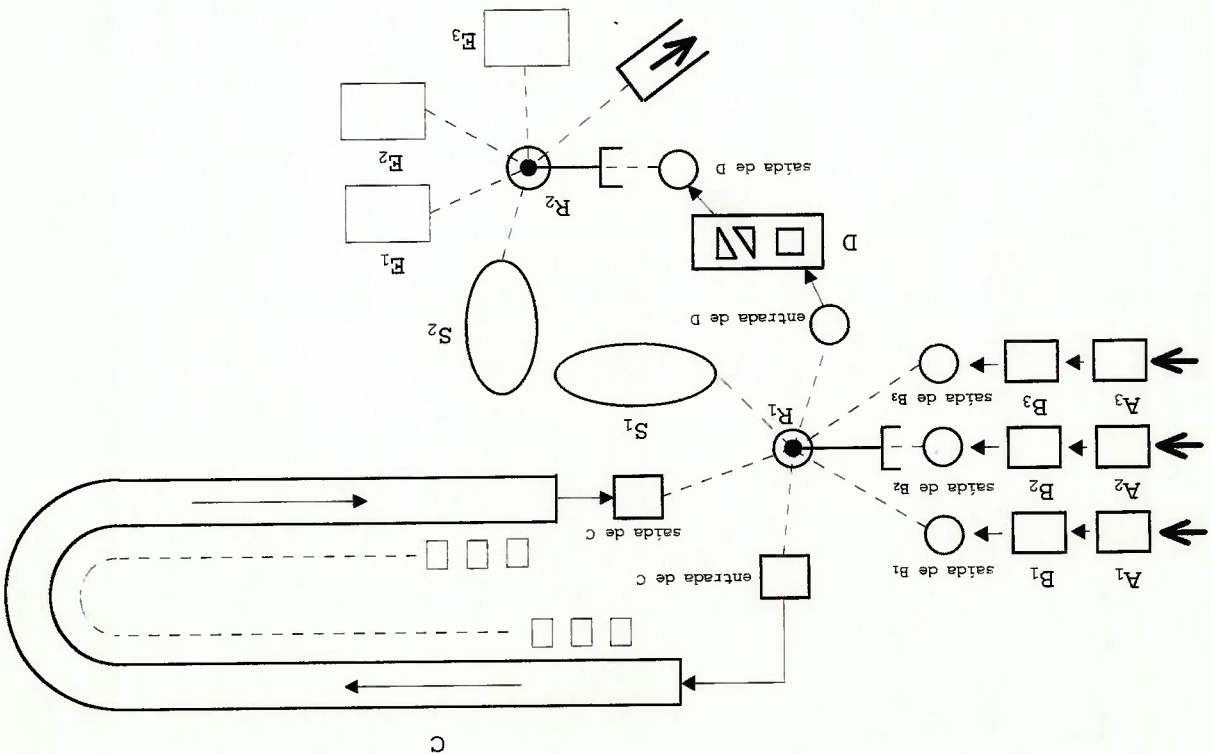
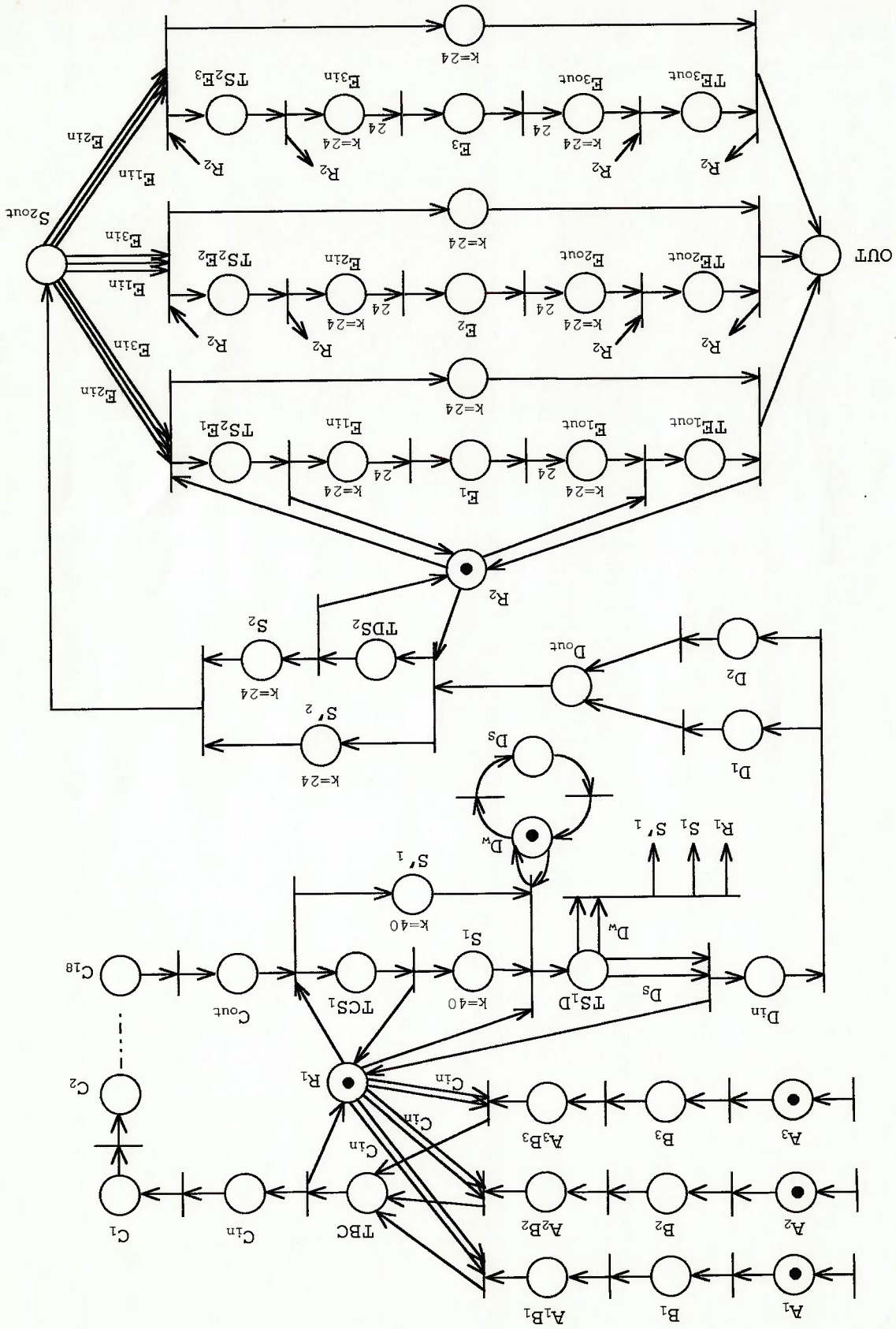


Fig. 6-5 R&PAM do SM proposto



A máquina D está em funcionamento normal enquanto há uma marca no lugar D_w (veja detalhe na manutenção periódica da máquina D na Fig. 6-6). Depois de oito horas de operação a máquina D entra em manutenção por uma hora (representado por uma marca em D_s). Enquanto a máquina D estiver indisponível e o buffer S_1 não estiver cheio ($M(S_1) > 40$),

TBC: transferência da peça para entrada da máquina C
 C_{in} : peça na entrada da máquina C
 C_1, C_2, \dots, C_{18} : peças sendo processadas nos 18 estágios de C
 C_{out} : peça na saída da máquina C
 TCS_1 : transferência da peça da máquina C para o buffer S_1
 S_1 : peças no buffer S_1
 TS_1D : transferência do buffer S_1 para entrada da máquina D
 D_{in} : peça na entrada da máquina D
 D_1 : processamento da nova peça obtida pela divisão da peça original
 D_2 : processamento da nova peça obtida pela divisão da peça original
 D_{out} : peça na saída da máquina D
 TDS_2 : transferência da peça da máquina D para o buffer S_2
 S_2 : peças no buffer S_2
 S_{2out} : peça na saída do buffer S_2
 TS_2E_1 : transferência da peça de S_2 para a entrada de E_{1in}
 E_1 : lote sendo processado na máquina E_1
 E_{1out} : peças na saída de E_1
 TE_{1out} : transferência de peças da saída de E_1 para OUT

A parada de uma ou duas máquinas E diminuiria a produção do SM e eventualmente diminuiria a utilização das outras máquinas e os buffers S_1 e S_2 poderiam ficar constantemente ocupados. Uma falha catastrófica em todas as máquinas E também). Da mesma forma o SM parará a produção.

Se a máquina C tiver uma falha catastrófica, as peças em C_{in} não serão retiradas, impedindo assim que as máquinas B continuem a produção (consequentemente as máquinas A sejam reparadas.

Suponhamos que ocorra uma falha catastrófica em alguma máquina A ou B. Se essa falha ocorrer em pelo menos uma das máquinas dos conjuntos 1, 2 e 3, a produção desse SM parará quando não houver mais peças na máquina C, no buffer S_1 , na máquina D e no buffer S_2 . No caso das máquinas E, se não houver peças suficientes para se completar um lote, essas peças permanecerão sem processamento na entrada de E até que as máquinas A ou B que tiveram a falha catastrófica

enquanto houver espaço no buffer S_1 ($M(S_1) > 40$). a liberação do robô nesta situação só poderá acontecer para S_1 liberando o robô para continuar a transferência de peças da saída de B_1 para C_{in} (TBC). A recuperação da peça e máquina D ficar indisponível, o robô R_1 devolverá a peça durante a transferência de uma peça de S_1 para D (TS_{1D}) a as máquinas A_1 , B_1 , C e o robô R_1 continuam a trabalhar. Se

faria com que o SM não produzisse mais peças, mas as outras máquinas continuariam a trabalhar até que os buffers S_1 e S_2 atinjam sua capacidade.

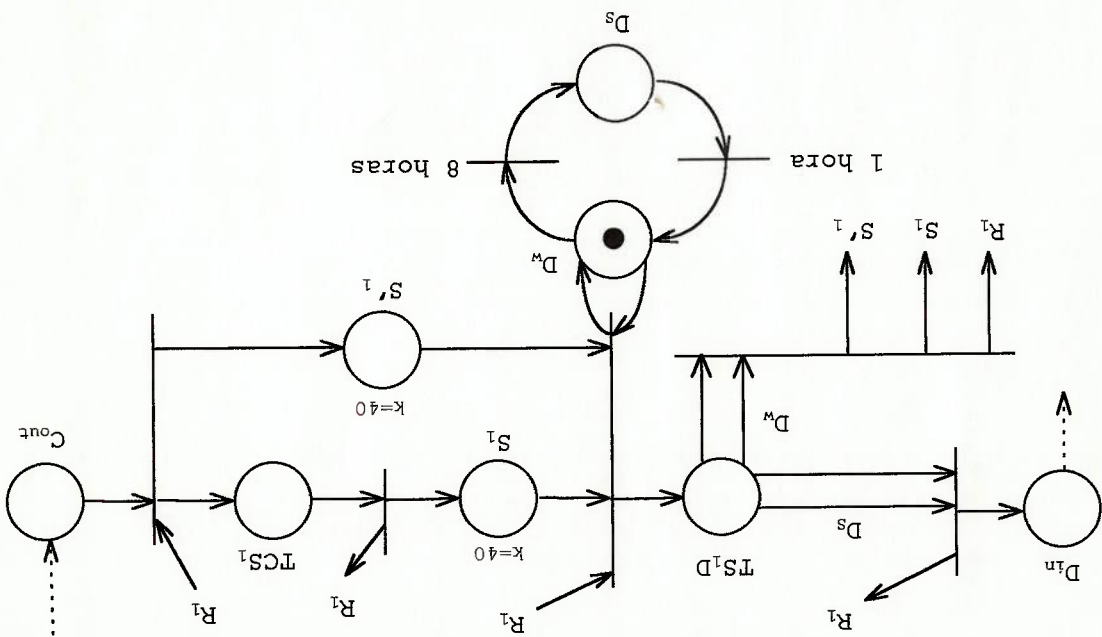


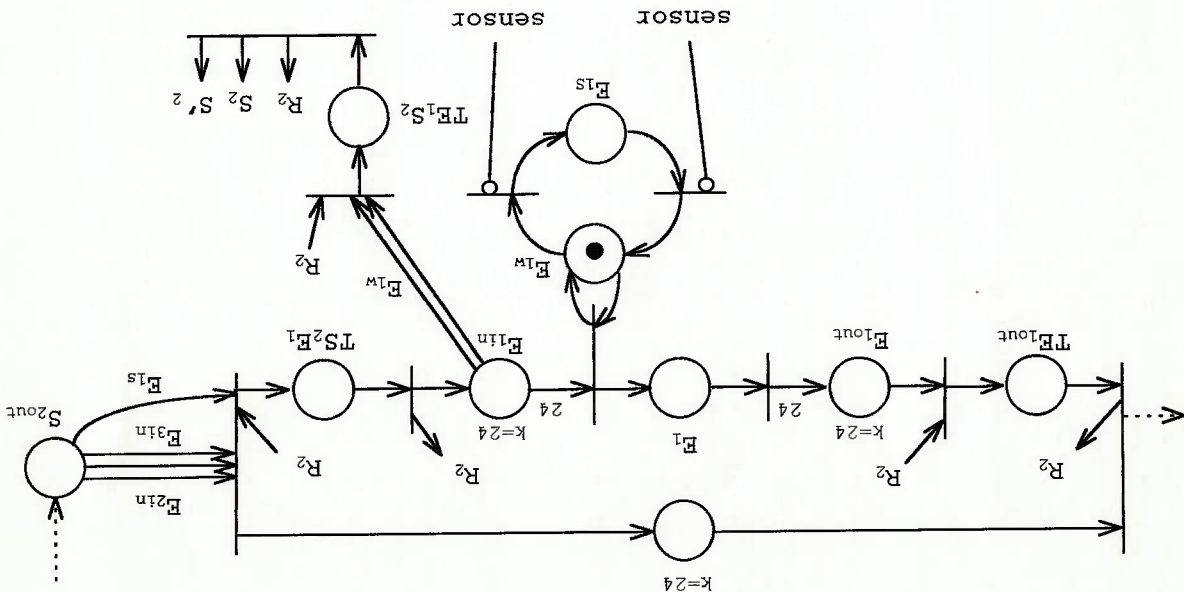
Fig. 6-6 Detalhe na manutenção periódica da máquina D

Segundo o conceito de manutenção preditiva proposto por NEPOMUCENO (1989), vamos supor que a máquina E_1 tenha sensores acoplados em pontos críticos, ou seja, pontos que podem sofrer desgaste, corrosão, fadiga, etc e venham a afetar o funcionamento normal do equipamento com uma falha evolutiva. Através destes sensores a máquina pode ser desativada e as peças que eventualmente estivessem sido carregadas são retiradas e voltam ao buffer S_2 para serem processadas em outra máquina E . A Fig. 6-7 mostra o controle necessário para a manutenção preditiva da máquina

E_1 .

Na Fig. 6-7 utilizamos os arcos inibidores apresentados por PETERSON (1981) para indicar o estado de sensores. Os arcos inibidores permitem a habilitação de transições em função da marcação de lugares específicos. Esta dependência ocorre com a definição de arcos ligados a transição e o lugar cuja marcação irá influenciar na habilitação da transição. Este arco não será direcionado e terá um pequeno círculo junto a transição. Se o lugar ligado ao arco inibidor estiver marcado, a transição ligada a ela estará desabilitada. A característica dos arcos inibidores é semelhante à dependência do peso de arcos com a marcação de lugares específicos, mas a RdPAM se mostra uma alternativa natural ao se considerar manutenções em SM.

Fig. 6-7 Manutenção preditiva da máquina E_1



6.1. Análise dos Resultados

Utilizando o conceito de RbPAM para o controle dos sistemas da Fig. 6-1 e Fig. 6-4, nota-se que a inclusão de arcos cujos pesos representam a marcação de determinados lugares reduz a necessidade de se definir novas condições (lugares) ou de se definir mais arcos. Consequentemente consegue-se uma simplificação da representação gráfica do modelo.

O uso da RbPAM para o controle de SM que envolvam manutenção periódica ou manutenção preditiva se mostra natural. Uma vez definida a manutenção periódica das máquinas pode-se gerar um controle semelhante ao usado nos casos estudados. No caso da manutenção preditiva seria necessário definir que componentes das máquinas poderiam sofrer falhas evolutivas e observá-los de modo a iniciar a manutenção no momento necessário para tal.

Pelo exposto, a utilização da marcação de lugares específicos como peso para determinados arcos facilita na sincronização da atividade do robô e as máquinas quando alguma delas deixa de funcionar. Além disso, conseguiu-se a recuperação de situações onde enquanto o robô fazia a transferência da peça do buffer SI para a máquina D, esta ficava indisponível. Com o uso da RbPAM implementou-se a recuperação da peça que o robô estava segurando.

A RdpAM também possui a mesma desvantagem de ter representações gráficas muito grandes para sistemas complexos como citado por MARTINEZ et al. (1986), pois baseia-se na modelagem através de Rdp e mais algumas características. De fato, seria necessário um estudo mais aprofundado sobre a utilização de RdpAM em sistemas que envolvam mais equipamentos que os casos estudados. Talvez usando uma abordagem Top-Down e que teria que considerar o relacionamento do peso de arcos com a marcação de lugares específicos.

Outro aspecto que poderia ser estudado é o efeito da manutenção sobre a produção do SM. No caso estudado, vemos que o tempo gasto na manutenção influenciaria na produção de outras máquinas, ou seja, dependendo da máquina parada e da máquina em produção, o SM continuará produzindo ou não.

7. CONCLUSÃO

O autor introduz RdPAM como uma ferramenta para o controle de SM considerando que estes podem ter alguns de seus elementos não disponíveis quando necessário. Para o desenvolvimento do trabalho o autor investigou:

- tópicos relativos à manutenção e falhas aplicáveis a SM
- variações de RdP e sua aplicação em SM
- propriedades da RdPAM
- aplicação de RdPAM

O estudo das variações de RdP correntemente aplicadas em SM mostrou que a ocorrência de paradas de máquinas para manutenção corretiva, periódica ou preditiva não são consideradas.

A aplicação de RdPAM em SM mostrou sua utilidade na descrição da estratégia de controle do sistema, considerando que as máquinas que o compõem precisam sofrer manutenção e são sujeitas a falhas. O estudo mostrou também que a recuperação de peças de situações de falhas abruptas ou manutenção preditiva é possível.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AGERWALA, T. Putting Petri Nets to Work. **COMPUTER**. December 1979.
- ALTA, H.; LADET, P.; MARTINEZ, J.; SILVA, M. Modelling and Validation of Complex Systems by Coloured Petri Nets: Application to a Flexible Manufacturing System. *Advances in Petri Nets 1984, Lecture Notes in Computer Science*, v.188, Spring Verlag, p.15-31, Berlin, 1985.
- CAO, X.; HO, Y. Models of Discrete Event Dynamic Systems. *IEEE Control Systems Magazine*. June 1990.
- CASSANDRAS, C. G.; RAMADGE, P. J. Toward a Control Theory for Discrete Event Systems. *IEEE Control Systems Magazine*. June 1990.
- EZPELETA, J.; MARTINEZ, J. Petri Nets as a Specification Language for Manufacturing Systems. *IMACS Modeling and Control of Technological Systems. Proceedings*. v.1, Lille, France. May 7-10, 1991.
- HASEGAWA, K.; TAKAHASHI, K.; MASUDA, R.; TANGE, K.; SUZUKI, T. Simulation of Discrete Production Systems Based on Mark Flow Graph. *System Science* v.13, n.1-2, Poland, 1987.
- HAYS, R. H.; JAIRUMAR, R. Manufacturing's Crisis: New Technologies, Obsolete Organizations. *Harvard Business Review*. September-October 1988.
- ITO, Y. A Desirable Production Structure Looking Toward The 21st Century - Anthropocentric Intelligence-Based Manufacturing. *XI Congresso Brasileiro de Engenharia e Mecânica*. São Paulo, Brasil. Dezembro 1991.
- KAMATH, M.; VISHWAMADHAM, N. Applications of Petri Net Based Models in The Modelling and Analysis of Flexible Manufacturing Systems. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p.312-317, April 1986.
- KOCHIKAR, V. P.; NARENDRAN, T. T. Modelling Automated Manufacturing Systems Using a Modification of Coloured Petri Nets. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, v.9, n.3, p.181-189, 1992.
- MARSAN, M. A. Stochastic Petri Nets: An Elementary Introduction. *Advances in Petri Nets 1989, Lecture Notes in Computer Science*, v.424, Spring Verlag, p.1-29, 1990.

- MARTINEZ, J.; ALTA, H.; SILVA, M. Petri Nets for the Specification of FMSs. Modelling and Design of Flexible Manufacturing Systems. Amsterdam, p.389-406, 1986.
- MORIYA, Y.; OKA, Y.; WATANABE, H. A Theory of Evaluation Applied to Human-Environment Systems. J. Therm Biol, v.18, n.5-6, p.443-447, 1993.
- MURATA, T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. Proceedings of the IEEE, v.77, n.4, April 1989.
- NEPOMUCENO, L. X. Técnicas de Manutenção Preditiva. v.1, 1989.
- PETERSON, J. L. Petri Net Theory and the Modeling of Systems. Prentice Hall, 1981.
- REISIG, W. Petri Nets - An Introduction. FATCS Monographs on Theoretical Computer Science, Spring-Verlag, 1985.
- VALETTE, R. Nets in Production Systems. Lecture Notes in Computer Science, v.255, Spring-Verlag, September 1986.
- VALK, R. Self-Modifying Nets, a Natural Extension of Petri Nets. Lecture Notes in Computer Science, v.62, Spring-Verlag, p.464-476, 1978.
- KALKUNTE, M. V.; SARIN, S. C.; WILHELM, W. E. Flexible Manufacturing Systems: A review of Modelling Approaches for Design, Justification and Operation. Flexible Manufacturing Systems: Methods and Studies, 1986.