COBEM 99
XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica
15th Brazilian Congress of Mechanical Engineering
22 - 26 de Novembro de 1999 / November 22 - 26, 1999 Águas de Lindóia, São Paulo,

REDES F-MFG (FUNCTIONAL MARK FLOW GRAPH) E SUA APLICAÇÃO NO PROJETO DE SISTEMAS ANTROPOCÊNTRICOS

Cristina Toshie Motohashi Matsusaki cristm@usp.br
Paulo Eigi Miyagi pemiyagi@usp.br
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo, SP, 05508-900

Resumo. *Este trabalho introduz uma formalização algébrica do F-MFG (Functional Mark Flow Graph) efetiva para a análise e simulação computacional de modelos de sistemas antropocêntricos de produção, onde são enfocadas a interação e a interface do elemento humano com o sistema produtivo. Abordando os sistemas antropocêntricos como uma classe de sistemas a eventos discretos. O F-MFG que é uma ferramenta baseada nas redes de Petri, comprova seu potencial para detalhar as ações e estados do sistema.*
O F-MFG, em conjunto com a Metodologia PFS/MFG (Production Flow Schema/ Mark Flow Graph), estabelece um procedimento eficiente para o projeto de sistemas antropocêntricos, tornando concisa a modelagem e a posterior avaliação estrutural e comportamental do sistema.

Palavras-chave: *Sistemas produtivos, Sistemas antropocêntricos, Redes de Petri, MFG.*

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas artificiais são sistemas concebidos, implementados e operados pelo homem e com o objetivo de atender às necessidades do homem. Estes sistemas, desenvolvidos e mantidos pelo homem, são classificados como sistemas antropocêntricos [Camarinha-Matos 1996] [Santos Fo. 1998]. Exemplos deles são: sistemas de saúde (hospitais, consultórios, etc.), edifícios inteligentes, sistemas balanceados de manufatura, sistemas de transporte, etc.

O desenvolvimento ou mesmo a manutenção de tais sistemas envolvem tarefas que não são triviais. Em função do porte, dinâmica, indeterminismo, estrutura e forma de operação existem muitos problemas principalmente para a compreensão, representação, controle, manutenção, etc. Estas tarefas envolvem profissionais e conhecimentos de diversas áreas, e são baseadas não somente em técnicas formais mas muitas vezes na experiência pessoais.

Neste contexto, diversos trabalhos têm sido conduzidos para o estudo dos sistemas antropocêntricos, principalmente quando vistos como sistemas dinâmicos a eventos discretos (SED) [Cao 1990]. E dentre os trabalhos existentes, a metodologia PFS/MFG (Production Flow Schema / Mark Flow Graph) de modelagem, análise e controle [Miyagi 1996] é uma das que oferece um tratamento claro e específico para a concepção e desenvolvimento destes sistemas. Esta metodologia é derivada da teoria de redes de Petri [Reisig 1985] e explora o poder de representação do PFS e do MFG, para descrever o sistema em diferentes níveis de abstração.

Apesar de ser possível a representação de sistemas (desde que caracterizados como SEDs), o MFG de um sistema complexo e/ou de grande porte pode se tornar pouco legível, pois esta representação é mais adequada para detalhamento das ações do sistema. O processo de modularização no MFG Funcional (ou Functional MFG, F-MFG) [Hasegawa 1985] soluciona este problema melhorando a visualização do modelo e a sua compreensão.

O F-MFG, sendo uma modificação do MFG básico [Hasegawa 1984], possui elementos estruturais, por exemplo: "box" agrupador e "box" desagrupador, que podem ser expandidos em grafos com elementos do MFG básico. Consequentemente propriedades herdadas do MFG básico são mantidas no F-MFG. No entanto, apesar de sua aplicabilidade evidente e já confirmada por diversos trabalhos anteriores (por exemplo: [Hasegawa 1988], [Masuda 1981], [Miyagi 1993], [Kagohara 1994]), ainda não existe uma formalização algébrica do F-MFG. Assim, as ferramentas computacionais de auxílio à modelagem e análise de sistemas que utilizam o F-MFG são baseadas em procedimentos computacionais de interpretação do grafo e execução das regras de disparo do MFG básico, não explorando as características do F-MFG.

A álgebra que formaliza o F-MFG é fundamental para validar analiticamente os modelos F-MFG e para o desenvolvimento de ferramentas para análise dos modelos. Assim como em casos semelhantes das extensões de redes de Petri propostas, como as redes Coloridas [Jensen 1990], esta formalização possibilita também o desenvolvimento de novas técnicas de análise e projeto de sistemas.

Do exposto, o objetivo principal do presente trabalho é o estudo da formalização algébrica do F-MFG e através desta abordagem, proposição da modelagem e análise de sistemas antropocêntricos utilizando-se a metodologia PFS/MFG com F-MFG.

2. EQUAÇÃO DE ESTADOS DO MFG BÁSICO

Elementos Estruturais. Os elementos estruturais do MFG são: "boxes", transições e arcos de conexão. O MFG básico torna-se uma rede de Petri C/E [Reisig 1985] se os arcos de saída e os "gates" forem desconsiderados.

O MFG é um grafo bipartido, descrito por uma tripla N=(B, E, H) onde:

- B é o conjunto de "boxes" (ou condições) b_j : B= { b_1, …, b_j, … } $j \geq 1; j \in N$
- E é o conjunto de transições (eventos) e_i : E= { e_1, …, e_i, … } $i \geq 1; j \in N$
- B e E são conjuntos disjuntos
- $H:(BxE) \cup (ExB) \rightarrow N$ representa os arcos que conectam "boxes" e transições.

Matriz de Incidência. Na matriz de incidência $\mathbf{A} = A^+ - A^-$, o elemento a_{ij} representa a existência ou não da conexão entre o "box" b_j e a transição e_i.

A^+ : $a_{ij} = 0$ se não existe conexão entre os elementos
$a_{ij} = +1$ se b_j é pós-condição de e_i
($b_j \in e_i\bullet$, onde $e_i\bullet$ é o conjunto das pós-condições de e_i)

A^- : $a_{ij} = 0$ se não existe conexão entre elementos
$a_{ij} = +1$ se b_j é pré-condição de e_i
($b_j \in \bullet e_i$, onde $\bullet e_i$ é o conjunto das pré-condições de e_i)

Não são permitidos "self-loops", isto é, transições onde $e_i\bullet \cap \bullet e_i = \emptyset$.

No MFG, o número de arcos entre dois elementos é no máximo igual a um.

Através da matriz de incidência pode-se identificar algumas relações interessantes entre eventos (transições). Dois eventos genéricos $\mathbf{e_r}$ e $\mathbf{e_s}$ podem:

- ser independentes se $\forall j$, $(v_r \otimes v_s)|_j=0$;
- estar em contato se $\exists j$ / $(v_r \otimes v_s)|_j= -1$;
- estar em conflito se $\exists j$ / $(v_r \otimes v_s)|_j= +1$;

onde: $\otimes$ = produto direto entre vetores, por exemplo:$[a_1\ \ a_2] \otimes [b_1\ \ b_2] = [a_1.b_1\ \ a_2.b_2]$
v_r = linha r de A (vetor que contém as pré-condições e pós-condições de e_r).
v_s = linha s de A (vetor que contém as pré-condições e pós-condições de e_s).
j = índice dos elementos do vetor resultante de $(v_r \otimes v_s)$

Vetor Marcação. Os elementos do vetor de marcação **M** representam o número de marcas em cada "box".

$M_l= [m_{l1}, m_{l2}, \ldots, m_{lj}, \ldots]^T$; $l \in N$

A marcação representa o estado do sistema modelado. Assim $\mathbf{M_l}$ é o l-ésimo estado do sistema e $\mathbf{M_{l+1}}$ é o seu próximo estado. $\mathbf{M_0}$ é a marcação inicial.

O MFG é um grafo seguro ("safe") [Murata 1989] pois permite apenas uma marca por vez em cada "box".

Um subconjunto de **B** formado pelos "boxes" marcados num determinado estado global da rede é chamado de "case" (**cs**). Entretanto pela analogia associada e sem prejuízo do formalismo, este texto trata "cases" e marcações de modo indistinto.

Regras de Habilitação de Transição. Uma transição **e** está habilitada em um dado case **cs** se ambas as afirmações abaixo forem verdadeiras:

1) todas as pré-condições de **e** estão marcadas
2) nenhuma das pós-condições de **e** está marcada.

Assim, $(\bullet e \subseteq cs) \wedge (e\bullet \cap cs = \emptyset) \Leftrightarrow$ e está habilitada (2.1)

Uma forma algébrica de verificar quais as transições habilitadas é a seguinte:

Para cada linha **r** da matriz **A**:

$(M_l^T \otimes v_r^- = v_r^-) \wedge (M_l^T \otimes v_r^+ = \text{vetor } 0) \Leftrightarrow e_r$ está habilitada (2.1')

Onde : "vetor 0" é um vetor com a mesma dimensão de **M,** preenchido de zeros.
v_r^- é a linha r de A^- ($v_{r\,j}^-=1$ se b_j é pré-condição de e_i, se não, $v_{r\,j}^-=0$).
v_r^+ é a linha r de A^+ ($v_{r\,j}^+=1$ se b_j é pós-condição de e_i, se não, $v_{r+\,j}^-=0$).

Vetor de Disparo. As transições habilitadas podem ser independentes ou estar em conflito entre si. A transição habilitada independente de todas as outras transições pertence ao vetor de disparo **F**. O conflito entre transições habilitadas é resolvido por alguma lógica ou regras preestabelecidas, definindo as transições disparáveis, que irão compor o vetor **F**.

F: $f_i = 0$ se a transição $\mathbf{e_i}$ não é disparável
$f_i = 1$ se a transição $\mathbf{e_i}$ é disparável

Equação de Estados. O comportamento dinâmico do sistema é representado pela evolução da marcação do grafo, resultante do disparo das transições.

Uma vez definido o vetor de disparo **F**, as transições que compõem este vetor disparam, seguindo as regras abaixo, para cada transição:

1) retira-se as marcas de todas as suas pré-condições;
2) coloca-se uma marca em todas as suas pós-condições.

A alteração na marcação é a evolução no estado do sistema, e o estado seguinte do sistema $\mathbf{M_{l+1}}$ é conhecido quando o estado atual $\mathbf{M_l}$ e a matriz de incidência **A** são dados e o vetor de disparo **F** é definido.

A equação de estados do MFG é então definida da seguinte forma:

$M_{l+1} = M_l + A^{+T} * F - A^{-T} * F$ (2.2)

Substituindo $A= A^{+T} - A^{-T}$, fica:

$M_{l+1} = M_l + A^T * F$ (2.2')

3. EQUAÇÃO DE ESTADOS DO MFG FUNCIONAL

O F-MFG possui, além dos elementos estruturais básicos, os “boxes” funcionais, que podem ser interpretados como “macros” (do conceito utilizado em engenharia de software), e que foram concebidos para representar funcionalidades em sistemas de manufatura, como paletização, montagem, despaletização, desmontagem, empacotamento, combinação, etc.

Os “boxes” funcionais, que são: múltiplo (M), agrupador (G) e dispersor (D), têm regras de habilitação e procedimentos de disparo mais complexos do que um “box” simples (S).

“Boxes” Funcionais. A transição que precede o “box” funcional é chamada de “input-transition” t_{in} (o “box” funcional é uma pós-condição de t_{in}). A transição de saída do “box” funcional é chamada de “output-transition” t_{out} (o “box” funcional é uma pré-condição de t_{out}).

A capacidade máxima (número máximo de marcas) do “box” funcional é **c**.

As características dos “boxes” funcionais alteram as regras de habilitação e de disparo das transições às quais estão conectados, impondo-lhes regras adicionais de habilitação e de disparo.

Parametrização.

A Tabela 3.1 resume as regras adicionais de habilitação e de disparo relacionadas aos “boxes” funcionais, onde O número de marcas no “box” funcional é **n**.

Tabela 3.1: Regras de habilitação e de disparo dos “boxes” funcionais.

Tipo do “box”		S	M	G	D
condições necessárias para habilitar a transição	t_{in}	n=0	n<c	n<c	n=0
	t_{out}	n=1	n≥1	n=c	n≥1
marcação após o disparo da transição	t_{in}	1	n+1	n+1	c
	t_{out}	0	n-1	0	n-1

As condições necessárias para habilitar as transições podem ser condensadas utilizando-se parâmetros (par^+, par^-, $fpar^+$, $fpar^-$). Assim, a condição necessária de habilitação é:

$n < par^+$ para “input-transitions”;

$n \geq par^-$ para “output-transition”.

Parametrizando de forma similar as regras adicionais de disparo, a marcação do “box” funcional após o disparo da transição é:

$n \leftarrow n + fpar^+$ para disparo das “input-transitions”;

$n \leftarrow n - fpar^-$ para disparo das “output-transitions”.

Tabela 3.2: Parâmetros de habilitação e de disparo dos “boxes” funcionais.

tipo do “box”		S	M	G	D
capacidade máxima		1	c	c	c
parâmetro de habilitação	par^+	1	c	c	1
	par^-	1	1	c	1
parâmetro de disparo	$fpar^+$	1	1	1	c
	$fpar^-$	1	1	c	1

Os valores que estes parâmetros podem assumir, de acordo com o tipo do “box”-funcional, estão resumidos na Tabela 3.2.

Considera-se **C**, o vetor de capacidades dos “boxes”, onde o elemento c_j é a capacidade máxima do “box” funcional b_j.

Considera-se $\mathbf{Par}^+$ e $\mathbf{Par}^-$, os vetores dos parâmetros de habilitação da transição de entrada e de saída respectivamente dos “boxes”, onde o elemento par^+_j e par^-_j assumem os valores 1 ou c_j conforme o tipo do “box” funcional b_j.

Define-se $\mathbf{Fpar}^+$ e $\mathbf{Fpar}^-$ como os vetores dos parâmetros de disparo** da transição de entrada e de saída respectivamente dos “boxes”; onde $fpar^+_j$ e $fpar^-_j$ assumem valores 1 ou c_j, conforme Tabela 3.2.

A dimensão destes vetores é igual ao número de “boxes” funcionais no grafo.

Função de Normalização da Marcação. Para que as regras de habilitação possam ser verificadas algebricamente no F-MFG, introduz-se uma função de normalização da marcação, com base na capacidade máxima do “box”-funcional. Esta função específica para o cálculo do vetor de disparo do grafo F-MFG é definida por:

$$|M_l|^+_j = \text{sign}(M_{lj} - Par^+_j) \qquad (3.1)$$

$$|M_l|^-_j = \text{sign}(M_{lj} - Par^-_j) \qquad (3.2)$$

onde sign(x)=0, x<0; e sign(x)=1, x≥0.

No MFG, para verificar se uma transição está habilitada ou não, verifica-se a marcação dos “boxes” da sua entrada e a marcação dos “boxes” da sua saída. No caso do MFG original, onde no máximo uma marca é permitida em cada “box” e os arcos têm todos pesos unitários, a marcação do “box” é uma variável lógica que representa a manutenção ou a não manutenção da condição. Mas no caso do F-MFG, que comporta várias marcas em um único “box”, a marcação é uma variável numérica, que já não reflete mais a manutenção ou não da condição. Então, para que uma transição seja habilitada e disparada é necessário considerar esta informação da marcação atual. Assim, sua marcação ($m_{lj} = c_j$) normalizada pela equação (3.2) é “1” ($|m_{lj}|^- = 1$). Desta forma, o vetor marcação normalizada é composta por “1” e “0”, indicando claramente a manutenção ou não das condições necessárias para a ocorrência do evento.

A organização e a parametrização realizada no item anterior permite a utilização das mesmas equações (3.1) e (3.2) para normalizar a marcação de qualquer tipo de “box” funcional.

Regras de Habilitação. Os passos para verificar se uma transição ($\mathbf{e_r}$) está habilitada são:

1) calcular a marcação normalizada da pré-condição, $|M_l|^+$
2) calcular a marcação normalizada da pós-condição, $|M_l|^-$
3) comparar as marcações normalizadas com os vetores de pré-condições e pós-condições da transição.

O passo 3) é realizado aplicando-se a expressão abaixo, que é uma variação de (2.1’). Assim, temos:

$$(|M_l|^{+T} \otimes v_r^+ = \text{vetor } 0) \wedge (|M_l|^{-\,T} \otimes v_r^- = v_r^-) \Leftrightarrow e_r \text{ está habilitada} \qquad (3.3)$$

Função de Normalização dos Pesos dos Arcos. As regras adicionais de disparo das transições conectadas aos “boxes” funcionais é refletida na matriz de incidência, para a obtenção do próximo estado do sistema.

A função de normalização dos pesos dos arcos modifica a matriz de incidência A e é definida por:

$$|A|^+ = [v_r^+ \otimes Fpar^+]$$

$$|A|^- = [v_r^- \otimes Fpar^-]$$

$$|A| = |A|^+ - |A|^-$$

Dado um par transição-”box” funcional (e_i, b_j) no grafo, é possível verificar se existe uma conexão entre eles através do elemento a_{ij} da matriz de incidência. Caso os elementos estejam conectados por um arco, o disparo da transição acarreta mudança na marcação do “box” funcional.

A matriz de incidência é composta por {-1, 0, +1} representando a existência ou não de uma conexão entre um par transição-”box” no grafo. Aplicando-se a Função de Normalização dos Pesos dos Arcos na matriz de incidência, ela incorpora a informação de qual será a variação da marcação dos “boxes” após o disparo da transição. Esta variação, que era unitária no MFG original, agora no F-MFG depende do tipo do “box”-funcional, e está parametrizada nos vetores $Fpar^+$ e $Fpar^-$.

Equação de Estado. Uma vez definido o vetor de disparo **F**, a próxima marcação no F-MFG é obtida pela seguinte equação de estado, que é uma variação de (2.2):

$$M_{l+1} = M_l+(|A|^{+T}*F) - (|A|^{-T}*F) \qquad (3.4)$$

$$M_{l+1} = M_l + |A|^{T}*F \qquad (3.4')$$

4. EQUAÇÃO DE ESTADOS DE GRAFOS COM "GATES"

O "gate" é um elemento do MFG que pode ser interpretado como monitor de informações, adicionando restrições na habilitação das transições. A origem do sinal do "gate" pode ser interno (a partir de um "box" do grafo) ou externo (gerado por um elemento que não pertence ao grafo). Em ambos os casos, o "gate" influencia na habilitação da transição ao qual está conectado, mas o estado da origem do sinal do "gate" não é influenciado pelo disparo ou não da transição.

Apesar da relevância do "gate", os formalismos do MFG publicados até o presente desconsideram ou omitem detalhes da definição formal deste e sua influência na dinâmica do grafo. Assim, introduz-se o conceito de pseudo-"box", uma interpretação do "gate" externo, para que estes também sejam explicitamente representados na equação de estado.

Pseudo-"Boxes". Uma transição num grafo MFG com "gates" externos está habilitada quando todas as seguintes condições de habilitação estiverem satisfeitas:

1) todas as pré-condições estão marcadas
2) nenhuma pós-condição está marcada
3) todos os "gates" habilitadores têm sinal =1 (estão habilitando o disparo da transição)
4) todos os "gates" inibidores têm sinal =0 (não estão inibindo o disparo da transição)

Os sinais de "gates" externos habilitadores, que têm origem em elementos externos, podem ser considerados como originados de um pseudo-"box" marcado, no caso da regra 3). Analogamente, na regra 4), o "gate" inibidor pode ser considerado como oriundo de um pseudo-"box" vazio (sem marcas).

Apesar dos conceitos envolvidos serem totalmente distintos, do ponto de vista da habilitação do disparo de transições, o pseudo-"box" marcado (e o "gate" habilitador) pode ser interpretado como pré-condição da transição. O pseudo-"box" vazio (e o "gate" inibidor) pode ser interpretado como pós-condição da transição.

Consequentemente, o sinal de "gate" externo pode ser representado por pseudo-"boxes", arcos e marcas. Incluindo os pseudo-"boxes" no conjunto de "boxes" B e considerando-os no vetor de marcação e na matriz de incidência, pode-se identificar as transições habilitadas de forma similar às descritas para F-MFG sem "gates".

Vetor Marcação. Os pseudo-"boxes" são também considerados no vetor marcação e assim o novo vetor marcação M fica:

$$\mathsf{M}^{T}=[M^{T}\ M'^{T}]$$

onde, M '= marcação dos pseudo-"boxes" = $[pb_1, \ldots, pb_j, \ldots]$ $\qquad j\geq 1;\ j\in N$

A marcação dos pseudo-"boxes" não é alterada com o disparo de transições. A alteração é de fato, definida pelo estado do elemento externo ao grafo.

Matriz de Incidência. Na nova matriz de incidência $\mathcal{A}$, são adicionadas colunas correspondentes aos pseudo-"boxes". Assim os "gates" habilitadores aparecem como pré-condições e os "gates" inibidores, como pós-condições. Assim $\mathcal{A}$ é composta pela matriz A e A', cujos elementos a'_{ij} representam a existência ou não de conexão entre o pseudo-"box" pb_j e a transição e_i.

$$\mathcal{A} =[A\ A']$$

$a'_{ij} = -1$ se pb_j é pré-condição de e_i

$a'_{ij} = +1$ se pb_j é pós condição de e_i

$a'_{ij} = 0$ se pb_j não é conectado a e_I

Parâmetros do Pseudo-"box". Os parâmetros de habilitação e de disparo dos pseudo-"boxes" são resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros de habilitação e de disparo dos pseudo-"boxes" (pb).

tipo do "box"		pb
capacidade máxima		1
parâmetro de habilitação	par^+	1
	par^-	1
parâmetro de disparo	$fpar^+$	0
	$fpar^-$	0

Regras de Habilitação. Com a inclusão dos "gates" externos nas equações, na forma de pseudo-"boxes" e arcos, a expressão (3.3) é redefinida para aplicação na verificação de transições habilitadas.

$$(|M_l|^+ \otimes v_r^+ = \text{vetor } 0) \wedge (|M_l|^- \otimes v_r^- = v_r) \Leftrightarrow e_r \text{ está habilitada} \qquad (4.1)$$

Vetor de Disparo. Uma vez identificadas as transições habilitadas, deve-se definir o vetor de disparo para se obter o próximo estado através da equação de estado.

Para obter o vetor de disparo **F** basta resolver o conflito entre transições, quando existir, através de mecanismos determinados previamente, como por exemplo um conjunto de regras de decisão. As demais transições habilitadas, que são eventos independentes entre si fazem parte do vetor de disparo.

Equação de Estado. A equação de estados para o F-MFG com "gates" externos é uma versão de (3.4'), que fica:

$$M_{l+1} = M_l + (|A|^{+T} * f) - (|A|^{-T} * f) \qquad (4.2)$$

Observação sobre os "Gates" Internos. Para a representação dos "gates" internos, utiliza-se pseudo-"boxes", cuja marcação é a imagem do "box" origem do sinal. Assim, toda a sua representação em matrizes e vetores fica idêntica a um "gate" externo.

5. ALGORITMO PARA CÁLCULO DO PRÓXIMO ESTADO

Utilizando-se as equações apresentadas nos itens anteriores, define-se um algoritmo para cálculos dos próximos estados do sistema. Este algoritmo é efetivo para ferramentas computadorizadas de simulação.

A necessidade deste algoritmo deve-se a um fato herdado das redes de Petri: não existe uma expressão algébrica que gere como resultado diretamente o vetor de disparo **F** e assim a análise por simulação é imprescindível para qualquer estudo mais detalhado da dinâmica do grafo.

Dados Iniciais. São os dados necessários, que devem ser fornecidos inicialmente.

- matriz das pré-condições A^+ (n x m)
- matriz das pós-condições A^- (n x m)
- vetor marcação inicial M_0 (m x 1)
- vetor capacidades dos "boxes" C (m x 1)

Constantes. São dados calculados a partir dos dados iniciais, e que são constantes no decorrer do processo de obtenção do próximo estado do sistema.

- vetores de parâmetros de habilitação Par^+ (m x 1) e Par^- (m x 1)
- vetores de parâmetros de disparo $Fpar^+$ (m x 1) e $Fpar^-$ (m x 1)
- matriz normalizada das pré-condições $|A|^+$ (n x m)

- matriz normalizada das pós-condições $|A|^-$ (n x m)
- transições em conflito, em contato, ou independentes

Algoritmo. Este é um algoritmo para obter uma seqüência de estados do sistema.

1) Calcular as constantes (Par^+, Par^- $Fpar^+$,$Fpar^-$, $|A|^+$, $|A|^-$, transições em conflito, em contato, ou independentes)
2) estado atual = estado inicial
3) obter o vetor das transições habilitadas
4) resolver os conflitos para obter o vetor das transições a disparar
5) obter a próxima marcação
6) estado atual = próxima marcação
7) se a condição de parada ainda não foi atingida, então voltar ao passo 3).

Observações. A condição de parada pode ser por exemplo :

- um certo número de iterações;
- a repetição sucessiva de um estado, indicando "deadlock" ou término da seqüência;
- o atingir de um estado pré estabelecido.

Para a obtenção do vetor de transições habilitadas no passo 3), são necessários passos intermediários:

3.1) obter os vetores de marcação normalizados

3.2) verificar as regras de habilitação de pós e pré-condições para todas as transições.

O conflito entre transições pode ser resolvido por diversos meios, por exemplo:prioridade de disparo, ordem definida, interpretador de regras, sistema especialista, aleatoriamente, etc.

7. OBSERVAÇÕES FINAIS

Este trabalho introduz uma formalização algébrica do F-MFG, que permite a utilização de equações para se obter o próximo estado do sistema modelado. Estas equações podem então ser traduzidas em um algoritmo bem definido, facilitando a execução da operação através de sistemas computacionais. Assim elimina-se a ambiguidade na implementação de sistemas computacionais para simulação de sistemas baseados em F-MFG, que até então dependia da interpretação dada a termos tais como "eventos instantâneos", "próximo estado", etc.

A parametrização dos "boxes"-funcionais do F-MFG permite utilizar sempre a mesma equação de estados, mesmo que se acrescentem novos tipos de "boxes"-funcionais. Isto é, novos tipos de "boxes"-funcionais podem ser introduzidos através da extração das suas características em parâmetros, e assim a equação utilizada não necessita ser modificada. Isto significa que pode-se utilizar o mesmo algoritmo para o próximo estado de um MFG, já que a equação utilizada é a mesma.

Foi realizado um estudo de caso, onde uma linha de montagem (parte de um sistema antropocêntrico de produção de um fabricante de circuitos elétricos [Hasegawa 1997]) foi modelada através da metodologia MFG/PFS com F-MFG. Partindo da especificação do sistema, obtém-se o modelo PFS do fluxo principal do sistema, composto por estágios de produção e "buffers", no nível mais alto de abstração do sistema. Em seguida, são acrescidos ao modelo os operadores e os estágios em que eles participam da produção. Na etapa seguinte de modelagem cada um dos estágios é detalhado sucessivamente, resultando em subsistemas representados pelo F-MFG. Estes modelos F-MFG especificam as etapas que compõem o estágio de produção e determinam o relacionamento do operador com o processo e também definem os intertravamentos. Cada um dos F-MFG é caracterizado pela sua representação algébrica. O desenvolvimento completo dos modelos e suas representações algébricas estão expostas em [Matsusaki 1998].

Avaliando-se este estudo de caso e os estudos relacionados com o desenvolvimento de outros sistemas e outras interpretações para o PFS/MFG, verifica-se que um modelo obtido pela Metodologia PFS/MFG com o F-MFG demonstra várias vantagens, quando comparado ao modelo obtido pelo procedimento de modelagem utilizando-se apenas a técnica do MFG, onde o modelo é obtido apenas em um passo, imediatamente no nível detalhado:

- Melhor legibilidade do modelo,
- Agilidade na manutenção e atualização dos modelos,
- Menor retrabalho no decorrer das etapas de modelagem. Isto é, exige-se do projetista uma certa experiência para identificar os elementos estruturais de forma que o modelo (grafo) resultante seja adequado para representar as características que se deseja analisar do sistema. No entanto, a abordagem por abstração em níveis hierárquicos funcionais utilizada no PFS/MFG é natural para o homem e verifica-se que a investigação inicial para aprofundar o conhecimento do sistema nas primeiras etapas do processo de modelagem é efetiva no resultado final da modelagem, reduzindo assim os retrabalhos.
- Representação algébrica mais sucinta (concisa). Por exemplo, no estudo de caso considerado, o grafo do modelo obtido utilizando-se apenas MFG possui cerca de 330 transições, 333 "boxes" e 15 "gates" e assim, a sua matriz de incidência possui cerca de 330 linhas e 348 colunas. Em termos de simulação computacional, o tratamento de matrizes numéricas de tais dimensões é possível, mas é uma sobrecarga desnecessária quando observa-se que, utilizando a Metodologia PFS/MFG com o F-MFG, o maior grafo a ser considerado possui dimensão de 6 linhas por 9.

Os estudos desenvolvidos confirmam que o F-MFG, através da descrição gráfica e explícita das relações de causa e efeito, é efetivo para representar adequadamente a interação do elemento humano com os sistemas, que numa abordagem antropocêntrica é um elemento essencial integrante do sistema produtivo. O F-MFG impõe uma definição clara de onde e como os operadores participam do sistema e para isto o projetista é "forçado"a avaliar os aspectos antropocêntricos e/ou balanceados da automação.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e FAPESP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Camarinha-Matos 1996] Camarinha-Matos, L., Afsarmanesh, H. (Eds) Balanced Automation Systems II - Implementation Challenges for Antropocentric Manufacturing, Chapman & Hall, London, 1996.

[Cao 1990] Cao, X.R.; Ho, Y.C. Models of Discrete Event Dynamics Systems, IEEE Control Systems Magazine, vol.10 , no 10, p. 69-76, 1990.

[Hasegawa 1984] Hasegawa, K. et al. Proposal of MFG for Discrete System Control, Transactions of SICE, vol.20, no2, p. 122-129, Tokyo, 1984.

[Hasegawa 1985] Hasegawa, K.; Takahashi, K. MFG Representation for Functional Modules of Discrete Production System, Proceedings of XI SICE System Symposium, p. 273-278, Japão, 1985.

[Hasegawa 1987] Hasegawa, K. et al Simulation of Discrete Production System Based on MFG, System Science, vol 13 no1-2, Poland, 1987.

[Hasegawa 1988] Hasegawa, K. et al. Application of the Mark Flow Graph to Represent Discrete Event Production Systems and System Control, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, vol.24 no 1 p. 69-75, 1988.

[Jensen 1990] Jensen, K. Coloured Petri Nets: A High Level Language for System Design and Analysis, Advances in Petri Nets 1990, Lecture Notes In Computer Science, vol. 483, Springer-Verlag, Berlin, 1990.

[Kagohara 1994] Kagohara, M.Y et al Automatic Generationa of Control Programs for Manufacturing Cells, IFIP Transactions on Production Management Methods, vol.B, no 19, p.335-343, North-Holand, Amsterdam, 1994.

[Matsusaki 1998] Matsusaki, C. T. M. Redes F-MFG e Sua Aplicação no Projeto de Sistemas Antropocêntricos, Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP, 1998.

[Masuda 1981] Masuda, R.; Hasegawa, K. Mark Flow Graph and Its Application to Compllex Sequential Control System, Proceedings of 13th Hawaii International Conference on System Science, p.194-203, 1981.

[Miyagi 1993] Miyagi, P.E.; Motohashi C.T.; Santos Filho, D. Mark Flow Graph e Suas Extensões para Análise e Controle de Sistemas de Manufatura, Anais em CDROM do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, ABCM, Brasília, 1993.

[Miyagi 1996] Miyagi, P.E. Controle Programável - Fundamentos do controle para sistemas a eventos discretos, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1996.

[Miyagi 1998] Miyagi, P.E.; et al. Modelagem e Análise de Sistemas Complexos com Recursos Compartilhados Através do PFS (Production Flow Schema), Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática, SBA, Uberlândia, 1998.

[Murata 1989] MURATA, T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 77, nº 4, p. 541-580, April 1989,

[Reisig 1985] Reisig, W. Petri Nets, An Introduction, EATCS, Monographs on Theoretical Computer Science, W.Brauer, G. Rozenberg, A. Salomaa (Eds.), Springer Verlag, Berlin, 1985.

[Santos Fo. 1998] Santos Fo., Diolino J. dos; Controle de sistemas antropocêntricos de produção baseados em redes de Petri interpretadas, Tese de doutorado, Escola Politécnica da USP, 1998.

F-MFG (FUNCTIONAL MARK FLOW GRAPH) AND ITS APLICATION IN ANTHROPOCENTRIC SYSTEMS DESIGN

Abstract. *This work introduces an algebraic formalization of F-MFG (Functional-Mark Flow Graph). This formalization is effective for analysis and simulation of anthropocentric production systems, due to its focus on the interaction and interface between human elements and production systems.*

When approaching anthropocentric systems as Discrete Event Dynamic Systems, the F-MFG, which is a Petri Net based technique, has been demonstrated its potential capabilities in describing detailed models of system actions and states.

The PFS/MFG Methodology (Production Flow Schema/Mark Flow Graph Methodology) combined with F-MFG establishes an efficient procedure for the design of anthropocentric systems. This procedure results in concise modeling and analysis (system structural and behavioral evaluation) processes.

Keywords. *Production systems, Anthropocentric systems, Petri Nets, MFG.*