CRISTINA TOSHIE MOTOHASHI MATSUSAKI

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

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

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica - Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

São Paulo

1998

Matsusaki, Cristina Toshie Motohashi

Redes F-MFG (Functional Mark Flow Graph) e Sua Aplicação no
Projeto de Sistemas Antropocêntricos. São Paulo, 1998.
89p

Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica

1. 2. 3. I. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecânica. II. t

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi, pela sua constante orientação, incentivo e paciência.

Ao Prof. Dr. Kouji Takahashi e ao Prof. Dr. José Reinaldo Silva, pelas discussões levantadas ao longo deste trabalho.

A todos os amigos da Mecatrônica da Escola Politécnica da USP.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento parcial deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2. SISTEMAS ANTROPOCÊNTRICOS E METODOLOGIA PFS/MFG.....	5
2.1 SISTEMAS ANTROPOCÊNTRICOS DE PRODUÇÃO	5
2.2 SISTEMAS ANTROPOCÊNTRICOS.....	6
2.3 METODOLOGIA PFS/MFG PARA PROJETO DE SISTEMAS	8
2.3.1 PFS - PRODUCTION FLOW SCHEMA	8
2.3.1.1 <i>Elementos Estruturais do PFS</i>	9
2.3.1.2 <i>Regras do PFS</i>	10
2.3.1.3 <i>Exemplo</i>	11
2.3.2 MFG - MARK FLOW GRAPH.....	12
2.3.2.1 <i>Elementos Estruturais do MFG</i>	13
2.3.2.2 <i>Dinâmica do MFG</i>	14

2.3.2.3 <i>Transição Habilitada</i>	14
2.3.2.4 <i>Regras para Disparo da Transição</i>	15
2.3.2.5 <i>Exemplo</i>	15
2.3.3 ANÁLISE DE SISTEMAS	17
3. FUNCTIONAL MARK FLOW GRAPH.....	20
3.1 EQUAÇÃO DE ESTADO DO MFG BÁSICO	20
3.1.1 <i>Elementos Estruturais</i>	20
3.1.2 <i>Matriz de Incidência</i>	21
3.1.3 <i>Vetor Marcação</i>	22
3.1.4 <i>Regras de Habilitação de Transição</i>	23
3.1.5 <i>Vetor de Disparo</i>	23
3.1.6 <i>Equação de estado</i>	24
3.2 EQUAÇÃO DE ESTADO DO MFG FUNCIONAL.....	25
3.2.1 <i>Boxes Funcionais</i>	25
3.2.2 <i>Parametrização</i>	29
3.2.3 <i>Função de Normalização da Marcação</i>	31
3.2.3 <i>Regras de Habilitação</i>	32
3.2.4 <i>Função de Normalização dos Pesos dos Arcos</i>	32
3.2.5 <i>Equação de Estado</i>	33
3.3 EQUAÇÃO DE ESTADO DE GRAFOS COM GATES.....	34
3.3.1 <i>Pseudo-Boxes</i>	34
3.3.2 <i>Vetor Marcação</i>	36
3.3.3 <i>Matriz de Incidência</i>	37
3.3.4 <i>Parâmetros do Pseudo-box</i>	37

3.3.5 Regras de Habilitação.....	38
3.3.6 Vetor de Disparo	38
3.3.7 Equação de estado	38
3.3.8 Observação sobre os Gates Internos	39
3.4 ALGORITMO PARA CÁLCULO DO PRÓXIMO ESTADO	39
3.4.1 Dados Iniciais	39
3.4.2 Constantes	40
3.4.3 O Algoritmo.....	40
3.5 EXEMPLOS DE MODELAGEM	41
3.5.1 EXEMPLO 1 - GRAFO SEM GATES	42
3.5.1.1 O sistema	42
3.5.1.2 Modelo F-MFG	43
3.5.2 EXEMPLO 2: GRAFO COM GATES	50
4. ESTUDO DE CASO	55
4.1 ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA	55
4.2 MODELAGEM DO SISTEMA ATRAVÉS DO MFG ORIGINAL	57
4.3 MODELAGEM ATRAVÉS DA METODOLOGIA PFS/MFG COM F-MFG	67
4.4 ANÁLISE DOS MODELOS	77
4.5 OUTROS TRABALHOS.....	79
5. OBSERVAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplo de um sistema produtivo.	12
Figura 2.2: Modelo PFS do sistema da Figura 2.1.....	12
Figura 3.1: Boxes funcionais e suas transições de entrada e de saída.....	26
Figura 3.6: Esquema de um sistema antropocêntrico de produção.....	42
Figura 3.7: Modelo PFS do sistema antropocêntrico de produção.	43
Figura 3.8: PFS detalhado da atividade /Processo.	43
Figura 3.9: Substituição dos elementos do PFS da Figura 3.8 pelos elementos do MFG ..	44
Figura 3.10: Modelo F-MFG do sistema antropocêntrico de produção.....	45
Figura 3.11: Estado seguinte ao grafo da Figura 3.10.....	49
Figura 3.12: Modelo MFG do sistema antropocêntrico de produção da Figura 3.6, considerando-se as intervenções externas.....	50
Figura 3.13: Nova marcação após o disparo da transição t_2 da Figura 3.12.	54
Figura 4.1: Esquema da linha de produção antropocêntrica.	56
Figura 4.2.a: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1.	60
Figura 4.2.b: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).	61
Figura 4.2.c: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).	62
Figura 4.2.d: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).	63
Figura 4.2.e: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).	64
Figura 4.2.f: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).....	65
Figura 4.2.g: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).	66
Figura 4.2.h: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).	66
Figura 4.2.i: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).	66

Figura 4.3.a: PFS do sistema da Figura 4.1.	67
Figura 4.3.b: PFS do sistema, acrescido dos operadores representados em MFG.....	68
Figura 4.4: Detalhamento da atividade /Estágio_A1.	68
Figura 4.5.a: Detalhamento da atividade /Estágio_B1 (PFS).	69
Figura 4.5.b: Detalhamento da atividade /Estágio_B1 (F-MFG).....	70
Figura 4.6.a: Detalhamento da atividade /Estágio_C (PFS).	71
Figura 4.6.b:Modelo F-MFG da Figura 4.6.a.....	72
Figura 4.7.a: Detalhamento da atividade /Estágio_D (PFS).	73
Figura 4.7.b: Detalhamento da atividade /Estágio_D (F-MFG).	74
Figura 4.8.b: Detalhamento da atividade /Estágio_E1 (F-MFG).....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Regras de habilitação e de disparo dos boxes funcionais.	29
Tabela 3.2: Parâmetros de habilitação e de disparo dos boxes funcionais.	30
Tabela 3.3: Parâmetros de habilitação e de disparo dos pseudo-boxes (pb).	37

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathbb{N}$	conjunto dos números naturais
$\cup$	união de conjuntos
$\cap$	interseção entre conjuntos
$\emptyset$	conjunto vazio
$\in$	pertence
$\subseteq$	contido
$\forall$	qualquer
$\exists$	existe
$\otimes$	produto direto entre vetores
T	transposta da matriz
B	conjunto de boxes
b_i	i-ésimo box
E	conjunto de transições
e_i	i-ésima transição
A	matriz de incidência
v_r	linha r da matriz de incidência
A^+	matriz das pós-condições
A^-	matriz das pré-condições
$\bullet e_i$	conjunto das pré-condições de e_i
$e_i \bullet$	conjunto das pós-condições de e_i
M_0	marcação inicial
M_l	l-ésima marcação ou marcação atual
M_{l+1}	l-ésima primeira marcação ou próxima marcação
F	vetor de disparo
c	número máximo de marcas no box (capacidade do box)
n	número de marcas no box

cs	case
S	box tipo simples
M	box-funcional tipo múltiplo
G	box-funcional tipo agrupador
D	box-funcional tipo desagrupador
par^+	parâmetro de habilitação da transição de entrada do box-funcional
par^-	parâmetro de habilitação da transição de saída do box-funcional
fpar^+	parâmetro de disparo da transição de entrada do box-funcional
fpar^-	parâmetro de disparo da transição de saída do box-funcional
C	vetor das capacidades dos boxes
Par^+ e Par^-	vetores dos parâmetros de habilitação da transição de entrada e de saída do box-funcional
Fpar^+ e Fpar^-	vetores dos parâmetros de disparo da transição de entrada e de saída do box-funcional
$ M_i $	marcação normalizada
$ A $	matriz incidência normalizada
pb_i	i-ésimo pseudo-box
A	matriz de incidência de um grafo com pseudo-boxes
M_i	marcação de um grafo com pseudo-boxes

RESUMO

Este trabalho introduz a formalização algébrica do F-MFG (Functional Mark Flow Graph) 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 técnica baseada nas redes de Petri, comprova ter potencial para descrever detalhadamente 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.

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, which is focused 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.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A maioria dos sistemas artificiais hoje existentes em nossa sociedade tem evidentemente como elemento principal o homem, isto é, 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 & Afsarmanesh 1995, 1996]. Exemplos deles são: sistemas de saúde (hospitais, postos, consultórios, etc.) [Miyagi M 1998], edifícios inteligentes [Arakaki 1998], sistemas balanceados de manufatura [Camarinha-Matos & Afsarmanesh 1995, 1996], 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 sua 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 em 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 [Peterson 1981] e explora o poder de representação do PFS e do MFG [Miyagi 1988] para descrever o sistema em diferentes níveis de abstração.

Apesar de ser possível a representação de qualquer sistema (desde que caracterizados como SEDs), o modelo MFG de um sistema de grande porte e complexo pode se tornar pouco legível (e eventualmente confuso), pois esta representação é mais adequada para níveis inferiores de detalhamento das ações do sistema. A introdução de boxes-funcionais no MFG Funcional (ou Functional MFG, F-MFG) [Hasegawa 1985] melhora a visualização do modelo e a sua compreensão.

O F-MFG, sendo uma modificação do MFG básico [Hasegawa 1984], possui elementos estruturais como o box agrupador e o box desagrupador, por exemplo, que podem ser expandidos em grafos com elementos do MFG básico. Conseqüentemente, características herdadas das redes de Petri tipo Condição-Evento (C/E) [Peterson 1981] pelo MFG básico são mantidas no F-MFG. No entanto, apesar de sua aplicabilidade evidente e já confirmada por diversos trabalhos anteriores (por exemplo: [Hasegawa 1982], [Hasegawa 1988], [Masuda 1981], [Miyagi 1990], [Miyagi 1993], [Kagohara et al.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.

As expressões algébricas que formalizam o F-MFG são fundamentais 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.

1.2 Objetivos

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

1.3 Organização do Trabalho

Este primeiro capítulo apresenta as motivações e os objetivos do trabalho desenvolvido.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos de projeto (modelagem e validação) de sistemas antropocêntricos, que serão utilizados como exemplo de aplicação posteriormente.

No Capítulo 3 é apresentada a formalização desenvolvida para o F-MFG.

Um estudo de caso de aplicação no projeto de sistemas antropocêntricos utilizando-se o F-MFG é ilustrado no Capítulo 4.

O Capítulo 5 sintetiza os principais tópicos deste trabalho e propõe alguns trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS ANTROPOCÊNTRICOS E METODOLOGIA PFS/MFG

2.1 Sistemas Antropocêntricos de Produção

Os sistemas produtivos, ou sistemas de produção, dentro da concepção adotada neste trabalho, envolvem todos os sistemas desenvolvidos artificialmente para atender as necessidades da sociedade. Assim, além dos sistemas de produção industrial como os sistemas de manufatura e de processos contínuos, estão incluídos também os sistemas de transporte, sistemas de comunicação, sistemas computacionais, sistemas de apoio às atividades de comércio, sistemas de saúde coletiva, etc.

Estes sistemas são criados pelo homem para gerar ou assegurar benefício ao homem e têm as suas “leis da dinâmica” criadas pelo homem ou derivadas delas. Isto é, a operação ou a evolução dinâmica de tais sistemas segue um conjunto de regras ou uma lógica criada para apresentar um comportamento desejável (embora, na prática, observa-se que nem sempre isto ocorre devido ao indeterminismo intrínseco do homem e suas ações). Assim, a evolução dos estados do sistema abordada sob determinados níveis de abstração pode ser

definida pela ocorrência de eventos discretos. Isto é, eventos que definem precisamente os estados anteriores e posteriores à sua ocorrência e que em princípio são considerados instantâneos. Estes eventos e a natureza discreta dos estados caracterizam um sistema dinâmico a eventos discretos (SED) [Cao 1990].

Assim, considera-se que os sistemas produtivos podem ser modelados e estudados através de ferramentas desenvolvidas para SED.

2.2 Sistemas Antropocêtricos

A introdução de inovações tecnológicas, seja através de produtos novos ou sistemas com novas tecnologias, tem gerado problemas comportamentais, tais como “pré-conceito” à automação de sistemas produtivos, aversão ao uso de sistemas automáticos de atendimento, etc., comprometendo a aceitação da inovação pelo usuário.

Na área de sistemas produtivos industriais, os esforços na pesquisa de novas tecnologias e suas aplicações têm sido concentradas nos aspectos técnicos da automação, seguindo a abordagem tecnocêntrica. Em contrapartida, existe a abordagem antropocêntrica, que enfoca os aspectos humanos. A abordagem antropocêntrica é a “valorização do elemento humano como parte integrante do sistema de produção, que intervém na sua evolução dinâmica, utilizando-se a capacidade destes elementos (operadores) para tomar decisões para flexibilizar e otimizar a funcionalidade destes sistemas” [Santos 1998]. Ambas as abordagens são evidentemente limitadas quando consideradas separadamente, e assim foi introduzido em [Camarinha-Matos 1996] o conceito de “sistemas de automação balanceada”, que incorpora porções adequadas não somente de ambas as abordagens, mas também de aspectos sócio-econômicos, integração/migração de sistemas já consolidados e

toda a herança do conhecimento da empresa (cultura-técnica das empresas) [Valle 1995] [Valle et al. 1995].

Uma das principais considerações da automação balanceada é a proporção adequada de automação e operação manual dos subsistemas. Em [Adlemo 96] é descrito um método de decisão de quais subsistemas e em que nível de automação estes subsistemas devem estar, tomando como parâmetros: o custo da instalação, a segurança, a flexibilidade, o tempo de processo e a qualidade do produto.

Uma vez que se inclui a intervenção do homem no processo, os aspectos humanos tais como erro de operação, condições de riscos, manutenção da qualidade do produto ou do serviço, comportamentos imprevistos, facilidade e efetividade da interface com a máquina, possibilidade de adaptação à habilidade do operador, etc. devem ser considerados no projeto de sistemas desde a sua concepção. Nesta abordagem antropocêntrica, as metodologias de “design”, técnicas de modelagem e todo o suporte para o projeto são ainda objetos de investigação e discussão.

Entretanto, do ponto de vista da apresentação de seus elementos estruturais e do comportamento dinâmico, a abordagem de SED é plenamente compatível, quando considerado a organização hierárquica dos sistemas antropocêntricos e os correspondentes níveis de abstração para assumir que os estados são discretos e os eventos são discretos e instantâneos.

Assim, baseado na grande quantidade de trabalhos que comprovam a eficiência e vantagem de teoria de Redes de Petri na modelagem, análise e controle de SED, este

trabalho introduz no próximo item a modelagem PFS/MFG (derivadas das redes de Petri) para esta classe de sistemas.

2.3 Metodologia PFS/MFG para Projeto de Sistemas

Uma tarefa fundamental no projeto de sistemas é o desenvolvimento de uma representação eficiente do sistema, isto é, a sua modelagem.

Considerando-se as características dos sistemas antropocêntricos de produção como sendo uma classe de SED, a abordagem através de Redes de Petri tem comprovadamente bons resultados. Em particular a Metodologia PFS/MFG de modelagem, análise e controle de sistemas mostra-se uma ferramenta adequada ao estudo de sistemas antropocêntricos por possuir meios de explicitar as relações hierárquicas e as intervenções do homem no sistema [Santos 1998].

A Metodologia PFS/MFG utiliza métodos e conceitos consolidados na área de projeto de software, como abordagem top-down, técnicas de refinamento, reutilização, prototipagem, etc. e baseia-se em dois tipos de redes: o ¹“PFS” e o MFG, que são versões da redes de Petri, apropriadas para aplicação em diferentes níveis de modelagem, análise e controle de SED.

2.3.1 PFS - Production Flow Schema

No desenvolvimento de modelos de sistemas produtivos, é natural a sua abordagem através de refinamentos sucessivos, top-down, dada a sua forma hierárquia de organização

¹ O PFS de fato é uma técnica baseada na interpretação de uma rede/grafos tipo canal-agência [Reisig 1992].

do sistema. Assim, os eventos do SED identificam um certo tipo de atividade que inclui vários outros eventos e estados, organizados hierarquicamente; isto é, estes eventos devem ser tratados como macro-eventos.

Neste contexto, o PFS (“Production Flow Schema”) é a técnica desenvolvida originalmente em [Miyagi 1988] para sistematizar e facilitar a modelagem por redes. O PFS é uma classe das redes canal-agência [Reisig 1992], que modelam o sistema a nível conceitual, identificando apenas os principais elementos do sistema e suas relações em um nível de abstração relativamente alto.

Por exemplo, na primeira etapa da modelagem de um sistema, divide-se o sistema em um pequeno número de partes discretas, pois a identificação destas partes deve facilitar a compreensão do sistema. Estas partes são divididas em componentes passivos do sistema, representados por círculos, e componentes ativos, representados por retângulos. Os componentes são conectados por arcos orientados, que designam as relações entre os componentes no sistema.

2.3.1.1 Elementos Estruturais do PFS

Um SED pode ser caracterizado com base no fluxo de itens (“coisas”, materiais, pessoas, informação, etc.) no sistema e, desta forma, qualquer sistema produtivo pode ser decomposto em dois elementos básicos:

1. Elementos ativos - Atividades: capazes de realizar ações, modificações nos itens.
2. Elementos passivos - Distribuidores: não realizam transformação, mas são capazes de armazenar e distribuir os itens.

As relações entre estes elementos são representadas por arcos orientados.

O grafo (diagrama) resultante da representação do fluxo de itens em um sistema produtivo composto pelos elementos acima é chamado de PFS.

Note que no PFS não existe o conceito de marcação ou marcas, isto é, não existe a representação explícita da evolução dinâmica.

As interpretações (inscrições na rede) são simples descrições dos elementos do sistema. As inscrições nos distribuidores descrevem quais itens são armazenados nestes elementos. As inscrições nas atividades indicam quando e como ocorrem estas alterações nos itens.

Assim, as redes PFS mostram explicitamente os componentes que formam o sistema e quais relações existem entre cada uma delas.

2.3.1.2 Regras do PFS

Um PFS é definido por:

- Atividades: representadas por um bloco delimitado por dois colchetes ([])
- Distribuidores: representados por círculos (O)
- Arcos orientados das atividades aos distribuidores ([] $\rightarrow$ O)
- Arcos orientados dos distribuidores às atividades (O $\rightarrow$ [])
- Inscrições em linguagem natural ou formal nos distribuidores e atividades.

Para o uso apropriado do PFS deve-se considerar o seguinte:

- Cada distribuidor representa um componente passivo do sistema capaz de armazenar, permanecer em certos estados e tornar visíveis os itens.

- Cada atividade representa um componente ativo do sistema que é responsável pela produção, transporte e modificação dos itens.
- Arcos orientados indicam uma conexão lógica e/ou física e/ou direitos de acessos.

Um arco nunca representa um componente do sistema, mas uma relação entre os componentes.

2.3.1.3 Exemplo

Como exemplo, apresenta-se os passos iniciais da modelagem de um sistema antropocêntrico de produção, utilizando-se o PFS. A Figura 2.1 mostra uma linha de processamento de material composta por:

- uma máquina de processamento (o torno);
- um buffer de entrada de material;
- um buffer de saída de material;
- um robô para carregar e descarregar a máquina.

O modelo PFS correspondente está na Figura 2.2.

Figura 2.1: Exemplo de um sistema produtivo.

Figura 2.2: Modelo PFS do sistema da Figura 2.1.

2.3.2 MFG - Mark Flow Graph

A Metodologia PFS/MFG está baseada no procedimento de refinamento gradativo do PFS, substituindo-se uma atividade ou um distribuidor por uma rede (PFS ou MFG, ou uma híbrida PFS/MFG com elementos de ambos os tipos de rede).

2.3.2.1 Elementos Estruturais do MFG

O MFG [Hasegawa 1982] é composto pelos seguintes elementos estruturais:

1. Box: indica uma condição e é representado por um bloco quadrado.
2. Transição: indica um evento e é representada por uma barra vertical.
3. Arco Orientado: conecta boxes e transições para indicar a relação entre uma condição e os pré e pós-eventos que o definem. É representado por uma seta.
4. Marca: indica a manutenção de uma condição e é representada por um ponto negro no interior do box correspondente à condição mantida.
5. Porta ou “gate”: habilita ou inibe a ocorrência dos eventos correspondentes às transições. Os gates podem ser habilitadores, representados por um arco terminado em um círculo negro, ou inibidores, representados por um arco terminado em um círculo branco. Quanto à origem do sinal do gate, os gates podem ser classificados em internos, cujos sinais originam de um box do grafo, ou externos, cujos sinais provêm de um ente externo ao grafo. O sinal do gate é binário: “1” ou “0”. O gate habilitador habilita a transição à qual está conectada quando o seu sinal for “1”. Quando o sinal do gate inibidor for “1”, a transição conectada a este gate é inibida.
6. Arco de sinal de saída: envia um sinal binário do box para um dispositivo externo ao grafo e é representada por uma linha conectando o box de origem ao dispositivo.

Os boxes e as transições são conectados pelos arcos orientados, de forma intercalada.

Não existe um número máximo de arcos de entrada ou saída de boxes ou transições, mas, para um dado par de transição e box ou um par de transição e origem do sinal externo, pode existir apenas um arco entre estes elementos.

2.3.2.2 Dinâmica do MFG

A disposição das marcas no grafo define uma marcação. A marcação atual do grafo representa o estado em que o sistema se encontra.

A marcação inicial é o arranjo inicial das marcas. Na marcação inicial é permitido no máximo uma marca em cada box. Se a marcação inicial não contiver nenhuma marca, é denominada de marcação inicial zero ou nula.

A evolução dinâmica do sistema é caracterizada pela alteração nos estados, causada pela ocorrência de eventos. Para que isto seja representado no MFG, são definidas as regras de habilitação e de disparo das transições.

2.3.2.3 Transição Habilitada

Uma transição está habilitada para disparo se as seguintes condições são todas satisfeitas:

- Não existe box com marcas no lado de saída.
- Não existe box sem marcas no lado de entrada.
- Não existe gate habilitador interno que esteja no estado de desabilitação.
- Não existe gate inibidor interno que esteja no estado de inibição.

Uma transição que está habilitada para disparo é chamada de transição habilitada, caso contrário é chamada de transição desabilitada.

2.3.2.4 Regras para Disparo da Transição

Para que ocorra o disparo da transição habilitada é necessário que obedeça a outras duas condições, que a caracteriza como transição disparável:

- Todas as portas habilitadoras externas estão no estado habilitado.
- Todas as portas inibidoras externas estão no estado desabilitado (isto é, não estão inibindo).

Se uma transição é disparável então ocorre o seu disparo de forma imediata e instantânea (supondo que não exista ²concorrência ou ³atraso de tempo).

O disparo de uma transição retira as marcas de todos os boxes de entrada e coloca marcas em todos os boxes de saída.

2.3.2.5 Exemplo

A Figura 2.3 apresenta o modelo MFG da atividade de processo do sistema da Figura 2.1.

² Concorrência: duas ou mais transições habilitadas que têm o mesmo box de saída estão mutuamente em concorrência e este box é um box-conflito de saída; analogamente, transições habilitadas com o mesmo box de entrada estão em concorrência e o box é um box-conflito de entrada [Hasegawa 1985]. O disparo de uma das transições em concorrência desabilita a(s) outra(s).

³ Atraso de tempo: o conceito de “tempo”, existente em sistemas reais, é introduzido no MFG através de box temporizado e transição temporizada [Hasegawa 1987].

Figura 2.3: Modelo MFG da atividade /Processo da Figura 2.2.

Quando a transição T1 da Figura 2.3 dispara, representando o início da atividade “Processo”, a marcação do grafo altera-se para a configuração ilustrada na Figura 2.4.

Figura 2.4 : Marcação após o disparo da transição T1.

2.3.3 Análise de Sistemas Discretos

Uma tarefa também fundamental no projeto de sistemas é a análise do sistema. ‘Análise é a atividade realizada para buscar informações a respeito do sistema, através de um modelo do sistema’ [Arata 1994]. É baseado nas informações obtidas na análise que se pode avaliar um sistema: verificar se este atende às especificações de operação, validá-lo e propor modificações.

As técnicas utilizadas para a realização da análise, quanto à maneira de se chegar aos resultados, podem ser classificadas em analíticas ou de simulação:

- 1) Técnicas analíticas: Utilizando um modelo matemático, que representa as relações entre os componentes do sistema e a interação deste com o ambiente, procuram deduzir características e propriedades do comportamento do sistema através de técnicas desenvolvidas para lidar com o formalismo do modelo [Woei 1997] [Monnerat 1998].
- 2) Técnicas de simulação: a partir das relações estabelecidas num modelo, reproduz o comportamento do sistema e, a partir da observação deste, obtém-se conclusões sobre o sistema por meios de inferência indutiva.

Quanto ao tipo de informação que a análise pode fornecer, pode-se classificá-la em qualitativa e quantitativa.

- 1) Análise qualitativa: fornece informações de cunho qualitativo; por exemplo: informações sobre o comportamento dinâmico geral do sistema (estabilidade, tipo de estabilidade, identificação de ciclos de comportamento, etc.), informações sobre

estados ou condições atingidas pelo sistema (“deadlock” - estado onde o sistema fica inerte, travado, não tendo como evoluir, muitas vezes devido a uma coordenação inadequada das atividades), relações de estados alcançáveis, de estados mutuamente exclusivos, e outras.

- 2) Análise quantitativa: fornece características mensuráveis numericamente; por exemplo: tempo para realização de um processo, taxa de produção média de uma célula de produção, etc.

Os resultados obtidos numa análise são influenciados pelo modelo utilizado. A análise quantitativa só é possível se o modelo comportar características mensuráveis. A técnica analítica em geral exige um maior grau de abstração do sistema para que seja possível a manipulação do modelo matemático. A técnica por simulação pode apresentar dados mais precisos sobre o sistema, mas os resultados obtidos são geralmente válidos somente para aquela configuração simulada.

A análise de sistemas antropocêntricos de produção tem como objetivos:

- verificar a operação correta do sistema (validação da especificação funcional);
- verificar o desempenho do sistema (medir índices, taxas, etc.);
- otimizar uso de recursos.

As informações qualitativas e quantitativas são necessárias em diferentes etapas do projeto de um sistema, exigindo diferentes tipos e técnicas de análise e, portanto, modelos adequados para cada análise. A metodologia PFS/MFG pode gerar o modelo do sistema em diferentes níveis de abstração para diferentes fins. O benefício do uso de uma única

ferramenta de modelagem também é notada quando o mesmo modelo é utilizado posteriormente para realizar o controle/operação do sistema.

A análise através da simulação é bastante utilizada em diversas áreas, pois o modelo pode representar um sistema de maneira bastante realista (numa análise através de técnicas analíticas, o modelo pode ficar bastante simplificado para viabilizar o tratamento matemático), e também por não requerer suposições rigorosas para alguns sistemas em estudo.

No entanto, quando realiza-se a simulação computacional de um sistema modelado em redes de Petri, é necessária a adequação e introdução de uma interpretação para a efetivação das regras de disparo, principalmente se o processamento de simulação utilizado é seqüencial, pois a rede tem um comportamento dinâmico essencialmente assíncrono. Os problemas podem ser parcialmente solucionados utilizando-se computadores de processamento paralelo ou multi-tarefas, mas sempre considerando-se as particularidades do algoritmo que executa o processo de disparo das transições. Uma discussão sobre este assunto pode ser encontrado em [Miyagi 1988]. A existência de uma equação algébrica elimina as ambiguidades decorrentes do processo de simulação computacional que impõe seqüencialização de eventos paralelos.

CAPÍTULO 3

FUNCTIONAL MARK FLOW GRAPH

Este capítulo apresenta uma formalização do Functional Mark Flow Graph (F-MFG), baseado nos conceitos de redes C/E [Reisig 1985] dos quais o MFG é derivado.

Inicialmente é apresentado o MFG Básico originalmente definido em [Hasegawa 82] e, então, o MFG Funcional (F-MFG) com boxes funcionais e gates [Hasegawa 1985, 1987] é introduzido.

3.1 Equação de estado do MFG Básico

3.1.1 Elementos Estruturais

Os elementos estruturais do MFG são: boxes, transições e arcos de conexão. Os boxes representam as condições, as transições representam os eventos e os arcos direcionados representam relações entre boxes e transições.

O MFG básico torna-se uma rede de Petri C/E 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 b_j :

$$B = \{ b_1, \dots, b_j, \dots \} \quad j \geq 1; j \in \mathbb{N}$$

- E é o conjunto de transições (eventos) e_i :

$$E = \{ e_1, \dots, e_i, \dots \} \quad i \geq 1; i \in \mathbb{N}$$

- B e E são conjuntos disjuntos.
- $H: (B \times E) \cup (E \times B) \rightarrow \{0,1\}$ representa os arcos que conectam boxes e transições.

3.1.2 Matriz de Incidência

A matriz de incidência A representa a conexão entre os elementos do grafo. O elemento a_{ij} representa a existência ou não da conexão entre o box b_j e a transição e_i .

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

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 que têm pré-condições que também são pós-condições ou seja, a condição $(e_i \bullet \cap \bullet e_i = \emptyset)$ deve ser satisfeita.

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 e_r e 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 $(v_r \otimes v_s)$.

3.1.3 Vetor Marcação

Os elementos do vetor de marcação $\mathbf{M}$ representam o número de marcas em cada box.

$$\mathbf{M}_l = [m_{l1}, m_{l2}, \dots, m_{lj}, \dots]^T \quad ; l \in \mathbf{N}^+$$

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 $\mathbf{B}$ formado pelos boxes marcados num determinado estado global da rede é chamado de “case” (**cs**). Entretanto, sem prejuízo do formalismo, este texto trata cases e marcações de modo indistinto.

3.1.4 Regras de Habilitação de Transição

Uma transição **e** está habilitada em um dado case **cs** se e somente 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,

$$(\bullet e \subseteq cs) \wedge (e \bullet \cap cs = \emptyset) \Leftrightarrow e \text{ está habilitada} \quad (3.1)$$

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

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

$$(M_l^T \otimes v_r^- = v_r^-) \wedge (M_l^T \otimes v_r^+ = \text{vetor } 0) \Leftrightarrow e_r \text{ está habilitada} \quad (3.1')$$

onde :

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

3.1.5 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 deve ser resolvido por alguma política ou regras preestabelecidas, definindo as transições disparáveis que irão compor o vetor **F**.

F: $f_i = 0$ se a transição e_i não é disparável

$f_i = 1$ se a transição e_i é disparável

3.1.6 Equação de Estado

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 $\mathbf{F}$, 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 $\mathbf{A}$ são dados e o vetor de disparo $\mathbf{F}$ é definido.

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

$$\mathbf{M}_{l+1} = \mathbf{M}_l + \mathbf{A}^{+T} * \mathbf{F} - \mathbf{A}^{-T} * \mathbf{F} \quad (3.2)$$

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

$$\mathbf{M}_{l+1} = \mathbf{M}_l + \mathbf{A}^T * \mathbf{F} \quad (3.2')$$

3.2 Equação de Estado 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), que inicialmente foram concebidos para representar funcionalidade em sistemas de manufatura, como paletização, montagem, despaletização, desmontagem, empacotamento, combinação, etc.

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

A seguir, as características destes boxes funcionais são parametrizados e então é introduzida a equação de estado para o F-MFG.

3.2.1 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.

Figura 3.1: Boxes funcionais e suas transições de entrada e de saída.

1) Box Simples (S)

É o box do MFG básico. Sua capacidade máxima é 1 (Figura 3.1.a).

2) Box Múltiplo (M)

Sua transição de entrada estará habilitada se o número de marcas não atingir a capacidade máxima. A transição de saída estará habilitada se houver pelo menos uma marca no box-funcional. Uma representação com elementos do MFG básico equivalente ao box-múltiplo é ilustrada na Figura 3.2, composta por uma sucessão de c boxes.

Figura 3.2: Exemplo de grafo equivalente ao box múltiplo.

3) Box Agrupador (G)

Este box “agrupa” as c marcas que chegam uma a uma na sua entrada e “gera” uma única marca na saída. A sua transição de entrada está habilitada enquanto a capacidade c do box não foi atingida e a sua transição de saída está habilitada quando o número de marcas é igual a c . Quando a transição de saída dispara, todas as marcas no box agrupador são retiradas. A sua representação gráfica (Figura 3.1.c) procura ilustrar que a transição de entrada “vê um box múltiplo” e a transição de saída “vê um box simples”. A figura 3.3 mostra um grafo equivalente ao box agrupador. O box agrupador representa atividades onde entram vários itens e sai apenas um, como por exemplo uma atividade de montagem, uma atividade de paletização, etc.

4) Box Desagrupador (D)

Neste caso, a transição de entrada está habilitada quando não existe nenhuma marca no box-funcional. Quando a transição de entrada dispara, coloca c marcas no box-funcional. A transição de saída está habilitada se houver pelo menos uma marca no box-funcional. A

cada disparo da transição de saída, é retirada uma marca do box desagrupador. A Figura 3.4 mostra um grafo equivalente ao box desagrupador.

Figura 3.3: Exemplo de grafo equivalente ao box agrupador.

Figura 3.4: Exemplo de grafo equivalente ao box desagrupador.

3.2.2 Parametrização

A Tabela 3.1 resume as regras adicionais de habilitação e de disparo relacionadas aos boxes funcionais.

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}	$n=1$	$n \geq 1$	$n=c$	$n \geq 1$
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.

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

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

Considera-se $\mathbf{C}$, 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.

3.2.3 Função de Normalização da Marcação

Para que as regras de habilitação possam ser verificadas algebricamente no F-MFG, introduz-se uma função de ⁴normalização 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:

$$|M_l|^+_j = \text{sign}(M_{lj} - \text{Par}^+_j) \quad (3.3)$$

$$|M_l|^-_j = \text{sign}(M_{lj} - \text{Par}^-_j) \quad (3.4)$$

onde
$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

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, 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 somente a manutenção ou não da condição. Então, para verificar se as condições para que determinado evento ocorra (isto é, para que uma transição seja habilitada e disparada) é necessário extrair esta informação da marcação atual. Por exemplo, a condição representada por um box-funcional agrupador conectado à entrada de uma transição será satisfeita (“habilitando” a transição) quando a sua marcação for igual à capacidade máxima. Assim, sua marcação ($m_{lj} = c_j$) normalizada pela equação (3.4) é “1” ($|m_{lj}|^- = 1$). Desta forma, o vetor marcação normalizada é composta por “1” e

⁴ Na referência [Motohashi 1995] esta função é denominada por “Capacity Modular Function”, e em [Silva 1996] é tratada como “modularization”, mas considerando que sua tradução literal pode gerar confusão, será evitado neste texto a sua utilização.

“0”, esclarecendo novamente 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 (3.3) e (3.4) para normalizar a marcação de qualquer tipo de box-funcional.

3.2.4 Regras de Habilitação

Os passos para verificar se uma transição (e_r) está habilitada são:

- 1) Calcular a marcação normalizada da pré-condição, $|M_i|^+$.
- 2) Calcular a marcação normalizada da pós-condição, $|M_i|^-$.
- 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 (3.5), que é uma variação de (3.1').

Assim, temos:

$$(|M_i|^{+T} \otimes v_r^+ = \text{vetor } 0) \wedge (|M_i|^{-T} \otimes v_r^- = v_r^-) \Leftrightarrow e_r \text{ está habilitada} \quad (3.5)$$

3.2.5 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 ⁵função 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 de 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 de 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 $Fpar^-$.

3.2.6 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 (3.2):

$$M_{l+1} = M_l + (|A|^{+T} * F) - (|A|^{-T} * F) \quad (3.6)$$

$$M_{l+1} = M_l + |A|^{+T} * F \quad (3.6')$$

⁵ Na referência [Motohashi 1995] esta função é denominada por “Capacity Weight Function”, mas considerando que sua tradução literal pode gerar confusão, será evitado neste texto a sua utilização.

3.3 Equação de Estado do F-MFG que Inclue Gates Externos

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 em princípio o estado da origem do sinal do gate não é influenciado pelo disparo ou não da transição.

Apesar da relevância deste elemento gate, os formalismos do MFG publicados até o presente trabalho desconsideram ou omitem detalhes da definição formal destes e sua influência na dinâmica do grafo. Assim, neste item introduz-se uma abordagem para a representação explícita deste elemento nas equações dinâmicas do MFG e F-MFG.

Introduz-se a seguir o conceito de pseudo-box, uma interpretação do gate externo, para que estes gates também sejam explicitamente representados na equação de estado.

3.3.1 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 apenas da habilitação do disparo de transições, o pseudo-box marcado (e o gate habilitador) podem ser interpretados como pré-condições da transição. O pseudo-box vazio (e o gate inibidor) podem ser interpretados como pós-condições da transição.

Consequentemente, o sinal de gate externo pode ser representado por pseudo-boxes, arcos e marcas, como ilustra a Figura 3.5.

Incluindo os pseudo-boxes no conjunto de boxes B e considerando-os conseqüentemente no vetor de marcação e na matriz de incidência, pode-se identificar as transições habilitadas de forma similar às descritas acima para F-MFG sem gates.

Figura 3.5: Equivalência para o caso específico da habilitação do disparo de transições.

3.3.2 Vetor Marcação

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

$$M^T = [M^T \mid M'^T]$$

onde,

$$M' = \text{marcação dos pseudo-boxes} = [pb_1, \dots, pb_j, \dots] \quad j \geq 1; j \in N$$

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; assim, isto deve ser considerado na equação de estado do grafo.

3.3.3 Matriz de Incidência

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

$$A = [A \mid A']$$

$$a'_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{se } pb_j \text{ é pré - condição de } e_i \\ +1 & \text{se } pb_j \text{ é pós condição de } e_i \\ 0 & \text{se } pb_j \text{ não é conectado a } e_i \end{cases}$$

3.3.4 Parâmetros do Pseudo-box

Os parâmetros de habilitação e de disparo dos pseudo-boxes são resumidos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: 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

3.3.5 Regras de Habilitação

Com a inclusão dos gates externos nas equações na forma de pseudo-boxes e arcos, a expressão (3.5) que verifica a habilitação da transição é redefinida conforme apresentado abaixo:

$$(|M_l|^{+T} \otimes v_r^+ = \text{vetor } 0) \wedge (|M_l|^{-T} \otimes v_r^- = v_r) \Leftrightarrow e_r \text{ está habilitada} \quad (3.7)$$

3.3.6 Vetor de Disparo

Uma vez identificadas as transições habilitadas, deve-se definir o vetor de disparo para 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.

3.3.7 Equação de Estado

A equação de estado para o F-MFG com gates externos é uma versão de (3.6), apresentada abaixo:

$$M_{l+1} = M_l + (|A|^{+T} * f) - (|A|^{-T} * f) \quad (3.8)$$

3.3.8 Observação sobre os Gates Internos

Para a representação dos gates internos, utilizam-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.

3.4 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 é efetivo para ferramentas computadorizadas de simulação.

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

3.4.1 Dados Iniciais

São os dados necessários, que devem ser fornecidos inicialmente:

- a matriz das pré-condições, $A^+ (n \times m)$;
- a matriz das pós-condições, $A^- (n \times m)$;
- o vetor marcação inicial, $M_0 (m \times 1)$;
- o vetor capacidades dos boxes, $C (m \times 1)$.

3.4.2 Constantes

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

- os vetores de parâmetros de habilitação, $\text{Par}^+ (m \times 1)$ e $\text{Par}^- (m \times 1)$
- os vetores de parâmetros de disparo, $\text{Fpar}^+ (m \times 1)$ e $\text{Fpar}^- (m \times 1)$
- a matriz normalizada das pré-condições, $|A|^+ (n \times m)$;
- a matriz normalizada das pós-condições, $|A|^- (n \times m)$;
- as transições em conflito, em contato, ou independentes.

3.4.3 O Algoritmo

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

- Passo 1) calcular as constantes (Par^+ , Par^- , Fpar^+ , Fpar^- , $|A|^+$, $|A|^-$, transições em conflito, em contato, ou independentes);
- Passo 2) estado atual = estado inicial;
- Passo 3) obter o vetor das transições habilitadas;
- Passo 4) resolver os conflitos para obter o vetor das transições a disparar;
- Passo 5) obter a próxima marcação;
- Passo 6) estado atual = próxima marcação;
- Passo 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 sequência;
- o atingir de um estado pré estabelecido.

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

Passo 3.1) obter os vetores de marcação normalizados;

Passo 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, como por exemplo:

- prioridade de disparo;
- ordem definida;
- interpretador de regras;
- sistema especialista;
- aleatoriamente;
- etc.

3.5 Exemplos de Modelagem

Apresenta-se a seguir um exemplo de sistema antropocêntrico de produção para ilustrar a utilização do algoritmo e das equações apresentadas anteriormente.

3.5.1 Exemplo 1 - Grafo sem Gates

3.5.1.1 O sistema

A figura abaixo é o esquema de uma linha de processamento de materiais, composta por:

- 1 máquina de processamento de peças;
- 1 operador para carregamento e descarregamento de peças.

A máquina processa uma peça por vez e o operador manipula uma peça por vez também. Cada pallet contém 8 peças. Os buffers de entrada e saída comportam 5 pallets cada um. O operador carrega/descarrega as peças na/da máquina.

Figura 3.6: Esquema de um sistema antropocêntrico de produção.

3.5.1.2 Modelo F-MFG

Seguindo a Metodologia PFS/MFG, o sistema é modelado pelo procedimento descrito abaixo.

O sistema antropocêntrico de produção é dividido em elementos ativos e elementos passivos. Inicialmente, o sistema é visto como composto por uma atividade de processo (do material) e seus magazines de entrada e de saída que armazenam peças. O modelo PFS do sistema num primeiro nível de abstração é ilustrado na Figura 3.7.

Figura 3.7: Modelo PFS do sistema antropocêntrico de produção.

A atividade “Processo” é então detalhada através de um outro grafo em PFS, ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8: PFS detalhado da atividade /Processo.

Em seguida, os elementos PFS são substituídos por elementos MFG correspondentes, formando o grafo da Figura 3.9. Os elementos “dummy”, que indicam estados

intermediários, mas que podem ser omitidos para efeito de análise funcional do sistema, aparecem sombreados. Foram introduzidos os recursos “operador” e “máquina”, nos pontos onde são requisitados e onde são liberados.

Figura 3.9: Substituição dos elementos do PFS da Figura 3.8 pelos elementos do MFG.

Os elementos passivos da Figura 3.7, Buffer-in e Buffer-out, serão substituídos por boxes múltiplos. Assim, o modelo F-MFG é gerado conforme o grafo ilustrado na Figura 3.10. É suposto, pela marcação inicial, que existem inicialmente cinco pallets no magazine de entrada e os recursos, “operador” e “máquina”, estão disponíveis.

Figura 3.10: Modelo F-MFG do sistema antropocêntrico de produção.

Matriz de Incidência

A partir do grafo do modelo F-MFG da Figura 3.10, obtém-se a matriz de incidência.

$$A^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A^+ = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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

$$A = \begin{bmatrix} -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & +1 & +1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Vetor Marcação, Parâmetros de Habilitação, Parâmetros de Disparo

$$M_0 = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$$

box	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9
tipo	M	D	S	S	S	G	M	S	S

$$Par^+ = \begin{bmatrix} 5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 8 & 5 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$Par^- = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 8 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$Fpar^+ = \begin{bmatrix} 1 & 8 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$Fpar^- = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 8 & 1 & 1 & 9 \end{bmatrix}^T$$

Vetores Marcação Normalizados

$$\boxed{|M_0|^+_k = \text{sign}(M_{0k} - Par^+_k)}$$

$$(M_0 - Par^+) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -8 & -5 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$|M_0|^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$\boxed{|M_0|^-_k = \text{sign}(M_{0k} - Par^-_k)}$$

$$(M_0 - Par^-) = \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -1 & -1 & -8 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$|M_0|^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$$

Matriz de Incidência Normalizada

$$|A|^+ = \{v_r^+ \otimes Fpar^+\}$$

$$|A|^+ = \begin{bmatrix} 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$|A|^- = \{v_r^- \otimes Fpar^-\}$$

$$|A|^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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

$$|A| = \begin{bmatrix} -1 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -8 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Cálculo do Próximo Estado

Verificação das transições habilitadas:

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

$$\begin{bmatrix} |M_0|^{+T} \otimes v_1^+ \\ |M_0|^{+T} \otimes v_2^+ \\ |M_0|^{+T} \otimes v_3^+ \\ |M_0|^{+T} \otimes v_4^+ \\ |M_0|^{+T} \otimes v_5^+ \\ |M_0|^{+T} \otimes v_6^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} * \\ * \\ * \\ * \\ * \\ * \end{matrix}$$

* = transições t_1, t_2, t_4, t_5 atendem à primeira parte da regra de habilitação

$$\begin{bmatrix} |M_0|^{-T} \otimes v_1^- \\ |M_0|^{-T} \otimes v_2^- \\ |M_0|^{-T} \otimes v_3^- \\ |M_0|^{-T} \otimes v_4^- \\ |M_0|^{-T} \otimes v_5^- \\ |M_0|^{-T} \otimes v_6^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} *$$

* = transição t_1 atende à segunda parte da regra de habilitação

Transição habilitada = t_1

Resolução de conflitos: não há conflito

Vetor de disparo:

$$F_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Próximo estado:

$$M_{i+1} = M_i + |A|^T * F$$

$$M = M_0 + |A|^T * F_0$$

$$M_1 = [4 \ 8 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]$$

O novo estado do sistema é ilustrado na Figura 3.11.

Figura 3.11: Estado seguinte ao grafo da Figura 3.10.

O disparo da transição T1 indica que um pallet do buffer foi deslocado para a entrada da máquina, tornando disponíveis as 8 peças para serem carregadas na máquina. Assim, a marcação do box Buf-in diminuiu de 5 para 4, e a marcação do box Depallet alterou-se de 0 para 8. Os demais boxes permanecem com a mesma marcação, inclusive o Operador e a Máquina, que continuam disponíveis.

3.5.2 Exemplo 2: Grafo com Gates

Neste exemplo de modelagem, serão consideradas também as intervenções externas no sistema antropocêntrico de produção da Figura 3.6, como uma ordem de produção (do supervisor do sistema) ou uma parada de emergência (de algum operador).

De forma simplificada, a ordem de produção é representada por um pseudo-box marcado e conectado ao grafo por um gate habilitador. Analogamente, o sinal de parada de emergência é representado por um pseudo-box conectado por um gate inibidor. Posteriormente, num estágio mais detalhado do projeto, este sinal de parada deverá ser especificado em termos, por exemplo, do seu tratamento. Assim, o modelo detalhado em F-MFG é mostrado na Figura 3.12.

Figura 3.12: Modelo MFG do sistema antropocêntrico de produção da Figura 3.6, considerando-se as intervenções externas.

A seguir será calculado M_2 , o estado seguinte ao estado mostrado na Figura 3.12 (M_1).

Matriz de Incidência

$$A^- = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccccc} b1 & b2 & b3 & b4 & b5 & b6 & b7 & b8 & b9 & pb1 & pb2 \end{array} \\ \begin{array}{l} t1 \\ t2 \\ t3 \\ t4 \\ t5 \\ t6 \end{array} \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A^+ = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccccc} b1 & b2 & b3 & b4 & b5 & b6 & b7 & b8 & b9 & pb1 & pb2 \end{array} \\ \begin{array}{l} t1 \\ t2 \\ t3 \\ t4 \\ t5 \\ t6 \end{array} \end{array} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Vetor Marcação, Parâmetros de Habilitação, Parâmetros de Disparo

$$M_1 = \begin{bmatrix} 4 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$Par^+ = \begin{bmatrix} 5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 8 & 5 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$Par^- = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 8 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$Fpar^+ = \begin{bmatrix} 1 & 8 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$Fpar^- = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 8 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Vetores Marcação Normalizados

$$\begin{aligned} M_1 - Par^+ &= \begin{bmatrix} -1 & 7 & -1 & -1 & -1 & -8 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T \\ |M_1|^+ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_1 - Par^- &= \begin{bmatrix} 3 & 7 & -1 & -1 & -1 & -8 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T \\ |M_1|^- &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

Verificação da Habilitação das Transições

$$|M_1|^{+T} \otimes v_r^+ = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} t_2 \\ \\ t_4 \\ \\ t_6 \end{matrix}$$

$$|M_1|^{-T} \otimes v_r^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ \\ \\ \end{matrix}$$

Transição habilitada = t_2

Não há conflito.

Vetor de disparo:

$$F_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de Incidência Normalizada

$$|A|^+ = \begin{matrix} t1 \\ t2 \\ t3 \\ t4 \\ t5 \\ t6 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$|A|^- = \begin{matrix} t1 \\ t2 \\ t3 \\ t4 \\ t5 \\ t6 \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Cálculo do Próximo Estado

$$M_2 = M_1 + |A|^{+T} * f_1 - |A|^{-T} * f_1$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 4 & 7 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Figura 3.13: Nova marcação após o disparo da transição T2 da Figura 3.12.

Neste novo estado ilustrado na Figura 3.13, uma das peças está sendo carregada na máquina. Com o disparo de T2, foi retirada uma marca do box Depallet e colocada uma marca no box Load. As marcas dos boxes Operado e Máquina também foram retiradas, indicando que estes não estão mais disponíveis. Observa-se no grafo que o pseudo-box Pb1 permanece inalterado, representando a ordem de produção dada pelo supervisor, um ente externo ao grafo. Se não houvesse esta ordem de produção no estado anterior, T2 não dispararia, pois apesar de suas regras de habilitação estarem satisfeitas, a transição estaria inibida pelo sinal de gate proveniente de Pb1.

Capítulo 4

ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta um exemplo de aplicação do F-MFG em sistemas antropocêntricos de produção. Inicialmente, é apresentada a especificação geral do sistema a ser estudado e, em seguida, este sistema é modelado pela técnica do MFG originalmente proposto. Por fim, utilizando-se a metodologia PFS/MFG, este mesmo sistema é novamente modelado até a obtenção dos grafos F-MFG, considerando-se inclusive a interação com entidades externas ao modelo através dos gates externos. As equações algébricas do modelo utilizadas na simulação do sistema são também apresentadas.

Assim são evidenciadas as vantagens do F-MFG associada à metodologia PFS/MFG para o desenvolvimento de modelos mais concisos (organizados hierarquicamente), que requerem menos recursos computacionais (pela manipulação de matrizes de dimensões menores) e que são mais efetivas para análise, atualização e manutenção dos modelos.

4.1 Especificação do Sistema

A linha de produção consiste dos cinco estágios de produção A, B, C, D e E, ilustrados na Figura 4.1, que foi apresentado inicialmente em [Miyagi 1990] e é parte de um sistema

antropocêntrico de produção implementado na prática por um fabricante de circuitos integrados no Japão.

Figura 4.1: Esquema da linha de produção antropocêntrica.

Inicialmente, nos estágios A e B compostos por três pares de processos, A1B1, A2B2 e A3B3, cada uma das peças é inicialmente transportada para uma das máquinas A_i ($i=1, 2$ ou 3) e processada. Em seguida, a peça é processada na máquina B_i associada a A_i e então é colocada na saída de B_i .

Quando uma peça chega na saída de B_i , o operador O1 transfere-a para a entrada da linha C. No entanto, o operador O1 não inicia a atividade de transporte enquanto houver alguma peça na entrada de C, impedindo o descarregamento neste, pois a sua capacidade é de somente uma peça por vez. A linha C consiste de 18 etapas em série. Após a última etapa, a peça chega à saída de C, de onde é transferida para o buffer S1 pelo operador O1.

No entanto, esta tarefa não é iniciada se o buffer S1 estiver com um número de peças igual à sua capacidade máxima de 40 peças.

As peças em S1 são transferidas uma a uma para a entrada de D, pelo operador O1, enquanto a entrada de D não estiver cheia. A máquina D realiza uma transformação tecnológica em cada peça que entra, gerando duas peças em sua saída. A peça na saída de D é transportada pelo operador O2 para o buffer S2 se este ainda não tiver atingido a sua capacidade máxima de 24 peças.

No estágio E, as máquinas E1, E2 e E3 processam lotes de 24 peças por vez. As peças são carregadas uma a uma do buffer S2 para as máquinas Ei ($i=1, 2$ ou 3) pelo operador O2, sendo que E2 é carregada somente quando E1 está totalmente ocupada e E3 é carregada somente quando E1 e E2 estão cheias. O processo nas máquinas Ei inicia apenas quando o lote de 24 peças estiver completo. Terminado o processo, as peças são descarregadas uma a uma pelo operador O2. Cada máquina Ei pode aceitar novas peças somente após a saída de todas as peças por ela processadas.

4.2 Modelagem do Sistema através do MFG Original

A seguir, o sistema especificado acima é modelado utilizando-se o MFG.

Nesta técnica, a modelagem é realizada em um único nível de abstração; o modelo é obtido em apenas um passo, imediatamente no nível detalhado. Para a construção do modelo, considerou-se a linha de processamento do material, representando-se em MFG todos os detalhes da descrição apresentada na especificação do sistema.

O grafo obtido é apresentado na Figura 4.2, que se estende por sete páginas, onde:

- $A1, A2, A3$ = processamento nas máquinas $A1, A2, A3$
- $Out-A1, Out-A2, Out-A3$ = buffers de saída de $A1, A2, A3$
- $B1, B2, B3$ = processamento nas máquinas $B1, B2, B3$
- $Out-B1, Out-B2, Out-B3$ = buffers de saída de $B1, B2, B3$
- $B1 \rightarrow C, B2 \rightarrow C, B3 \rightarrow C$ = transporte de $B1, B2, B3$ para C
- $In-C$ = buffer de entrada de C
- $C1, C2, \dots C18$ = processamento em C
- $Out-C$ = buffer de saída de C
- $C \rightarrow S1$ = transporte de C para $S1$
- $S1-1, S1-2, \dots S1-40$ = buffer $S1$
- $S1 \rightarrow D$ = transporte de $S1$ para D
- $In-D$ = buffer de entrada de D
- $D1, D2$ = processamento em D
- $Out-D$ = buffer de saída de D
- $D \rightarrow S2$ = transporte de D para $S2$
- $S2-1, S2-2, \dots S2-24$ = buffer $S2$
- $O1$ = operador $O1$
- $O2$ = operador $O2$
- $Act-E1, Act-E2, Act-E3$ = seleciona a máquina Ei
- $S2 \rightarrow E1$ = transporte de $S2$ para $E1$
- $E1-1, E1-2, \dots E1-24$ = contador de peças em $E1$
- $E1in-1, E1in-2, \dots E1in-24$ = acumulador de peças em $E1$
- $E1$ = processamento em $E1$

- $E1_{out-1}, E1_{out-2}, \dots E1_{out-24}$ = desacumulador de peças em E1
- $S2 \rightarrow E2$ = transporte de S2 para E2
- $E2-1, E2-2, \dots E2-24$ = contador de peças em E2
- $E2_{in-1}, E2_{in-2}, \dots E2_{in-24}$ = acumulador de peças em E2
- E2 = processamento em E2
- $E2_{out-1}, E2_{out-2}, \dots E2_{out-24}$ = desacumulador de peças em E2
- $S2 \rightarrow E3$ = transporte de S2 para E3
- $E3-1, E3-2, \dots E3-24$ = contador de peças em E3
- $E3_{in-1}, E3_{in-2}, \dots E3_{in-24}$ = acumulador de peças em E3
- E3 = processamento em E3
- $E3_{out-1}, E3_{out-2}, \dots E3_{out-24}$ = desacumulador de peças em E3

Figura 4.2.a: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1.

Figura 4.2.c: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).

Figura 4.2.d: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).

Figura 4.2.e: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).

Figura 4.2.f: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).

Figura 4.2.g: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).

Figura 4.2.h: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).

Figura 4.2.i: Modelo MFG do sistema da Figura 4.1 (continuação).

4.3 Modelagem através da Metodologia PFS/MFG com F-MFG

O mesmo sistema especificado em 4.1 é agora modelado através da técnica formalizada no presente trabalho. As figuras 4.3 a 4.7 apresentam o modelo PFS/MFG do sistema.

Inicialmente, o fluxo principal do sistema é modelado em PFS resultando no grafo da Figura 4.3.a. Os estágios de processamento são modelados como atividades (Estágio_Ai, Estágio_Bi, Estágio_C, Estágio_D, Estágio_Ei) e os buffers são modelados como distribuidores (Out-Ai, In-C, S1, S2).

Em seguida, os operadores são acrescentados ao modelo, representando recursos utilizados pelo sistema. Pela Figura 4.3.b fica claro que o Operador 1 (descrito por O1) participa dos estágios Bi, C e D; e o Operador 2 (O2), dos estágios D e Ei.

Figura 4.3.a: PFS do sistema da Figura 4.1.

Figura 4.3.b: PFS do sistema, acrescido dos operadores representados em MFG.

Cada uma das atividades do modelo da Figura 4.3.a pode ser refinada para modelar com mais detalhes cada parte do sistema.

O detalhamento em F-MFG da atividade /Estágio_A1 é ilustrado na Figura 4.4 e, em seguida a respectiva matriz de incidência e os vetores que caracterizam os boxes funcionais, isto é, C , Par^+ , Par^- , $Fpar^+$ e $Fpar^-$ são apresentados.

Figura 4.4: Detalhamento da atividade /Estágio_A1.

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} +1 \\ -1 \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} \\
 Par^+ &= \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} \\
 Par^- &= \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} \\
 Fpar^+ &= \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} \\
 Fpar^- &= \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

No processo de refinamentos sucessivos, o elemento PFS a ser refinado é descrito por uma rede PFS (ou por uma rede híbrida, com elementos PFS e elementos F-MFG) detalhada. Então, os elementos PFS são substituídos por elementos do F-MFG adequados. Assim, a atividade /Estágio_B1 pode ser descrito pelo modelo da Figura 4.5.a, onde um elemento distribuidor Out-B1 modela o estado intermediário de uma peça que passou por B1 e está esperando para ser transportada para C.

Figura 4.5.a: Detalhamento da atividade /Estágio_B1 (PFS).

A Figura 4.5.b ilustra o detalhamento do modelo da Figura 4.5.a através da inclusão dos elementos do F-MFG. Arcos de /O1 e para /O1 explicitam a relação da atividade “Transporte B1→C” com o operador O1, e o gate externo “Pb1 In-C cheio” explicita o intertravamento com a condição do buffer de entrada de C.

Figura 4.5.b: Detalhamento da atividade /Estágio_B1 (F-MFG).

A seguir apresenta-se a matriz de incidência e outros vetores do grafo da Figura 4.5.b.

$$A = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ -1 & +1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & -1 & +1 & -1 & | & +1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & | & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 \end{bmatrix}$$

$$Par^+ = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 \end{bmatrix}$$

$$Par^{-+} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 \end{bmatrix}$$

$$Fpar^+ = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 \end{bmatrix}$$

$$Fpar^- = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 \end{bmatrix}$$

Os Estágios B2 e B3 são similares ao Estágio B1, assim como os Estágios A2 e A3 são similares ao Estágio A1; por isso, considerou-se o detalhamento destas partes desnecessário.

O modelo PFS da Figura 4.6.a descreve com mais detalhes a atividade /Estágio_C, onde um elemento distribuidor Out-C modela o estado intermediário de uma peça que foi processada em C e está esperando para ser transportada para S1.

Figura 4.6.a: Detalhamento da atividade /Estágio_C (PFS).

Os elementos PFS são substituídos por elementos F-MFG adequados para obter o grafo da Figura 4.6.b. Os 18 passos da linha C estão resumidos no box-funcional com capacidade $c=18$. Arcos de /O1 e para /O1 explicitam a relação da atividade “Transporte C→S1” com o operador O1, e o gate externo “Pb1 S1 cheio” explicita o intertravamento com a condição do buffer S1.

Figura 4.6.b: Modelo F-MFG da Figura 4.6.a.

Abaixo apresenta-se a matriz de incidência e os demais vetores do modelo da Figura 4.6.b.

$$A = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & +1 & -1 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 18 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Par^+ = \begin{bmatrix} 18 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Par^{-+} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Fpar^+ = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Fpar^- = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

A Figura 4.7.a apresenta o modelo PFS detalhado da atividade /Estágio_D, onde o elemento distribuidor In-D modela o buffer de entrada de D e o distribuidor Out-D modela o buffer de saída de D.

Figura 4.7.a: Detalhamento da atividade /Estágio_D (PFS).

O detalhamento em F-MFG da atividade /Estágio_D é ilustrado na Figura 4.7.b, e em seguida a respectiva matriz de incidência e os vetores que caracterizam os boxes funcionais, isto é, C , Par^+ , Par^- , $Fpar^+$ e $Fpar^-$ são apresentados. A transformação que gera duas peças para cada peça que entra na máquina D é representada por um box-funcional do tipo desagrupador com $c=2$.

Arcos de /O1 e /O2 e arcos para /O1 e /O2 explicitam a relação da atividade “Transporte S1→D” com o operador O1 e a atividade “Transporte D→S2” com o operador O2. Os gates externos “Pb1 In-D cheio” e “Pb2 S2 cheio” explicitam os intertravamentos com as condições dos buffers In-D e S2, respectivamente. O sinal do gate Pb1 é “1” quando In-D está cheio e tem origem no box In-D, do mesmo grafo, sendo portanto um gate interno. Mas, como “para a representação dos gates internos, utilizam-se pseudo-

boxes, cuja marcação é a imagem do box origem do sinal” (item 3.3), este sinal foi modelado como Pb1, que será marcado quando In-D estiver marcado.

Figura 4.7.b: Detalhamento da atividade /Estágio_D (F-MFG).

$$A = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & +1 & 0 \\ -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & -1 & 0 & +1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & +1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
C &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
Par^+ &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
Par^- &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
Fpar^+ &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
Fpar^- &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

A Figura 4.8.a mostra o modelo PFS detalhado da atividade /Estágio_Ei, onde os elementos distribuidores “acumula” e “desacumula” modelam o estado anterior e o estado posterior do processamento das peças.

Figura 4.8.a: Detalhamento da atividade /Estágio_E (PFS).

O detalhamento em F-MFG da atividade /Estágio_E1 é ilustrado na Figura 4.8.b, e em seguida a respectiva matriz de incidência e os vetores que caracterizam os boxes funcionais, isto é, C , Par^+ , Par^- , $Fpar^+$ e $Fpar^-$ são apresentados. As atividades correspondentes às máquinas E2 e E3 são similares à atividade /Estágio_E1, portanto seus modelos são similares ao apresentado a seguir. A lógica que controla o carregamento e descarregamento das máquinas Ei é simplificada nos dois gates (ou pseudo-boxes Pb1 e Pb2) conectados à transição de entrada desta rede. O pseudo-box Pb1 está relacionado com o intertravamento em relação à capacidade de E1; e Pb2, relacionado com a regra para a

escolha da máquina E_i a ser carregada. Os arcos de/para /O2 explicitam a relação entre as atividades de transporte com o operador O2. Considerou-se que a saída do sistema antropocêntrico de produção está sempre livre para receber uma peça pronta.

Figura 4.8.b: Detalhamento da atividade /Estágio_ E_1 (F-MFG).

$$A = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & -1 \\ -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
C &= \begin{bmatrix} 1 & 24 & 1 & 24 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
Par^+ &= \begin{bmatrix} 1 & 24 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
Par^- &= \begin{bmatrix} 1 & 24 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
Fpar^+ &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 24 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
Far^- &= \begin{bmatrix} 1 & 24 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

4.4 Análise dos Modelos

Apresentou-se os modelos do sistema de produção especificado no item 4.1, resultantes da aplicação da Técnica de Modelagem MFG (item 4.2) e da Metodologia PFS/MFG com o F-MFG (item 4.3).

No primeiro procedimento de modelagem, o modelo é obtido em apenas um passo, imediatamente no nível detalhado. Para a construção do modelo, considerou-se a linha de processamento do material, representando-se em MFG todos os detalhes da descrição apresentada na especificação do sistema. Esta abordagem “planar” dispensa qualquer exercício de abstração e reflexão sobre as funções do sistema, e assim este procedimento aparentemente simples e direto pode ser de fato relativamente trabalhoso, devido a ausência de critérios e ao retrabalho, e também propício a erros, em função do modelo ser dependente da interpretação pessoal do projetista. Estes erros são difíceis de serem detectados pois exigem o rastreamento de todo o modelo. Além disto, a correção dos erros ou mesmo uma simples alteração implica na construção de um novo modelo com novas matrizes e vetores.

No segundo procedimento de modelagem, com a metodologia PFS/MFG, é necessário que o projetista conheça o sistema para desenvolver a abstração; é exigido 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, esta abordagem por abstração em níveis hierárquicos funcionais 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, como por exemplo a redução de retrabalhos.

Mesmo após a conclusão da modelagem, um modelo obtido pela Metodologia PFS/MFG com o F-MFG demonstra várias vantagens quando comparado ao modelo obtido pelo procedimento “planar”.

A primeira delas é em relação à legibilidade do modelo. Um modelo deve sempre esclarecer as especificações funcionais, caracterizando (descrevendo) assim o comportamento dinâmico do sistema. Um dos pontos positivos do MFG é a visualização gráfica do modelo (tanto da estrutura como da dinâmica do sistema). No entanto, grafos muito extensos são de difícil compreensão (o conjunto de grafos da Figura 4.2 é evidentemente mais difícil de ser analisado e manipulado que o conjunto estruturado de grafos nas Figuras 4.3 a 4.8). Assim, o modelo que envolve grafos “planares” com muitos elementos prejudica sua função de comunicação.

A segunda vantagem é em relação a sua representação algébrica, que em grafos de grande porte também é extensa. Por exemplo, o grafo da Figura 4.2 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 se sabe que, utilizando a Metodologia PFS/MFG com o F-MFG, o maior grafo a ser considerado possui dimensão de 6 linhas por 9 colunas.

A terceira vantagem está relacionada com tarefas de atualização e manutenção do modelo. Pequenas alterações em determinadas partes do sistema implicam em revisões e alterações no modelo. A metodologia PFS/MFG com o F-MFG agiliza a remodelagem pois permite que apenas o subgrafo correspondente à parte alterada seja substituída pelo novo grafo. Esta facilidade de reutilização dos sub-modelos também pode ser explorada quando se deseja testar diferentes estratégias de controle do sistema.

4.5 Outros Trabalhos

A abordagem introduzida no presente trabalho foi desenvolvida e aperfeiçoada concomitantemente com a realização de diferentes estudos relacionados com o desenvolvimento de outros sistemas e outras interpretações para o PFS/MFG, como por exemplo os listados a seguir:

- os estudos relacionados com as macro-funções (isto é, os boxes funcionais) do MFG, suas extensões e a proposta do F-MFG foram apresentados em trabalhos publicados em co-autoria [Miyagi 1993] [Motohashi 1995];
- um estudo relacionado com a associação do PFS/MFG ao F-MFG para geração de programa de controle para sistemas de manufatura, cuja proposta é apresentada no trabalho publicado em co-autoria [Kagohara 1994];

- relacionado com a aplicação do PFS/MFG com F-MFG para especificação geral do controle da célula de fabricação instalada na Escola Politécnica da USP, os principais estados são apresentados no trabalhos em co-autoria [Motohashi 1994a, 1994b];
- relacionado com o desenvolvimento de um ambiente para treinamento em controle de sistemas a eventos discretos, onde o PFS/MFG com F-MFG é também introduzido; os trabalhos relevantes são [Motohashi 1997], [Kagohara 1995] e [Miyagi 1995].

Capítulo 5

OBSERVAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho introduz uma formalização algébrica do F-MFG. A formalização do F-MFG 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 ambigüidade 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 estado (equação 3.8 do item 3.3), 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.

A utilização de pseudo-box traz vantagens também na modelagem de sistemas através de metodologias top-down ou bottom-up, onde o sistema é subdividido em subsistemas.

Sendo o pseudo-box um elemento que representa qualquer ente externo ao sistema, ou do sub-sistema, ele poderá ser interpretado como elemento de conexão entre os sub-sistemas, sem fluxo de itens entre subsistemas. Existem diversas outras formas de se utilizar (ou interpretar) os gates e pseudo-boxes para se obter eficientemente os modelos de sistemas. Um trabalho interessante seria estudar a interpretação “recomendável” destes gates para obtenção de modelos, dentro da Metodologia PFS/MFG, no contexto de projeto de sistemas de controle.

Outro trabalho futuro é o desenvolvimento de ferramentas computacionais de auxílio ao projeto baseadas em F-MFG. Alguns itens que esta ferramenta deve incorporar são:

- Editor gráfico - Mais do que um simples editor de grafos F-MFG, este Editor deve ser uma ferramenta de auxílio à modelagem, que suporta a Metodologia PFS/MFG (isto é, hierárquico, funcional e top-down; que permita a reutilização de módulos e que possua bibliotecas de grafos adequada à área de aplicação; etc.);
- Gerador automático da matriz de incidência e demais vetores que caracterizam o(s) modelo(s);
- Análise através de técnicas analíticas (por exemplo, análise de invariantes do grafo);
- Análise por simulação (registro histórico, coleta de dados estatísticos, visualização gráfica da evolução dos estados, etc.).

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.

Assim, os principais pontos positivos de se utilizar esta ferramenta de apoio ao projeto, baseada em PFS/MFG com F-MFG, são:

- explicitar os pontos de intervenção do homem no sistema produtivo;
- poder dimensionar o grau de liberdade de decisão ou autonomia deste homem (operador), verificando o impacto desta liberdade no sistema.

Um exemplo de aplicação desta ferramenta computacional, além do projeto do sistema em si, seria por exemplo a geração de programas de treinamento do elemento humano (operador) redimensionando o grau de sua atuação dentro do sistema, de acordo com o amadurecimento do operador ou de acordo com as alterações nas exigências de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ARAKAKI 1993] ARAKAKI, J. *Análise de Sistemas de Manufatura Através da Metodologia MFG/PFS e Regras de Produção*, dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [ARAKAKI 1998] ARAKAKI, J.; MIYAGI, P.E.; SANTOS FILHO, D.J. Integração de Sistemas em Edifícios Inteligentes Utilizando a Metodologia PFS/MFG, *Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática*, SBA, Uberlândia, 1998.
- [ARATA 1994] ARATA, W. M. *Análise Quantitativa de Sistemas de Manufatura: Abordagem baseada em redes GSPN* (“Generalized Stochastic petri Nets”), dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- [CAMARINHA-MATOS & AFSARMANESH 1995] CAMARINHA-MATOS, L., AFSARMANESH, H. (EDS) *Balanced Automation Systems - Architectures and Design Methods*, Chapman & Hall, London, 1995.
- [CAMARINHA-MATOS & AFSARMANESH 1996] CAMARINHA-MATOS, L., AFSARMANESH, H. (EDS) *Balanced Automation Systems II - Implementation Challenges for Antropocentric Manufacturing*, Chapman & Hall, London, 1996.
- [CAMARINHA-MATOS 1996] CAMARINHA-MATOS, L. M. *Balanced Automation Systems, Studies in Informatics and Control*, vol.5, n°2, p.87-88, 1996.
- [CAO 1990] CAO, X.R.; HO, Y.C. Models of Discrete Event Dynamics Systems, *IEEE Control Systems Magazine*, vol.10, n° 10, p. 69-76, 1990.
- [CASSANDRAS 1990] CASSANDRAS, C.G.; RAMADGE, R.J. Towards a Control Theory for Discrete Event Systems, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 10, n° 4, p.66-68, 1990.
- [DAVID 1992] DAVID, R.; ALLA, H. *Petri Nets and Grafcet*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1992.
- [DAVID 1995] DAVID R. Grafcet: A Powerful Tool for Specification of Logic Controllers, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol.3 n° 3, p. 253-268, 1995.

- [FALCIONE 1993] FALCIONE, A.; KROGH, B.H. Design Recovery for Relay Ladder Logic, *IEEE Control Systems*, vol.13, n°2, p. 90-98, 1993.
- [HASEGAWA 1982] HASEGAWA, K.; TAKAHASHI, K. Programmable Controller Based on MFG, *Proceedings of SICE'82*, p. 109-110, Tokyo, 1982 (em japonês).
- [HASEGAWA 1984] HASEGAWA, K. ET AL. Proposal of MFG for Discrete System Control, *Transactions of SICE*, vol.20, n°2, 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.; TAKAHASHI, K.; MASUDA, R.; TANGE, K.; SUZUKI, T. Simulation of Discrete Production System Based on MFG, *System Science*, vol 13 n°1-2, Poland, 1987.
- [HASEGAWA 1988] HASEGAWA, K.; TAKAHASHI, K.; MIYAGI, P.E. 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, n° 1, p. 69-75, 1988.
- [HO 1989] HO, Y.C. Dynamics of Discrete Event Dynamic Systems, *Proceedings of IEEE*, vol. 77, n° 1, p. 3-6, 1989.
- [ITO 1996] ITO, S.; NAKAYAMA, Y.; MIZUTANI, H. Model-Based Explanation of Specifications for Sequential Control, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol.32 n°6, p.938-947, 1996 (japanese).
- [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.; SILVA, J.R.; MOTOHASHI, C.T.; MIYAGI, P.E. Control Programs Generator for Manufacturing Cells, *Anais do X Congresso Brasileiro de Automática (CBA) e do VI Congresso Latino-americano de Controle Automático*, SBA, p. 124-126, Rio de Janeiro, 1994.
- [KAGOHARA 1995] KAGOHARA, M.Y.; MOTOHASHI C.T.; TSUGAWA, M.F.; MIYAGI, P.E. Ferramenta para Treinamento em Controle de Sistemas a Eventos Discretos, *Anais em CDROM do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM) e do II Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica (CIDIM)*, ABCM, Belo Horizonte, 1995.

- [KAGOHARA ET AL.1994] KAGOHARA, M.Y; TOLEDO, C.F.M.; MIYAGI, P.E.; SILVA, J.R. Automatic Generation of Control Programs for Manufacturing Cells, *IFIP Transactions on Production Management Methods*, vol.B, n° 19, p.335-343, North-Holand, Amsterdam, 1994.
- [MASUDA 1981] MASUDA, R.; HASEGAWA, K. Mark Flow Graph and Its Application to Complex Sequential Control System, *Proceedings of 13th Hawaii International Conference on System Science*, p.194-203, 1981.
- [MIYAGI 1988] MIYAGI, P.E. *Control System Design, Programming and Implementation for Discrete Event Production System Using Mark Flow Graph*, tese de doutorado, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 1988.
- [MIYAGI 1990] MIYAGI, P.E.; YUHARA, C.J.; HAYASHI, S.Y.; SANTOS FILHO, D. Ferramenta para Projeto e Análise de Sistemas Integrados de Manufatura, *Anais do IV Congresso Nacional de Automação Industrial*, p. 174-183, São Paulo, 1990.
- [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 1995] MIYAGI, P.E.; KAGOHARA, M.Y.; MOTOHASHI C.T.; TSUGAWA, M.F. Training System for Control Design of Discrete Event Systems, *Proceedings of IV Symposium on Low Cost Automation*, IFAC/AADECA, Buenos Aires, 1995.
- [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.; HASEGAWA, K.; TAKAHASHI, K.; M.ARATA, W.M.; ARAKAKI, J.; SANTOS FILHO, D.; SILVA, J.R. 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.
- [MIYAGI M 1998] MIYAGI, M.M.; MIYAGI, P.E.; ARAKAKI, J.; GOMES, A.M.; KISIL, M. Simulação Discreta de Redes de Petri para Análise de Sistemas de Saúde, *Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática*, SBA, Uberlândia, 1998.
- [MONNERAT 1998] MONNERAT, N.L.P.M. *Análise da Propriedade Distância Síncrona na Rede Ghenesys*, dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

- [MOTOHASHI 1994 A] MOTOHASHI, C.T.; MIYAGI, P.E.; KAGOHARA, M.Y.; BARRETTO, M.R.P. Controle de Célula de Fabricação Através da Metodologia MFG/PFS, *Máquinas e Metais*, n^o. 344, p. 88-96, Aranda Editora, São Paulo, 1994.
- [MOTOHASHI 1994 B] MOTOHASHI, C.T.; MIYAGI, P.E.; KAGOHARA, M.Y.; BARRETTO, M.R.P. Ambiente Integrado de Controle de Célula de Fabricação com Utilização da Metodologia MFG/PFS, *Anais do VI Congresso Nacional de Automação Industrial (CONAI)*, SUCEUS, São Paulo, 1994.
- [MOTOHASHI 1995] MOTOHASHI, C.T.; MIYAGI, P.E.; TAKAHASHI, K. Hierarchical Modelling of Discrete Event Driven Production Systems and its Formalization, *Proceedings of XVI Workshop on Discrete Event Systems*, SICE, p. 7-13, Ishikawa, 1995.
- [MOTOHASHI 1997] MOTOHASHI, C.T.; MIYAGI, P.E. Ambiente Integrado para Treinamento em Controle de Sistemas Dinâmicos a Eventos Discretos, *Anais em CDROM do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, ABCM, Brasília, 1993.
- [MURATA 1989] MURATA, T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 77, n^o 4, p. 541-580, April 1989,
- [NAGAO 1996] NAGAO, Y; OHTA, H.; URABE, H.; NAKANO, S.; KUMAGAI Net-Based Cooperative Control for Autonomous Distributed Systems, *Transcations of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol.32 n^o 6, p.967-974, 1996 (japanese).
- [PETERSON 1981] PETERSON, J.L. *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs., 1981.
- [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
- [REISIG 1992] REISIG, W. Combining Petri Nets and Other Formal Methods, Application of Petri Nets, Lecture Notes In Computer Science vol. 616, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [RIASCOS 1998] RIASCOS, L.A.M.; MIYAGI, P.E. Modelagem do Tratamento de Falhas em Sistemas de Manufatura Através de Redes de Petri, *Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática*, SBA, Uberlândia, 1998.
- [SANTOS 1998] SANTOS FILHO, D. *Controle de Sistemas Antropocêntricos de Produção Baseado em Redes de Petri Interpretadas*, tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

- [SILVA 1996] SILVA, J.R.; MIYAGI, P.E. A Formal Approach to PFS/MFG: A Petri Net Representation of Discrete Manufacturing Systems, *Studies in Informatics and Control*, vol. 5, n^o2, junho, 1996.
- [VALLE 1995] VALLE, R.A.B. Integração na Indústria Brasileira : Informática, Estratégica e Cultural, *Manufatura Integrada por Computador*, Terra, L.D.B. (Ed.), p. 19-27, Fundação CEFETMINAS, 1995.
- [VALLE ET AL. 1995] VALLE, R.A.B.; CAULIAUX, H.M.; SIMA, A.F. Computer Integrated Manufacturing: Aspectos Organizacionais, *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, vol. XVII, n^o2, pg190-200, ABCM, 1995.
- [VENKATESH 1994] VENKATESH, K.; AZHOU, MC.; CAUDILL, R.J. Comparing Ladder Logic Diagrams and Petri Nets for Sequence Controller Design Trough a Discrete Manufacturing System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.411, n^o 6, p. 611-619, 1994.
- [WOEI 1997] WOEI, S.S. *Análise de Invariantes na Rede de Petri Ghenesys*, dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.