

UNICAMP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

**MODELAGEM E PROCESSAMENTO  
DE CONHECIMENTO BASEADOS  
EM REDE DE PETRI NEBULOSA ESTENDIDA**

ALEXANDRE MOREIRA/DALTRINI 1980

ORIENTADOR: FERNANDO A. C. GOMIDE\*

Este exemplar corresponde à redação final da tese  
defendida por ALEXANDRE MOREIRA  
DALTRINI e aprovada pela Comissão  
Julgadora em 21 / 06 / 93.

*Fernando A. C. Gomide*  
Orientador

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica - FEE, da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, Junho de 1993.

**À minha família,  
pelo carinho e incentivo.**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Fernando A. C. Gomide, principalmente pelo apoio, idéias, sugestões e incentivo sem os quais não seria possível a conclusão deste trabalho.

Aos professores do DCA pelo suporte para enfrentar as dúvidas e obstáculos surgidos durante esta longa jornada.

A Prof. Beatriz Mascia Daltrini, cujos conselhos e carinho me guiaram desde o início da minha vida acadêmica.

A **FAPESP - FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO** pelo suporte financeiro durante o período do trabalho.

A todos os amigos e compaheiros de laboratório (LCA) que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## **RESUMO**

Atualmente, a Modelagem e Processamento de Conhecimento é um assunto muito explorado na área de pesquisa em Inteligência Artificial. A proposta deste trabalho é apresentar uma modificação das Redes de Petri, a Rede de Petri Nebulosa Estendida, baseada em conceitos da Lógica Nebulosa e das Redes de Petri.

Esta nova metodologia é direcionada para a representação e processamento de conhecimento em sistemas com características de incerteza ou aspectos vagos em sua modelagem.

A Rede de Petri Nebulosa Estendida pretende fornecer uma ferramenta para representação de conhecimento que seja de amplo escopo de aplicação, adaptando-se à problemas nas mais diversas áreas de atuação, e que seja de fácil manipulação.

Há ainda um exemplo de aplicação em simulação de sistemas de manufatura, onde se realiza a modelagem através de regras de produção nebulosas e, após o processamento sob o algoritmo proposto, apresentam-se os resultados e sua devida interpretação.

## **ABSTRACT**

Nowadays, knowledge modelling and processing are topics of interest for Artificial Intelligence researchers. The proposal of this work is to develop a modification of classical Petri Nets, which one is based on principles of Fuzzy Logic and Petri Nets, called Extended Fuzzy Petri Nets.

This new methodology is addressed to the Knowledge Representation and Processing of systems, in which there are some aspects of uncertainty and vagueness.

The Extended Fuzzy Petri Nets intends to offer a Knowledge Representation tool, with several application areas and easy manipulation.

There is an example of manufacturing systems simulation, with the cell modelling based on fuzzy production rules and, after the processing by the algorithm developed, the results and interpretation are presented.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>3</b>
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. REPRESENTAÇÃO DE CONHECIMENTO	3
2.2.1. Representações Lógicas	
2.2.2. Redes Semânticas	
2.2.3. Representações Procedimentais	
2.2.4. Programação Lógica	
2.2.5. Representação Baseada em "Frames"	
2.2.6. Regras e Sistemas de Produção	
2.2.7. Comparação entre os Diferentes Modelos	
2.3. REDES DE PETRI	8
2.3.1. Descrição Formal	
2.3.2. Propriedades das Redes de Petri	
2.3.3. Principais Métodos de Análise	
2.3.4. Redes de Petri Modificadas	
2.4. LÓGICA NEBULOSA	22
2.4.1. Conceitos Básicos da Lógica Nebulosa	
2.4.2. Conceitos Básicos em Metodologias Nebulosas	
2.5. RESUMO	28
<b>3. REDE DE PETRI NEBULOSA ESTENDIDA</b>	<b>29</b>
3.1. INTRODUÇÃO	29
3.2. DESCRIÇÃO FORMAL	29
3.3. TRANSF. DE REGRAS DE PRODUÇÃO NEBULOSAS EM <b>RPNE</b>	34
3.4. PROPRIEDADES DA <b>RPNE</b>	44
3.5. RESUMO	47

<b>4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO</b>	<b>48</b>
4.1. INTRODUÇÃO	48
4.2. SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA	48
4.2.1. História da Simulação	
4.2.2. Fases do Processo de Simulação	
4.3. DESCRIÇÃO DA CÉLULA DE MANUFATURA	52
4.4. MODELAGEM DA CÉLULA DE MANUFATURA	55
4.4.1. Modelagem para Estudo do Tempo Final de Produção	
4.4.2. Modelagem para Estudo da Utilização da CN-72	
4.4.3. Funções de Pertinência	
4.5. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO E SIMULAÇÃO	65
4.6. RESUMO	71
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>72</b>
5.1. CONCLUSÕES	72
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>75</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Os modelos matemáticos do mundo real têm um lugar de destaque na evolução da Ciência e da Engenharia. Entretanto, o mundo real é tal que, em muitas situações, ele não pode ser modelado exclusivamente por equações matemáticas.

Durante muitos anos, as pesquisas em Inteligência Artificial concentraram-se no desenvolvimento de notações e noções precisas para a representação de conhecimento. Nesse sentido, muitas metodologias para esta finalidade foram desenvolvidas, como por exemplo: regras de produção, *frames*, representações lógicas, e muitas outras. [06]

A eficácia das metodologias de modelagem, simulação e análise de sistemas reais pode ser significativamente aumentada pela habilidade de tratamento de incertezas e/ou aspectos vagos, que são características intrínsecas destes tipos de sistemas. [38]

A motivação para este trabalho surgiu da percepção que a maioria dos sistemas de simulação convencionais possui apenas métodos estatísticos para tratamento das informações. Porém, em muitas situações, existem aspectos vagos e/ou incertezas nos dados de formação do modelo de simulação e também na entrada e saída de dados.

Estas características necessitam de uma nova abordagem em simulação, a qual permita a solução de problemas, como a simulação para o planejamento estratégico, onde o nível de incerteza dos elementos e seu aspecto vago e impreciso praticamente impossibilita o tratamento do problema por técnicas convencionais de simulação.

Uma alternativa é o desenvolvimento de uma metodologia capaz de representar e processar conhecimento que não sofra das características citadas. Como consequência, foi escolhido o desenvolvimento da Rede de Petri Nebulosa Estendida a partir de um aprimoramento do trabalho apresentado por Chen. [15]

Portanto, o objetivo principal é desenvolver uma metodologia para a modelagem e manipulação de conhecimento que seja aplicável a uma gama variável de problemas, e que tenha as facilidades necessárias para o tratamento de incertezas e/ou aspectos vagos. A presença de metodologias bem estabelecidas, como as Redes de Petri e a Lógica Nebulosa permite o direcionamento do trabalho de tal forma a contribuir para atingir os objetivos determinados.

É desejável que as etapas de aquisição e manutenção do conhecimento do modelo sejam facilitadas pela utilização das regras de produção nebulosas. É também necessário algum tipo de tratamento dos resultados da simulação para uma melhor compreensão do comportamento do sistema.

Além disso, outro fator que motivou este trabalho foi a possibilidade de se estudar mais profundamente a Lógica Nebulosa (*Fuzzy Logic*) e suas possíveis aplicações nas mais diversas áreas da engenharia.

Essa dissertação está estruturada, como descrito nos parágrafos a seguir.

O Capítulo 2 é uma revisão da bibliografia utilizada. Ele contém o embasamento teórico do trabalho, com uma visão de cada área abordada: Representação de Conhecimento, Rede de Petri e Lógica Nebulosa.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia proposta para representação e processamento de conhecimento, chamada de Rede de Petri Nebulosa Estendida (**RPNE**).

No Capítulo 4 , a metodologia é aplicada em um exemplo de simulação de sistemas de manufatura, com o estudo de alguns casos significativos.

No Capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho desenvolvido, juntamente com sugestões para trabalhos futuros na mesma área.

Finalmente, apresenta-se as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento da **RPNE** e do exemplo de aplicação.

# **CAP. 2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA**

## **2.1 INTRODUÇÃO**

Como pode ser observado na literatura científica, o tema Representação e Processamento de Conhecimento têm sido explorado e pesquisado há anos dentro do escopo da Inteligência Artificial, em particular nos "sistemas inteligentes".

As Redes de Petri são utilizadas para o estudo e modelagem dos mais diversos tipos de aplicações, inclusive na área de sistemas baseados em regras. Tal característica pode trazer alguns benefícios em aplicações específicas quando se trata de manipulação de conhecimento.

O uso de termos vagos e imprecisos na definição dos modelos mentais formados durante o raciocínio humano tornaram-se o principal empecilho à criação de um modelo matemático convencional para Representação e Processamento de Conhecimento. Portanto, há a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia que suporte tal característica intrínseca do raciocínio.

Com o desenvolvimento da Teoria dos Conjuntos Nebulosos e, conseqüentemente da Lógica Nebulosa, fez-se disponível uma ferramenta para a modelagem de elementos com características vagas ou incertas. Com a combinação de conceitos já elaborados das áreas de Representação de Conhecimento, Redes de Petri e Lógica Nebulosa apresenta-se uma ferramenta que pretende ser utilizada na representação de conhecimento com a capacidade para o tratamento das características acima citadas, a Rede de Petri Nebulosa Estendida.

A seguir são apresentados resumidamente os principais conceitos sobre os quais o trabalho foi realizado.

## **2.2. REPRESENTAÇÃO DE CONHECIMENTO**

A idéia de Representação de Conhecimento explícita, manipulada por mecanismos de inferência de propósito geral, vêm do filósofo Leibniz. Ele notou que o cálculo de proposições poderia exceder, em escopo e poder, o cálculo diferencial que ele tinha anteriormente desenvolvido. [06]

A área de Representação de Conhecimento engloba todas as metodologias disponíveis para explicitar, através de alguma linguagem ou meio de comunicação, descrições que correspondam de modo significativo ao conhecimento do mundo real. Portanto, este é um campo de estudo que procura formas de representar o conhecimento sobre objetos, processos, ações, tempo, etc. em sistemas baseados em Inteligência Artificial.

Diversos aspectos foram considerados como tópicos principais na área, são eles: [14]

- Formalização de metodologias para Representação de Conhecimento.[07][18]
- Controle de Inferências. [07] [23]
- Aquisição Inicial de Conhecimento. [18]
- Atualização do Conhecimento embutido no sistema de representação.[28] [52]
- Manipulação de Conhecimento vago ou incompleto.[03][05][22][60]

Durante o final da década de 60, a Representação de Conhecimento surgiu como uma área de estudo distinta dentro do universo da Inteligência Artificial, em razão da percepção dos pesquisadores de que: "no projeto de sistemas inteligentes, um sistema de representação adequado para codificar e processar o conhecimento é crucial". [32][60]

Entretanto, somente na década passada, um número crescente de pesquisadores interessaram-se em metodologias abrangentes para Representação de Conhecimento em sistemas baseados em conhecimento (sistemas inteligentes), pois verificou-se que diversas aplicações em domínios diferentes dividiam uma estrutura comum.

A consequência natural deste interesse foi a Primeira Conferência Internacional sobre Princípios da Representação de Conhecimento e Raciocínio (**KR'89 - *The First International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning***), realizada em maio de 1989 em Toronto, Canadá.

Atualmente, podemos destacar várias metodologias, que não são mutuamente exclusivas mas, pelo contrário, podem formar melhores sistemas para Representação de Conhecimento se usadas conjuntamente. As principais são:

- Representações Lógicas.
- Redes Semânticas.
- Representações Procedimentais.
- Programação Lógica.
- Representações baseadas em *Frames*.
- Representações baseadas em Regras de Produção.

### 2.2.1. REPRESENTAÇÕES LÓGICAS

Há uma discussão acirrada sobre a utilidade e adequação do uso de representações lógicas em Representação de Conhecimento, devido ao fato de que historicamente os objetivos de ambas metodologias serem diferentes.

Porém, durante a década de 60, a lógica de primeira ordem foi utilizada em pesquisas de Representação de Conhecimento nas áreas de prova automática de teoremas e sistemas de pergunta-resposta, tendo como base o princípio da resolução.

Várias limitações são observadas nas representações que se utilizam da lógica clássica elementar [41], tais como, incapacidade de expressar a relevância do conhecimento, difícil tratamento de conhecimento incompleto ou variável e limitações na inferência dedutiva. Contudo, os seus defensores argumentam que a precisão formal e a interpretabilidade da lógica são muito úteis e fornecem uma certa expressividade que falta a outros esquemas de Representação de Conhecimento. Além disso, as representações lógicas possuem procedimentos automáticos de prova de teoremas capazes de mecanizar o processo de inferências lógicas.

Basicamente, como formalismo para a Representação de Conhecimento, as linguagens lógicas são somente uma ferramenta cuja efetividade depende de como elas são utilizadas. [29]

Entretanto, a necessidade de formalismos lógicos que tenham a capacidade de tratar os problemas mencionados levou ao desenvolvimento de variantes da lógica clássica conhecidas, tais como : lógica de precisão variável, lógica de Dempster-Shafer, lógica probabilística [17] ,e também da lógica nebulosa (*Fuzzy Logic*).[68]

## 2.2.2. REDES SEMÂNTICAS

A idéia básica das Redes Semânticas é a Representação de Conhecimento sob a estrutura de grafos, onde os nós representam conceitos e as ligações entre os nós representam as relações semânticas entre os conceitos da rede.

Desde a introdução deste formalismo por Quillian, diversas generalizações foram desenvolvidas, por exemplo, Redes Particionadas, Esquemas de Propagação de Marcas e Redes Hierárquicas (IS-A). Estas generalizações permitiram seu uso nas mais diversas áreas, tais como: entendimento de linguagem natural, raciocínio dedutivo e aprendizagem de conceitos.

A Figura 2.1 mostra um exemplo de uma pequena Rede Semântica do tipo hierárquica (IS-A). Neste tipo de rede hierárquica, as propriedades dos conceitos em níveis mais altos podem ser herdadas pelos conceitos em níveis mais baixos.

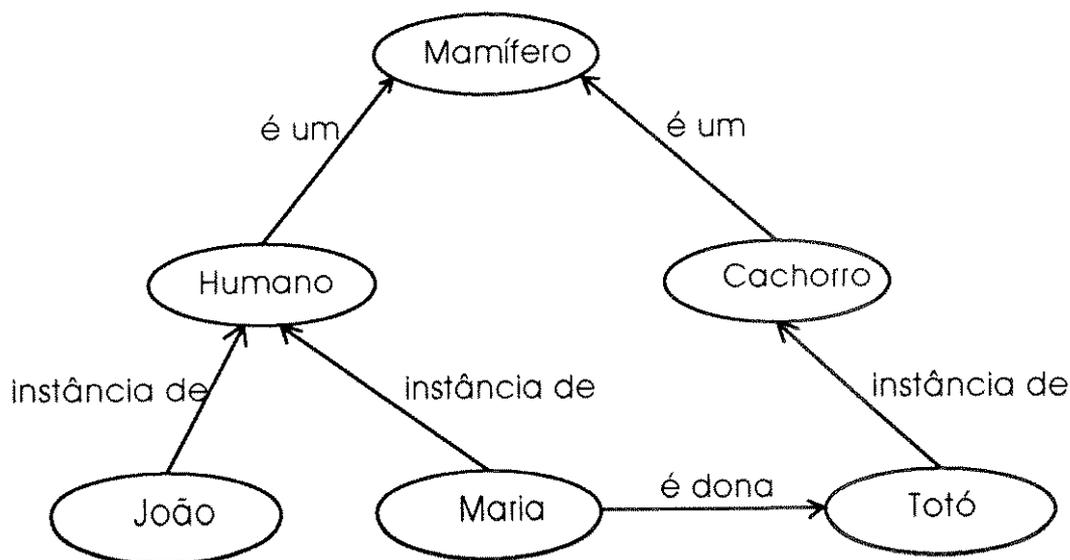


Figura 2.1 - Rede Semântica do tipo Hierárquica (IS-A)

### 2.2.3. REPRESENTAÇÕES PROCEDIMENTAIS

Representações Procedimentais envolvem a estruturação do conhecimento embutidos em procedimentos. Este conhecimento pode ser acessado diretamente ou usando-se técnicas de invocação de procedimentos. Os adeptos desta forma de Representação de Conhecimento enfatizam sua semelhança com a maneira que os seres humanos armazenam e processam o conhecimento.

O desenvolvimento desta metodologia trouxe à tona a controvérsia "procedimental-declarativa" que, na realidade, expressa os conceitos "saber como" (procedimental) e "saber que" (declarativo). Porém, esta controvérsia desapareceu quando defensores de ambos os lados perceberam que para cada tipo de problema há uma solução que facilita a Representação de Conhecimento.

Contudo, as tentativas de estender os modelos puramente procedimentais esbarraram na barreira da complexidade, pois é necessário um número enorme de procedimentos para modelar o conhecimento de um mundo complexo, o que tornou-se a principal crítica com relação a esta metodologia.

Reconhecendo a importância das representações procedimentais, foi desenvolvida a PSN (*Procedural Semantics Network*) que abrange as abordagens tradicionais das Redes Semânticas com a estrutura dos procedimentos. Este esquema para Representação de Conhecimento possui certas vantagens sobre as abordagens procedimentais clássicas, pois incorpora os procedimentos dentro de uma rede. [14]

### 2.2.4. PROGRAMAÇÃO LÓGICA

Da combinação das metodologias que envolvem procedimentos com a lógica, surge a Programação Lógica, que tem seu exemplo mais famoso na linguagem PROLOG (*Programming in Logic*) [08]. Nesta estrutura, as representações lógicas e os procedimentos são combinados em uma só forma, os programas lógicos.

O poder da Programação Lógica deriva do fato que sentenças declarativas em cálculo de predicados compõem um programa. Também há uma uniformidade entre a representação dos processos nesta metodologia e a linguagem natural, além da facilidade de inclusão de conhecimento e precisão formal na notação utilizada.

A maior vantagem do PROLOG como linguagem é sua forma clara e compreensível de Representação de Conhecimento.

### 2.2.5. REPRESENTAÇÃO BASEADA EM FRAMES

A idéia básica da utilização de *frames* para Representação de Conhecimento é a sua forma de organização em blocos de conhecimento. Neste tipo de organização, há uma redução no esforço de computação necessário para encontrar determinada informação pois, quando um *frame* é acessado, todo o conhecimento relevante a ele está imediatamente disponível no próprio *frame*.

Os *frames* são particularmente úteis quando utilizados para representar conhecimento em conceitos ou eventos típicos. As aplicações deste tipo de metodologia variam da visão computacional à compreensão de linguagem natural.[14] Além disso, linguagens para Representação de Conhecimento como KL-One e KRL foram desenvolvidas com o objetivo de facilitar a manipulação do conhecimento armazenado sob a forma de *frames*. [06]

## 2.2.6. REGRAS E SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Sistemas de produção foram concebidos como sendo modelos do raciocínio humano. São formados por um conjunto de regras de produção, uma máquina de inferência e uma base de fatos. Geralmente, a base de fatos armazena as informações a respeito dos estados do domínio de aplicação, enquanto as regras de produção especificam como ocorrem as mudanças entre os diversos estados.

A máquina de inferência é responsável pelo processo de escolha e acionamento (disparo) das regras. No caso do encadeamento direto (*Forward Chaining*), o disparo da regra só acontece caso o antecedente da regra combina com algum dos elementos da base de fatos (*matching*); ativando a ação descrita no conseqüente da regra, tentando alcançar uma resposta adequada com relação ao estado inicial da base de fatos e ao conjunto de regras de produção.

Uma vantagem dos Sistemas de Produção é a facilidade de aquisição e estruturação de conhecimento sob a forma de regras. Este foi o motivo principal do desenvolvimento de várias aplicações de sistemas baseados em conhecimento específico: os sistemas especialistas. Dentre eles podemos destacar: DENDRAL (programa heurístico para análise em química orgânica), MACSYMA (integração simbólica), MYCIN (diagnóstico e tratamento de doenças infecciosas), PROSPECTOR (exploração mineral) e PSI (sistema de programação automática).[58]

Do desenvolvimento dos Sistemas Especialistas reconheceu-se a importância da função do Engenheiro do Conhecimento (*Knowledge Engineer*), que é o profissional responsável pela incorporação do conhecimento e metodologia de diversos especialistas nos Sistemas de Produção atuais.

## 2.2.7. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MODELOS

Comparando-se os diferentes modelos para manipulação e representação de conhecimento deve-se observar as seguintes características:

- representação de conhecimento é relativa, o melhor esquema é frequentemente dependente requisitos particulares de uma dada aplicação.
- é importante que o modelo para representação de conhecimento apresente rigor formal e capacidade para representar conhecimento em todos os níveis.
- o processamento do conhecimento embutido deve ser correto formalmente, além disso, deve ter capacidade de execução em tempo e espaço razoáveis.

## 2.3. REDES DE PETRI

As Redes de Petri foram propostas por Carl Adam Petri [50] em 1962 com o objetivo de fornecer uma ferramenta matemática e gráfica para modelagem que fosse aplicável ao estudo de diferentes tipos de sistemas, em particular para sistemas a eventos discretos.

A utilização de Redes de Petri têm se mostrado eficiente no estudo e modelagem de sistemas cujas características marcantes são: concorrência de eventos, assincronia, distribuição, paralelismo e variabilidade.

Por ser uma ferramenta formal, a principal vantagem na utilização de Redes de Petri é a sua capacidade de ser analisável em relação à diversas propriedades importantes (descritas no item 2.3.2.). Em contraste com outras ferramentas descritivas, as Redes de Petri têm a característica particular de representar não somente o comportamento dinâmico de um sistema, mas também as relações estáticas entre os diferentes componentes de um sistema. [54]

Como exemplos de áreas de aplicação pode-se citar o estudo e modelagem de Máquinas de Estado Finito, Fluxo de Dados em Computação, Protocolos de Comunicação, Controle de Sincronização, Linguagens Formais, Sistemas Multiprocessados, Sistemas Especialistas, Sistemas de Auxílio à Tomada de Decisão, Sistemas de Manufatura, entre outras. [11][12][13][20][27][51][57]

### 2.3.1. DESCRIÇÃO FORMAL

Uma Rede de Petri consiste de um tipo particular de grafo de fluxo juntamente com sua marcação inicial  $M_0$ . Neste grafo existem dois tipos de nós: lugares (*places*) e transições (*transitions*). Além disso, arcos ligam diretamente os lugares às transições e vice-versa. Deve-se observar que não existe arco ligando nós do mesmo tipo.

Graficamente, os lugares e as transições são representados por círculos e barras respectivamente. As marcas (*tokens*) são representadas por pontos negros dentro dos lugares. Os arcos são representados por segmentos de reta direcionados. Tais arcos podem ser ponderados com um número positivo inteiro  $K$ , o que pode ser interpretado como sendo  $K$  arcos paralelos entre os nós de ligação.

Do ponto de vista gráfico, as Redes de Petri podem ser usadas como meio de comunicação visual, tal como, gráficos de fluxo e diagramas de bloco. As marcas na rede são utilizadas para simular o comportamento dinâmico das atividades do sistema.

Do ponto de vista matemático, é possível construir diversos modelos de representação de sistemas, por exemplo, equações algébricas e equações de estado. Contudo, o mais importante a se destacar na utilização das Redes de Petri são os diversos métodos existentes destinados à análise das propriedades características do sistema em estudo.

## DEFINIÇÃO FORMAL DA REDE DE PETRI CLÁSSICA (RP)

$$RP = \{ P, T, F, W \}$$

onde:

- **P** é o conjunto finito de lugares pertencentes à **RP**.

$$P = \{ p_1, p_2, \dots, p_n \}$$

- **T** é o conjunto finito de transições da **RP**.

$$T = \{ t_1, t_2, \dots, t_m \}$$

- **F** é o conjunto de arcos da **RP** (relação de fluxo).

$$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$$

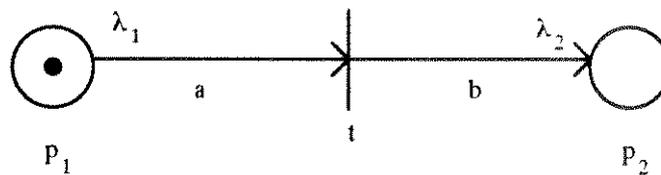
- **W** é a função de ponderação.

$$W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$$

Deve-se observar que :  $P \cap T = \emptyset$  e  $P \cup T \neq \emptyset$ .

A Marcação Inicial ( $M_0$ ) da rede é dada por:  $M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$

Na figura abaixo é apresentado um exemplo simples de Rede de Petri Clássica, com o objetivo de colocar a representação gráfica e a definição formal.



$$P = \{ p_1, p_2 \}$$

$$W(a) = \lambda_1$$

$$T = \{ t \}$$

$$W(b) = \lambda_2$$

$$F = \{ a, b \}$$

$$M_0(p_1) = 1$$

$$M_0(p_2) = 0$$

Figura 2.2 - Exemplo de Definição Formal de Rede de Petri Clássica

A marcação em uma Rede de Petri atribui a cada lugar da rede um número inteiro não-negativo que representa a quantidade de marcas presentes naquele lugar. A mudança da posição das marcas na rede, que consiste na habilitação e disparo das transições, é uma regra simples. [46]

## REGRA DE DISPARO DAS TRANSIÇÕES

1. Uma transição "t" está habilitada se cada lugar de entrada "p<sub>i</sub>" desta transição possui, no mínimo,  $w(p_i, t)$  marcas, onde  $w(p_i, t)$  é o peso do arco de união de "p<sub>i</sub>" a "t".

2. Uma transição habilitada pode disparar ou não.

3. O disparo da transição habilitada "t" remove  $w(p_i, t)$  marcas de cada lugar de entrada, e adiciona  $w(t, p_j)$  marcas a cada lugar de saída "p<sub>j</sub>" de "t", onde  $w(t, p_j)$  é o peso do arco de ligação de "t" a "p<sub>j</sub>".

### 2.3.2. PROPRIEDADES DAS REDES DE PETRI

Desde o trabalho inicial de Carl Adam Petri, diversos métodos de análise quantitativa e qualitativa foram desenvolvidos para o estudo das propriedades dos modelos representados sob a forma de Redes de Petri. Tais métodos são aplicados com o objetivo de determinar as características relevantes do sistema em estudo. Para Redes de Petri clássicas existem propriedades que dividem-se em duas categorias principais: Dinâmicas e Estruturais. Deve-se observar que outros métodos de análise podem ser aplicados às mais diversas formas de variações de redes criadas tendo como base as Redes de Petri clássicas.

#### • Propriedades Dinâmicas:

Alcançabilidade (*Reachability*)  
Limitação (*Boundedness*)  
Vivacidade (*Liveness*)  
Reversibilidade e Estado Inicial (*Reversibility and Home State*)  
Cobertura (*Coverability*)  
Persistência (*Persistence*)  
Distância Sincrona (*Synchronic Distance*)

#### • Propriedades Estruturais:

Vivacidade Estrutural (*Structural Liveness*)  
Controlabilidade (*Controlability*)  
Repetição (*Repetitiveness*)  
Consistência (*Consistency*)

## A. Propriedades Dinâmicas

Propriedades Dinâmicas são aquelas que não dependem somente da estrutura topológica das redes, mas também da marcação inicial  $M_0$ .

- ALCANÇABILIDADE (*Reachability*)

**DEFINIÇÃO:** Uma marcação  $M_n$  é dita alcançável a partir da marcação  $M_0$  se existe uma sequência de disparo de transições que transforma a marcação  $M_0$  em  $M_n$ .

O conjunto de todas as possíveis marcações que podem ser alcançadas a partir de  $M_0$  é denotado de  $R(M_0)$ .

Esta propriedade é a base fundamental para o estudo das propriedades dinâmicas das Redes de Petri e consiste do estudo da evolução das marcas (*marking*) dentro da rede. O principal método de análise desta propriedade é através da utilização da Árvore de Alcançabilidade, onde são dispostos em forma de árvore todas as marcações alcançáveis a partir de  $M_0$ .

Porém, deve-se notar que para o caso geral, o problema de verificar a alcançabilidade de determinada marcação é solucionável embora possa incorrer em um gasto de tempo e espaço com características exponenciais. [50][54]

- LIMITAÇÃO (*Boundedness*)

**DEFINIÇÃO:** Uma Rede de Petri é dita K-limitada ou simplesmente limitada se o número de marcas em cada lugar da rede não exceder um número finito K, para qualquer marcação obtida a partir da evolução da marcação inicial  $M_0$ .

Uma Rede de Petri é dita segura (*safe*) se for 1-limitada ( $K=1$ ).

A importância desta propriedade está na possibilidade de verificação do maior número de marcas presentes em um único lugar da Rede de Petri no mesmo instante de tempo. Com isso, é possível detectar erros de projeto, como a verificação da ocorrência de *overflow*.

- VIVACIDADE (*Liveness*)

**DEFINIÇÃO:** Uma Rede de Petri é dita viva, o que é equivalente a dizer que M é uma marcação viva, se é possível continuar a sequência de disparo das transições, não importando qual marcação foi alcançada a partir de  $M_0$ .

Isto significa que uma Rede de Petri viva é livre de *dead-locks*, não importando qual a sequência de disparo escolhida, haverá sempre uma transição habilitada e passível de disparo. Esta é uma propriedade forte e ideal para diversos tipos de sistemas (exemplo: sistemas operacionais), entretanto verificar esta propriedade pode ser muito trabalhoso para alguns sistemas de grande porte. [46]

- REVERSIBILIDADE e ESTADO INICIAL (*Reversibility and Home State*)

**DEFINIÇÃO:** Uma Rede de Petri é considerada reversível se, para cada marcação  $M$  em  $R(M_0)$ ,  $M_0$  é alcançável a partir de  $M$ .

A propriedade de Estado Inicial é um relaxamento da propriedade de reversibilidade onde define-se uma marcação qualquer  $M'$ . A marcação  $M'$  é considerada um Estado Inicial se, para cada marcação  $M$  em  $R(M_0)$ ,  $M'$  é alcançável a partir de  $M$ .

- COBERTURA (*Coverability*)

**DEFINIÇÃO:** Uma marcação  $M$  em uma Rede de Petri é dita ser coberta se existe uma marcação  $M'$  em  $R(M_0)$  tal que  $M'(p) \geq M(p)$  para cada lugar "p" na rede.

Esta é uma propriedade fortemente relacionada com a vivacidade da rede em questão, pois uma rede só está livre de bloqueios (*dead-locks*) se a marcação inicial cobrir a marcação mínima.

- PERSISTÊNCIA (*Persistence*)

**DEFINIÇÃO:** Uma Rede de Petri é dita persistente se, para duas transições habilitadas quaisquer, o disparo de uma delas não desabilita o disparo da outra. Portanto, uma transição em uma rede persistente continuará habilitada até o seu disparo.

A propriedade da persistência é fortemente relacionada às Redes de Petri livres de conflito (*conflict-free nets*), isto é, não há concorrência para o disparo das transições habilitadas no modelo em estudo (por exemplo: esquemas de programação paralela e circuitos assíncronos de velocidade independente).

- Distância Síncrona (*Synchronic Distance*)

**DEFINIÇÃO:** A Distância Síncrona entre duas transições  $t_1$  e  $t_2$  é dada por:

$$d_{12} = \max_{\sigma^*} | \sigma^*(t_1) - \sigma^*(t_2) |$$

onde  $\sigma$  é a sequência de disparo começando de qualquer marcação  $M$  em  $R(M_0)$  e  $\sigma^*(t_i)$  é o número de vezes que a transição  $t_i$ ,  $i = 1, 2$ , dispara em  $\sigma$ .

Distância Síncrona é uma métrica relativa ao grau de dependência mútua entre dois eventos em um sistema condição/evento. Porém, esta métrica é de difícil aplicação quando se trata de outras classes de Redes de Petri diferentes da original.

## B. Propriedades Estruturais

Propriedades Estruturais são aquelas que dependem da estrutura topológica das redes. Elas são independentes da marcação inicial  $M_0$  no sentido de que continuam válidas para qualquer marcação inicial.

- VIVACIDADE ESTRUTURAL (*Structural Liveness*)

**DEFINIÇÃO:** Uma Rede de Petri é dita viva estruturalmente se existe uma marcação inicial viva para a rede. Uma caracterização completa desta propriedade para Redes de Petri, em geral, é desconhecida. [46]

- CONTROLABILIDADE (*Controlability*)

**DEFINIÇÃO:** Uma Rede de Petri é dita completamente controlável se uma marcação qualquer pode ser atingida de qualquer outra marcação.

- REPETIÇÃO (*Repetitiveness*)

**DEFINIÇÃO:** Uma Rede de Petri é dita repetitiva se existe uma marcação  $M_0$  e uma sequência de disparo  $\sigma$  a partir de  $M_0$  tal que toda transição ocorre infinitamente em  $\sigma$ .

- CONSISTÊNCIA (*Consistency*)

**DEFINIÇÃO:** Uma Rede de Petri é consistente se existe uma marcação  $M_0$  e uma sequência de disparo  $\sigma$ , de  $M_0$  para  $M_0$ , tal que toda transição aparece ao menos uma vez em  $\sigma$ .

### 2.3.3. PRINCIPAIS MÉTODOS DE ANÁLISE

Os principais métodos de análise para Redes de Petri dividem-se em três categorias: Método da Árvore de Atingibilidade, Abordagem por Equações Matriciais e Técnicas de Redução ou Decomposição. [21]

- ÁRVORE DE ATINGIBILIDADE

Dada uma Rede de Petri qualquer e da marcação inicial  $M_0$ , consegue-se obter um número de novas marcações igual ao número de transições habilitadas. De cada nova marcação, pelo mesmo raciocínio, pode-se alcançar outras novas marcações. Este processo resulta na formação da Árvore de Atingibilidade, onde cada nó representa as marcações geradas a partir de  $M_0$  e cada arco representa o disparo da transição responsável pela alteração da marcação. Portanto, este método enumera todas as marcações atingíveis a partir de  $M_0$  e é aplicável a todas as classes de Redes de Petri.

Para uma Rede de Petri limitada, todas as propriedades dinâmicas podem ser analisadas somente por este método. Já no caso geral, as estas propriedades necessitam de outros artifícios para serem verificadas. Contudo, a principal limitação para sua utilização consiste no tamanho da rede a ser analisada, devido à complexidade da explosão do espaço de estados na árvore.

Existem vários algoritmos para a construção da Árvore de Atingibilidade, cada um considerando aspectos relevantes de cada tipo de rede. Um método de aplicação geral é descrito por Murata. [46]

#### • ABORDAGEM POR EQUAÇÕES MATRICIAIS

Esta abordagem consiste em analisar as propriedades dinâmicas e estruturais das Redes de Petri através da formulação de equações matriciais.

A Matriz de Incidência ( $A=[a_{ij}]$ ) de uma rede com "n" transições e "m" lugares é de ordem "m x n", com os valores dados por:

$$a_{ij} = a_{ij}^* - a_{ij}^o$$

onde  $a_{ij}^* = w(i,j)$  é o peso do arco que liga a transição "i" ao lugar de saída "j" e  $a_{ij}^o = w(j,i)$  é o peso do arco que liga a transição "i" ao lugar de entrada "j".

A marcação na rede é dada pelo vetor coluna  $M_k$  de ordem "m x 1". A j-ésima entrada do vetor  $M_k$  corresponde ao número de marcas existentes no lugar "j", depois de "k" disparos em alguma sequência determinada. O vetor de controle  $u_k$  de ordem "n x 1" é formado por (n-1) zeros e uma entrada igual a 1 na i-ésima posição indicando que a transição "i" dispara no k-ésimo disparo.

Portanto, pode-se formular a seguinte Equação de Estado para a Rede de Petri :

$$M_k = M_{k-1} + A^T u_k$$

Sendo assim, esta é uma ferramenta de análise poderosa para Redes de Petri; a manipulação desta equação fornece dados importantes com relação às propriedades dinâmicas, como atingibilidade, e também resolve todos os casos de análise das propriedades estruturais já citadas.

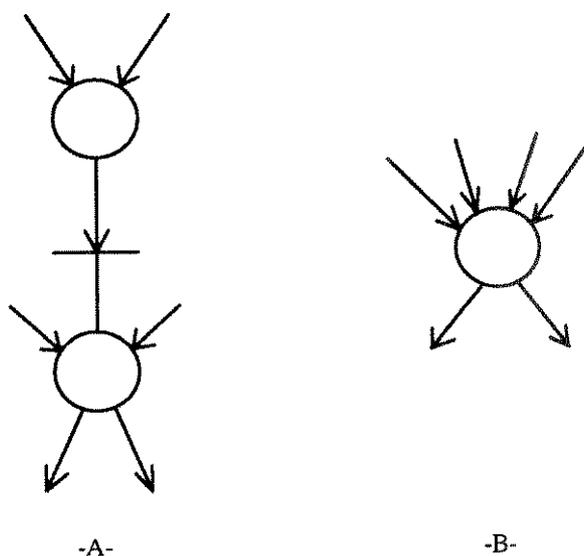
Contudo, esta abordagem é aplicável somente a subclasses especiais de Redes de Petri. A solução deste tipo de equação é limitada parcialmente pela natureza de não-determinismo inerente às Redes de Petri e também pelas restrições impostas ao tipo de resposta a ser obtida.

#### • TÉCNICAS DE REDUÇÃO OU DECOMPOSIÇÃO

A técnica de Redução ou Decomposição em Redes de Petri consiste de um procedimento que transforma as redes originais em redes reduzidas, preservando algumas propriedades desejáveis da rede original.

Como já citado, uma das desvantagens com relação ao uso de Redes de Petri é o problema da complexidade. Desta forma, o desenvolvimento de métodos que permitam reduções hierárquicas e passo-a-passo, que preservem as propriedades do sistema em estudo, são importantes.

Na figura abaixo pode-se observar uma transformação de redução, onde as redes das figuras A e B são idênticas com relação às propriedades de limitação, segurança e vivacidade.



**Figura 2.3 - Exemplo de Técnica de Redução em Redes de Petri**

Existem diversos métodos, inclusive computacionais, para a redução de Redes de Petri. Tais métodos são específicos dependendo da propriedade que se queira preservar durante o processo de simplificação. [54]

#### **2.3.4. REDES DE PETRI MODIFICADAS**

As Redes de Petri Modificadas foram criadas com o intuito de aumentar a capacidade de representação do modelo inicial, adequando-se assim ao tratamento de um número maior de sistemas que os possíveis de serem tratados pelas Redes de Petri em sua forma original.

A necessidade de tratamento de fatores, como tempo e incertezas, estimularam o desenvolvimento destas modificações. A seguir, são citadas algumas destas variações e as suas características principais. O aumento da complexidade dos sistemas em estudo levou à combinação destas modificações para formar modelos híbridos em Redes de Petri, as quais têm sido usados no estudo dos mais diversos tipos de sistemas.

- REDE DE PETRI GENERALIZADA: existência de arcos inibidores; permite múltiplos arcos de ligação.
- REDE DE PETRI COLORIDA: cores são atribuídas às marcas; possibilidade de modelagem de vários sistemas com uma só rede.
- REDE DE PETRI DE CAPACIDADE FINITA: a cada lugar é associado um valor inteiro positivo, que exprime o número máximo de marcas que este lugar suporta.
- REDE DE PETRI COM PRIORIDADE: cada transição possui um nível de prioridade utilizado para resolver conflitos entre o disparo de transições.
- REDE DE PETRI TEMPORAL: a cada transição habilitada é associado um intervalo de tempo para o seu disparo.
- REDE DE PETRI ESTOCÁSTICA: a cada transição habilitada é associado um intervalo estatístico de tempo para o seu disparo.
- REDE DE PETRI NEBULOSA (FPN): cada marca e transição têm associado o conceito de nebulosidade.

Nesta modificação, o modelo sob a forma de Rede de Petri Nebulosa (FPN) representa as regras de produção nebulosas de um sistema baseado em regras, onde uma regra de produção nebulosa é uma regra que descreve a relação nebulosa entre duas proposições. Além disso, na metodologia apresentada por Chen [15] é possível determinar se há relação antecedente-consequente entre duas proposições da rede, sendo possível avaliar o valor verdade das conclusões desejadas.

#### DEFINIÇÃO FORMAL DA REDE DE PETRI NEBULOSA (FPN)

$$FPN = \{ P, T, D, I, O, f, \alpha, \beta \}$$

onde:

- **P** é o conjunto finito de lugares pertencentes à FPN.

$$P = \{ p_1, p_2, \dots, p_n \}$$

- **T** é o conjunto finito de transições da FPN.

$$T = \{ t_1, t_2, \dots, t_m \}$$

- **D** é o conjunto finito de disposições da FPN.

$$D = \{ d_1, d_2, \dots, d_n \}$$

Portanto:  $|P| = |D|$  (número de elementos no conjunto P é igual ao do conjunto D)

$$P \cap T \cap D = \emptyset$$

- **I** é a função de entrada (*INPUT*), isto é, um mapeamento das transições no conjunto dos lugares de entrada respectivos.

$$I: T \rightarrow P$$

- **O** é a função de saída (*OUTPUT*) que faz o mapeamento das transições no conjunto dos lugares de saída respectivos.

$$O: T \rightarrow P$$

- **f** é a função de associação dos lugares de entrada de uma transição aos seus respectivos fatores de certeza.  $\mu \in [0, 1]$

$$f: P \rightarrow [0, 1]$$

- **$\alpha$**  é a função de associação da marca em cada lugar pertencente à rede com o seu respectivo valor verdade. (*RPNE é segura*)

$$\alpha: P \rightarrow [0, 1]$$

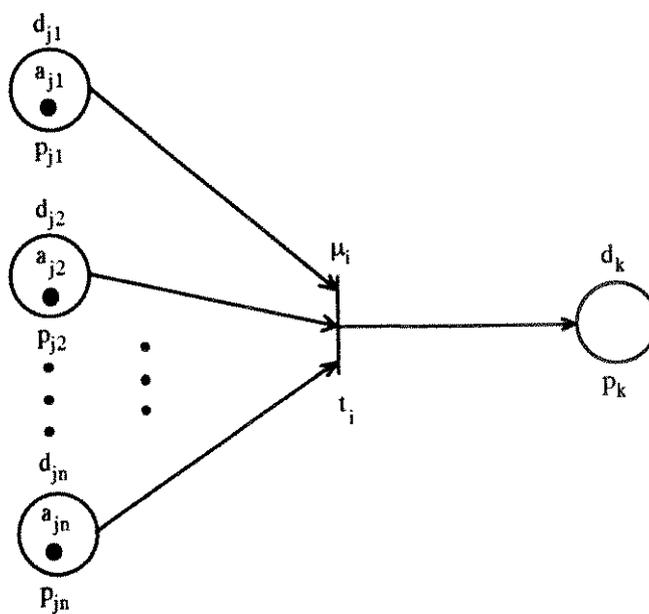
- **$\beta$**  é a função de associação de cada lugar pertencente à rede com a disposição associada.

$$\beta: P \rightarrow D$$

### TRANSFORMAÇÃO DAS REGRAS DE PRODUÇÃO NEBULOSAS EM FPN

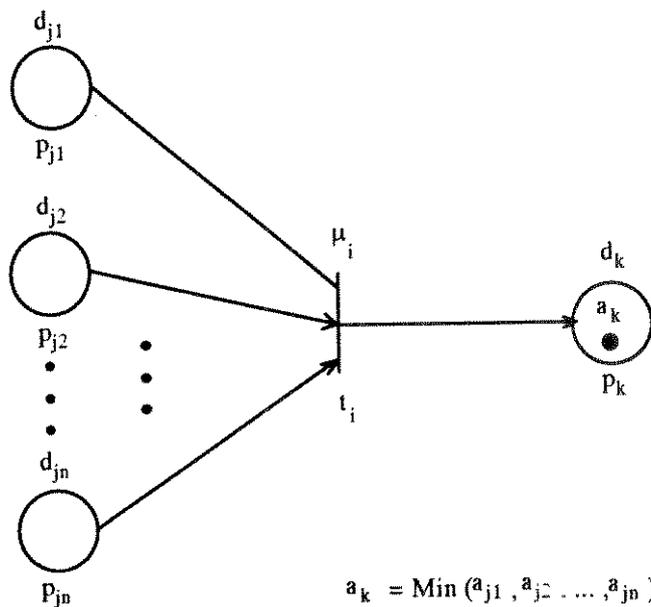
A transformação das regras de produção nebulosas compostas usados na modelagem de conhecimento sob a forma de FPN são colocadas a seguir. Na figura -A- observa-se o estado da rede antes do disparo da transição, e na figura -B- têm-se o estado da rede após o disparo da transição, com a fórmula para o cálculo do valor da marca nos lugares de saída da respectiva transição

TIPO I: SE  $d_{j1}$  "E"  $d_{j2}$  "E" ... "E"  $d_{jn}$  ENTÃO  $d_k$ . ( $CF=\mu_i$ )



-A-

caso  $a_{ji} \geq \lambda$ , para todo  $i = 1, 2, \dots, n$ :

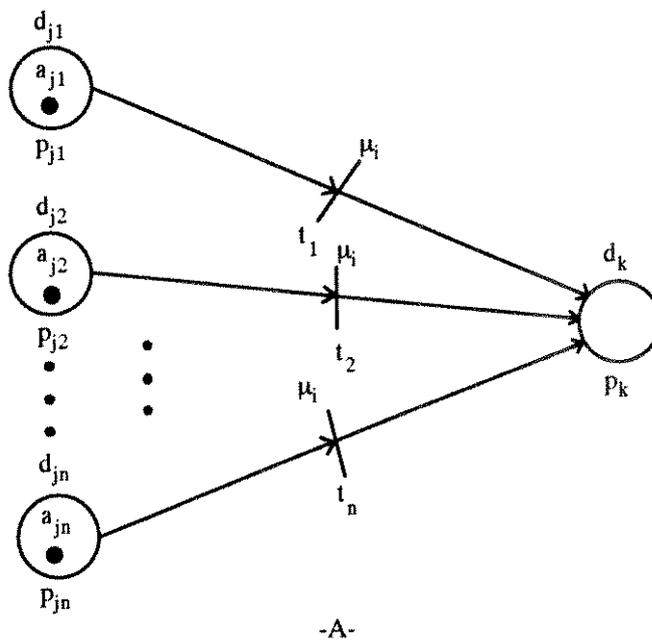


$$a_k = \text{Min}(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn}) * \mu_i$$

-B-

Figura 2.4 - Representação sob a Forma de FPN das Regras de Produção Nebulosas do TIPO I

TIPO II: SE  $d_{j1}$  "OU"  $d_{j2}$  "OU" ... "OU"  $d_{jn}$  ENTÃO  $d_k$ . ( $CF=\mu_i$ )



caso  $a_{ji} \geq \lambda$ , para  $i = 1, 2, \dots, n$ :

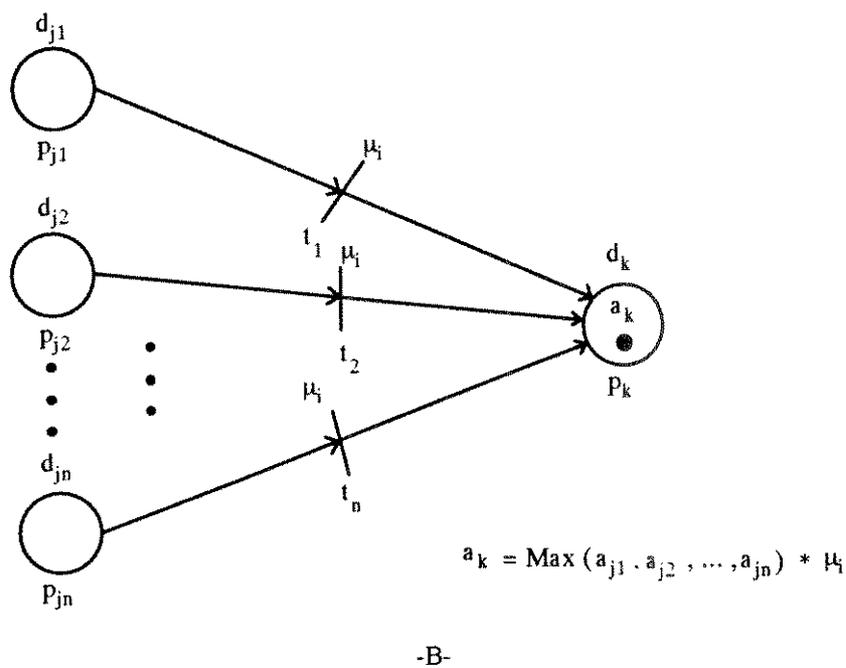
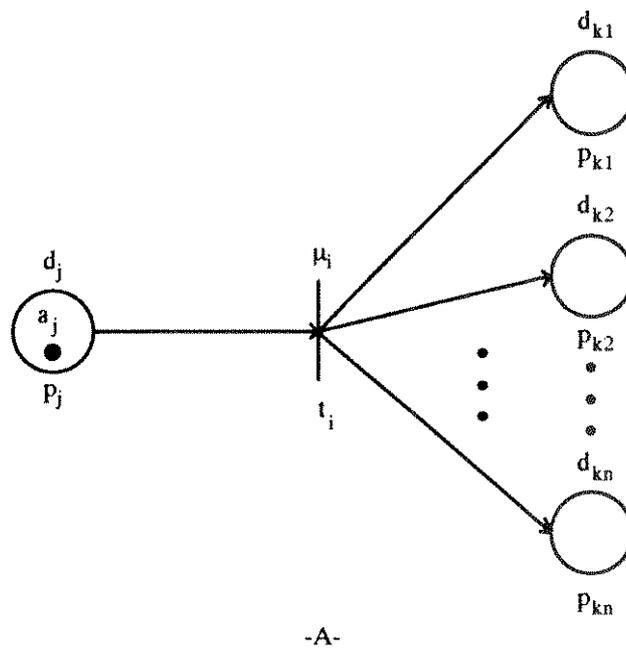


Figura 2.5- Representação sob a Forma de FPN das Regras de Produção Nebulosas do TIPO II

TIPO III: SE  $d_j$  ENTÃO  $d_{k1}$  "E"  $d_{k2}$  "E" ... "E"  $d_{kn}$ . ( $CF=\mu_i$ )



caso  $a_j \geq \lambda$  :

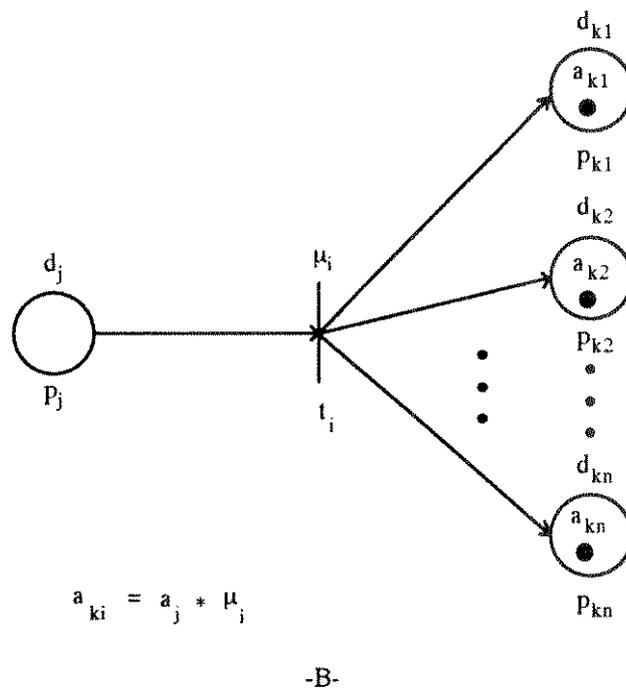
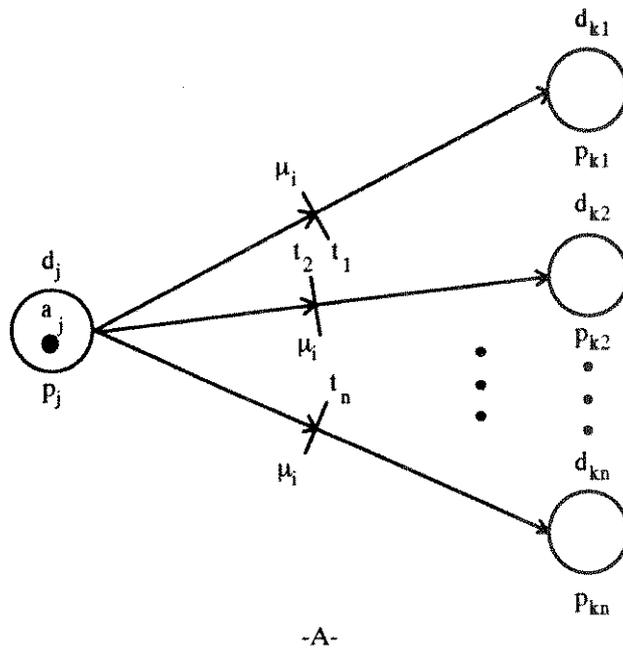


Figura 2.6 - Representação sob a Forma de FPN das Regras de Produção Nebulosas do TIPO III

TIPO IV: SE  $d_j$  ENTÃO  $d_{k1}$  "OU"  $d_{k2}$  "OU" ... "OU"  $d_{kn}$ . ( $CF=\mu_i$ )



caso  $a_j \geq \lambda$  :

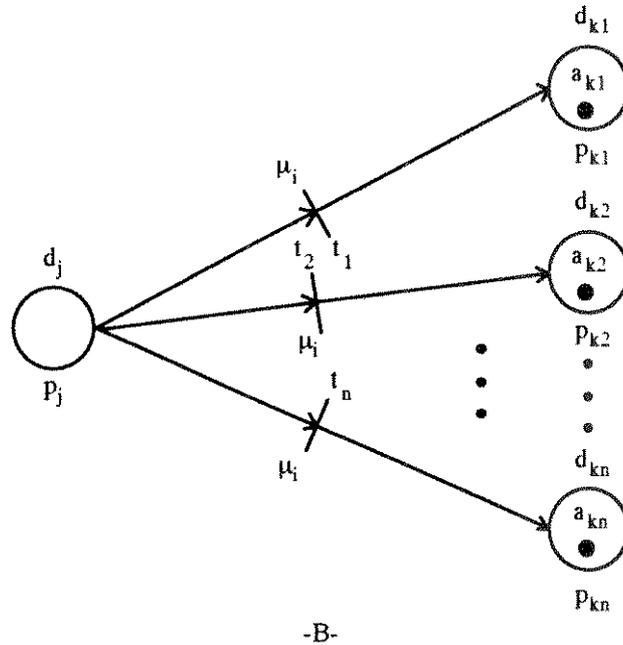


Figura 2.7 - Representação sob a Forma de FPN das Regras de Produção Nebulosas do TIPO IV

## 2.4. LÓGICA NEBULOSA

O conceito de conjunto nebuloso surgiu em 1965, pelo trabalho de Lofti A. Zadeh [61], no qual cada elemento de um conjunto possui um grau de pertinência que varia dentro do intervalo  $[0, 1]$ . Portanto, a Teoria dos Conjuntos Nebulosos (*Fuzzy Set Theory*) é baseada no reconhecimento de que certos conjuntos possuem fronteiras imprecisas.

A principal característica da Lógica Nebulosa é que, diferentemente dos sistemas da Lógica Clássica, ela objetiva a modelagem de modos imprecisos de raciocínio, os quais possuem um papel essencial na notável capacidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente caracterizado pela incerteza e imprecisão. [68]

Além disso, o fato de que a Lógica Nebulosa fornecer uma ferramenta formal para o tratamento de modelos aproximados de raciocínio implica que, em geral, as seqüências de raciocínio em Lógica Nebulosa são menores em extensão.

Entretanto, no estágio de desenvolvimento inicial, a Lógica Nebulosa enfrentou o ceticismo e, algumas vezes, hostilidade por parte da comunidade científica. Já na década de 80, ocorreram avanços na área devido aos seguintes fatores:

- Amadurecimento da teoria como um todo.
- Surgimento de organizações para o desenvolvimento e divulgação da teoria (*International Fuzzy Systems Association, Japan Society for Fuzzy Theory and Systems e North American Fuzzy Information Processing*).
- Publicação dos primeiros livros com reconhecimento da comunidade científica.
- Principalmente, algumas das aplicações envolvendo a Lógica Nebulosa atraíram a atenção das indústrias e organizações não-acadêmicas.

A primeira aplicação significativa apareceu em um Sistema de Controle Nebuloso Automático para o metrô da cidade de Sendai, Japão, em julho de 1987. A sua performance é superior em comparação aos sistemas baseados em controle clássico. [30]

Hoje em dia, o número de aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento humano é enorme. Exemplos: Controle Automático, Aplicações na Medicina, Auxílio à Tomada de Decisão, Economia, Engenharia, Proteção ao Meio Ambiente, Pesquisa Operacional, Psicologia, Inteligência Artificial, Reconhecimento de Padrões, entre outras. Uma lista de referências bibliográficas de trabalhos que envolvem a Lógica Nebulosa pode ser encontrada em [42].

### 2.4.1. CONCEITOS BÁSICOS DA LÓGICA NEBULOSA

A seguir, estão resumidamente descritos os princípios e conceitos básicos da Teoria dos Conjuntos Nebulosos e da Lógica Nebulosa. Maiores informações à respeito do assunto podem ser encontradas nas referências [04][31][35][36][45][48][49][61][63][68].

## • CONJUNTOS NEBULOSOS E OPERAÇÕES LÓGICAS

Suponha  $X$  como um espaço de pontos (objetos), sendo que um elemento genérico de  $X$  é denotado por  $x$ . Desta forma,  $X = \{ x \}$ .

**DEFINIÇÃO:** Um Conjunto Nebuloso  $A$  em  $X$  é caracterizado por uma função de pertinência  $f_A(x)$ , a qual associa a cada ponto em  $X$  um número real no intervalo  $[0, 1]$ , com o valor de  $f_A(x)$  representando o grau de pertinência de  $x$  em  $A$ .

Segundo Zadeh [61], da definição de conjunto nebuloso pode-se notar que as seguintes definições são extensões óbvias das definições correspondentes aos conjuntos ordinários da lógica clássica. Considere  $A$ ,  $B$  e  $C$  como sendo conjuntos nebulosos em  $X$ , com funções de pertinência  $f_A$ ,  $f_B$  e  $f_C$  respectivamente.

**DEFINIÇÃO:** Um Conjunto Nebuloso  $A$  é **VAZIO** se e somente se sua função de pertinência é identicamente igual a zero em  $X$ , isto é,  $f_A = 0$  para todo  $x$  em  $X$ .

**DEFINIÇÃO:** O **COMPLEMENTO** de um Conjunto Nebuloso  $A$  é denotado por  $A'$ , e tem como função de pertinência  $f_{A'} = 1 - f_A$ .

**DEFINIÇÃO:** Um Conjunto Nebuloso  $A$  está **CONTIDO** em um Conjunto Nebuloso  $B$  se, para todo  $x$  em  $X$ ,  $f_A \leq f_B$ .

**DEFINIÇÃO:** A **UNIÃO** de dois Conjuntos Nebulosos  $A$  e  $B$  é o Conjunto Nebuloso  $C$ , denotada por  $C = A \cup B$ , cuja função de pertinência  $f_C$  é dada por:  $f_C = f_A \vee f_B = \text{Max} [ f_A, f_B ]$ .

**DEFINIÇÃO:** A **INTERSECÇÃO** de dois Conjuntos Nebulosos  $A$  e  $B$  é o Conjunto Nebuloso  $C$ , denotada por  $C = A \cap B$ , cuja função de pertinência  $f_C$  é dada por:  $f_C = f_A \wedge f_B = \text{Min} [ f_A, f_B ]$ .

## • NORMAS TRIANGULARES

Duas definições importantes dizem respeito às normas triangulares, norma-t e norma-s, que irão formar os conectivos lógicos das regras de produção nebulosas. [20]

**DEFINIÇÃO:** A **norma-t** é uma função de dois argumentos,  $t: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ , tal que:

1. **t** é uma função não-decrescente em cada argumento, para  $x \leq y$  e  $y \leq z$ :  $x \ t \ y \leq y \ t \ z$ .
2. **t** é comutativa:  $x \ t \ y = y \ t \ x$ .
3. **t** é associativa:  $(x \ t \ y) \ t \ z = x \ t \ (y \ t \ z)$ .
4. satisfaz as seguintes condições de contorno:

$$x \ t \ 0 = 0 \qquad x \ t \ 1 = x \qquad \text{com } x, y, z \in [0, 1]$$

**DEFINIÇÃO:** A **norma-s** é uma função de dois argumentos,  $s: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ , tal que:

1. **s** é uma função decrescente em cada argumento.
2. **s** é comutativa.
3. **s** é associativa.
4. satisfaz as seguintes condições de contorno:

$$x \ s \ 0 = x \qquad x \ s \ 1 = 1 \qquad \text{com } x, y, z \in [0, 1]$$

A tabela 3.1 traz alguns exemplos de **normas-s** e **normas-t**.

<b>norma-t</b> $x \ t \ y$	<b>norma-s</b> $x \ s \ y$
$\text{Min}(x, y) = x \wedge y$	$\text{Min} [ 1, (x^p + y^p)^{1/p} ]$ $p \geq 1$
$x \cdot y$	$x + y - x \cdot y$
$(x \cdot y) / [\alpha + (1 - \alpha) \cdot (x + y - x \cdot y)]$ $\alpha \geq 0$	$\text{Min} [ 1, x + y + \alpha \cdot x \cdot y ]$ $\alpha \geq -1$

**Tabela 2.1 - Exemplos de norma-t e de norma-s**

As diferentes normas utilizadas como conectivos lógicos nos métodos de raciocínio nebuloso alteram de maneira relevante o resultado das implicações lógicas. [45]

## 2.4.2. CONCEITOS BÁSICOS EM METODOLOGIAS NEBULOSAS

A seguir são abordados os conceitos básicos utilizados em metodologias que fazem uso da Lógica Nebulosa e da Teoria dos Conjuntos Nebulosos. Tais metodologias são de fundamental importância na solução de problemas e no desenvolvimento de sistemas nas mais diferentes áreas de pesquisa. [31]

### • ABORDAGEM LINGÜÍSTICA

A Abordagem Linguística usa do conceito de variáveis linguísticas com valores que não são números, e sim palavras (ou sentenças) de uma linguagem natural (ou artificial). Um valor linguístico é interpretado como sendo um "rótulo" para uma restrição nebulosa nos valores da variável de base.

Por exemplo, os possíveis rótulos: "ALTO", "MÉDIO" ou "BAIXO" são considerados como sendo o valor atribuído à variável base. Na figura abaixo temos os valores linguísticos (baixa, média e alta) para a variável "velocidade".

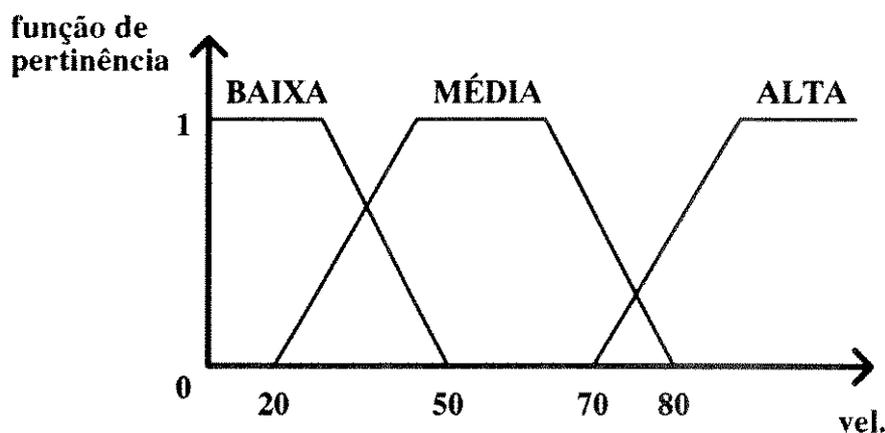


Figura 2.8 - Exemplo de Variável Linguística

A utilização do conceito de variáveis linguísticas facilita a modelagem e estudo de uma classe significativa de sistemas. [43][63][64]

### • IMPLICAÇÃO NEBULOSA E REGRA DE INFERÊNCIA COMPOSICIONAL

O raciocínio aproximado utiliza-se de declarações nebulosas e de regras de inferência composicionais. Em uma declaração condicional nebulosa do tipo:

Se "A" Então "B"

o antecedente ("A") e o conseqüente ("B") são proposições nebulosas. Portanto, uma declaração deste gênero estabelece uma relação nebulosa R entre A e B.

**DEFINIÇÃO:** Se A é um conjunto nebuloso em um universo de discurso U, e B é um conjunto nebuloso em um universo de discurso V, então o **PRODUTO CARTESIANO** de A e B, denotado por  $A \times B$ , é definido como sendo uma relação nebulosa R de U em V, dada por:

$$A \times B = \sum_{R=U \times V} [(f_A(u) \wedge f_B(v)) / (u, v)]$$

onde R é usualmente dado, no caso discreto, sob a forma de matriz. [68]

Uma declaração condicional nebulosa pode ser expressa na forma de produto cartesiano da seguinte forma:

$$A \Rightarrow B = \text{Se "A" Então "B"} \Leftrightarrow (A \times B + A' \times V)$$

onde "+" se refere à união de duas relações nebulosas.

No caso de uma expressão da forma: Se "A" Então "B" Senão "C", têm-se o seguinte:

$$\text{Se "A" Então "B" Senão "C"} \Leftrightarrow (A \times B + A' \times C)$$

Com o conhecimento da relação nebulosa R de U em V, e se A é um conjunto nebuloso em U, então o conjunto nebuloso B será dado pela composição de R e A ( $B = R \circ A$ ), ou seja, B é dado pelo produto max-min de A e R, da seguinte forma:

$$B = A \circ R \Leftrightarrow f_B(v) = \text{Sup}_u [f_A(u) \wedge f_R(u, v)] / (v)$$

(REGRA DE INFERÊNCIA COMPOSICIONAL)

#### • NÚMEROS NEBULOSOS

**DEFINIÇÃO:** Um **NÚMERO NEBULOSO** é um subconjunto nebuloso de uma linha real definido por sua função de pertinência  $f: R \rightarrow [0, 1]$ . [22]

Em sua forma mais utilizada, um número nebuloso pode ser definido pela quádrupla  $(a, b, \alpha, \beta)$ , onde  $\alpha$  é chamado de "largura da banda esquerda",  $\beta$  é a "largura da banda direita", e  $[a, b]$  é o intervalo fechado no qual a função de pertinência é igual a um (valor máximo). A forma da curva do lado esquerdo e direito pode ser limitada a uma função S, tal que  $S(-x) = S(x)$ . A figura abaixo dá um exemplo de número nebuloso.

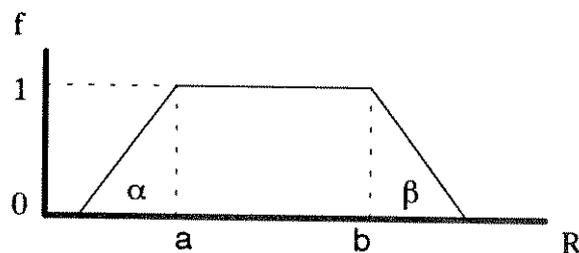


Figura 2.9 - Exemplo de Número Nebuloso

A definição da maneira de se efetuar as diversas operações, como a adição, subtração, multiplicação, divisão e exponenciação permitem o tratamento de números nebulosos similarmente ao tratamento dado aos números convencionais da álgebra clássica.

• PRINCÍPIO DA EXTENSÃO

O Princípio da Extensão permite que qualquer função não-nebulosa torne-se nebulosa. Se os argumentos da função são representados como conjuntos nebulosos, então o valor de tal função é também um conjunto nebuloso com uma única função de pertinência.

Mais especificamente, considere que a variável  $X$  tome valores no universo  $U$ , e é restringida pela proposição " $X$  é  $A$ ". Além disso, assumamos que " $f$ " é um mapeamento de  $U$  a  $V$ , tal que  $X$  é mapeado em  $f(X)$ . O que se deseja saber é qual a restrição em  $f(X)$  induzida pela restrição em  $X$ . [68]

A resposta obtida pelo uso do Princípio da Extensão pode ser expressa por:

$$\frac{X \text{ é } A}{f(X) \text{ é } f(A)}$$

onde a função de pertinência  $f(A)$  é dada por:

$$fA(v) = \sup_u fA(u)$$

sujeito à condição  $v = f(u)$ ,  $u \in U$  e  $v \in V$ .

O Princípio da Extensão é uma das mais importantes ferramentas da Teoria dos Conjuntos, pois é através de seu uso que torna-se possível a transição entre elementos não-nebulosos e conceitos nebulosos.

• TEORIA DA POSSIBILIDADE

**DEFINIÇÃO:** Se  $B$  é um conjunto nebuloso no universo de discurso  $U = \{u\}$ , e  $B$  é caracterizado pela função de pertinência  $f_B$ , então a proposição de forma " $X$  é  $B$ ", onde  $X$  é uma variável que toma valores em  $U$ , induz uma **DISTRIBUIÇÃO DE POSSIBILIDADE** ( $\Pi_X$ ), a qual expressa a compatibilidade de  $u$  com  $B$ , e é denotada por:

$$\Pi(X = u) = \Pi_X(u) \cdot f_B(u)$$

O conjunto B pode ser tratado como sendo uma "Restrição Nebulosa" em X, pois ele atua como uma restrição aos valores que podem ser atribuídos a X. [65]

## 2.5. RESUMO

O capítulo 2 apresentou de forma breve os principais conceitos e metodologias que serviram de suporte para o desenvolvimento da Rede de Petri Nebulosa Estendida.

O estudo de metodologias para Representação de Conhecimento forneceu base teórica para o estudo do sistema desenvolvido com a finalidade desejada. Já no caso das Redes de Petri, o estudo descrito facilita o entendimento das propriedades e métodos de análise para as RPNE's.

Para se atender aos requisitos necessários definidos para esta nova metodologia, tratamento de incertezas e aspectos vagos, a utilização e estudo da Lógica Nebulosa e da Teoria dos conjuntos foi essencial.

No próximo capítulo está descrita formalmente a proposta deste trabalho, a Rede de Petri Nebulosa Estendida, incluindo suas propriedades, métodos de análise e forma de utilização.

# CAP. 3. REDE DE PETRI NEBULOSA ESTENDIDA

## 3.1 INTRODUÇÃO

A Rede de Petri Nebulosa Estendida (RPNE) é a proposta deste trabalho para a modelagem e processamento de conhecimento descrito sob a forma de regras de produção nebulosas. Esta metodologia permite que tais regras sejam transformadas na RPNE equivalente e, a partir deste ponto, pode-se efetuar o processamento do conhecimento embutido com o objetivo de se obter as respostas desejadas do modelo proposto.

As principais características que dirigiram o desenvolvimento da RPNE foram: a necessidade de uma metodologia que possuísse flexibilidade suficiente para representar o conhecimento especialista, bem como senso comum; generalidade para suportar diversas formas de raciocínio dedutivo; e um processo eficiente de aquisição de conhecimento.

Além disso, uma representação gráfica que facilite a interpretação do conhecimento armazenado e a possibilidade de introduzir características que permitam o aprendizado de alguns fatores da rede são características apreciáveis em abordagens desta natureza.

Assim sendo, esta metodologia surgiu de um aprimoramento do trabalho apresentado por Chen et. al. [15], no qual foram introduzidas modificações que alteram a capacidade de modelagem e processamento de conhecimento em Redes de Petri Nebulosas.

Outra tentativa em relação à proposta de transformação de regras de produção nebulosas em Rede de Petri Nebulosa é descrita por Looney [40]. Nesta proposta, a técnica de raciocínio nebuloso via transformação dos vetores de estado do valor verdade é estendido para as Redes de Petri. Modificações foram realizadas no modelo de Redes de Petri clássica para permitir o raciocínio nebuloso baseado em regras através da lógica proposicional.

Contudo, apesar de apresentar ferramentas analíticas adequadas para o estudo de propriedades relativas à modelagem e processamento de conhecimento sob a forma de equações matriciais que governam o comportamento e dinâmica da rede, esta metodologia não fornece o suporte necessário para atender os objetivos propostos com relação à generalidade na representação de conhecimento (não permite a inclusão de fatores de certeza múltiplos para cada regra e não existe o conceito de valor limite de disparo nesta abordagem). Em razão dos argumentos anteriormente citados, esta abordagem não representa papel significativo no desenvolvimento da RPNE.

## 3.2 DEFINIÇÃO FORMAL DA RPNE

Antes porém de apresentar a estrutura formal e o processo de transformação das regras de produção nebulosas na RPNE equivalente, alguns conceitos precisam ser claramente definidos.

#### • DISPOSIÇÃO:

Segundo Zadeh [67], uma disposição é uma proposição que é preponderantemente, mas não necessariamente sempre verdadeira. Assim sendo, uma disposição é uma proposição com quantificadores nebulosos extremos como, por exemplo: a maioria, frequentemente, raramente, uma pequena fração, etc. O processo de EXPLICAÇÃO consiste em expor os quantificadores nebulosos implícitos em uma regra.

A importância do conceito de disposição surge do fato de que uma coleção de disposições pode ser encarada como conhecimento de senso comum, [66] e portanto, permitem que a RPNE represente este tipo de conhecimento, não se restringindo somente ao conhecimento especialista.

#### • FATOR DE CERTEZA ( $\mu$ ):

Este é o conceito associado à credibilidade que a regra de produção nebulosa possui, e também, ao tipo de conhecimento representado (conhecimento especialista ou de senso comum). A incerteza gerada pela representação de conhecimento vago ou incompleto e pelos eventos estocásticos requer um parâmetro que exprima a certeza que se possui em cada uma das regras. [03]

No conhecimento do tipo especialista, a definição deste fator (número real) é feita pelo próprio especialista, levando em consideração a confiança depositada na regra por ele mesmo formulada. Já no caso de conhecimento de senso comum, o fator de certeza assume a forma da função que define o quantificador nebuloso utilizado nas disposições contidas nas regras.

#### • VALOR LIMITE DE DISPARO ( $\lambda$ ):

O Valor Limite de Disparo é o fator que determina se uma regra pode ser disparada. Caso os valores verdade dos antecedentes da regra forem maiores ou iguais a  $\lambda$ , ocorre o disparo. Caso contrário, a regra não pode ser acionada. O uso deste fator tenta representar o conceito de que, além de um certo limite, deve-se ignorar o que se considera irrelevante ou não razoável.

#### • VALOR VERDADE ( $\alpha(p_i)$ ):

O valor verdade representa o grau de verdade associado a cada disposição. Durante o processamento na RPNE, este é o valor que cada marca assume após o processamento das regras e significa a avaliação da credibilidade ou confiança com que se pode afirmar que o conteúdo (significado) da disposição associada  $\beta(p_i)$  é verdadeira.

A estrutura formal da **RPNE** pode ser descrita da seguinte forma:

$$\text{RPNE} = \{ P, T, D, I, O, N, f, g, \alpha, \beta, \delta \}$$

- **P** é o conjunto finito de lugares pertencentes à **RPNE**.

$$P = \{ p_1, p_2, \dots, p_n \}$$

- **T** é o conjunto finito de transições da **RPNE**.

$$T = \{ t_1, t_2, \dots, t_m \}$$

- **D** é o conjunto finito de disposições da **RPNE**, sendo que cada disposição corresponde a um e somente um lugar na rede.

$$D = \{ d_1, d_2, \dots, d_n \}$$

Portanto:  $|P| = |D|$  (número de elementos no conjunto **P** é igual ao do conjunto **D**)

$$P \cap T = \emptyset$$

$$P \cap D = \emptyset$$

$$T \cap D = \emptyset$$

- **I** é a função de entrada (*INPUT*), isto é, um mapeamento das transições no conjunto dos lugares de entrada respectivos.

$$I: T \rightarrow P$$

- **O** é a função de saída (*OUTPUT*) que faz o mapeamento das transições no conjunto dos lugares de saída respectivos.

$$O: T \rightarrow P$$

- **N** é o conjunto de normas utilizadas durante o processo de modelagem de conhecimento.

$$N = \{ \text{min}, \text{max}, \text{max-min}, \dots \}$$

- **f** é a função de associação dos lugares de entrada de uma transição aos seus respectivos fatores de certeza.  $\mu \in [0, 1]$

$$f: P \rightarrow [0, 1]$$

- $g$  é a função de associação das transições aos seus respectivos valores limites de disparo.  $\lambda \in [0, 1]$

$$g: T \rightarrow [0, 1]$$

- $\alpha$  é a função de associação da marca em cada lugar pertencente à rede com o seu respectivo valor verdade. (RPNE é segura)

$$\alpha: P \rightarrow [0, 1]$$

- $\beta$  é a função de associação de cada lugar pertencente à rede com a disposição associada.

$$\beta: P \rightarrow D$$

- $\delta$  é a função de associação dos lugares de saída de uma transição às respectivas normas utilizadas na avaliação do valor verdade durante o processamento de conhecimento embutido na rede.

$$\delta: T \rightarrow N$$

Como exemplo, na figura 3.1 (A e B) pode-se observar a descrição formal da RPNE, antes e após o disparo da transição  $t_1$ , como anteriormente apresentado.

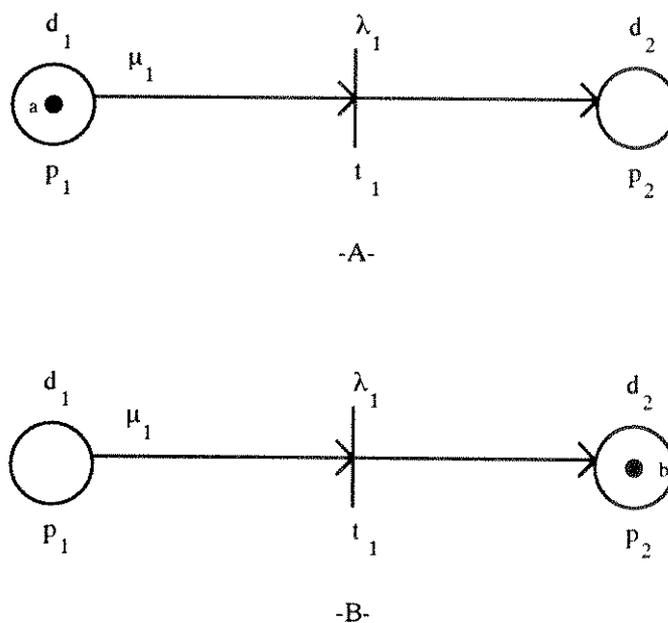


Figura 3.1: Exemplo de Descrição Formal RPNE.

Descrição Formal da **RPNE** apresentada na Figura 3.1

$$P = \{ p_1, p_2 \}$$

$$D = \{ d_1, d_2 \}$$

$$T = \{ t_1 \}$$

$$I(t_1) = \{ p_1 \}$$

$$O(t_1) = \{ p_2 \}$$

$$f(p_1) = \{ \mu_1 \}$$

$$g(t_1) = \{ \lambda_1 \}$$

$$\text{Fig. 3.1.A: } \alpha(p_1) = a \quad \alpha(p_2) = 0$$

$$\text{Fig. 3.1.B, caso } a \geq \lambda_1: \alpha(p_1) = 0 \quad \alpha(p_2) = a * \mu_1 = b$$

$$\beta(p_1) = d_1$$

$$\beta(p_2) = d_2$$

$$\delta(t_1) = *$$

onde:

- $p_1$  e  $p_2$  são os lugares associados às disposições  $d_1$  e  $d_2$  respectivamente.
- $t_1$  é a transição, a qual está relacionada ao valor limite de disparo  $\lambda_1$ .
- "a" e "b" são os valores verdade das marcas nos lugares  $p_1$  e  $p_2$  respectivamente.
- $\mu_1$  é o fator de certeza associado ao lugar  $p_1$ .
- \* é a norma utilizada para o cálculo do valor verdade da marca no lugar  $p_2$ , caso a transição  $t_1$  dispare.

Com relação à metodologia apresentada por Chen [15], as três modificações propostas e implementadas com o objetivo de melhorar a capacidade de representação de conhecimento são:

- utilização de diferentes tipos de normas para o cálculo do valor verdade dos lugares de saída das transições habilitadas, o que permite a modelagem de diversos tipos de raciocínio nebuloso.
- possibilidade de associação de um fator de certeza para cada lugar de entrada de uma transição, o que permite a modelagem de conhecimento especialista ou de senso comum.
- a designação de diferentes valores limite de disparo às diferentes proposições de uma mesma regra é utilizada de forma a expressar a relevância do conhecimento contido na regra.

A associação dos fatores acima citados permitem uma maior flexibilidade na capacidade de modelagem de conhecimento sob a forma de **RPNE**.

### 3.3 TRANSFORMAÇÃO DAS REGRAS DE PRODUÇÃO NEBULOSAS EM RPNE

Como apresentado em capítulos anteriores, as regras de produção nebulosas constituem um dos meios utilizados para a representação de conhecimento. Desta forma, após a obtenção do conjunto de regras nebulosas que representa o conhecimento a ser modelado e processado, a transformação deste conjunto na RPNE equivalente é trivial.

As regras de produção nebulosas podem ser divididas em dois grupos básicos: simples e composta. A diferença entre elas é que, no tipo simples, não estão presentes os conectivos lógicos "E" e "OU" ligando as disposições do antecedente ou do conseqüente da regra. Já no tipo composto, a presença dos conectivos é obrigatória[15]

Como exemplo, o conjunto abaixo, formado por duas regras de produção nebulosas do tipo simples, têm a sua representação sob a forma de RPNE apresentada na Figura 3.2.

Conjunto I de Regras Nebulosas do Tipo Simples

SE "velocidade é alta" ENTÃO "consumo é alto".  
SE "consumo é alto" ENTÃO "autonomia é baixa".

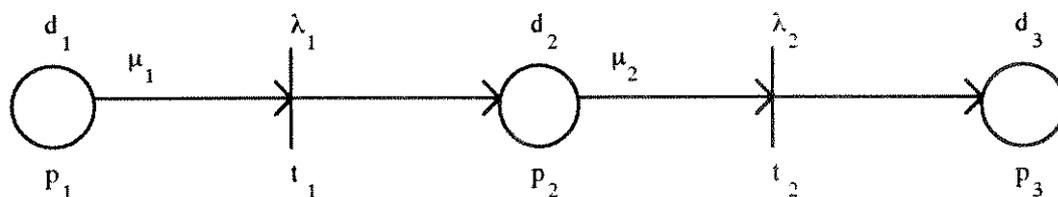


Figura 3.2. Representação do Conjunto I de Regras do Tipo Simples sob a Forma de RPNE.

onde:

- d<sub>1</sub> - velocidade é alta.
- d<sub>2</sub> - consumo é alto.
- d<sub>3</sub> - autonomia é baixa.
- \* e ^ - são as normas utilizadas no processo de raciocínio dedutivo.

Descrição Formal da **RPNE** apresentada na Figura 3.2

$$\begin{array}{lll}
 P = \{ p_1, p_2, p_3 \} & D = \{ d_1, d_2, d_3 \} & T = \{ t_1, t_2 \} \\
 \\
 I(t_1) = \{ p_1 \} & I(t_2) = \{ p_2 \} & \\
 O(t_1) = \{ p_2 \} & O(t_2) = \{ p_3 \} & \\
 f(p_1) = \{ \mu_1 \} & f(p_2) = \{ \mu_2 \} & \\
 g(t_1) = \{ \lambda_1 \} & g(t_2) = \{ \lambda_2 \} & \\
 \\
 \alpha(p_1) = 0 & \alpha(p_2) = 0 & \alpha(p_3) = 0 \\
 \beta(p_1) = d_1 & \beta(p_2) = d_2 & \beta(p_3) = d_3 \\
 \\
 \delta(t_1) = * & \delta(t_2) = ^ & 
 \end{array}$$

Já no caso das regras de produção nebulosas compostas, a transformação na **RPNE** equivalente é um pouco mais elaborada, e depende do tipo de conectivo ("E" ou "OU") utilizado em sua formulação. Portanto, pode-se distinguir quatro tipos básicos de regras, os quais suportam a modelagem e processamento de conhecimento de qualquer conjunto de regras que utilizem os conectivos "E" ou "OU". Os quatro tipos de regras de produção nebulosas compostas são:

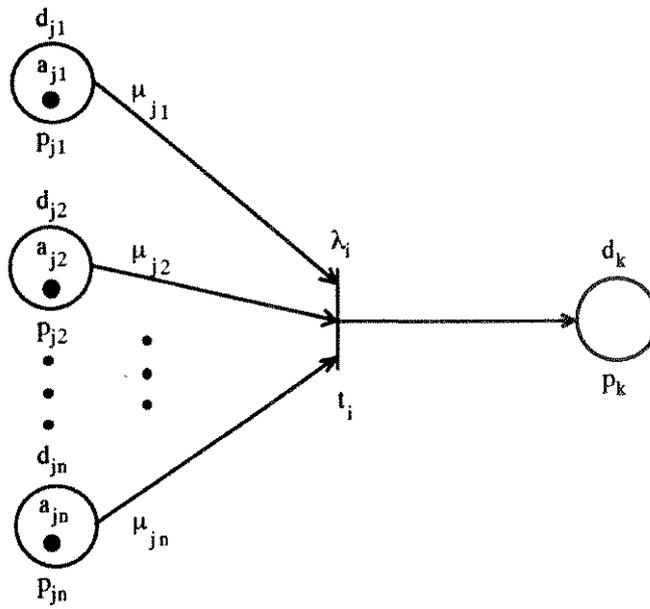
- TIPO I: SE  $d_{j1}$  "E"  $d_{j2}$  "E" ... "E"  $d_{jn}$  ENTÃO  $d_k$ .
- TIPO II: SE  $d_{j1}$  "OU"  $d_{j2}$  "OU" ... "OU"  $d_{jn}$  ENTÃO  $d_k$ .
- TIPO III: SE  $d_j$  ENTÃO  $d_{k1}$  "E"  $d_{k2}$  "E" ... "E"  $d_{kn}$ .
- TIPO IV: SE  $d_j$  ENTÃO  $d_{k1}$  "OU"  $d_{k2}$  "OU" ... "OU"  $d_{kn}$ .

A representação dos quatro tipos básicos de regras de produção nebulosas compostas sob a forma de **RPNE**, bem como a descrição formal e o tipo de processamento realizado (valor verdade das marcas antes e após o disparo das transições), podem ser observados, nas Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 a seguir, respeitando a notação abaixo.

**NOTAÇÃO:** \* e ^ - qualquer norma do tipo t.

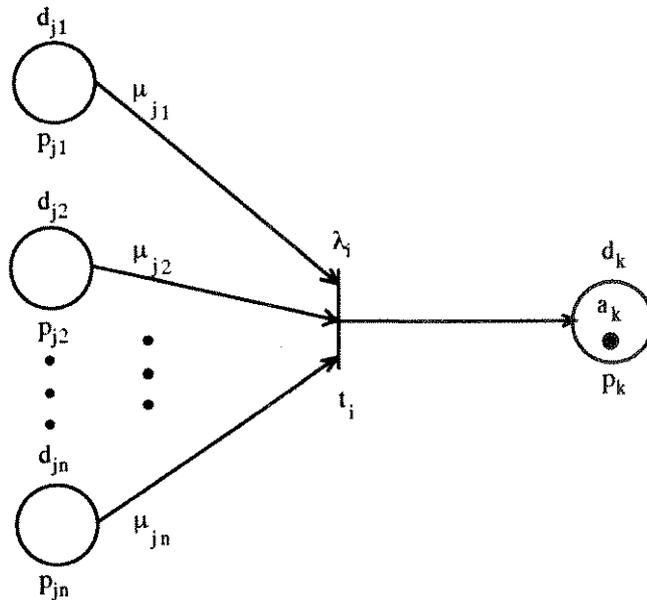
# - qualquer norma do tipo s.

TIPO I: SE  $d_{j1}$  "E"  $d_{j2}$  "E" ... "E"  $d_{jn}$  ENTÃO  $d_k$ .



-A-

caso  $a_{ji} \geq \lambda_i$ , para todo  $i = 1, 2, \dots, n$ :



-B-

Figura 3.3 - Representação sob a Forma de RPNE das Regras de Produção Nebulosas do TIPO I.

DESCRIÇÃO FORMAL DA RPNE APRESENTADA NA FIGURA 3.3  
REGRA DE PRODUÇÃO NEBULOSA COMPOSTA TIPO I

TIPO I: SE  $d_{j1}$  "E"  $d_{j2}$  "E" ... "E"  $d_{jn}$  ENTÃO  $d_k$ .

$$P = \{ p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jn}, p_k \} \quad D = \{ d_{j1}, d_{j2}, \dots, d_{jn}, d_k \} \quad T = \{ t_i \}$$

$$I(t_i) = \{ p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jn} \} \quad O(t_i) = \{ p_k \}$$

$$f(p_{j1}) = \{ \mu_{j1} \} \quad f(p_{j2}) = \{ \mu_{j2} \} \quad \dots \quad f(p_{jn}) = \{ \mu_{jn} \}$$

$$g(t_i) = \{ \lambda_i \}$$

$$\beta(p_{j1}) = d_{j1} \quad \beta(p_{j2}) = d_{j2} \quad \dots \quad \beta(p_{jn}) = d_{jn} \quad \beta(p_k) = d_k$$

$$\delta(t_i) \in \{ *, ^ \}$$

$$\text{caso (-A-): } \alpha(p_{j1}) = a_{j1} \quad \alpha(p_{j2}) = a_{j2} \quad \dots \quad \alpha(p_{jn}) = a_{jn} \quad \alpha(p_k) = 0$$

$$\text{caso (-B-): } \alpha(p_{j1}) = 0 \quad \alpha(p_{j2}) = 0 \quad \dots \quad \alpha(p_{jn}) = 0 \quad \alpha(p_k) = a_k$$

$$\text{onde: } \alpha(p_k) = a_k = * ( a_{ji} \wedge \mu_{ji} ) \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

DESCRIÇÃO FORMAL DA RPNE APRESENTADA NA FIGURA 3.4  
REGRA DE PRODUÇÃO NEBULOSA COMPOSTA TIPO II

TIPO II: SE  $d_{j1}$  "OU"  $d_{j2}$  "OU" ... "OU"  $d_{jn}$  ENTÃO  $d_k$ .

$$P = \{ p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jn}, p_k \} \quad D = \{ d_{j1}, d_{j2}, \dots, d_{jn}, d_k \} \quad T = \{ t_1, t_2, \dots, t_n \}$$

$$I(t_i) = \{ p_{ji} \} \quad O(t_i) = \{ p_k \}$$

$$f(p_{j1}) = \{ \mu_{j1} \} \quad f(p_{j2}) = \{ \mu_{j2} \} \quad \dots \quad f(p_{jn}) = \{ \mu_{jn} \}$$

$$g(t_1) = \{ \lambda_1 \} \quad g(t_2) = \{ \lambda_2 \} \quad \dots \quad g(t_n) = \{ \lambda_n \}$$

$$\beta(p_{j1}) = d_{j1} \quad \beta(p_{j2}) = d_{j2} \quad \dots \quad \beta(p_{jn}) = d_{jn} \quad \beta(p_k) = d_k$$

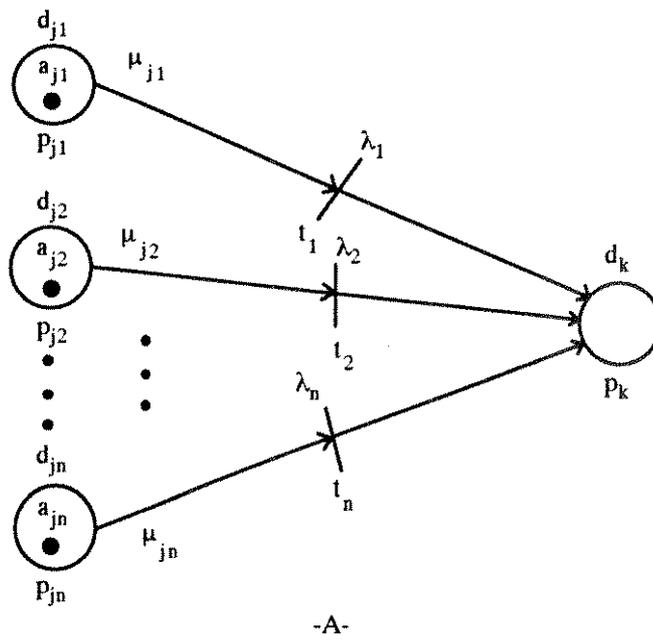
$$\delta(t_i) \in \{ ^, \# \}$$

$$\text{caso (-A-): } \alpha(p_{j1}) = a_{j1} \quad \alpha(p_{j2}) = a_{j2} \quad \dots \quad \alpha(p_{jn}) = a_{jn} \quad \alpha(p_k) = 0$$

$$\text{caso (-B-): } \alpha(p_{j1}) = 0 \quad \alpha(p_{j2}) = 0 \quad \dots \quad \alpha(p_{jn}) = 0 \quad \alpha(p_k) = a_k$$

$$\text{onde: } \alpha(p_k) = a_k = \# ( a_{ji} \wedge \mu_{ji} ) \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

TIPO II: SE  $d_{j1}$  "OU"  $d_{j2}$  "OU" ... "OU"  $d_{jn}$  ENTÃO  $d_k$ .



caso  $a_{ji} \geq \lambda_i$ , para todo  $i = 1, 2, \dots, n$ :

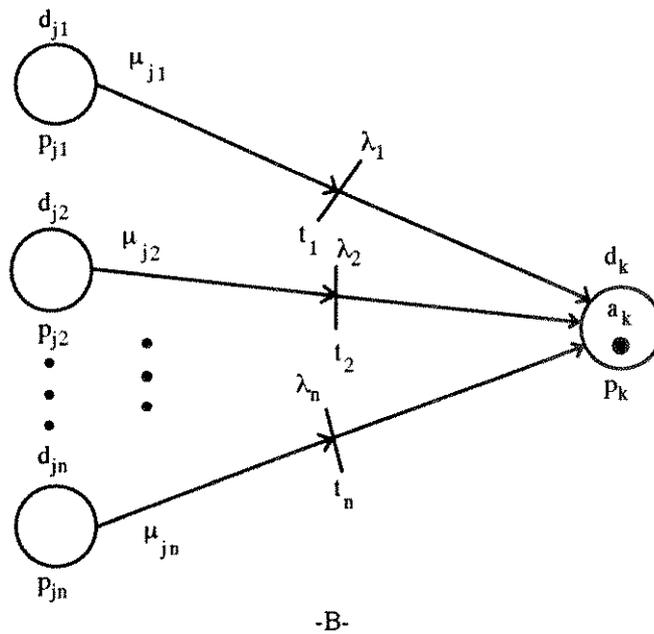
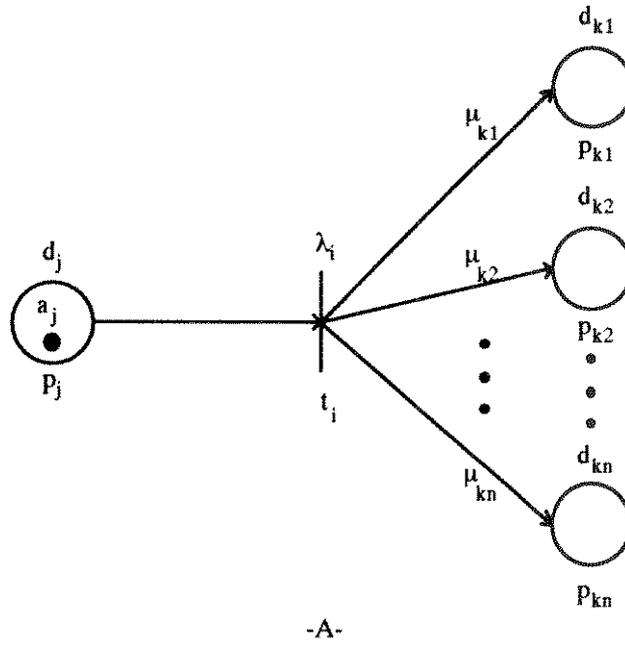


Figura 3.4 - Representação sob a Forma de RPNE das Regras de Produção Nebulosas do TIPO II.

TIPO III: SE  $d_j$  ENTÃO  $d_{k1}$  "E"  $d_{k2}$  "E" ... "E"  $d_{kn}$ .



caso  $a_j \geq \lambda_i$  :

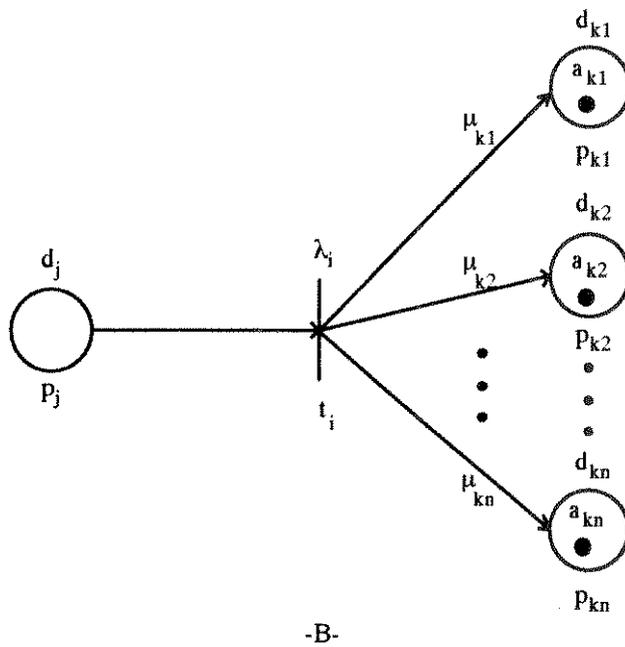


Figura 3.5 - Representação sob a Forma de RPNE das Regras de Produção Nebulosas do TIPO III.

DESCRIÇÃO FORMAL DA RPNE APRESENTADA NA FIGURA 3.5

REGRA DE PRODUÇÃO NEBULOSA COMPOSTA TIPO III

TIPO III: SE  $d_j$  ENTÃO  $d_{k1}$  "E"  $d_{k2}$  "E" ... "E"  $d_{kn}$ .

$$P = \{ p_j, p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kn} \} \quad D = \{ d_j, d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{kn} \} \quad T = \{ t_i \}$$

$$I(t_i) = \{ p_j \} \quad O(t_i) = \{ p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kn} \}$$

$$f(p_{k1}) = \{ \mu_{k1} \} \quad f(p_{k2}) = \{ \mu_{k2} \} \quad \dots \quad f(p_{kn}) = \{ \mu_{kn} \}$$

$$g(t_i) \in \{ \lambda_i \}$$

$$\beta(p_j) = d_j \quad \beta(p_{k1}) = d_{k1} \quad \beta(p_{k2}) = d_{k2} \quad \dots \quad \beta(p_{kn}) = d_{kn}$$

$$\delta(t_i) = \{ * \}$$

$$\text{caso (-A-): } \alpha(p_j) = a_j \quad \alpha(p_{k1}) = 0 \quad \alpha(p_{k2}) = 0 \quad \dots \quad \alpha(p_{kn}) = 0$$

$$\text{caso (-B-): } \alpha(p_j) = 0 \quad \alpha(p_{k1}) = a_{k1} \quad \alpha(p_{kn}) = a_{kn}$$

$$\text{onde: } \alpha(p_{ki}) = a_{ki} = (a_j * \mu_{ki}) \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

DESCRIÇÃO FORMAL DA RPNE APRESENTADA NA FIGURA 3.6

REGRA DE PRODUÇÃO NEBULOSA COMPOSTA TIPO IV

TIPO IV: SE  $d_j$  ENTÃO  $d_{k1}$  "OU"  $d_{k2}$  "OU" ... "OU"  $d_{kn}$ .

$$P = \{ p_j, p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kn} \} \quad D = \{ d_j, d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{kn} \} \quad T = \{ t_1, t_2, \dots, t_n \}$$

$$I(t_i) = \{ p_j \} \quad O(t_i) = \{ p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kn} \}$$

$$f(p_{k1}) = \{ \mu_{k1} \} \quad f(p_{k2}) = \{ \mu_{k2} \} \quad \dots \quad f(p_{kn}) = \{ \mu_{kn} \}$$

$$g(t_1) = \{ \lambda_1 \} \quad g(t_2) = \{ \lambda_2 \} \quad \dots \quad g(t_n) = \{ \lambda_n \}$$

$$\beta(p_j) = d_j \quad \beta(p_{k1}) = d_{k1} \quad \beta(p_{k2}) = d_{k2} \quad \dots \quad \beta(p_{kn}) = d_{kn}$$

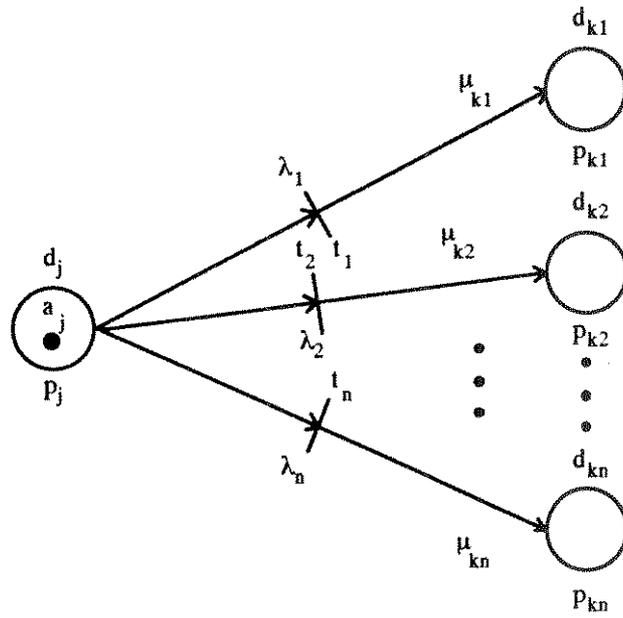
$$\delta(t_i) \in \{ \wedge \}$$

$$\text{caso (-A-): } \alpha(p_j) = a_j \quad \alpha(p_{k1}) = 0 \quad \alpha(p_{k2}) = 0 \quad \dots \quad \alpha(p_{kn}) = 0$$

$$\text{caso (-B-): } \alpha(p_j) = 0 \quad \alpha(p_{k1}) = a_{k1} \quad \alpha(p_{k2}) = a_{k2} \quad \dots \quad \alpha(p_{kn}) = a_{kn}$$

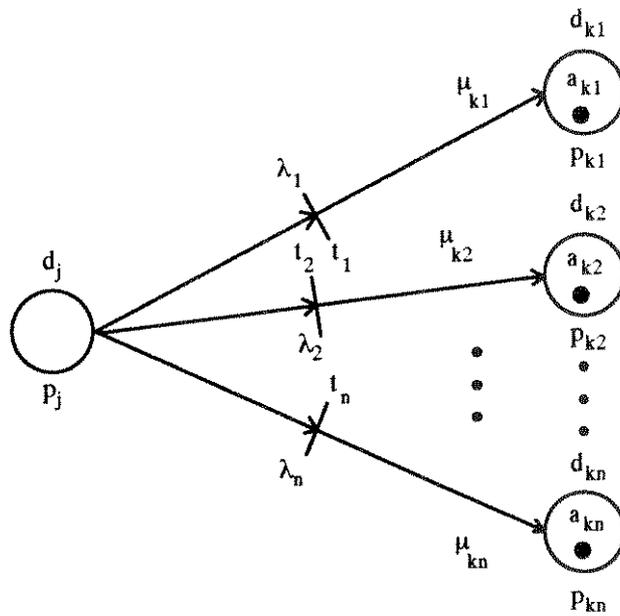
$$\text{onde: } \alpha(p_{ki}) = a_{ki} = (a_j \wedge \mu_{ji}) \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

TIPO IV: SE  $d_j$  ENTÃO  $d_{k1}$  "OU"  $d_{k2}$  "OU" ... "OU"  $d_{kn}$ .



-A-

caso  $a_j \geq \lambda_i$ , para  $i = 1, 2, \dots, n$ :



-B-

Figura 3.6 - Representação sob a Forma de RPNE das Regras de Produção Nebulosas do TIPO IV.

Como mencionado por Chen et. al. [15], a regra de produção nebulosa composta do tipo IV faz parte do conjunto de possíveis formas de representação de conhecimento. Porém, esta não se adequa ao processamento de conhecimento (raciocínio dedutivo) já que não realiza implicações específicas.

Como exemplo, o conjunto de regras de produção nebulosas compostas apresentado a seguir, foi proposto por uma série de especialistas na área para o diagnóstico de Defeitos no Septo Atrial (DSA) [35]. A RPNE correspondente a este conjunto está representada na Figura 3.7. Antes porém, pode ser observada a sua descrição formal.

### CONJUNTO DE REGRAS PARA O DIAGNÓSTICO DE DSA

- SE "divisão fixa S2" E "ejeção de murmúrios de fluxo crescente" ENTÃO A
- SE "marcas vasculares pulmonares crescentes no raio X" E "dilatação das artérias pulmonares do tronco no raio X" E "bloqueio no ramo de feixes direito no eletrocardiograma" ENTÃO B

- SE "A" OU "B" ENTÃO DSA

DESCRIÇÃO FORMAL DA RPNE APRESENTADA NA FIGURA 3.7

CONJUNTO DE REGRAS DE PRODUÇÃO NEBULOSAS PARA O DIAGNÓSTICO DE DSA

$$P = \{ p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8 \} \quad D = \{ d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8 \}$$

$$T = \{ t_1, t_2, t_3, t_4 \}$$

$$I(t_1) = \{ p_1, p_2 \} \quad I(t_2) = \{ p_3, p_4, p_5 \} \quad I(t_3) = \{ p_6 \} \quad I(t_4) = \{ p_7 \}$$

$$O(t_1) = \{ p_6 \} \quad O(t_2) = \{ p_7 \} \quad O(t_3) = \{ p_8 \} \quad O(t_4) = \{ p_8 \}$$
  

$$f(p_1) = \{ \mu_1 \} \quad f(p_2) = \{ \mu_2 \} \quad \dots \quad f(p_8) = \{ \mu_8 \}$$

$$g(t_1) = \{ \lambda_1 \} \quad g(t_2) = \{ \lambda_2 \} \quad \dots \quad g(t_8) = \{ \lambda_8 \}$$

$$\beta(p_1) = d_1 \quad \beta(p_2) = d_2 \quad \dots \quad \beta(p_8) = d_8$$

$$\delta(t_i) \in \{ ^, *, \# \}$$

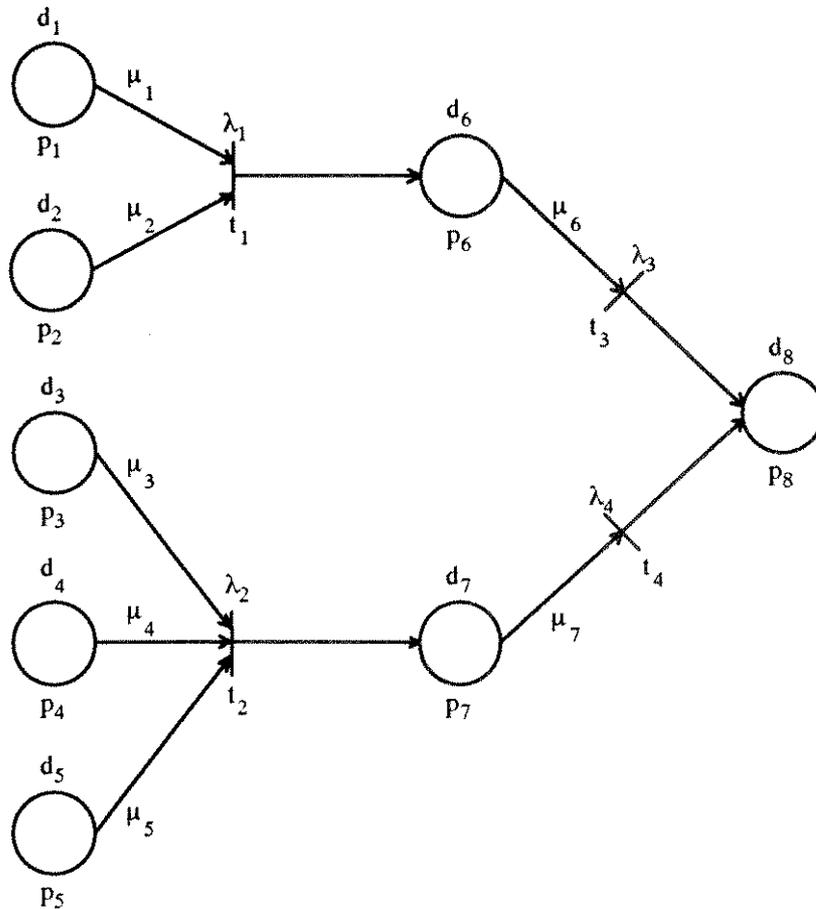


Figura 3.7 - RPNE equivalente ao Conjunto de Regras para o Diagnóstico de DSA.

onde:

- **d<sub>1</sub>** - divisão fixa S2.
- **d<sub>2</sub>** - ejeção de murmúrios de fluxo crescente.
- **d<sub>3</sub>** - marcas vasculares pulmonares crescentes no raio X.
- **d<sub>4</sub>** - dilatação das artérias pulmonares do tronco no raio X.
- **d<sub>5</sub>** - bloqueio no ramo de feixes direito no eletrocardiograma.
- **d<sub>6</sub>** - disposição A.
- **d<sub>7</sub>** - disposição B.
- **d<sub>8</sub>** - defeito no septo atrial (DSA).

Deve-se notar que as disposições **d<sub>6</sub>** e **d<sub>7</sub>** correspondem às deduções intermediárias A e B, cujos significados são puramente abstratos, servindo apenas com propósitos dedutivos. Além disso, a definição dos valores de limite de disparo das transições e dos fatores de certeza da RPNE dependem da credibilidade dada a cada regra, pelo especialista, em sua formulação.

### 3.4 PROPRIEDADES DA RPNE

Da mesma forma que outras variações surgidas a partir da Rede de Petri clássica [21], apresentada pela primeira vez por C.A. Petri [50], a RPNE possui características próprias que não estão presentes em outras versões. Portanto, as propriedades aqui descritas têm por objetivo apresentar elementos de análise úteis no estudo da metodologia desenvolvida quanto a sua finalidade principal, que é a modelagem e processamento de conhecimento.

Contudo, existem métodos tradicionais para a análise de Redes de Petri, como é o caso da "Árvore de Alcançabilidade" [46] e "Técnicas de Redução/Decomposição" [54], que podem ser utilizados, com algumas restrições, no estudo das propriedades das RPNE 's.

Porém, o uso da técnica clássica de abordagem por "Equações Matriciais", utilizada na análise das propriedades de algumas sub-classes especiais de Redes de Petri, fica impossibilitada pela ausência de uma representação da RPNE sob a forma de equações matriciais que se adeque aos métodos já desenvolvidos e em uso.

A seguir são apresentadas as principais características inerentes às RPNE 's.

#### • PROPRIEDADE DA LIMITAÇÃO

A limitação é uma propriedade relacionada ao número de marcas que podem estar presentes em um determinado lugar da rede no mesmo instante de tempo. Caso este número seja igual a um, a Rede de Petri é chamada de "segura".

A RPNE é naturalmente segura pois, conforme representado na figuras 3.3 e 3.4, o número de marcas presentes em um único lugar é sempre menor ou igual a um. Esta característica se deve a forma de disparo das transições na rede, e ao fato de que, caso ocorra o fluxo de mais de uma marca para o mesmo lugar ( $p_i$ ), este lugar possuirá apenas uma marca, a qual possui o maior Valor Verdade  $\alpha(p_i)$ .

Sob o enfoque da representação e processamento de conhecimento, o fato da RPNE ser sempre segura garante que o Valor Verdade associado a uma disposição seja único e, além disso, o maior valor possível de ser atingido a partir do método de processamento utilizado e dos Valores Verdade associados às marcas na marcação inicial da rede.

Isto significa que a credibilidade dada a qualquer disposição presente na RPNE, durante o processo de raciocínio dedutivo, é sempre única e a maior possível.

#### • PROPRIEDADE DA FINALIZAÇÃO

Esta propriedade está diretamente relacionada com a dinâmica da evolução da marcação inicial até a final em uma RPNE. A seguir é apresentado um teorema relevante com relação ao uso desta propriedade para a modelagem e processamento de conhecimento.

**DEFINIÇÃO:** Extensão da Cadeia Máxima (ECM) é a extensão máxima entre todas as possíveis seqüências de disparo em uma RPNE qualquer, a partir do estado inicial (marcação inicial  $M_0$ ). No cálculo da ECM deve-se enumerar todo lugar e transição pertencente ao caminho máximo que leva ao lugar objetivo.

**Teorema:** Se  $T$  é a Extensão da Cadeia Máxima (ECM) de uma RPNE, então o número de disparos de transições necessários para alcançar qualquer estado final (marcação objetivo  $M$ ) a partir do estado inicial (marcação inicial  $M_0$ ) é finito e não excede a  $\lceil T/2 \rceil$ , onde a notação  $\lceil x \rceil$  significa o maior número inteiro menor ou igual a  $x$ .

**Prova:** Para cada transição que dispara em uma RPNE, há um lugar de entrada e um de saída, no mínimo, associados a esta transição. Quando ocorre o disparo, as marcas transferem-se dos lugares de entrada para os de saída, habilitando outras transições, formando assim a cadeia de implicações (raciocínio dedutivo).

Desta forma, em todo disparo de transição, as marcas percorrem, ao menos, dois lugares e uma transição. Lembrando que em uma RPNE não existem ciclos, entre  $n$  lugares pertencentes à uma rede qualquer há, no máximo,  $n-1$  transições. Portanto, o número de lugares e transições em uma rede qualquer é, no máximo,  $n + n - 1$ . Logo, para o caso extremo:

$$T = n + n - 1$$

$$n - 1 = \lceil T/2 \rceil$$

Isto significa que número de disparos necessários para atingir o estado final é limitado a, no máximo,  $\lceil T/2 \rceil$ .

Como exemplo, se for tomada a RPNE apresentada na figura 3.7, o número máximo de lugares somado com o número de transições dos caminhos que atingem o lugar objetivo é igual a 5, que seria a ECM desta rede. Portanto, o número de disparos de transições necessários para se atingir o estado objetivo (conclusão - lugar "pg") fica limitado a, no máximo:

$$\lceil ECM/2 \rceil = \lceil 5/2 \rceil = 2$$

Portanto, a rede considerada como exemplo atinge a conclusão ("lugar objetivo") em, no máximo, dois disparos de transições pertencentes a um caminho que leve ao estado objetivo.

Conclui-se que, para um conjunto finito de regras de produção nebulosas, simples ou compostas, a RPNE equivalente possui um número finito de lugares e transições, e portanto, a marcação final (objetivo do processo dedutivo) é atingida, caso possível, em um número finito de disparos de transições da RPNE.

Sob o aspecto de representação e processamento de conhecimento, esta é uma propriedade forte, pois assegura que os valores verdade das disposições a serem deduzidas a partir da atribuição dos valores verdade às disposições iniciais são alcançados, no máximo, em um número finito de passos.

• PROPRIEDADE DA ALCANÇABILIDADE

Sendo esta a propriedade básica para o estudo de propriedades dinâmicas das Redes de Petri clássicas, no contexto desta abordagem ela determina o relacionamento entre as diversas conclusões (conjunto de disposições) que são dedutíveis a partir de um conjunto inicial qualquer de disposições (marcação inicial).

Considera-se que uma marcação qualquer  $M$  é alcançável a partir da marcação inicial  $M_0$  se existe uma sequência de disparo  $\sigma$ , que leva  $M_0$  à  $M$ , sem considerar o valor verdade das marcações e valores limites de disparo  $\lambda$  de todas as transições presentes na RPNE.

Tal propriedade pode ser analisada através da construção da "Árvore de Alcançabilidade", que consiste na formação de uma árvore onde o nó raiz é a marcação inicial  $M_0$ , e cada nó descendente do nó raiz representa uma marcação atingível a partir de  $M_0$  pelo disparo das transições da RPNE, formando assim a sequência de disparo  $\sigma$ .

Com o desenvolvimento de *hardware* (nos aspectos de capacidade de memória e velocidade de processamento) e de novos métodos computacionais, este método de análise que era de aplicação limitada a redes de pequeno porte (número de lugares e transições pequenos), devido à complexidade da explosão de espaço de estados durante a construção da "Árvore de Alcançabilidade"[46], atualmente também pode ser aplicado à redes de grande porte.

A construção de tal árvore é importante quando deseja-se saber quais são as disposições passíveis de conclusão a partir de um conjunto inicial qualquer de disposições (marcação inicial  $M_0$ ) em uma RPNE. Por exemplo, na figura 3.7 suponha que na marcação inicial estão presentes marcas nos lugares  $p_1, p_2$  e  $p_5$ . A "Árvore de Alcançabilidade" para esta rede pode ser observada na Figura 3.8.

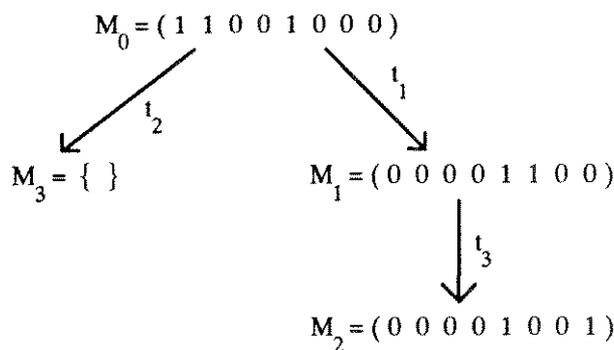


Figura 3.8 Árvore de Alcançabilidade.

onde:  $M_i = ( m(p_1) , m(p_2) , \dots , m(p_8) )$

$m(p_i)$  = presença ou ausência (1 ou 0) da marca no lugar  $p_i$ .

• uma vez que a rede é sempre segura, o valor zero ou um presente em  $M_i$  representa a presença e ausência, respectivamente, da marcação nos lugares da RPNE.

- ao lado das flechas que indicam as mudanças de  $M_i$  está determinada a transição cujo disparo determinou tal alteração.

Portanto, a partir da marcação inicial  $M_0$  podem ser atingidas somente  $M_1$  e  $M_2$ , através do disparo das transições  $t_1$  e  $t_3$  respectivamente. A transição  $t_2$  não dispara pois não existem marcas em todos os lugares pertencentes ao conjunto  $I(t_2)$ . Logo, a disposição  $d_7$  não pode ser deduzida a partir de  $M_0$ , pois  $m_7$  é sempre igual a zero em todas as marcações presentes na Árvore de Alcançabilidade.

### 3.5. RESUMO

Neste capítulo foi descrita a metodologia desenvolvida para representação e processamento de conhecimento, chamada de **RPNE**, juntamente com sua definição formal, método de transformação de regras de produção nebulosas compostas na rede correspondente, e também, algumas das propriedades que se aplicam a este tipo de rede.

No próximo capítulo será apresentado o exemplo de aplicação proposto na área de simulação de sistemas de manufatura baseada em conhecimento (montagem de regras de produção nebulosas para simular o comportamento dinâmico da célula), com ênfase na modelagem da célula de fabricação e na interpretação dos resultados obtidos.

## 4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA RPNE

### 4.1 INTRODUÇÃO

O exemplo de aplicação escolhido para demonstrar a capacidade de modelagem e processamento de conhecimento da RPNE é na área de Simulação de Sistemas de Manufatura. A razão desta escolha reside no fato de que, em muitas ocasiões, no processo de modelagem para simulação os aspectos vagos e/ou incertezas estão presentes.

Outro fator que conduziu esta escolha é a crescente diversidade de áreas de aplicação da Teoria dos Conjuntos Nebulosos e da Lógica Nebulosa em sistemas de manufatura, tal como em desenvolvimento de novos produtos, implementação de estratégias para CIM (*Computer Integrated Manufacturing*), gerenciamento de recursos humanos, planejamento da produção e de recursos, entre outras. [11][12][31][42][59]

Além disso, procurou-se escolher um sistema de manufatura real (Célula de Fabricação para Componentes de Motor Diesel para Locomotiva), onde pode-se verificar o desempenho do sistema desenvolvido, comparando-o com os resultados obtidos através da utilização de sistemas convencionais de simulação.

Porém, antes de apresentar o estudo realizado, uma conceituação teórica resumida a respeito de simulação de sistemas de manufatura se faz necessária, com o objetivo de permitir uma melhor avaliação entre a metodologia proposta e as já existentes na literatura e no mercado.

### 4.2. SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA

A manufatura de bens pode ser definida como um sistema de diversos níveis que integra os seus diferentes estágios, necessitando para isso insumos e dados de entrada definidos para se obter resultados esperados [02]. A figura 4.1 representa esquematicamente o sistema proposto.

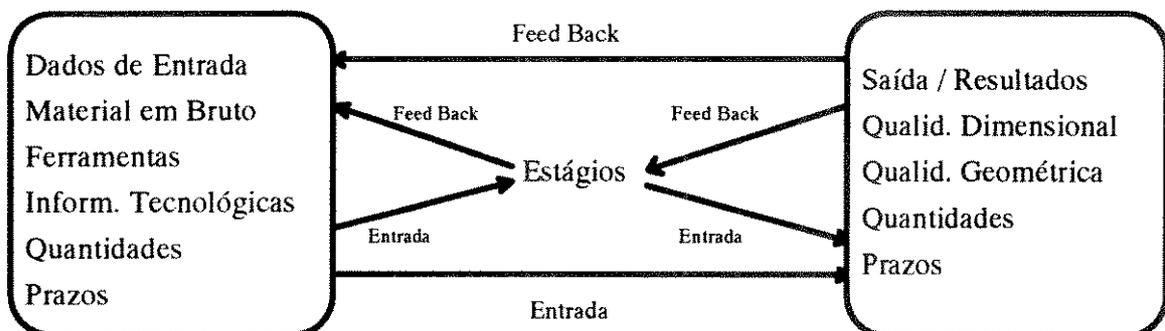


Figura 4.1 - Sistema de Manufatura Esquemático

A relação entre os dados de entrada, os estágios de fabricação e a saída/resultados se dão na forma de informação de entrada e *feed-back*. O fluxo de informações caracteriza o controle da produção e qualidade. Há também influências e informações externas que contribuem para determinar o comportamento dinâmico de um sistema de manufatura.

Enquanto a tecnologia envolvida em processos da manufatura têm se sofisticado e atendido às necessidades da indústria com relação à flexibilidade e complexidade, a adoção e implementação destas tecnologias têm sido esparsas devido a falta de procedimentos de justificativa apropriados.[55]

A justificativa para o emprego de técnicas de simulação em manufatura é que, nos últimos anos, como resultado da abertura das fronteiras (ex: Comunidade Européia e Mercosul) e da competição internacional, a indústria é forçada através do caminho da automação industrial e revisão das políticas e procedimentos adotados internamente. Porém, as ferramentas de análise existentes, em sua maioria, não são capazes de planejar um sistema de manufatura complexo sem que ocorram erros.

Portanto, a simulação começou a ser aceita como uma ferramenta muito poderosa e necessária para o planejamento, projeto, e controle de sistemas de produção complexos, como CIM (*Computer Integrated Manufacturing*), Células com Robôs e Sistemas de Produção (*Just-in-Time* e *Kanban*), antes de sua real implementação. [09]

Como definido por Sabuncuoglu e Hommertzheim, este é o papel desempenhado pela simulação em manufatura: "Genericamente, um modelo de simulação é um modelo descritivo de um sistema da vida real, se comparado a modelos normativos, tal qual a programação linear, a qual gera soluções possíveis. Portanto, ela é frequentemente utilizada para prever a performance de um sistema e avaliar diversas estratégias, algoritmos, regras, etc. Entretanto, a simulação é capaz de capturar os detalhes necessários da dinâmica e complexidade do sistema em estudo. Esta característica é muito importante em sistemas de manufatura porque é muito difícil para um modelo analítico tratar adequadamente a complexidade e o nível de detalhe presentes nestes sistemas". [53]

#### 4.2.1. HISTÓRIA DA SIMULAÇÃO

Historicamente, a simulação a eventos discretos começou a ser desenvolvida na década de 50, quando provavelmente foi produzida a primeira linguagem dedicada à simulação, a GSP (*the General Simulation Program*), por Tocher trabalhando na *United Steels*, Inglaterra. No mesmo período foi desenvolvido o GPSS (*General Purpose Simulation System*), que é certamente a linguagem para simulação mais utilizada no mundo. [47]

Durante os anos 60, a simulação consolidou-se como tópico de pesquisa e técnica de aplicação, o que levou ao desenvolvimento de diversas técnicas relativas aos problemas enfrentados pela simulação (geração de números aleatórios e análises estatísticas). Ainda neste período, surgiram outras linguagens direcionadas para simulação, sendo que a mais importante foi desenvolvida no *Norwegian Computer Center*, chamada de SIMULA, com características de programação orientada a objetos, a qual influenciou consideravelmente a área de representação de conhecimento em Inteligência Artificial.

Na década de 70, a evidência foi colocada na parte prática da simulação; foram desenvolvidos *softwares* que facilitavam a tarefa da programação (geradores automáticos de programas para simulação). Além disso, a interação do programa de simulação com o usuário foi melhorada com a utilização de gráficos e animação, como o sistema SEE-WHY. [47]

Os anos 80 vieram como uma retomada dos fundamentos teóricos e conceituais da simulação pois, tal como na área de representação de conhecimento, a falta de bases conceituais tornava difícil a comparação entre as diversas abordagens e linguagens para simulação. Este período concretizou uma nova era na área de simulação.

A estruturação da área neste período permitiu que, nos anos 90, tecnologias alternativas à área de simulação, como os Sistemas Especialistas, Abordagens Linguísticas, Redes de Petri e a Lógica Nebulosa, pudessem ser introduzidas de tal forma a tentar diminuir as dificuldades encontradas pelos usuários durante o processo. Uma avaliação das abordagens e técnicas para a modelagem e simulação de sistemas de manufatura é apresentada por Ekere e Hannam. [24]

## 4.2.2. FASES DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO

A simulação consiste de um processo iterativo que pode ser dividido em fases distintas, a saber:

- **DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS:** nesta etapa devem ser muito bem especificadas as características do sistema, bem como os objetivos a serem alcançados durante o processo (respostas desejadas da simulação).

- **CONSTRUÇÃO DO MODELO:** fase que envolve a transformação da definição do sistema, esquemas e processos em programas de computador. Esta etapa é facilitada caso haja uma metodologia amigável para a modelagem de sistemas.

- **SIMULAÇÃO:** é a execução pelo computador do programa de simulação, com linguagem própria e resultados que permitam um julgamento sobre o modelo executado.

- **VALIDAÇÃO DO MODELO:** o usuário deve ter confiança nos resultados do modelo proposto. Para sistemas reais, os resultados da simulação devem ser comparados com o histórico do sistema; já no caso de sistemas não implementados fisicamente, o processo de validação do modelo deve utilizar-se de recursos gráficos, como a animação, além de histogramas atualizados em tempo real.

- **CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS:** a fase de execução da simulação após a validação do modelo, onde realizam-se mudanças no valor das variáveis e parâmetros e armazena-se os resultados para a posterior análise.

- **ANÁLISE DE RESULTADOS:** etapa que consiste da escolha e aplicação de métodos para a análise dos resultados obtidos. Em sistemas convencionais de simulação, a aplicação de métodos estatísticos é uma prática comum e muitas vezes já vem incorporada ao próprio sistema.

Graficamente, pode-se visualizar o processo iterativo da simulação na figura 4.2.

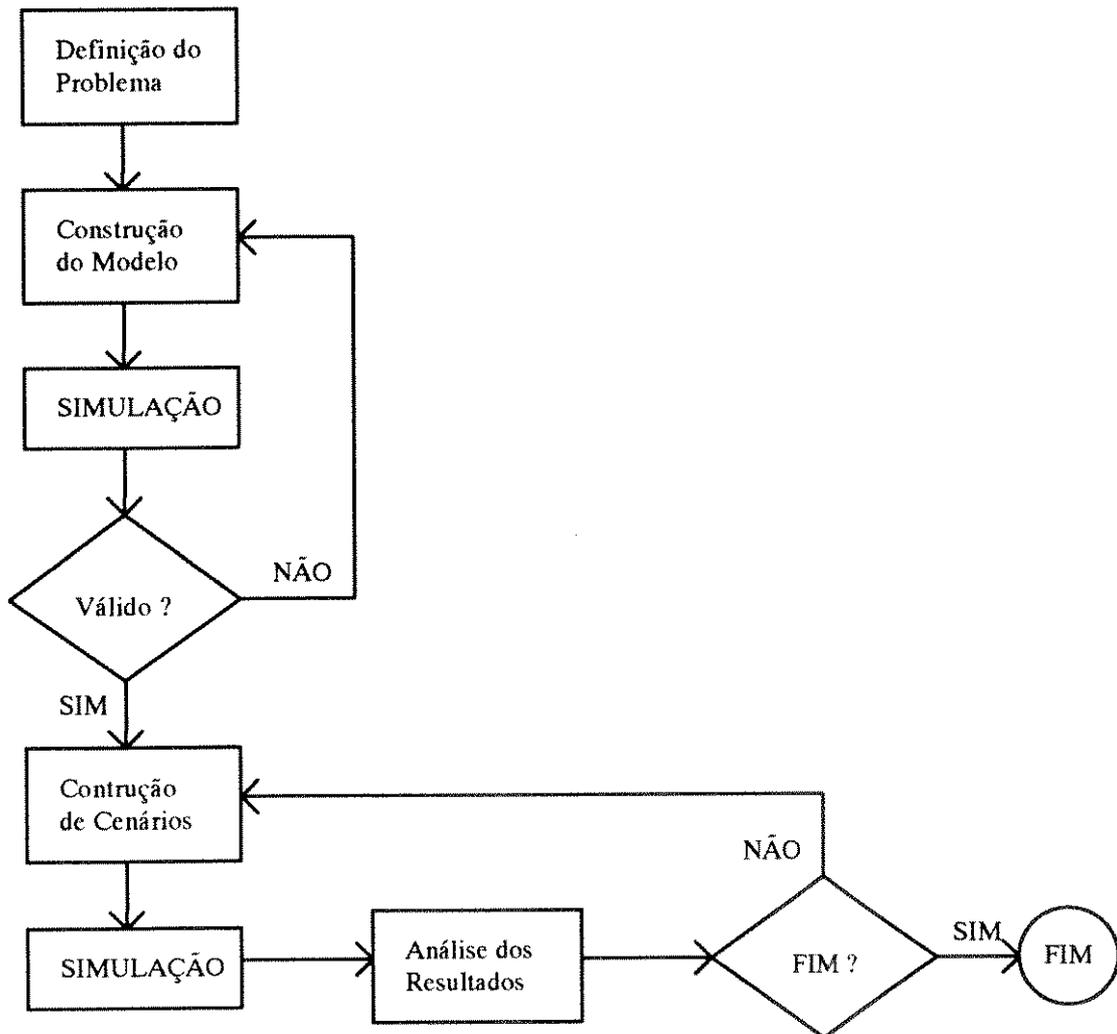
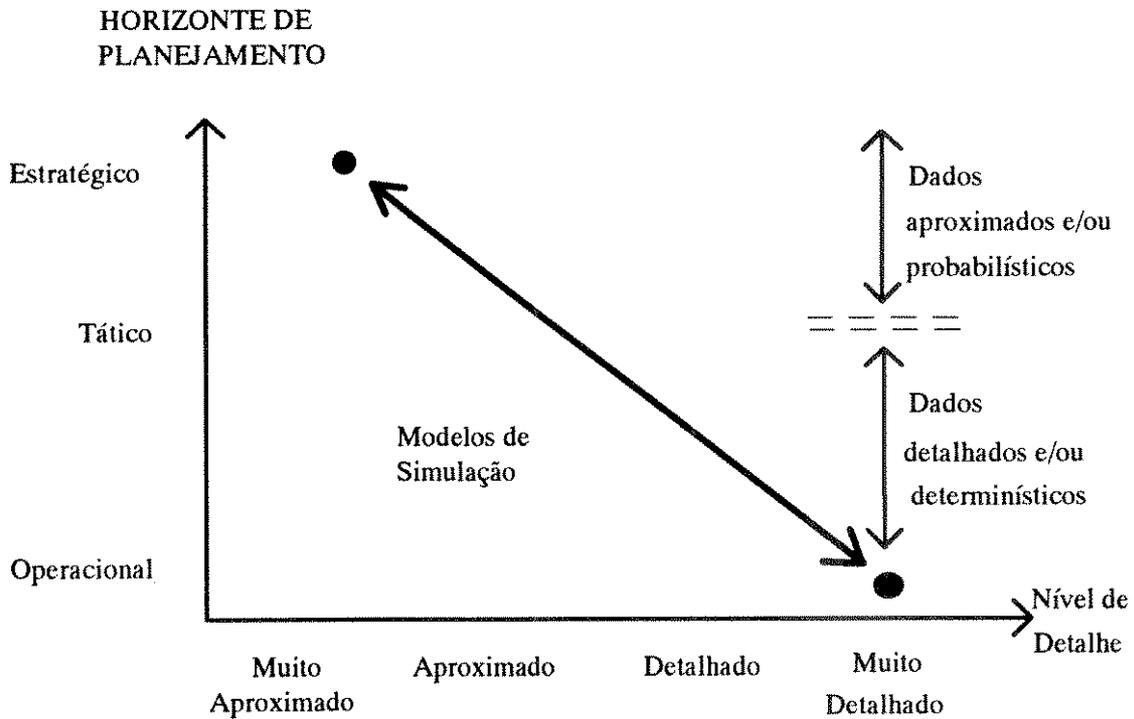


Figura 4.2 - Etapas do Processo de Simulação

Outra característica importante na definição do processo de simulação diz respeito à definição de diferentes níveis de detalhamento do modelo proposto. Tendo em consideração o horizonte de planejamento, podem ser construídos diferentes modelos para o mesmo sistema, cada um com uma aplicação em particular.

No caso de sistemas de manufatura, a simulação é necessária para uma vasta variedade de áreas, variando de problemas de sequenciamento de máquinas e operações ao planejamento estratégico. A figura 4.3. mostra diferentes níveis de abstração existentes nos modelos de simulação para manufatura. O usuário pode se utilizar de dados mais precisos e determinísticos no tratamento de problemas operacionais de curto prazo. Em contraste, um modelo menos preciso, com dados aproximados e/ou probabilísticos, pode ser utilizado em problemas de tomada de decisão a médio e longo prazos.



**Figura 4.3 - Nível de Detalhamento x Horizonte de Planejamento**

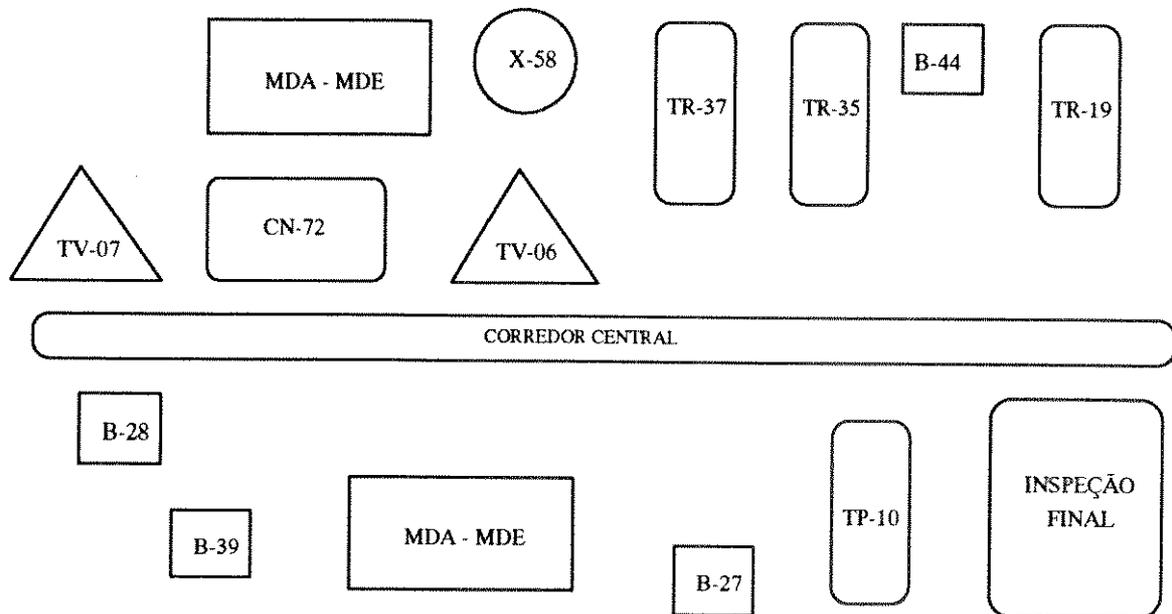
### 4.3. DESCRIÇÃO DA CÉLULA DE MANUFATURA

Almejando uma visualização global do sistema de manufatura, antes de apresentar a célula de manufatura utilizada como objeto de estudo, têm-se uma breve descrição da indústria (Equipamentos Villares S.A.) onde está a Célula de Fabricação de Componentes para Motor Diesel para Locomotivas utilizada como exemplo de aplicação em simulação através da modelagem e processamento de conhecimento sob a forma de **RPNE**.

A fábrica localiza-se em Araraquara e foi projetada para a fabricação de bens de capital sob encomenda, tendo como produtos básicos: pontes rolantes, laminadores e locomotivas. Assolada pela crise que se abateu pelo país, levando a uma forte retração no mercado e, conseqüentemente a um baixíssimo volume de encomendas, a direção da empresa alterou a orientação básica da fábrica, buscando ampliar o horizonte de mercado.

Com esta decisão, a empresa passou a produzir, além dos itens citados anteriormente, produtos destinados à geração de energia (hidrogeradores, turbinas e turbogeradores), produtos destinados à área petrolífera (sondas de prospecção) e movimentação de cargas (portainers, transteiners e guindastes). [16]

Nesse ambiente é que foi formada a Célula de Fabricação de Componentes para Motor Diesel para Locomotivas, onde são produzidos basicamente três tipos de produtos a saber: pistão, camisa e cabeçote. As três peças são de grandes dimensões, como é o caso dos motores de locomotivas. O *lay-out* físico simplificado desta célula com as máquinas e equipamentos utilizados, com as suas respectivas siglas de denominação, pode ser observado na figura 4.4.



**Figura 4.4 - Lay-Out Físico Simplificado da Célula de Fabricação.**

sendo que:

- TR-19 , TR-35 , TR-37: torno do tipo revólver.
- B-27 , B-28 , B39 , B-44 : furadeiras.
- X-58 : forno de alívio de tensão.
- TV-06 , TV-07 : torno do tipo vertical.
- MDA-MDE : bancadas de trabalho.
- CN-72 : máquina de controle numérico.
- TP-10 : torno tipo paralelo.

A escolha desta célula de fabricação como exemplo para aplicação desta nova abordagem (RPNE) levou em conta dois fatores principais. O primeiro fator é a relativa simplicidade da célula e do roteiro de fabricação das peças; e principalmente, em segundo lugar, foi o conhecimento a respeito do comportamento dinâmico da célula através de estudos anteriormente realizados. [19]

Portanto, o conhecimento obtido através da simulação da mesma célula de fabricação, utilizando o sistema de simulação convencional GPSS [26][44], possibilitou a formação das regras de produção nebulosas que, juntamente com as entradas do sistema, irão formar o modelo sob a forma de Rede de Petri Nebulosa Estendida. Deve-se deixar claro que para a formação do modelo para simulação foi utilizado somente o conhecimento a respeito da dinâmica da célula obtido através de estudos realizados com o GPSS, e não utilizando os resultados obtidos da simulação propriamente dita.

Deve-se observar que cada peça tem um roteiro de fabricação pré-definido, onde cada operação deve ser realizada em determinada máquina ou equipamento, e cada uma destas operações leva aproximadamente um tempo médio de execução. O roteiro de fabricação e tempos de processamento e "set-up" para a fabricação da peça "pistão" estão expostos na tabela 4.1.

OBS. (\*): Tempo expresso em unidades de horas. (ex: 0,4 h. = 24 min.)

	OPERAÇÃO	EQUIP.	TEMPO*	TEMPO SET-UP*
1.	Abrir furo de centro	B-44	0,16	0,50
2.	Desbastar Ø externo	TR-19	0,40	1,00
3.	Desbastar Ø interno	TR-35	0,40	1,00
4.	Limpeza interna	MDA	0,10	-----
5.	Alívio de tensão	X-58	0,10	-----
6.	Jatear internamente	MDA	0,50	-----
7.	Aparar Ø interno	CN-72	0,70	1,50
8.	Limpeza interna	MDA	0,10	-----
9.	Tornear Ø externo acabado	CN-72	1,50	4,00
10.	Teste hidrostático	MDE	0,40	-----
11.	Furações da saia	B-28	0,50	0,40
12.	Furar e Rosquear	B-39	0,20	0,50
13.	Rebarbar e Gravar	MDA	0,20	-----
14.	Brunir Ø externo	TP-10	0,40	1,00
15.	Inspeccionar e Embalar	Inspeção Final	-----	-----

Tabela 4.1 - Sequenciamento de Operações na Produção do Pistão

## 4.4. MODELAGEM DA CÉLULA DE MANUFATURA

A modelagem do sistema foi realizada utilizando-se do conceito de regras de produção nebulosas, onde cada elemento de interesse na simulação foi colocado sob a forma de proposição. Assim, pode-se relacionar os diversos elementos do sistema sob a forma de regras e, como mostra o capítulo 3, transformar as regras obtidas na Rede de Petri Nebulosa Estendida equivalente.

Na fase de definição do problema levou-se em consideração o fato de que a **RPNE** nunca foi utilizada em aplicações envolvendo simulação de sistemas de manufatura. Portanto, decidiu-se pela simplificação do problema, reduzindo-o para analisar somente a produção da peça "pistão". Com isso, espera-se obter um melhor controle sobre o modelo, simplificando a etapa de validação e, posteriormente, uma facilidade maior na interpretação dos resultados.

Com a experiência obtida em experimentos anteriores [19], verificou-se um comportamento semelhante em todas as máquinas que compõem a célula (tipo da curva de utilização das máquinas), com exceção da máquina CN-72. Este fato é devido à realização da única operação de *set-up* na produção isolada da peça "pistão", o que conduz a um comportamento diferenciado.

Portanto, para efeito de aprimoramento da metodologia proposta, considerou-se de relevância para a simulação, o estudo do Tempo Final de Produção na Célula em relação ao Tamanho do Lote de Fabricação e do Tamanho do Lote de Transferência. Além disso, para um estudo mais aprofundado, realizou-se o estudo da Utilização da Máquina CN-72 em operações de *set-up* e processamento.

**DEFINIÇÃO:** Tamanho do Lote de Fabricação é o número total de peças a serem fabricadas, no caso, o número de "pistões" a serem manufaturados.

**DEFINIÇÃO:** Tamanho do Lote de Transferência é o número de peças que devem ser processadas antes da realização da operação de *set-up* em qualquer máquina. Isto significa que a realização do *set-up* só deve ser realizada antes ou após a passagem de "n" peças que irão sofrer o mesmo processo de transformação, onde "n" = Tamanho do Lote de Transferência.

**DEFINIÇÃO:** Tempo Final de Produção é a quantidade total de tempo decorrida entre o início da fabricação da primeira peça do lote de fabricação até a finalização da última operação na última peça do lote.

**DEFINIÇÃO:** Utilização da Máquina X em operações de *set-up* é um valor que exprime a quantidade de tempo de utilização da máquina que foi empregado na realização de operações de *set-up* (preparação da máquina X para realização de determinada operação) em relação ao tempo final de produção.

**DEFINIÇÃO:** Utilização da Máquina X em operações de processamento é um valor que exprime a quantidade de tempo de utilização da máquina que foi empregado na realização de operações de transformação em relação ao tempo final de produção.

#### 4.4.1. MODELAGEM PARA ESTUDO DO TEMPO FINAL DE PRODUÇÃO

Neste tipo de estudo procura-se analisar a influência da relação entre o tamanho do lote de fabricação e de transferência no tempo final de produção. Com este objetivo, foram estabelecidas as regras de produção nebulosas estabelecendo as relações entre as três variáveis linguísticas de interesse: Tempo Final de Produção (TFP), Tamanho do Lote de Transferência (TLT) e Tamanho do Lote de Fabricação (TLF).

Foram estabelecidos três valores linguísticos para cada variável: Pequeno (P), Médio (M) e Grande (G). Cada um com sua função de pertinência estabelecida (item 4.4.3.) para uma maior facilidade na formação das regras de produção nebulosas. As regras também podem ser expressas na forma de tabela, onde os elementos centrais sugerem o valor do consequente. As regras que determinam o modelo da célula para a avaliação do tempo final de produção (TFP), sob a forma de tabela, podem ser vistas na tabela 4.2.

TFP	TLF		
TLT	P	M	G
P	M $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,2$	M $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4$	G $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,6$
M	P $\mu = 0,6 \quad \lambda = 0,6$	M $\mu = 0,6 \quad \lambda = 0,6$	M $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4$
G	P $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,6$	P $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4$	M $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,4$

Tabela 4.2 - Regras de Produção Nebulosas para Determinação do TFP

Apesar de ser mais fácil a modelagem do sistema utilizando-se de uma tabela, esta pode ser traduzida para a forma de regras de produção nebulosas da seguinte forma:

Se	"TLT é P"	e	"TLF é P"	Então	"TFP é M"	$(\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,2)$
Se	"TLT é P"	e	"TLF é M"	Então	"TFP é M"	$(\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4)$
Se	"TLT é P"	e	"TLF é G"	Então	"TFP é G"	$(\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,6)$
Se	"TLT é M"	e	"TLF é P"	Então	"TFP é P"	$(\mu = 0,6 \quad \lambda = 0,6)$
Se	"TLT é M"	e	"TLF é M"	Então	"TFP é M"	$(\mu = 0,6 \quad \lambda = 0,6)$
Se	"TLT é M"	e	"TLF é G"	Então	"TFP é M"	$(\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4)$
Se	"TLT é G"	e	"TLF é P"	Então	"TFP é P"	$(\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,6)$
Se	"TLT é G"	e	"TLF é M"	Então	"TFP é P"	$(\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4)$
Se	"TLT é G"	e	"TLF é G"	Então	"TFP é M"	$(\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,4)$

Também é importante observar que, de início, os valores de  $\mu$  (coeficiente de certeza das regras de produção nebulosas) e  $\lambda$  (valor limite de disparo) são propostos pelo modelador. O valor final destes fatores só pode ser fixado após o processo de validação do modelo. Na tabela 4.2 já temos os valores utilizados durante a coleta de resultados.

As regras também podem ser agrupadas de tal modo a facilitar a sua implementação sob a forma de RPNE. Tal agrupamento é feito conforme as semelhanças entre os antecedentes e/ou consequentes utilizados de modo a condensar as regras em estruturas que permitam uma melhor visualização do conhecimento representado.

A descrição formal do modelo em RPNE é colocada a seguir.

$$P = \{ p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11} \}$$

$$T = \{ t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10} \}$$

$$D = \{ d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9, d_{10}, d_{11} \}$$

onde as disposições expressas por D são:

$d_1$  - "TLF é P"

$d_2$  - "TLF é M"

$d_3$  - "TLF é G"

$d_4$  - "TLT é P"

$d_5$  - "TLT é M"

$d_6$  - "TLT é G"

$d_7, d_8$  - Auxiliares \*

$d_9$  - "TFP é P"

$d_{10}$  - "TFP é M"

$d_{11}$  - "TFP é G"

OBS(\*): uma disposição auxiliar serve apenas de apoio ao método de raciocínio proposto.

$$I(t_1) = \{ p_1 \} \quad I(t_2) = \{ p_2 \} \quad I(t_3) = \{ p_5 \} \quad I(t_4) = \{ p_6 \} \quad I(t_5) = \{ p_4, p_7 \}$$

$$I(t_6) = \{ p_6, p_7 \} \quad I(t_7) = \{ p_1, p_5 \} \quad I(t_8) = \{ p_3, p_8 \} \quad I(t_9) = \{ p_2, p_5 \} \quad I(t_{10}) = \{ p_3, p_4 \}$$

$$O(t_1) = \{ p_7 \} \quad O(t_2) = \{ p_7 \} \quad O(t_3) = \{ p_8 \} \quad O(t_4) = \{ p_8 \} \quad O(t_5) = \{ p_{10} \}$$

$$O(t_6) = \{ p_9 \} \quad O(t_7) = \{ p_9 \} \quad O(t_8) = \{ p_{10} \} \quad O(t_9) = \{ p_{10} \} \quad O(t_{10}) = \{ p_{11} \}$$

$$f(p_1) = 0,6$$

$$f(p_5) = 0,6$$

$$f(p_9) = 0$$

$$f(p_2) = 0,6$$

$$f(p_6) = 0,8$$

$$f(p_{10}) = 0$$

$$f(p_3) = 0,8$$

$$f(p_7) = 1,0$$

$$f(p_{11}) = 0$$

$$f(p_4) = 0,8$$

$$f(p_8) = 1,0$$

$$g(t_1) = 0,2$$

$$g(t_5) = 0,4$$

$$g(t_9) = 0,6$$

$$g(t_2) = 0,4$$

$$g(t_6) = 0,6$$

$$g(t_{10}) = 0,6$$

$$g(t_3) = 0,4$$

$$g(t_7) = 0,6$$

$$g(t_4) = 0,4$$

$$g(t_8) = 0,4$$

$$\alpha(p_i) = 0, \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, 10. \quad (\text{RPNE sem marcação inicial})$$

$$\beta(p_i) = d_i, \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, 10.$$

$\delta ( t_1 ) = \text{max-prod}$	$\delta ( t_2 ) = \text{max-prod}$	$\delta ( t_3 ) = \text{prod}$	$\delta ( t_4 ) = \text{prod}$
$\delta ( t_5 ) = \text{prod}$	$\delta ( t_6 ) = \text{prod}$	$\delta ( t_7 ) = \text{min-prod}$	$\delta ( t_8 ) = \text{min-prod}$
$\delta ( t_9 ) = \text{min-prod}$	$\delta ( t_{10} ) = \text{min-prod}$		

onde as normas utilizadas são: max-prod (máximo-produto), prod (produto) min-prod (mínimo-produto).

A figura 4.5 mostra a RPNE equivalente ao conjunto de regras de produção nebulosas propostas pela tabela 4.2 com o agrupamento dos consequentes. A implementação deste modelo permite a simulação de diversos cenários envolvendo as mudanças nos valores das variáveis base.

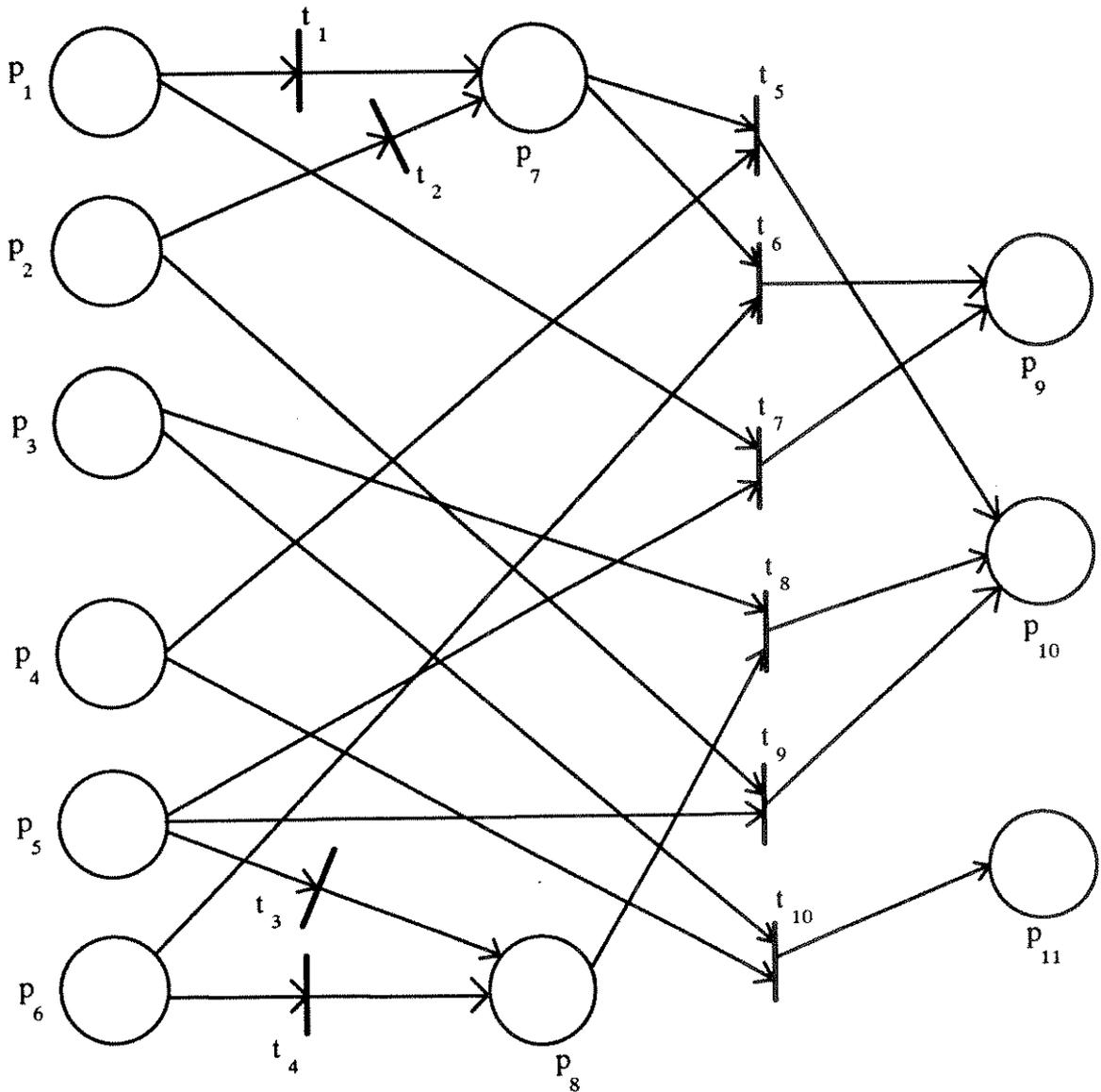


Figura 4.5 - Diagrama Simplificado da RPNE equivalente ao Modelo Proposto.

#### 4.4.2.. MODELAGEM PARA ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA CN-72

Como dito anteriormente, o mesmo sistema pode dar origem a diversos modelos para simulação, dependendo de quais características se deseja analisar. Neste caso, será necessário um novo modelo para o estudo da utilização da máquina CN-72 em operações de *set-up* e também de processamento. O estudo de tal comportamento se faz importante porque a CN-72 é o gargalo do sistema de produção (*bottleneck*). [19]

Da mesma forma que na modelagem anterior, o modelo proposto para o estudo da máquina CN-72 é baseado em regras de produção nebulosas compostas, cujas variáveis de interesse na solução do problema possuem três possíveis valores linguísticos (P, M, G).

As variáveis linguísticas de entrada e saída são:

##### ENTRADA:

- Tamanho do Lote de Fabricação (TLF)
- Tamanho do Lote de Transferência (TLT)
- Tempo de Processamento na Operação 7 da sequência de operações (tabela 4.1) (TP7)
- Tempo de Processamento na Operação 9 da sequência de operações (tabela 4.1) (TP9)

##### SAÍDA:

- Utilização da CN-72 em operações de *set-up* (USU)
- Utilização da CN-72 em operações de produção (UOP)

As regras utilizadas para a modelagem da célula quanto à USU podem ser observadas na tabela 4.3, 4.4 e 4.5. A necessidade de diversas tabelas é decorrente da necessidade de modelagem da realização *set-up* nas duas operações realizadas na CN-72.

É interessante notar que a utilização da CN-72 em operações de *set-up* depende somente do Tamanho do Lote de Transferência, pois esta operação (*set-up*) só é realizada quando ocorre a passagem deste número de peças (TLT), portanto é independente do Tamanho do Lote de Fabricação.

TLT		
P	M	G
M $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,7$	P $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,3$	P $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0$

Tabela 4.3 - Regras de Produção Nebulosas para Determinação do USU Operação 7

TLT		
P	M	G
G $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4$	M $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,6$	P $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4$

**Tabela 4.4 - Regras de Produção Nebulosas para Determinação do USU Operação 9**

USU	USU (9)		
USU (7)	P	M	G
P	P $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,6$	M $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,6$	G $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,6$
M	M $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,6$	G $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,5$	G $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,3$

**Tabela 4.5 - Regras de Produção Nebulosas para Determinação do USU**

Da mesma forma que na modelagem para avaliar o Tempo Final de Produção, as regras em forma de tabela poderiam ser traduzidas em sua forma correspondente de regras de produção nebulosas. Porém, o intuito é apresentar a facilidade com que estas regras são formuladas, isto é, como que através do conhecimento do comportamento dos elementos da Célula de Fabricação de Componentes para Motor Diesel é possível formular regras simples que representam a dinâmica do sistema.

As tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 mostram as regras de produção nebulosas utilizadas para a determinação UOP. Deve-se observar que estudos já realizados [19] mostraram que a Utilização da Máquina CN-72 é independente do Tamanho de Lote de Fabricação, se este for maior ou igual a vinte peças.

UOP(7)	TLT		
TP7	P	M	G
P	P $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,3$	P $\mu = 0,6 \quad \lambda = 0,3$	P $\mu = 0,6 \quad \lambda = 0,3$
M	M $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,3$	M $\mu = 0,6 \quad \lambda = 0,3$	M $\mu = 0,6 \quad \lambda = 0,3$
G	M $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4$	M $\mu = 0,9 \quad \lambda = 0,3$	M $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,2$

Tabela 4.6 - Regras de Produção Nebulosas para Determinação do UOP Operação 7

UOP(9)	TLT		
TP9	P	M	G
P	M $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,2$	M $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,6$	G $\mu = 0,4 \quad \lambda = 0,4$
M	G $\mu = 0,6 \quad \lambda = 0,6$	G $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4$	G $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,3$
G	G $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,4$	G $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,2$	G $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,0$

Tabela 4.7 - Regras de Produção Nebulosas para Determinação do UOP Operação 9

UOP	UOP(9)	
UOP(7)	M	G
P	M $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,2$	G $\mu = 0,8 \quad \lambda = 0,6$
M	G $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,2$	G $\mu = 1,0 \quad \lambda = 0,0$

Tabela 4.8 - Regras de Produção Nebulosas para Determinação do UOP Total

É importante destacar que a modelagem da célula para o estudo dos problemas propostos, que não são de modelagem simples em sistemas de simulação convencionais, envolveu a elaboração de apenas 34 regras de produção nebulosas compostas.

#### 4.4.3. - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

O estabelecimento de funções de pertinência para cada uma das variáveis linguísticas envolvidas no processo de modelagem é necessário e fundamental tanto para se ter uma melhor "visão" na elaboração das regras de produção nebulosas, quanto para a implementação da rede em ambiente computacional. É interessante salientar que métodos analíticos para a formação inicial e ajuste de funções de pertinência ainda não foram plenamente estabelecidos.

Portanto, da figura 4.6 à figura 4.12 estão disponíveis as funções de pertinência utilizadas durante todo o processo de simulação, isto significa que estas funções de pertinência tiveram seu valor e forma alterados durante o processo de validação do modelo para simulação. Inicialmente, estas funções foram avaliadas de tal forma a colocar o que se "pensava" correto a respeito dos valores linguísticos das variáveis nebulosas. Posteriormente, estas foram alteradas de tal forma a aproximar o modelo proposto às respostas desejadas do sistema em estudo.

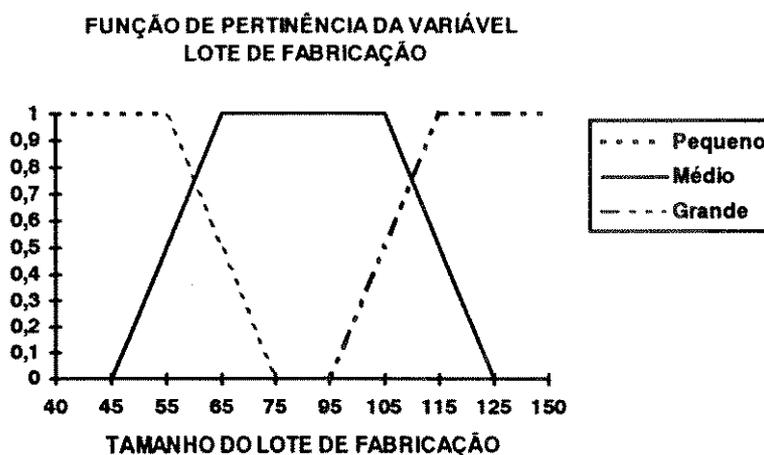


Figura 4.6 - Função de Pertinência da Variável "Tamanho do Lote de Fabricação"

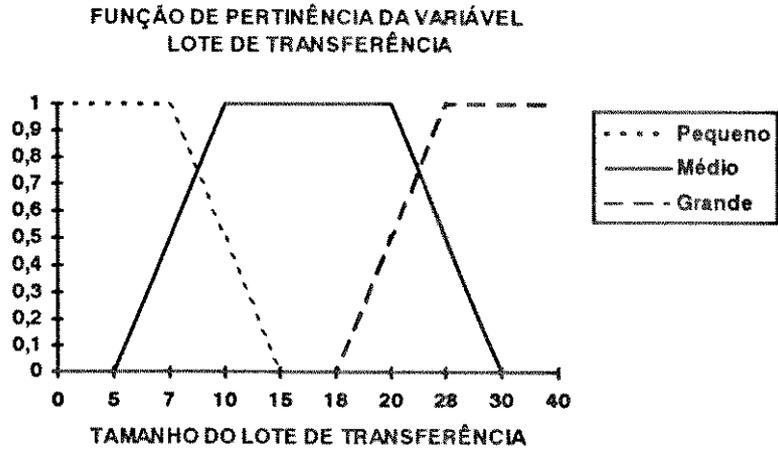


Figura 4.7 - Função de Pertinência da Variável "Tamanho do Lote de Transferência"

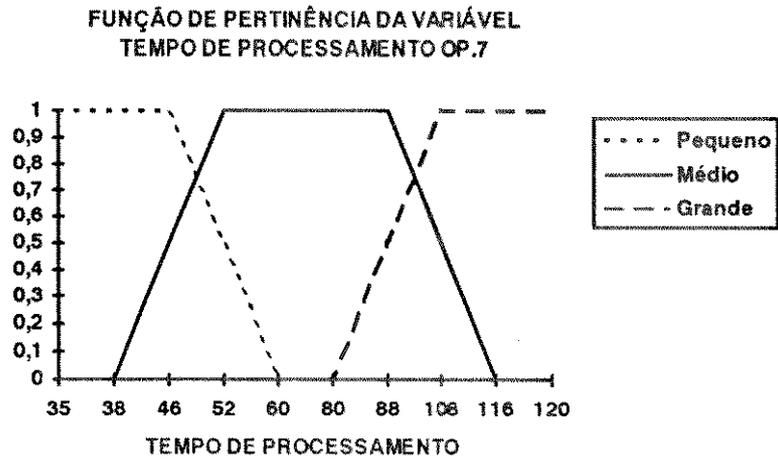


Figura 4.8 - Função de Pertinência da Variável "Tempo de Processamento na Operação 7"

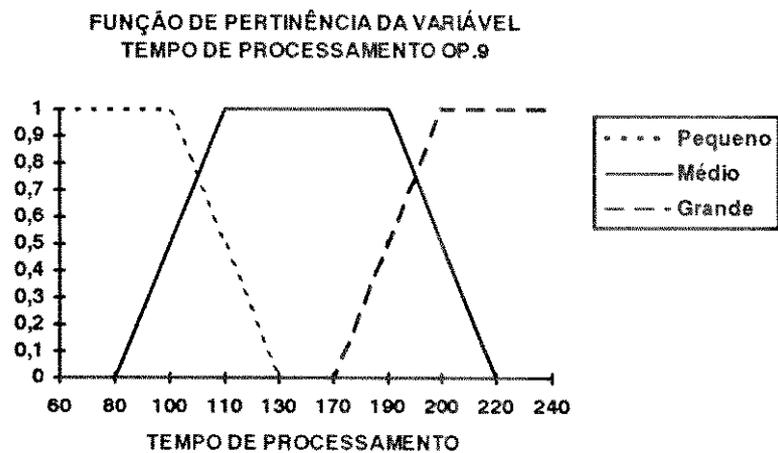


Figura 4.9 - Função de Pertinência da Variável "Tempo de Processamento na Operação 9"

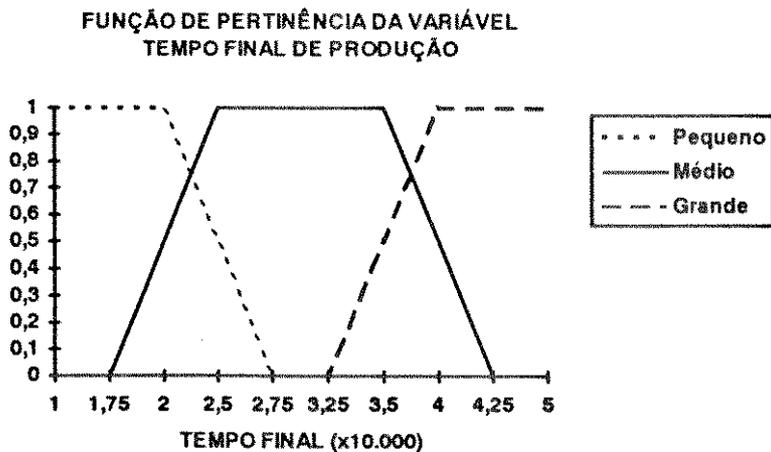


Figura 4.10 - Função de Pertinência da Variável "Tempo Final de Produção"

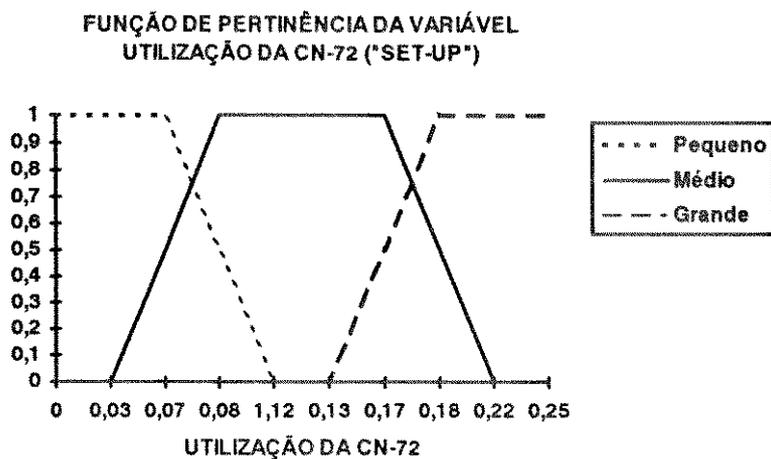


Figura 4.11 - Função de Pertinência da Variável "Utilização da CN-72 em "Set-Up"".

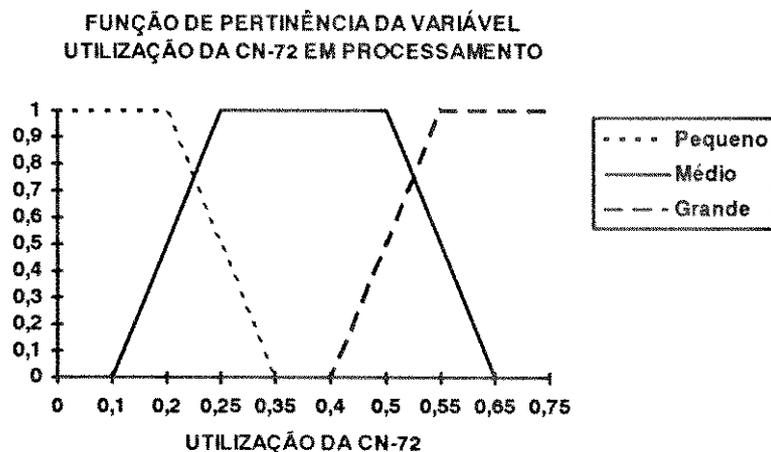


Figura 4.12 - Função de Pertinência da Variável "Utilização da CN-72 em Processamento"

Além disso, existem diversos métodos para atribuir a um elemento discreto o valor correspondente da função de pertinência do valor linguístico. Tais métodos são chamados de processos de *fuzzyficação*. Este é o processo associado à aceitação da incerteza e imprecisão existentes em cada sistema. Diversos aspectos relacionados à estratégias de *fuzzyficação* são descritos por Lee. [36]

Neste trabalho, o valor das variáveis *fuzzy* foram obtidos através da verificação do valor da função de pertinência das variável linguísticas em questão no ponto indicado pelo valor *não-fuzzy*.

O processo inverso, chamado de *defuzzyficação*, é basicamente um mapeamento do espaço nebuloso em um universo de discurso não-nebuloso. A existência de tal método se justifica pela necessidade de, muitas vezes, um valor *não-fuzzy* como resultado da inferência nebulosa. Uma discussão resumida a respeito de estratégias de *defuzzyficação* é descrita por Lee. [37]. Atualmente, os métodos mais utilizados são:

- Critério do Máximo.
- Critério da Média dos Máximos
- Critério do Centro de Área.

O método utilizado no trabalho foi o Critério do Centro de Área, que consiste no cálculo do valor *não-fuzzy* como sendo o centro de área da função de pertinência da variável de interesse. Para o caso de universo discreto, com "n" níveis de quantização na saída, o valor obtido  $z_0$  *defuzzificado* é dado por:

$$z_0 = \frac{\sum_{j=1}^n f(w_j) \cdot w_j}{\sum_{j=1}^n f(w_j)}$$

## 4.5. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO E SIMULAÇÃO

A implementação do modelo sob a forma de RPNE em um ambiente computacional foi realizada em linguagem pascal (*Turbo Pascal Version 6.0*) em um computador padrão IBM-PC 386-SX, seguindo o algoritmo desenvolvido descrito em seguida. Este algoritmo é capaz de rodar qualquer conjunto de regras de produção nebulosas compostas sob a forma de RPNE.

## ALGORITMO DE RACIOCÍNIO DA RPNE

1. Definição da sequência de disparo das transições na RPNE feita pelo usuário, ou situação "default" (sequência crescente das transições).

2. Escolhe a primeira transição da sequência de disparo (transição "t").

3. Verifica se o valor das marcas nos lugares de entrada da transição "t",  $\alpha(I(t))$ , é maior ou igual ao valor limite de disparo de "t" ( $\lambda$ ).

SIM: próximo passo (4)

NÃO: escolhe a próxima transição da sequência de disparo e volta a (3).

4. Calcula o valor da marca com base na norma utilizada, valor das marcas nos lugares de entrada da transição "t" e do fator de certeza associado à regra ( $\mu$ ). Atribui este valor às marcas dos lugares de saída da transição "t". ( $O(t)$ )

5. Verifica se existem outras transições na sequência de disparo.

SIM: toma a próxima transição da sequência de disparo como sendo a transição "t" e volta a (3).

NÃO: próximo passo (6).

6. FIM.

Existem outros algoritmos semelhantes, como o descrito por Chen et al. [15], onde se procura primeiro pelas possíveis soluções da rede e, somente depois traçados todos caminhos para as possíveis soluções (lugar objetivo), realiza-se o cálculo dos valores das marcas disparando somente as transições que levam ao lugar objetivo.

Porém, para a aplicação em questão, que é simulação de sistemas de manufatura, o algoritmo proposto teve um desempenho satisfatório, pois quase todas as transições disparam. Portanto, o algoritmo descrito por Chen et al [15] é mais lento que o algoritmo proposto por causa do tempo gasto na procura de soluções possíveis, enquanto o outro faz a execução do raciocínio diretamente na rede.

A entrada dos modelos definidos anteriormente é direta e simples, onde é necessário apenas a colocação do conjunto de regras sob a forma de RPNE, e então "entrar" a definição formal da rede obtida conforme as necessidades do programa implementado.

Quanto ao desempenho do modelo implementado, o tempo que se gasta no processamento de uma rede de 60 lugares e 65 transições (aproximadamente 50 regras de produção nebulosas) é menor que um segundo, o que é muito mais rápido que qualquer sistema de simulação convencional.

A etapa de simulação para o modelo da avaliação do Tempo Final de Produção foi realizada com a entrada de dados na forma nebulosa, isto é, cada variável linguística assume um valor não-numérico (valor linguístico: Pequeno, Médio ou Grande) e os resultados são apresentados na mesma forma, tal que se simplifique o entendimento e a análise dos resultados.

Os resultados obtidos nesta etapa estão reproduzidos na tabela 4.9. Deve-se notar que os resultados correspondem fielmente à tabela 4.2., que define a formação das regras de produção nebulosas que compõem o modelo.

TFP	TLF		
TLT	P	M	G
P	M	M	G
M	P	M	M
G	P	P	M

**Tabela 4.9 - Resultados da Simulação (TFP) envolvendo Variáveis Linguísticas**

Deve-se observar que as entradas, se colocadas em valores não-nebulosos, podem ser objeto de métodos de *fuzzyficação*, para serem compatíveis com as entradas requeridas pelo modelo em **RPNE**. Da mesma maneira, as saídas podem ser objeto do processo de *defuzzyficação* para se obter uma medida a respeito de um valor não-nebuloso aproximado do resultado do raciocínio nebuloso.

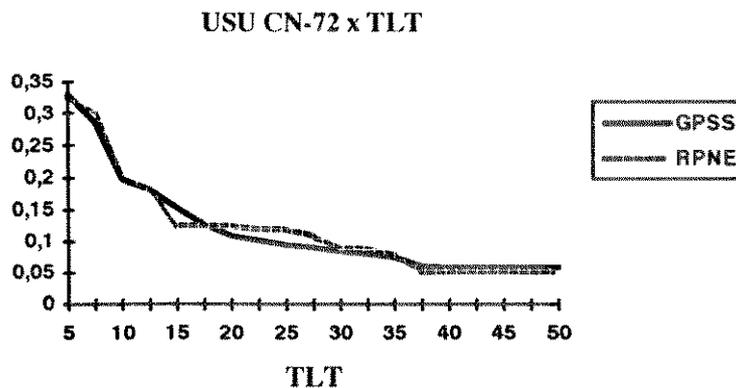
Em uma primeira etapa do estudo do comportamento da máquina CN-72 através do modelo proposto, procurou-se realizar uma medida da validade dos dados obtidos no modelo de simulação. Para tanto, os resultados obtidos com a utilização de sistemas convencionais de simulação foram comparados com os resultados das corridas de simulação usando a **RPNE**, com a entrada sofrendo o processo de *fuzzyficação* e os dados de saída *defuzzyficionados* para a medida da Utilização da CN-72 em Operações de *Set-Up* (USU).

Os resultados da segunda etapa do processo de simulação envolveu processos de *fuzzyficação* das variáveis de entrada, que eram valores reais, e também processos de *defuzzyficação* das variáveis de saída, objetivando uma comparação dos resultados gerados com os obtidos no uso do sistema de simulação convencional GPSS, obtidos por Daltrini. [19] A tabela 4.10 mostra os resultados alcançados pelos dois métodos.

TLT	RPNE	GPSS	DIFERENÇA (%)
5	0,325	0,329	12,5
7	0,299	0,285	4,9
10	0,203	0,197	3,0
12	0,178	0,181	1,6
15	0,125	0,153	18,3
18	0,125	0,127	1,6
20	0,125	0,109	12,8
23	0,119	0,102	16,8
25	0,119	0,095	25,3
28	0,109	0,091	19,8
30	0,090	0,084	7,1
33	0,090	0,080	12,5
35	0,079	0,075	5,3
37	0,052	0,060	13,3
40	0,052	0,058	10,3
42	0,052	0,058	10,3
45	0,052	0,058	10,3
48	0,052	0,058	10,3
50	0,052	0,058	10,3

**Tabela 4.10 - Comparação dos Resultados da Simulação para USU utilizando RPNE e GPSS**

Graficamente, o desempenho de ambos sistemas pode ser visualizado na figura 4.13.



**Figura 4.13 - USU x TLT para os Sistemas de Simulação GPSS e RPNE**

Pode-se observar que ambos os métodos de avaliação da utilização da máquina CN-72 em operações de *set-up* resultaram em curvas muito próximas, o que evidencia, mais uma vez, a validade das regras de produção nebulosas utilizadas na modelagem da célula. Possivelmente, o ajuste nos fatores valor limite de disparo e coeficiente de certeza das regras pode aproximar cada vez mais os resultados gerados.

A maior diferença encontrada entre as duas abordagens para a simulação situa-se na casa de 25%, o que não representa um grande valor considerando a forma de modelagem utilizada (variáveis linguísticas). Os resultados da simulação obtidos com a utilização da modelagem baseada em dados determinísticos (GPSS), não apresentou diferenças significativas de valores em relação à modelagem baseada em regras de produção nebulosas. O valor médio da diferença entre as duas abordagens em relação ao valor dado pela simulação em GPSS é de 10,4%.

Após uma validação, mesmo que parcial, através de uma comparação dos resultados obtidos com o uso do GPSS e do modelo em RPNE, foram realizadas diversas corridas de simulação utilizando-se somente variáveis nebulosas para avaliar o comportamento da utilização da máquina CN-72 em operações de processamento (UOP). Como a definição deste fator depende de três variáveis linguísticas, a tabela 4.11 mostra os resultados considerando "TLT é P", na tabela 4.12 "TLT é M" e, finalmente, na tabela 4.13 "TLT é G".

Deve-se observar que o resultado apresentado nas tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 é uma aproximação linguística do resultado obtido ao final do processo de raciocínio dedutivo [64]. Esta aproximação se justifica no sentido de facilitar a interpretação dos resultados da simulação.

Por exemplo, na tabela 4.11, o valor obtido para a utilização da CN-72 em operações de processamento (UOP) é Médio (M) se as entradas, tempo de processamento da operação 7 e da operação 9, são consideradas Pequenas (P). Porém, o resultado obtido da simulação, isto é, o valor verdade das marcas nos lugares associados à variável linguística UOP são:

- "UOP é P" = 0
- "UOP é M" = 0.8
- "UOP é G" = 0.2

Portanto, o resultado da simulação é de interpretação mais elaborada, e pode ser visualizado, em sua forma gráfica, na figura 4.14.

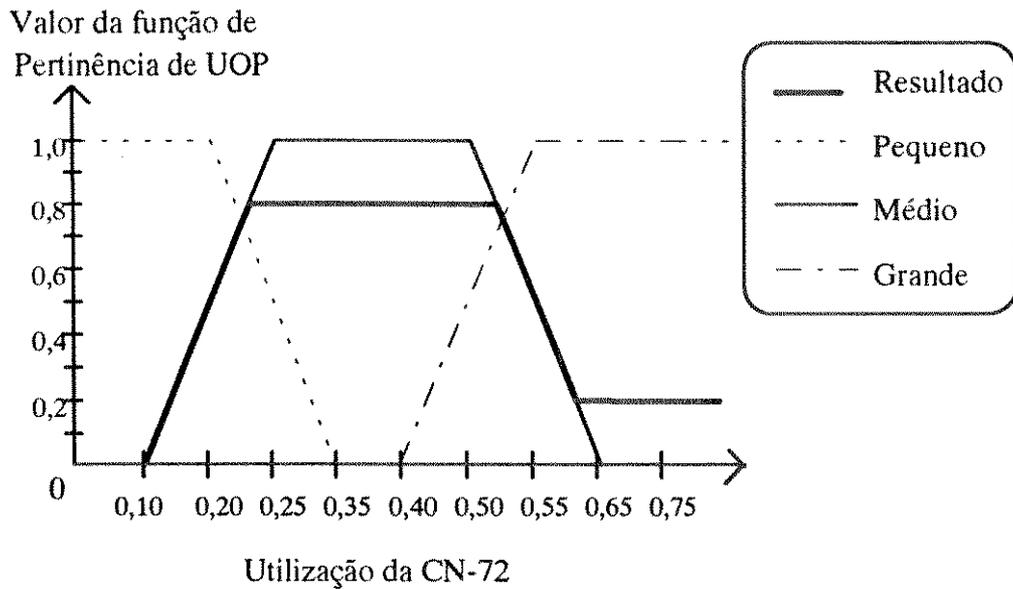


Figura 4.14 - Resultado da Simulação (UOP) em Comparação com a Função de Pertinência

UOP	TP9		
TP7	P	M	G
P	M	M	G
M	M	G	G
G	G	G	G

Tabela 4.11 - Resultados de UOP para "TLT é P"

UOP	TP9		
TP7	P	M	G
P	M	G	G
M	M	G	G
G	G	G	G

Tabela 4.12 - Resultados de UOP para "TLT é M"

UOP	TP9		
TP7	P	M	G
P	M	G	G
M	G	G	G
G	G	G	G

**Tabela 4.13 - Resultados de UOP para "TLT é G"**

Para finalizar com as experiências, foram realizadas diversas modificações nas normas utilizadas, bem como nos valores de certeza e valor limite de disparo, com o objetivo de se verificar o resultado das modificações na modelagem do sistema. Contudo, tais resultados precisam de um método de avaliação mais sofisticado para se comparar as melhorias decorrentes das alterações efetuadas.

## 4.6. RESUMO

Este capítulo descreveu o exemplo de aplicação em simulação de sistemas de manufatura baseada na formulação de regras de produção nebulosas.

Inicialmente, apresentou-se uma breve conceituação teórica a respeito de simulação de sistema de manufatura em sua forma convencional. A seguir, a descrição da célula de fabricação de componentes para motor diesel e sua modelagem foram descritas.

Finalmente, a implementação e interpretação dos resultados da simulação foram apresentados de forma a destacar a importância do método utilizado na simulação.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1. CONCLUSÕES

O trabalho pode ser analisado sob duas perspectivas diferentes. A primeira diz respeito à Rede de Petri Nebulosa Estendida como metodologia para a modelagem e processamento de conhecimento. A segunda perspectiva é com relação à aplicação desta nova abordagem na área de simulação de sistemas de manufatura.

Quanto à capacidade para modelagem e processamento de conhecimento pode-se afirmar que o uso de regras de produção nebulosas diminui o esforço gasto na aquisição e na posterior representação de conhecimento, pois o usuário utiliza-se do poder de abstração fornecido pelo uso de variáveis linguísticas para agrupar diversas situações na mesma regra.

Além disso, a alteração e/ou adição de conhecimento em regras representadas sob a forma de RPNE é simples e direto, pois basta alterar na definição da rede os elementos que trazem a modificação, sem perder a estrutura formada pelo conjunto de regras anterior.

Outro fator marcante no desenvolvimento da RPNE é a sua forma de processar o conhecimento. A alteração do tipo das normas que calculam a evolução da marcação pode modificar completamente o processo de "raciocínio" efetuado, já que cada norma representa um tipo diferente de implicação nebulosa[45]. Esta capacidade refere-se também a possibilidade de expressão de conhecimento de senso comum através do uso das normas adequadas.

A familiaridade do uso de Redes de Petri ajuda na compreensão do formalismo da RPNE, e também fornece sugestões quanto aos caminhos que devem ser seguidos para o desenvolvimento teórico e prático desta nova metodologia.

A existência do valor limite de disparo e do fator de certeza nas regras sugere uma proximidade entre a forma de atuação da RPNE com a forma de inteligência humana, como a descrita por Albus [01]. Nesta forma temos o modelo representado pelo conjunto de regras de produção nebulosas e os critérios de julgamento representados pelos fatores acima citados.

A capacidade de encadeamento das regras de produção nebulosas é uma característica notável em relação a RPNE, porque na forma mais comum de raciocínio nebuloso, chamada de Relação Nebulosa, este encadeamento não é passível de representação. Outras metodologias que surgiram nos últimos anos, tal como a TVFIN (*Truth-Valued Flow Inference Network*) [69] possuem características muito semelhantes às das RPNE's inclusive sob este aspecto.

Porém, o mais importante a se destacar sob este ponto de vista, é a flexibilidade desta nova abordagem quanto às áreas de aplicação, visto que qualquer sistema que possa ser representado por um conjunto de regras pode ser manipulado eficazmente utilizando a RPNE.

A **RPNE** como metodologia para simulação de sistemas de manufatura deve ser encarada como um complemento às abordagens que existem atualmente, que devem ser utilizadas conjuntamente, e não como uma metodologia substituta. Mesmo assim, a **RPNE** atingiu os objetivos propostos no início do trabalho quanto à seu desempenho como ferramenta para a simulação.

Os modelos para simulação propostos apresentaram resultados satisfatórios tanto em termos quantitativos (comparação dos resultados da **RPNE** com os do **GPSS**) quanto em termos qualitativos. Porém, um ajuste nos diversos fatores que formam os modelos podem aproximar ainda mais os resultados da realidade.

Apesar de existirem outras tentativas de facilitar o processo de modelagem para a simulação através do uso de algum artifício linguístico [10][34][56], nenhuma destas abordagens mostrou a facilidade da aquisição e manipulação de conhecimento sob a forma de regras de produção nebulosas.

O emprego desta metodologia na simulação de sistemas de manufatura deve-se restringir à aspectos nos quais a precisão dos conceitos não é de fundamental importância, mas a complexidade do sistema sugere a adoção de alguma técnica não-convencional de simulação. Algumas situações que se enquadram no descrito anteriormente são:

- Planejamento estratégico.
- Desenvolvimento de Novos Produtos e Processos.
- Planejamento de Recursos e Facilidades.
- Desenvolvimento de Recursos Humanos.

Uma mudança significativa quanto aos sistemas de simulação convencionais é a possibilidade de apresentação de resultados tanto na forma quantitativa (valor numérico) como na qualitativa (valor linguístico). Em muitas ocasiões, a interpretação dos resultados é difícil em razão do volume de dados a serem analisados, o que não acontece quando os resultados são dados na forma qualitativa.

Finalmente, a combinação dos conceitos da Teoria de Conjuntos Nebulosos, Lógica Nebulosa e Redes de Petri faz com que a **RPNE** seja uma ferramenta promissora com relação à eficiência na modelagem e processamento de conhecimento em sistemas de diferentes classes e níveis de complexidade.

## 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugestões para trabalhos futuros se dividem em aspectos teóricos e práticos.

Dentro do escopo dos aspectos teóricos, há a necessidade de aprofundamento no estudo das propriedades e métodos de análise aplicáveis às **RPNE's** para que se tenham elementos suficientes para determinar, da mesma forma que nas Redes de Petri Clássicas, importantes características relativas ao modelo em questão.

Além disso, é interessante analisar a influência dos conectivos lógicos das regras e das normas empregadas no método de raciocínio em relação aos resultados obtidos, e em relação ao próprio método de raciocínio humano.

Técnicas de aprendizado, como as disponíveis para Redes Neurais [33][39], podem ser desenvolvidas de tal forma a facilitar a definição e ajuste de certos elementos constituintes das **RPNE's**, caso do valor limite de disparo e do fator de certeza da regra.

No escopo das aplicações, pode-se visualizar um grande espectro de áreas em cuja atuação as **RPNE's** seriam muito úteis para a modelagem e processamento de conhecimento. É o caso dos sistemas especialistas, sistemas de controle, etc. [25]

O principal aspecto seria o desenvolvimento de uma implementação que suportasse o processamento em tempo-real, o que seria interessante no surgimento de controladores nebulosos com capacidade de encadeamento de regras de produção nebulosas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] Albus, J. S. : "*Outline for a Theory of Intelligence*", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 21, n° 3, pp. 473-509, May/Jun. 1991.
- [02] Agostinho, O. L. : "*Sistemas Flexíveis de Manufatura (notas de aula)*", Campinas, UNICAMP, 1991.
- [03] Basu, A.; Dutta, A. : "*Reasoning with Imprecise Knowledge to Enhance Intelligent Decision Support*", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 19, n° 4, pp. 756-770, Jul./Aug. 1989.
- [04] Bellman, R. E.; Zadeh, L. A. : "*Decision-Making in a Fuzzy Environment*", Management Science, vol. 17, n° 4, pp. 141-164, Dec. 1970.
- [05] Bobrow, D.G. : "*Qualitative Reasoning about Physical Systems*", Artificial Intelligence, vol. 24, pp.1-5, 1984.
- [06] Brachman, R. J.; Levesque, H. J.; Reiter, R. : "*Introduction to the Special Volume on Knowledge Representation*", Artificial Intelligence, vol. 49, pp. 1-3, 1991.
- [07] Brachman, R. J.; Schmolze, J. G. : "*An Overview of the KL-ONE Knowledge Representation System*", Cognitive Science, vol. 9, pp. 171-216, 1985.
- [08] Bratko, I. : "*PROLOG: Programming for Artificial Intelligence*", Addison Wesley, 1990.
- [09] Bullinger, H. - J. ; Sauer, H. : "*Planning and Implementing a Flexible Assembly System Supported by Simulation*", International Journal of Production Research, vol. 25, n° 11, pp. 1625-1634, 1987.
- [10] Câmara, A. S.; Antunes, P. C.; Pinheiro, M. D.; Seixas, M. J. F. : "*Linguistic Dynamic Simulation - A New Approach*", Simulation, pp. 208-212, Nov. 1987.
- [11] Cao, T.; Sanderson, A. C. : "*Task Sequence Planning Using Fuzzy Petri Nets*", Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.349-354, Charlottesville, VA, Oct. 1991.
- [12] Cao, T.; Sanderson, A. C. : "*Sensor-Based Recovery for Robotic Task Sequences Using Fuzzy Petri Nets*", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1063-1069, Nice, France, May 1992.
- [13] Cardoso, J.; Valette, R.; Dubois, D. : "*Redes de Petri com Marcação Imprecisa*", Anais 8° CBA (UFPa - Belém), pp. 578-584, 1990.

- [14] Cercone, N.; McCalla, G. : "*What is Knowledge Representation ?*", *The Knowledge Frontier: Essays in the Representation of Knowledge*, edited by Nick Cercone and Gordon McCalla, New York, Springer, pp. 1-43, 1987.
- [15] Chen, S.; Ke, J.; Chang, J. : "*Knowledge Representation Using Fuzzy Petri Nets*", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 2, n° 3, pp. 311-319, Sept. 1990.
- [16] Christiano, A. C. : "*Projeto e Implementação de Células de Manufatura em uma Empresa Produtora de Bens de Capital sob Encomenda*", Tese de Mestrado, USP-EESC, 1989.
- [17] Collins, A.; Michalski, R. : "*The Logic of Plausible Reasoning: A Core Theory*", *Cognitive Science*, vol. 13, pp. 1-49, 1989.
- [18] Cooke, N. M.; McDonald, J. E. : "*A Formal Methodology for Acquiring and Representing Expert Knowledge*", *Proceedings of the IEEE*, vol. 74, n° 10, pp. 1422-1430, Oct. 1986.
- [19] Daltrini, A. M. : "*Simulação de Sistemas de Manufatura*", Relatório Técnico do CNPq, processo n° 610.129/89-6, 1990.
- [20] Daltrini, A. M. : "*Fuzzy Simulation in Manufacturing Systems*", *Proceedings of the International Symposium on Robotics and Manufacturing (ISRAM'92)*, Santa Fe, N.M., U.S.A., Nov., 1992.
- [21] David, R. : "*Modeling of Dynamic Systems by Petri Nets*", *EEC91 European Control Conference (Grenoble - France)*, pp. 136-147, 1991.
- [22] Dubois, D.; Prade, H. : "*Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*", Academic Press, New York, 1980.
- [23] Dubois, D.; Prade, H. : "*Processing Fuzzy Temporal Knowledge*", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 19, n° 4, pp. 729-744, Jul./Aug. 1989.
- [24] Ekere, N. N.; Hannam, R. G. : "*An Evaluation of Approaches to Modeling and Simulating Manufacturing Systems*", *International Journal of Production Research*, vol. 27, n° 4, pp. 599-611, 1989.
- [25] Gaynes, B. R.; Shaw, M. L. : "*From Fuzzy Logic to Expert Systems*", *Information Sciences*, vol. 36, pp. 5-16, 1985.
- [26] Gordon, G. : "*The Application of GPSS V to Discrete System Simulation*", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.
- [27] Hatono, I.; Yamagata, K.; Tamura, H. : "*Modeling and On-Line Scheduling of Flexible Manufacturing Systems Using Stochastic Petri Nets*", *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 17, n° 2, pp. 126-132, Feb. 1991.

- [28] Hayes, P. J. : "*Some Problems and Non-Problems in Representation Theory*", Proceedings of AISB Summer Conference, University of Sussex, pp.63-79, 1974.
- [29] Israel, D. J. : "*Some Remarks on the Place of Logic in Knowledge Representation*", *The Knowledge Frontier: Essays in the Representation of Knowledge*, edited by Nick Cercone and Gordon McGalla, New York, Springer, pp. 80-91, 1987.
- [30] Kahaner, D. K. : "*Advances in Fuzzy Theory and Applications*", IEEE Micro, pp. 8-11, Aug. 1991.
- [31] Karwowski, W.; Evans, G. W. : "*Fuzzy Concepts in Production Management Research: A Review*", *International Journal of Production Research*, vol. 24, n° 1, pp. 129-147, 1986.
- [32] King, M.; Rosner, M. : "*The Special Issue on Knowledge Representation*", Proceedings of the IEEE, vol. 74, n° 10, pp. 1299-1303, Oct. 1986.
- [33] Knight, K. : "*Connectionist - Ideas and Algorithms*", *Communications of ACM*, vol. 33, n° 11, pp.59-74, Nov. 1990.
- [34] Kuipers, B. : "*Qualitative Simulation*", *Artificial Intelligence*, vol. 29, pp. 289-338, 1986.
- [35] Leão, B. F.; Rocha, A. F. : "*Proposed Methodology for Knowledge Acquisition: A Study on Congenital Heart Disease Diagnosis*", *Meth. Inform. Med.*, vol.29, pp. 30-40, 1990.
- [36] Lee, C. C. : "*Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I*", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, vol. 20, n° 2, pp. 404-415, Mar./Apr. 1990.
- [37] Lee, C. C. : "*Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part II*", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, vol. 20, n° 2, pp. 419-433, Mar./Apr. 1990.
- [38] Levary, R. R. : "*Systems Dynamics with Fuzzy Logic*", *International Journal of Systems Sciences*, vol. 21, n° 8, pp. 1701-1707, 1990.
- [39] Lin, C.; Lee, C. S. G. : "*Neural-Network-Based Fuzzy Logic Control and Decision Systems*", IEEE Transactions on Computers, vol. 40, n° 12, pp. 1320-1336, Dec. 1991.
- [40] Looney, C. G. : "*Fuzzy Petri Nets for Rule-Based Decision making*", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, vol. 18, n° 1, pp. 178-183, Jan./Feb. 1988.
- [41] Mates, B. : "*Elementary Logic*", Oxford Press, New York, 1972.
- [42] Maiers, J.; Sherif, Y. S. : "*Applications of Fuzzy Set Theory*", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 15, n° 1, pp. 175-189, Jan./Feb. 1985.

- [43] Mamdani, E. H. : "*Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis*", IEEE Transactions on Computers, vol. 26, n° 12, pp. 1182-1191, Dec. 1977.
- [44] Minuteman Software : "*GPSS / PC - General Purpose Simulation - Reference Manual*", 1986.
- [45] Mizumoto, M. : "*Fuzzy Controls Under Various Fuzzy Reasoning Methods*", Information Sciences, vol. 45, pp. 129-151, 1988.
- [46] Murata, T. : "*Petri Nets: Properties, Analysis and Applications*", Proceedings of the IEEE, vol. 77, n° 4, pp. 541-580, 1989.
- [47] O'Keefe, R. M. : "*The Role of Artificial Intelligence in Discrete-Event Simulation*", Simulation & Modeling, John Wiley & Sons, pp. 359-379, 1989.
- [48] Pal, S. K. : "*Fuzzy Tools for the Management of Uncertainty in Pattern Recognition, Image Analysis, Vision and Expert Systems*", International Journal of Systems Sciences, vol. 22, n° 3, pp. 511-549, 1991.
- [49] Pedrycz, W. : "*Fuzzy Control and Fuzzy Systems*", Research Studies Press LTD., 1989.
- [50] Petri, C. A. : "*Fundamentals of a Theory of Assynchronous Information Flow*", Proceedings of IFPI Congress 62, pp. 386-390, 1963.
- [51] Righini, G. : "*FIRST: A Petri Net Based System for Simulation of Complex Distributed Manufacturing Systems*", Computer Integrated Manufacturing Systems, vol. 3, n° 4, pp. 252-263, Nov. 1990.
- [52] Rolland-May, C. : "*Automatic Knowledge Learning in an Expert System for Space Management and Planning*", Fuzzy Sets and Systems, vol. 44, pp. 341-355, 1991.
- [53] Sabuncuoglu, I.; Hommertzheim, D. L. : "*Expert Simulation Systems - Recent Developments and Applications in Flexible Manufacturing Systems*", Computers and Industrial Engineering, vol. 16, n° 4, pp. 575-585, 1989.
- [54] Saha, B.; Bandyopadhyay, S. : "*Computer-Based Reduction Technique for Petri Nets*", International Journal of Systems Sciences, vol. 22, n° 1, pp. 49-59, 1991.
- [55] Shannon, R. E. : "*Knowledge Based Simulation Techniques for Manufacturing*", International Journal of Production Research, vol. 26, n° 5, pp. 953-973, 1988.
- [56] Su, H-M ; Kachitvichyanukul, V. : "*A Natural Language to Aid Simulation Model Formulation*", Computers and Industrial Engineering, vol. 16, n° 4, pp. 535-543, 1989.
- [57] Tabak, D.; Levis, A. H. : "*Petri Net Representation of Decision Models*", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 15, n° 6, pp. 812-818, Nov./Dec. 1985.

- [58] Turban, E. : "Review of Expert Systems Technology", IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 35, n° 2, pp. 71-81, May 1988.
- [59] Wilhelm, M. R.; Parsaci, H. R. : "A Fuzzy Linguistic Approach to Implement a Strategy for Computer Integrated Manufacturing", Fuzzy Sets and Systems, vol. 42, pp. 191-204, 1991.
- [60] Woods, W. A. : "Important Issues in Knowledge Representation", Proceedings of the IEEE, vol. 74, n° 10, pp. 1322-1334, Oct. 1986.
- [61] Zadeh, L. A. : "Fuzzy Sets", Information and Control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [62] Zadeh, L. A. : "Probability Measures of Fuzzy Events", Journal of Mathematical Analysis and Applications, vol. 23, 1968.
- [63] Zadeh, L. A. : "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 3, n° 1, pp. 28-44, Jan. 1973.
- [64] Zadeh, L. A. : "The Concept of Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning", Information Science, vol. 8-9, 1975.
- [65] Zadeh, L. A. : "Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility", Fuzzy Sets and Systems: International Journal, vol. 1, n° 3, 1978.
- [66] Zadeh, L. A. : "Syllogistic Reasoning in Fuzzy Logic and its Application to Usuality and Reasoning with Dispositions", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 15, n° 6, pp. 754-763, Nov./Dec. 1985.
- [67] Zadeh, L. A. : "Commonsense and Fuzzy Logic", The Knowledge Frontier: Essays in the Representation of Knowledge, edited by Nick Cercone and Gordon McGalla, New York, Springer, pp. 103-136, 1987.
- [68] Zadeh, L. A. : "Fuzzy Logic", Computer, pp. 83-93, Apr. 1988.
- [69] Zhuang, W. P.; Qiao, W. Z.; Heng, T. H. : "The Truth-Valued Flow Inference Network", Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks (Iizuka, Japan), pp. 267-281, Jul. 1990.