

MARCOS AURÉLIO SCOPEL SIMÕES  
Engenheiro Mecânico, Universidade Federal do Espírito Santo, 1982

MODELAGEM DOS PROCESSOS DE DECISÃO EM  
OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO  
COM REDES DE PETRI E TEORIA FUZZY

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

São Paulo  
2000

MARCOS AURÉLIO SCOPEL SIMÕES  
Engenheiro Mecânico, Universidade Federal do Espírito Santo, 1982

MODELAGEM DOS PROCESSOS DE DECISÃO EM  
OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO  
COM REDES DE PETRI E TEORIA FUZZY

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

Orientador:  
Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barretto

São Paulo  
2000

À minha mãe Santa, pelo caminho ensinado  
À minha esposa Andréa, pela inspiração e desejo de mudanças  
Aos meus filhos Gabriel, Saulo e Tomas, pela sabedoria e perseverança  
À Deus pela iluminação

## **AGRADECIMENTOS**

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barretto pelas diretrizes seguras e permanente incentivo que possibilitou o desenvolvimento desta tese.

Aos amigos do Departamento de Planejamento e Programação do Porto de Tubarão – CVRD e ao Prof. Cícero Cavati –DEL/UFES pelas contribuições que ajudaram no enriquecimento desta tese.

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

Na página 3, **ONDE ESTÁ ESCRITO:**

O planejamento e as tomadas de decisão em sistemas de produção são classificados por níveis hierárquicos e têm por objetivo determinar a qualidade da decisão tomada em função do grau de incertezas ou certezas das informações utilizadas. Quanto mais baixa na hierarquia, maior é a qualidade da informação utilizadas, aumentando também a qualidade das decisões tomadas. Entretanto, em qualquer atividade de planejamento a melhor solução frente a um objetivo é dependente das decisões em todos os níveis hierárquicos. A figura 1 apresenta uma hierarquia de decisão em processos de produção.

**LEIA-SE:**

O planejamento e as tomadas de decisão em sistemas de produção são classificados por níveis hierárquicos e têm por objetivo determinar a qualidade da decisão tomada em função do grau de incertezas ou certezas das informações utilizadas. Quanto mais baixa na hierarquia, maior é a qualidade da informação utilizadas, aumentando também a qualidade das decisões tomadas. Entretanto, em qualquer atividade de planejamento a melhor solução frente a um objetivo é dependente das decisões em todos os níveis hierárquicos. A figura 1 apresenta uma hierarquia de decisão, segundo SANTORO (1994), aplicados a processos de produção. O trabalho de TAGAWA (1996) discute um modelo de decisão hierárquica aplicado a um tipo característico de ambiente de produção.

Na página 15, **ONDE ESTÁ ESCRITO:**

Como exemplo, o trabalho de CROWE (1997) discute um modelo de tomada de decisão com base na teoria dos conjuntos difusos aplicado a indústria eletrônica para a utilização da área de planejamento onde deseja-se avaliar os níveis funcionais dos projetos e o impacto causado por possíveis alterações nas estratégias de mercado. Já o trabalho de LOTAN (1998) discute um modelo de decisão com base na teoria dos conjuntos difusos aplicando o raciocínio aproximado na escolha de rotas num problema de tráfego.

**LEIA-SE:**

Como exemplo, o trabalho de CROWE et al (1997) discute um modelo de tomada de decisão com base na teoria dos conjuntos difusos aplicado a indústria eletrônica para a utilização da área de planejamento onde deseja-se avaliar os níveis funcionais dos projetos e o impacto causado por possíveis alterações nas estratégias de mercado. Já o trabalho de LOTAN (1998) discute um modelo de decisão com base na teoria dos conjuntos difusos aplicando o raciocínio aproximado na escolha de rotas num problema de tráfego e WORM et al (1996) apresenta um modelo de decisão para o planejamento de manutenção em estradas. Já o trabalho de KUSIAK (1990) discute a aplicação de sistemas baseado no conhecimento para uso da programação em vários ambientes de produção.

Na página 15, **ONDE ESTÁ ESCRITO:**

Alguns trabalhos como os discutidos por ALANCHE et al (1984); ALLA et al (1984); CORBEEL et al (1985); MUSZYNSKI et BANASZAK (1988); MARTINEZ et SILVA (199-); WADHWA et BROWNE (1989); ZHOU et al (1995); SEIFODDINI et ZHANG (1996); LEU (1996); ULUSOY et ÖZDAMAR (1996); CARLIER et CHRETIENNE (1988); CARLIER et al (1987); SILVA et VALETTE (1989) e DEMAEL et LEVIS apresentam aplicações de redes de Petri na modelagem de problemas de tomada de decisão em sistemas de produção.

**LEIA-SE:**

Alguns trabalhos como os discutidos por ALANCHE et al (1984), ALLA et al (1984), CORBEEL et al (1985), MUSZYNSKI;BANASZAK (1988); MARTINEZ;SILVA (1992), WADHWA;BROWNE (1989), ZHOU et al (1995), SEIFODDINI;ZHANG (1996), LEU (1996), ULUSOY;ÖZDAMAR (1996), CARLIER;CHRETIENNE (1988), CARLIER et al (1984), SILVA;VALETTE (1989), DEMAEL;LEVIS (1989) e MEHREZ et al (1995) apresentam aplicações de redes de Petri na modelagem de problemas de tomada de decisão em sistemas de produção.

Na página 28, **ONDE ESTÁ ESCRITO:**

onde  $aij^+ = w(i,j)$  é peso dos arcos da transição  $i$  de seu lugar de saída  $j$  e  $aij = w(j,i)$  é o peso do arco para a transição  $i$  do lugar de entrada  $j$ .

Uma transição  $i$  está habilitada dada uma marcação  $M$  se somente se:

$$Aij^+ \leq M(j), j=1,\dots,m \quad (3.4)$$

**LEIA-SE:**

onde  $aij^+ = w(i,j)$  é peso dos arcos da transição  $i$  do lugar de saída  $j$  e  $aij^- = w(j,i)$  é o peso do arco para a transição  $i$  do lugar de entrada  $j$ .

Uma transição  $i$  está habilitada dada uma marcação  $M$  se somente se:

$$aij^- \leq M(j), j=1,\dots,m \quad (3.4)$$

Na página 31, **ONDE ESTÁ ESCRITO:**

O trabalho de EL-HARAKSY et al (1990) apresenta uma metodologia para análise de desempenho de modelos de rede de Petri temporizada aplicado a protocolos de comunicação.

**LEIA-SE:**

O trabalho de EL-HARAKSY et al (1990) apresenta uma metodologia para análise de desempenho de modelos de rede de Petri temporizada aplicado a protocolos de comunicação. Já ALPAN;JAFARI (1988) apresentam um estudo de análise da dinâmica de uma rede de Petri temporizada.

Na página 32, **ONDE ESTÁ ESCRITO:**

As redes de Petri Coloridas pode transportar em suas marcas um grande número de informações, o que reduz o tamanho o modelo que representa um determinado processo analisado e facilitam as análises das propriedades do modelo, bem como a visualização de aderência ao processo real.

**LEIA-SE:**

As redes de Petri Coloridas, segundo JESEN (1996a), JESEN (1996b) e GENRICH (1988), podem transportar em suas marcas um grande número de informações, o que reduz o tamanho o modelo que representa um determinado processo analisado e facilitam as análises das propriedades do modelo, bem como a visualização de aderência ao processo real.

Na página 57, **ONDE ESTÁ ESCRITO:**

BELLMAN et ZADEH (1970) sugeriram um modelo de decisão difusa que deve satisfazer certas restrições  $C$  e objetivos  $G$ . Neste caso, ambos restrições e objetivos são tratados como conjuntos difusos caracterizados por funções de pertinência, tais como:

**LEIA-SE:**

BELLMAN;ZADEH (1970) e mais tarde ZIMMERMANN (1978) sugeriram um modelo de decisão difusa que deve satisfazer certas restrições  $C$  e objetivos  $G$ .

Neste caso, ambas restrições e objetivos são tratadas como conjuntos difusos caracterizados por funções de pertinência, tais como:

Na página 141, **ONDE ESTÁ ESCRITO:**

HO, Y.C., ED., Special Issue on Discrete Events Dynamic Systems. **Proc. IEEE**, Jan. 1989.

**LEIA-SE:**

**GARÁ FILHO, W., Aplicação da Teoria dos Sistemas Difusos em Processos de Decisão de Múltiplos Estágios com Múltiplos Objetivos, São Paulo, (1997). Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.**

**SANTORO, M.C., Planejamento e Controle da Produção. São Paulo, 1994. Apostila (Notas de Aula do Curso de Planejamento, Programação e Controle da Produção e Estoque) Departamento de Engenharia da Produção, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.**

Na página 141, **ONDE ESTÁ ESCRITO:**

**JESEN, K., Coloured Petri Nets. Vol. 1, Springer, 1996.**

**JESEN, K., Coloured Petri Nets. Vol. 2, Springer, 1996.**

**LEIA-SE:**

**JESEN, K., Coloured Petri Nets. Vol. 1, Springer, 1996a.**

**JESEN, K., Coloured Petri Nets. Vol. 2, Springer, 1996b.**

# CONTEÚDO

Resumo	
Abstract	
Figuras e Tabelas	
Notação utilizada	
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 O sistema de produção	1
1.2 O planejamento e Programação em sistema de produção	3
1.3 A programação da Produção	6
1.3.1 A programação da produção em sistemas contínuos	6
1.3.2 A programação da produção em sistemas intermitentes	7
1.4 Classificação dos problemas de produção	8
1.5 O objetivo do trabalho	10
Capítulo 2 Métodos para a programação da produção	12
2.1 Visão Geral	12
2.2 Métodos Otimizantes	17
2.2.1 Modelos mais comuns aplicados a programação da produção	17
2.3 Métodos heurísticos	18
2.3.1 Métodos mais comuns aplicados a programação da produção	19
2.4 Outros métodos aplicados a sistemas de produção	21
Capítulo 3 Teoria de Redes de Petri	23
3.1 Introdução	23
3.2 Propriedades das Redes de Petri	26
3.2.1 Propriedades comportamentais	26
3.2.2 Propriedades estruturais	27
3.2.3 Métodos de análise	27
3.2.4 Sub-Classes de redes de Petri	29
3.2.5 Redes de alto nível	31
3.3 Redes de Petri Colorida e Temporizada	32
3.3.1 Definição formal	33
3.3.2 Regras de disparo	34
3.4 Análise geral de rede de Petri colorida e temporizada	37
3.5 Exemplo Redes de Petri Colorida e Temporizada	42



Capítulo 4 Teoria de Conjuntos Difusos	49
4.1 Introdução	49
4.2 Definições básicas	52
4.3 Processo de decisão difuso com múltiplos objetivos	57
4.4 Raciocínio difuso	59
Capítulo 5 O Modelo proposto	65
5.1 Introdução	65
5.2 Modelagem do processo de decisão	65
5.2.1 Nível estruturante do processo de decisão	66
5.2.2 Nível tático do processo de decisão	67
5.2.2.1 Alteração das regras de disparo da TCPN	68
5.2.2.2 Tomada de decisão	69
Capítulo 6 Aplicação do modelo	73
6.1 Os requisitos do sistema	73
6.2 A solução	73
6.2.1 Modelagem do estudo de caso	78
6.3 Simulação do modelo	84
6.3.1 Simulação do nível estruturante, excluindo o nível tático	84
6.3.2 Simulação do nível tático	115
6.3.2.1 Avaliação do nível tático pela análise da transição T3	118
6.3.2.2 Simulação para T3	124
Capítulo 7 Comentários finais	138
Referências bibliográficas	140

## RESUMO

Este trabalho propõe o uso das redes de Petri Coloridas e Temporizadas como base formal de uma ferramenta de tomada de decisão para aplicações em planejamento e programação de processos produtivos industriais. A rede de Petri temporizada é responsável pela transição de estados no processo decisório, estabelecendo no tempo o uso dos recursos e das heurísticas que correspondem às ações gerenciais e operacionais mais importantes para a atividades de planejamento e programação dos processos produtivos de uma planta industrial.

Para tratar com as incertezas das envolvidas em um processo decisório, que em geral leva em conta o conhecimento do especialista responsável pelas rotinas envolvidas no sistema produtivo, fazemos uso da teoria dos conjuntos difusos para sugerir decisões logicamente consistentes que obtenha uma solução viável percorrendo apenas os estados viáveis da árvore de decisão, que neste caso se confunde com a árvore de cobertura da Rede de Petri. Como exemplo de aplicação ao modelo proposto, utilizamos um sistema de produção caracterizado por uma planta portuária, cuja modelagem e resultados da simulação estão descritos ao final deste trabalho.

## ABSTRACT

This work proposes the use of Timed Colored Petri nets as a formal base to a decision making tool for applications in industrial productive processes planning and programming. The Timed Colored Petri net is responsible for the transition of states in the decision process, establishing in time the use of resources and of heuristics that correspond to the more important managerial and operational actions for the planning activities and programming of the productive processes of an industrial plant.

To negotiate with the uncertainties involved in a decision process, that in general takes care of the responsible specialist's knowledge for the routines involved in the productive system, we make use of the theory of fuzzy sets to suggest decisions logically consistent that obtain a viable solution just leading the viable states of the decision tree, that, in this case, is confused with the cover tree of the Petri net. As application example to the proposed model, we used a production system characterized by a port plant, whose model and simulation results are described at the end of this work.

## FIGURAS

Figura1- Hierarquia do Processo de Decisão	4
Figura2- Dinâmica do Processo de Decisão	12
Figura3- Alocação de Recursos no Processo de Produção	42
Figura4- Rede de Petri Colorida Modelando um Processo Produtivo	43
Figura5- Rede TCP na Modelagem de um Processo de Manufatura – Ocorrência de (P1,T1)(P2,T1)	45
Figura6- Rede TCP na Modelagem de um Processo de Manufatura – Ocorrência de (T2,P2)	45
Figura7- Rede TCP na Modelagem de um Processo de Manufatura – Ocorrência de (T2,P1)	46
Figura8- Rede TCP na Modelagem de um Processo de Manufatura – Ocorrência de (T3,P1)	46
Figura9- Rede TCP na Modelagem de um Processo de Manufatura – Ocorrência de (T2,P2)	47
Figura10- Rede TCP na Modelagem de um Processo de Manufatura – Ocorrência de (T3,P2)	48
Figura11- Resultado da Simulação	48
Figura12- Pontos Considerados a Direita do Ponto A – Conjunto Difuso	51
Figura13- Funções de pertinência para “Alto” e para “Pesado”	61
Figura14- Funções de pertinência para “Alto” e para “Pesado” - Resultado	62
Figura15- Processo de agregação e defusificação	64
Figura16- Representação do Processo de Decisão Proposto	66
Figura17- Topologia da Transição entre Estados numa TCPN	68
Figura18- Representação do modelo difuso	70
Figura19- Representação do Ambiente do Porto de Ganel	73
Figura20- Rede TCP do Porto de Ganel - Funcional	76
Figura21- Rede TCP do Porto de Ganel - Formal	78
Figura22- Rede TCP do Porto de Ganel	85
Figura23- Rede TCP do Porto de Ganel – (T1,N1)	86
Figura24- Rede TCP do Porto de Ganel – (T2,N1)	87
Figura25- Rede TCP do Porto de Ganel – (T3,N1)	89
Figura26- Rede TCP do Porto de Ganel – (T1,N2),(T2,N2)	91
Figura27- Rede TCP do Porto de Ganel – (T2,N3)	92
Figura28- Rede TCP do Porto de Ganel – (T1,N3)	93
Figura29- Rede TCP do Porto de Ganel – (T4,N1)	94

Figura30- Rede TCP do Porto de Granel – (T4,N2)[15]	95
Figura31- Rede TCP do Porto de Granel – (T3,N3)[15]	96
Figura32- Rede TCP do Porto de Granel – Final da Simulação	97
Figura33- Resultado da Simulação	98
Figura34- Gráfico de Ocorrência	99
Figura35- Obtenção do valor do conhecimento para satisfação ao bloqueio	120
Figura36- Obtenção do valor do conhecimento para satisfação ao Fluxo	122
Figura37- Obtenção do valor do conhecimento para satisfação ao Custo	123
Figura38- Rede TCP do Porto de Granel – H(T3,N1)	126
Figura39- Rede TCP do Porto de Granel – H(T1,N2), H(T2,N2)	130
Figura40- Rede TCP do Porto de Granel – H(T3,N2)	131
Figura41- Rede TCP do Porto de Granel – H(T1,N3)	133
Figura42- Rede TCP do Porto de Granel – (T4,N1)[6.36]	134
Figura43- Rede TCP do Porto de Granel – (T2,N3)[6.36], H(T3,N3)[6.36]	135
Figura44- Rede TCP do Porto de Granel– H(T4,N3)[15,69],H(T4,N2)[19,21]	136
Figura45- Resultado da simulação com inclusão do nível tático	137

## **TABELAS**

Tabela 1 – Tempos de Máquina Associada a Operação e Material Utilizado	44
Tabela 2 – Valores de dor – Conjunto Difuso	51
Tabela 3 – Síntese dos Resultados de Pesquisa para Números Naturais	54
Tabela 4 – Tabela Simplificada de Rotas Ligando Origem e Destino	88
Tabela 5 – Relação de Conflitos entre Rotas	88
Tabela 6 – Tabela Simplificada de Rotas em Função do Nível de Impacto, Fluxo Nominal e Custo Operacional	125
Tabela 7 – Matriz de conhecimento para Carga de 70.000 Ton.	127
Tabela 8 – Resumo da Classificação e Ordenação das Rotas R1 a R7	128
Tabela 9 – Nível de Satisfação por Rota para Carga de 135.000 Ton.	132
Tabela 10 – Resumo da Classificação e Ordenação das Rotas de R1 a R5	132
Tabela 11 – Nível de Satisfação por Rota para a Carga de 84.000 ton.	135
Tabela 12 – Resumo da Classificação e Ocorrência da Rotas R1 e R4	136

## **QUADRO DE SOLUÇÕES**

101 À 115

## NOTAÇÃO UTILIZADA

$\emptyset$	Conjunto vazio
$\subseteq$	Contido em
$\Rightarrow$	Implicação
$\cup$	Operação de união
$\cap$	Operação de interseção
$\wedge$	Operação de mínimo
$\vee$	Operação de máximo
$\in$	Pertence a
$\forall$	Qualquer que seja
$M_0$	Marcação inicial de um sistema modelado por uma rede de Petri
$M_n$	Marcação final de um sistema modelado por uma rede de Petri
$[Y$	Sequência de disparo de um sistema modelado por uma rede de Petri
$R(M_0)$	Conjunto de todas as marcações alcançáveis de um sistema modelado por uma rede de Petri

B	Matriz de incidência de um sistema modelado por uma rede de Petri
$B_{ij}$	Representação típica de uma matriz de incidência de um sistema modelado por uma rede de Petri
$M_k$	Marcação k de um sistema modelado por uma rede de Petri
$M_{k-1}$	Marcação k-1 de um sistema modelado por uma rede de Petri
P	Conjunto de lugares de um sistema modelado por uma rede de Petri
T	Conjunto de transições de um sistema modelado por uma rede de Petri
$B^T$	Transposta da Matriz B
$U_k$	Vetor de transição representando as transições a disparar de um sistema modelado por uma rede de Petri
${}^{\circ}t$	Conjunto de lugares de entrada de uma transição t
$t^{\circ}$	Conjunto de lugares de saída de uma transição t
${}^{\circ}p$	Conjunto de transições de entrada do lugar p
$p^{\circ}$	Conjunto de transições de saída do lugar p
$\Sigma$	Conjunto de cores de um sistema modelado por uma rede de Petri colorida
A	Conjunto de arcos de um sistema modelado por uma rede de Petri colorida
N	Função de nó de um sistema modelado por uma rede de Petri colorida
C	Função de cor de um sistema modelado por uma rede de Petri colorida
G	Função de guarda de um sistema modelado por uma rede de Petri colorida



E	Função do arco de um sistema modelado por uma rede de Petri colorida
I	Função de inicialização de um sistema modelado por uma rede de Petri colorida
R	Conjunto de valores de tempo
ro	Elemento do conjunto R
a	Elemento do conjunto A
p	Elemento do conjunto P
t	Elemento do conjunto T
$\mu_A(x)$	Grau de pertinência do elemento x em relação a um conjunto difuso A
$\mu_A(x)/x$	Elemento de um conjunto difuso A
x	Elemento de um conjunto
X	Conjunto de valores que a variável x, que define o estado do sistema pode tomar
Min[a,b]	Valor mínimo entre a e b
Max[a,b]	Valor máximo entre a e b
$A^c$	Complemento do Conjunto A
A x B	Produto cartesiano dos conjuntos A e B
$Or_{\max(\mu)}$	Operador de Ordenação da Marcação para o Nível de Máxima Satisfação
$Cl_{\min(\mu)}$	Operador de Classificação da Marcação para o Mínimo Nível de Satisfação

## 1.Introdução

### 1.1 O sistema de produção

Um sistema de produção é caracterizado por um ambiente capaz de executar uma ordem de fabricação ou serviço em atendimento a uma determinada demanda. Esta demanda dispara um certo número de questões, tais como: o que, quanto, quando e por quem produzir, os quais afetam diretamente uma rotina de produção. Isto tem motivado diversas pesquisas na busca de procedimentos, métodos formais e ferramentas de simulação com o objetivo de auxiliar as decisões que visam atender a uma demanda gerada.

Os principais objetivos de um sistema de produção são:

- Minimizar investimentos em estoques
- Minimizar atrasos e não atendimento de ordens de produção
- Maximizar a disponibilidade e utilização dos equipamentos
- Minimiza os *lead times* de produção
- Conseguir uma distribuição equilibrada de carga de trabalho entre recursos produtivos e uma flutuação suave dessa carga no tempo
- Minimizar os custos operacionais

Esses objetivos variam de uma empresa para outra em função da classificação do sistema de produção.

A classificação tradicional dos sistemas de produção é feita em função do fluxo do produto e é de grande utilidade na determinação dos limites entre uma grande variedade de técnicas de planejamento, programação e controle da produção. Esta classificação é dada pelo agrupamento em três grandes categorias:

- Sistema de produção contínua ou em fluxo de linha;
- Sistema de produção por lote ou por encomenda (fluxo intermitente);
- Sistema de produção de grandes projetos.

Os sistemas de produção contínua apresentam uma seqüência linear para a execução do produtos ou serviços. Neste caso, os produtos são bastante padronizados e o processo de produção tende a ser altamente automatizado.

Nos sistemas de produção intermitente os recursos são tradicionalmente organizados em centros de trabalho e o processo de produção fica prejudicado no seu volume de produção em função das constantes mudanças nos lotes a produzir. Estas mudanças geram perdas de tempo que são necessárias aos rearranjos dos centros de trabalho.

Já os sistemas de produção de grande projetos exigem um planejamento único e todo o recurso está voltado a atendê-lo e portanto, diferencia-se bastante dos tipos de sistemas anteriores quanto a aplicação de técnicas de planejamento, programação e controle da produção.

Constituem-se como elementos de um sistema de produção os insumos, o processo de transformação, o resultado desta transformação, representados pelos produtos e/ou serviços, os elementos restritivos e o controle da produção.

Os insumos são os recursos a serem transformados diretamente em produtos e os que movem o sistema de produção, tais como mão de obra, o capital, as máquinas e equipamentos, as instalações e a tecnologia.

O processo de transformação é o responsável pela mudança na forma ou composição dos recursos. Se o processo de transformação está na indústria, então o foco do sistema de produção está nas máquinas e nos equipamentos, entretanto se o processo de transformação está no serviço, então o foco do sistema de produção está na mão de obra especializada.

O sistema de controle atua para assegurar que a programação e os padrões sejam obedecidos. Além disso, deve assegurar que os recursos sejam utilizados de forma eficaz e que a qualidade desejada dos produtos e serviço seja obtida.

## 1.2 O Planejamento e Programação em Sistema de Produção

O planejamento e a programação da produção consiste em determinar ações que buscam atender adequadamente a demanda por meio de efetivas ações operacionais e gerenciais. Como exemplo de ações operacionais destacamos: o controle de estoque e sua localização, o controle sobre os recursos de transformação e de transporte, etc. Como exemplo de ações gerenciais destacamos: as estratégias de atendimento a clientes diferenciados, a busca ao atendimento com menor custo operacional e a máxima satisfação cliente/empresa com relação ao atendimento a uma demanda.

Em qualquer das ações, quer operacional ou gerencial, o foco principal do planejamento da produção está no processo de tomada de decisão, uma vez que o operador dispõe de um universo de informações que o balizará na escolha das melhores soluções, obedecendo sua capacidade de análise, sua capacidade de dedução e sua intuição, principalmente quando os limites entre duas ou mais soluções não são bem definidos.

O planejamento e as tomadas de decisão em sistemas de produção são classificados por níveis hierárquicos e têm por objetivo determinar a qualidade da decisão tomada em função do grau de incertezas ou certezas das informações utilizadas. Quanto mais baixa na hierarquia, maior é a qualidade da informação utilizadas, aumentando também a qualidade das decisões tomadas. Entretanto, em qualquer atividade de planejamento a melhor solução frente a um objetivo é dependente das decisões em todos os níveis hierárquicos. A figura 1 apresenta uma hierarquia de decisão em processos de produção.

No primeiro nível, chamado de Planejamento Estratégico, é executado para um período longo, as incertezas das informações são grandes e a decisão passa apenas por diretrizes a seguir sem que haja detalhamento da decisão adotada. Neste nível, o horizonte de planejamento é grande, assim como o período para replanejamento.

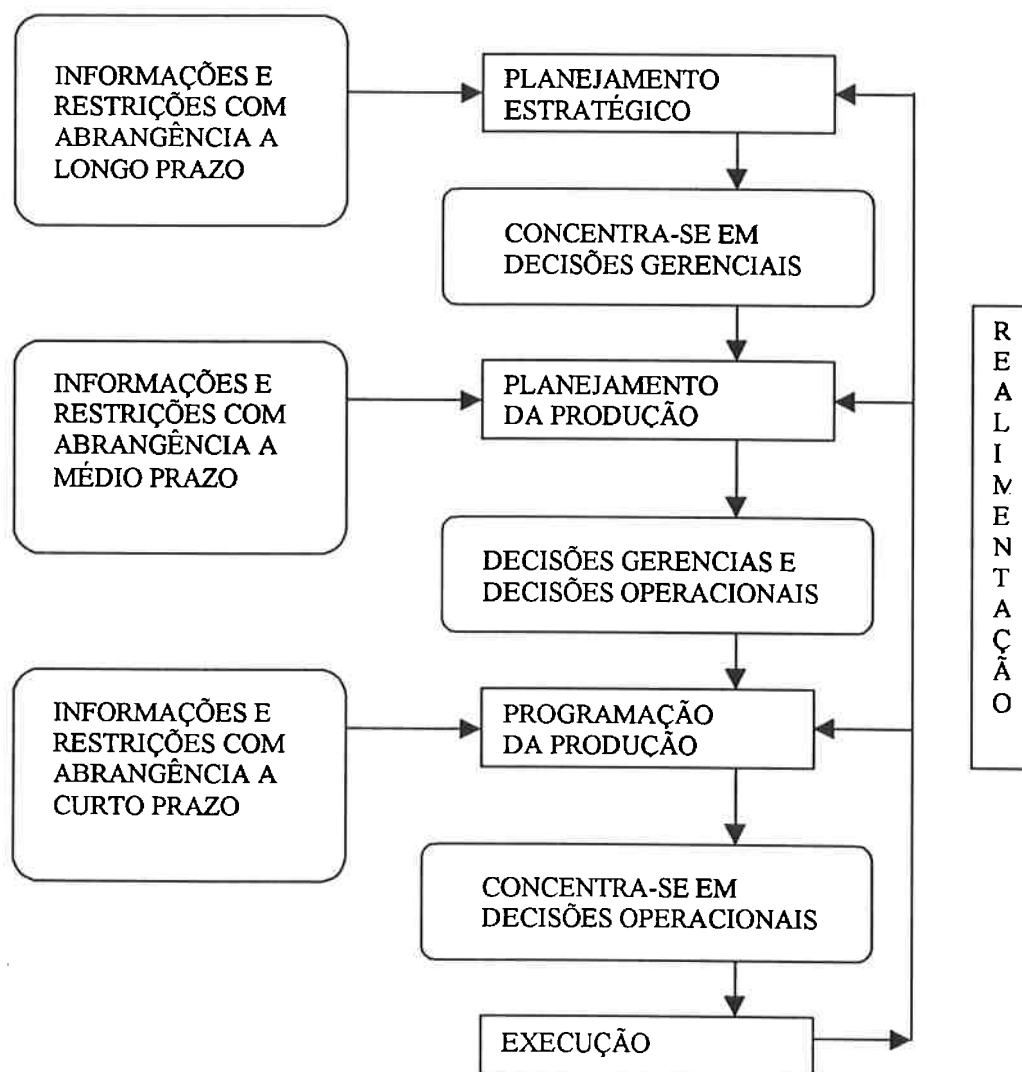


Figura 1: Hierarquia no Processo do Tomada de Decisão

Já o segundo nível, chamado de Planejamento da Produção, as informações e as restrições possuem um maior grau de detalhamento. Neste nível a decisão está em QUE, QUANTO e QUANDO algo deve ser produzido. Seus horizontes de planejamento e o período de replanejamento são menores que o primeiro nível.

No terceiro nível, o planejamento e a tomada de decisão envolve curtos horizontes de tempo e riscos relativamente menores. Tarefas rotineiras como a alocação de carga aos departamentos produtivos e a programação da produção são exemplos, assim como o controle de estoques.

Em resumo, os planos e decisões do nível mais alto dá linhas de ação para os planos e decisões ao 2 nível que por sua vez direciona a rotina operacional. A alta gerência é responsável pelo estabelecimento dos objetivos da organização, tais como o lucro, posição de competitividade e outros. Ela toma decisões que afetam o futuro da empresa a longo prazo. As decisões da alta gerência determinam os objetivos que a gerência do 2 nível deve cumprir. Finalmente, as decisões do 2 nível afetam diretamente o atendimento aos objetivos de curto prazo, ou seja, deve provocar uma decisão de O QUE, QUANTO, QUANDO E ONDE produzir. Neste momento a tomada de decisão deve levar em consideração o ambiente de produção e a estratégia de atender uma ordem de produção segundo um determinado critério.

Ainda no nível operacional a resposta a - O QUE produzir – está relacionada a um sistema de produção de volume intermediário com capacidade para produzir diversos produtos. Neste caso uma outra questão surge - em que ordem produzir - que é uma questão de seqüenciamento. O seqüenciamento envolve diversas técnicas que afetam diretamente a ordem de produção. Como exemplo, as regras de prioridade são modelos simples de decisão, usados em situações rotineiras de programação; são chamadas as vezes de regras empíricas de seqüenciamento, embora essa designação não seja de todo apropriada, já que usualmente as regras de prioridade têm uma base completamente racional.

### **1.3 A Programação da Produção**

Considerando na Figura 1 o terceiro nível, onde as decisões da empresa buscam atender os objetivos da produção a curto prazo, é preciso implementar os planos integrados por meio de programas e planos detalhados para o uso da equipe de trabalho e da capacidade física da empresa. A natureza do problema ao detalhar o planejamento e a programação irão diferir, de certo modo, caso consideremos sistemas contínuos ou intermitentes.

#### **1.3.1 A Programação da Produção em Sistemas Contínuos**

Os sistemas contínuos se caracterizam entre outros por linhas de produção e processos químicos continuados, nos quais, uma vez estabelecido o ritmo de produção, a seqüência das operações individuais e as relações entre as mesmas já foram bastante bem determinadas pelo projeto de instalação do sistema. O sistema funciona como uma grande máquina. Se o ritmo de produção está determinado, segue-se que a seqüência e interligação das operações já foram levadas em consideração no projeto do sistema. No entanto, em função das decisões do planejamento integrado que estabelecem os níveis de emprego e os ritmos de produção, ainda restam problemas importantes, como por exemplo as quantidades de cada produto a ser produzido.

O efeito de uma decisão de planejamento integrado sobre os níveis de emprego e ritmos de produção, com as especificações resultantes do vulto de trabalho extraordinário admitido durante o período, é a adequação da capacidade efetiva do sistema ao período previsto. Em outras palavras, foram estabelecidos limites de capacidade, os quais criam um conjunto de restrições de capacidade a serem observadas no estabelecimento da programação detalhada. Dessa forma, a distribuição da capacidade limitada entre os tipos e tamanhos dos produtos torna-se um problema econômico importante.

O processo de programação em sistemas contínuos considera o plano integrado como uma restrição, aproveitando qualquer flexibilidade por ele deixada para experimentar soluções de um plano praticável. Quando o plano integrado exige uma

alteração no nível de emprego, a distribuição das tarefas pela equipe de trabalho resultante deve ser objeto de um novo equilíbrio. No caso de linhas de montagem complexas podem ser usados os métodos e procedimentos de equilíbrio de linhas, maiores detalhes podem ser obtidos em BUFFA (1969).

### **1.3.2 A Programação da Produção em Sistemas Intermitentes**

A programação da produção, nos sistemas de produção intermitentes, é bastante complexa, sob o enfoque dos autores BUFFA (1969) e MOREIRA (1998). O fluxo irregular do material, devido ao projeto do arranjo físico, com centros de trabalho especializados, pode provocar o aparecimento de quantidades consideráveis de estoque de materiais em processo. Este material acumula-se em filas junto ao centro de trabalho, aguardando o devido processamento. Para tratar estas filas o problema de programação envolve primeiramente o processo de distribuir as operações necessárias pelos diversos centros de trabalho. Essa fase recebe o nome de alocação de carga. Dado que diferentes operações podem aguardar o processamento num dado centro, a programação da produção também envolve o processo de decisão para determinar a ordem na qual essas operações serão realizadas. A essa fase dá-se o nome de seqüenciamento. O foco de atenção na programação da produção recai pois sobre essas duas responsabilidades básicas – alocação de carga e seqüenciamento.

A alocação de carga envolve a designação de operações aos centros de processamento ou trabalho. Quando uma dada operação deve obrigatoriamente ser feita em um centro específico, os problemas são relativamente menores, entretanto, quando existem diversos centros os quais as operações podem ser alocadas, os problemas são relativamente complexos. Nesta circunstância, procura-se a carga de forma a buscar algum objetivo principal: diminuir custos de processamento e/ou de operações de máquina, minimizar tempos ociosos de equipamentos ou centros de trabalho, minimizar o tempo para completar as operações e assim por diante, dependendo de cada caso.



Em todos os problemas de seqüenciamento por mais simples que sejam admitem soluções diferentes dependendo da regra de decisão escolhida. Por exemplo, a minimização do tempo médio de término e a minimização do atraso máximo para qualquer das ordens fornecem resultados diferentes. À pergunta: qual técnica ou regra de decisão de seqüenciamento deve ser usada? não existe uma resposta definitiva, diferentes técnicas saem-se melhor segundo diferentes critérios.

Quando introduzimos o seqüenciamento através de um único processador, por exemplo, as três mais conhecidas regras de prioridade são: *PEPS* ou *FIFO* (primeiro o que chega é o primeiro que sai), *MTP* (Menor tempo de processamento) e *DD* (Data Devida). Todas essas regras são regras estáticas, que agem sobre um conjunto de trabalhos ao mesmo tempo, não havendo reprogramação do seqüenciamento enquanto o conjunto não for totalmente processado.

#### **1.4 Classificação dos Problemas de Produção**

A maioria dos modelos utilizados em sistemas de produção pertence por convenção ao campo da chamada Ciência da Gerência, embora não todos, alguns modelos são bem simples, aplicável a situações muito bem definidas, enquanto que outros são muito mais complexos e aplicáveis a uma gama considerável de situações.

Se o problema de produção for bastante estruturado, ou seja, os dados são conhecidos e quantificáveis, é possível pensar em uma análise quantitativa de forma a se obter uma solução matemática para ele; de qualquer forma, é provável que mesmo nas situações mais favoráveis, antes de implementar a solução, seja necessário levar em conta alguns fatores qualitativos que resistiram à qualificação. Às vezes tais fatores são também chamados de fatores imponderáveis.

Se o problema for pouco estruturado, então muitas informações serão não quantificáveis ou até mesmo virão cercadas de incertezas. Neste caso, não haverá muito lugar para a modelagem matemática e o gerente deverá tomar a decisão baseada em sua experiência, poder de avaliação e julgamento de situação. Podem surgir, sem dúvida,

casos intermediários, sendo as informações daí derivadas úteis como de apoio ao gerente, que não poderá entretanto dispensar uma análise personalizada dos fatores imponderáveis.

Um tipo de ambiente com pouca estruturação e que estamos considerando ser alvo de nosso estudo resume-se em:

- Uma ou mais filas de pedidos sob regime de regra dinâmica;
- Um ou mais pontos de estocagem com limitação de capacidade;
- Transportes entre pontos de estocagem e entrega formado por várias rotas concorrentes;
- Um ou mais pontos de entrega com limitação de capacidade;
- Atividade fortemente influenciada por decisões gerenciais;
- As variáveis de decisão gerenciais estão cercadas de incertezas;
- Regime de produção intermitente.

Este ambiente pode ser encontrado em diversos sistemas de produção tais como: sistema de distribuição e transporte de carga por caminhões, sistemas de distribuição em refinarias de petróleo e sistemas de embarque de graneis em portos.

Ainda como característica do ambiente estudado está a multiplicidade de objetivos que é geralmente determinado pelas decisões gerenciais em conflito com os objetivos clássicos de um sistema de produção.

No exemplo do transporte de carga, a formação da carga no caminhão para a entrega nos pontos A, B, etc está relacionada com uma certo nível de prioridade dada aos clientes em cada ponto de entrega, ou seja, este nível depende de fatores tais como a tradição do cliente na empresa, o quanto a carga é perecível, o tamanho da carga, se a carga oferece um certo risco de roubo, etc. Portanto a formação da carga no caminhão e conseqüentemente a ordem que será entregue, depende do julgamento do nível de prioridade da carga levando em consideração todos estes fatores acima descritos. Isto faz parte de uma estratégia de atendimento global onde a decisão está caracterizada por

uma programação de um sistema de produção envolvendo múltiplos objetivos de difícil quantificação.

### **1.5. Objetivos do trabalho**

O objetivo deste trabalho é o de propor uma ferramenta formal para modelagem do processo de decisão aplicado a uma classe de problemas em programação da produção que são caracterizados por pouca estruturação, que devem levar em consideração as atitudes gerenciais no momento da decisão e que em geral são caracterizadas por um certo grau de incerteza. Estes problemas tornam-se complexos quando modelados através de métodos de programação matemática clássica. O resultado almejado é uma ferramenta com capacidade de modelar o processo de tomada de decisão para a programação de rotina para um tipo incomum de ambiente de produção.

O ambiente a ser modelado possui recursos concorrentes (a programação de uma ordem interfere ou suspende a utilização de outros recursos por outras ordens), além disso cada ordem com características similares podem ter tratamentos bastante distintos inviabilizando o agrupamento das mesmas. Portanto, o formalismo que buscamos deve incorporar as características necessárias a atividade de planejamento e programação para o ambiente considerado e tendo como foco a experiência do executor da programação. Para tanto, buscou-se inicialmente identificar uma ferramenta formal capaz de tratar do controle sobre o uso dos recursos produtivos da planta, como por exemplo: concorrência e conflito na utilização dos recursos produtivos da planta, e de suas ocorrências num período de tempo. Já para tratar da utilização da opinião ou conhecimento, inerente à atividade de planejamento e programação, representado em sua grande maioria por heurísticas envolvendo ações gerenciais do homem sobre o processo, buscou-se identificar ferramentas com capacidade de modelar este conhecimento de maneira clara e qualitativa. A união destas ferramentas é a base formal do modelo de decisão que propomos e é discutido no Capítulo 5.

Na seqüência, apresentaremos no capítulo 2 uma revisão dos modelos mais comuns aplicados a pesquisa operacional, no capítulo 3 o formalismo das redes de Petri e suas extensões e no capítulo 4 a teoria dos conjuntos difusos e sua interferência nas regras de disparo da rede. Ambos capítulos 3 e 4 formam a base teórica da ferramenta discutida no capítulo 5. Nesse capítulo apresentamos o modelo de decisão proposto e no capítulo 6 um estudo de caso para planejamento e programação de atividades portuárias como uma aplicação do modelo proposto. Os resultados obtidos são discutidos no capítulo 7.

## 2. Métodos para a Programação em Sistemas de Produção

### 2.1. Visão Geral

O foco da tomada de decisão que será discutido neste trabalho encontra-se no nível da programação a curto prazo das operações do sistema de produção. Por suas características, os sistemas de produção vêm se revelando um campo fértil para a aplicação de procedimentos formais de análise de problemas de decisão. Ou seja, a tomada de decisão é a principal função de um gerente num sistema produtivo, cuja dinâmica é apresentada na figura 2. Veja por exemplo o trabalho discutido por NAKAMURA (1988).

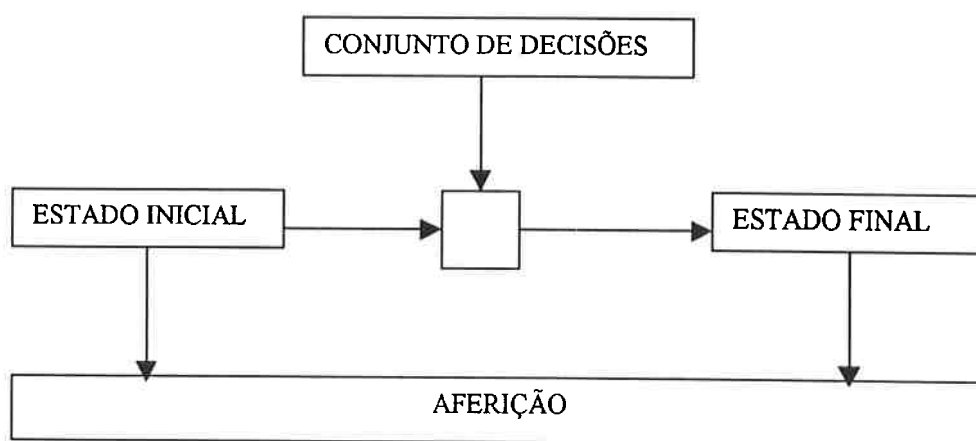


Figura 2 : Dinâmica do Processo de decisão

A análise formal dos problemas de decisão ocorre geralmente através de modelos matemáticos, que são representações simbólicas do problema em questão; o que se faz é procurar enquadrar o problema em um dos muitos modelos já disponíveis e de utilidade comprovada. Se a empresa tiver recursos, como analistas de Pesquisa Operacional e computadores à disposição, pode-se inclusive formular modelos novos, específicos aos problemas particulares da organização.

A pesquisa operacional associada a ferramentas computacionais viabilizam inúmeros métodos de otimização de processos, contribuindo para que algumas classes de decisões não estruturadas possam se transformar em decisões estruturadas. É o caso, por exemplo, de ferramentas de controle de estoque e da otimização de recursos num processo produtivo.

Os métodos de Pesquisa Operacional estão em sua maioria agrupados em duas grandes classes de modelos, como descritos nos trabalhos de WISMER (1967) e ELSAYED et BOUCHER (1985). O primeiro tipo de modelo é o determinístico em que, dado um estado do sistema e uma decisão a ser tomada, o próximo estado é determinado com absoluta certeza. O segundo tipo de modelo é o estocástico, onde o estado do sistema em certo instante depende probabilisticamente do estado ocupado e da decisão adotada no estado anterior.

Uma das maiores limitações dos modelos em Pesquisa Operacional estão ligadas ao fato de que os métodos tratam somente das variáveis quantitativas e não qualitativas, o que gera alterações nas condições analisadas em função da decisão adotada. Por exemplo, a produção pode ser aumentada, por força de demanda, através do aumento de horas na força de trabalho, porém não leva em consideração que este aumento pode provocar uma queda de produtividade, maior parada por quebra da linha de produção, etc.

Outra questão está na característica dos métodos que baseiam-se apenas em informações passadas, numa relação de causa e efeito, representada por uma função, no caso dos processos determinísticos ou por uma distribuição de probabilidade, no caso dos processos estocásticos. Em alguns processos de tomada de decisão, a necessidade por vezes está em decidir baseado em apenas sentimento e opiniões, sem necessidade de levar em consideração dados históricos que ajudam, mas não são suficientes. É o caso do lançamento de um produto no mercado, por exemplo.

A dinâmica de sistemas (FORRESTER (1961)) foi criada para analisar as interações ao longo do tempo entre as partes que compõem um sistema, sejam elas de natureza quantitativas ou não e, eventualmente, não possuindo dados históricos. As

variáveis qualitativas representam conceitos de qualidade absolutamente precisos. Além disso, a dinâmica de sistema não se preocupa em otimizar o desempenho do sistema. O trabalho GOUTIS (1995) apresenta um método para resolver problemas de decisão sob incerteza utilizando programação dinâmica.

Uma vez que um grande número de variáveis em tomada de decisão não possui conceitos precisos, uma nova linha de trabalhos vem surgindo com base na teoria de conjuntos difusos desde que foi criada por Zadeh em 1965, com o objetivo de modelar a imprecisão na tomada de decisão. Nessa linha os processos de decisão passaram por uma profunda alteração de conceitos, onde as variáveis envolvidas não mais são absolutamente precisas e sim podem incorporar níveis de incertezas comuns em decisões que envolvem os processos produtivos. Os níveis de incertezas podem também estar se alterando em função do momento que em as decisões são tomadas. Nesta linha, surgem alguns conceitos associados a tomada de decisão em ambientes difusos utilizando vários critérios, tais como:

- Processo de decisão difusa com múltiplos atributos,
- Processos de decisão difusa com múltiplos objetivos,
- Programação matemática difusa,
- Programação por metas difusas,
- Programação por critério global difusa,
- Programação dinâmica difusa,
- Programação interativa difusa,
- Processos de decisão probabilísticos com múltiplos objetivos.

Todos os critérios acima listados, que foram sintetizados no trabalho de GARA FILHO (1997), exceto o de programação dinâmica difusa, tratam os problemas em um único estágio, ou seja, problemas em que a decisão deve ser escolhida apenas uma vez ao longo do tempo. Para eliminar esta limitação, a técnica de programação dinâmica difusa utiliza uma função de transição entre estados, onde cada estado pode apresentar um conjunto de valores, sujeitos a um conjunto de decisões.

Como exemplo, o trabalho de CROWE (1997) discute um modelo de tomada de decisão com base na teoria dos conjuntos difusos aplicado a indústria eletrônica para a utilização da área de planejamento onde deseja-se avaliar os níveis funcionais dos projetos e o impacto causado por possíveis alterações nas estratégias de mercado. Já o trabalho de LOTAN (1998) discute um modelo de decisão com base na teoria dos conjuntos difusos aplicando o raciocínio aproximado na escolha de rotas num problema de tráfego.

Uma outra linha de trabalhos tem surgido com a utilização de uma ferramenta de modelagem matemática e gráfica para modelar o fluxo de informações e o fluxo de controle em processo de tomada de decisão. Esta ferramenta conhecida por redes de Petri é discutida por diversos autores, tais como PETERSON (1981); GIRANIT (1982); REISIG (1985) e MURATA (1989). As redes de Petri fornecem uma rica e versátil aproximação para modelar situações de decisão. Modelos de redes de Petri têm sido utilizado extensivamente em um grande número de áreas, tais como: simulação de sistemas de informação, automação em procedimentos de escritórios, análises de informações e fluxo de controle na produção e automação da manufatura e outros.

No exemplo de processos gerenciais, as redes de Petri permitem representar com clareza os estados em que as decisões devam ser tomadas. Já as regras de disparo da rede representam as funções de transição de estado, como na programação dinâmica. Os estados atingíveis da rede geram a árvore de alcançabilidade. Os diferentes caminhos gerados pela árvore de alcançabilidade são dependentes da estratégia adotada no momento de disparo da transição, ou seja, no tratamento dos conflitos, concorrência, etc. O estado final é dependente do caminho escolhido, isto é, estados intermediários da árvore de alcançabilidade, e pode ser utilizado para valorizar uma política global.

Alguns trabalhos como os discutidos por ALANCHE et al (1984); ALLA et al (1984); CORBEEL et al (1985); MUSZYNSKI et BANASZAK (1988); MARTINEZ et SILVA (199-); WADHWA et BROWNE (1989); ZHOU et al (1995); SEIFODDINI et ZHANG (1996); LEU (1996); ULUSOY et ÖZDAMAR (1996); CARLIER et CHRETIENNE (1988); CARLIER et al (1987); SILVA et VALETTE (1989) e



DEMAEL et LEVIS apresentam aplicações de redes de Petri na modelagem de problemas de tomada de decisão em sistemas de produção.

Outros trabalhos tais como o apresentado por PERDU et LEVIS (1989) apresentam uma aplicação de redes de Petri na modelagem da tomada de decisão focada no ser humano. Já o trabalho de ASIIMAKOPOULOS (1988) estuda a aplicação das redes de Petri na modelagem da tomada de decisão no controle de sistemas complexos. O trabalho de TÖRN (1990) discute um modelo de decisão genérico com base também em redes de Petri.

As redes de Petri têm sido aplicada também em conjunto com sistemas de regras para aplicação em tomada de decisão em sistemas de produção, conforme encontra-se relatado nos trabalhos de BAKO (1990) e ZAIDI et LEVIS (1997).

Na prática, certos problemas de decisão não são facilmente modelados usando tradicionais ferramentas de tomadas de decisão em sistemas de produção como algumas já citadas. Problemas de decisão de gerenciamento podem possuir características que são difícil de descrever totalmente com uma única abordagem. No exemplo de decisões que envolvem as atitudes gerenciais, a decisão está na escolha da melhor alternativa, dentre as oriundas de um grande número de variáveis envolvidas e em que momento elas devem ser tomadas, visando obter o melhor resultado dentro de um conjunto de objetivos a alcançar.

Nos itens a seguir, discute-se com mais detalhes os modelos mais comuns utilizados na programação dos sistemas de produção divididos em modelos otimizantes e modelos heurísticos.

## 2.2 Métodos Otimizantes

Os modelos matemáticos exploram o crescimento da capacidade dos computadores. Isto foi decisivo para o surgimento de modelos como, por exemplo, a programação linear inteira que permitiu que problemas de programação em ambiente de maior complexidade fossem formulados e resolvidos exatamente. Outro exemplo de método matemático é o *branch-and-bound*, cujo formalismo explora todas as possíveis soluções de um problema de seqüenciamento de ordens, como por exemplo, suponha que 30 ordens sejam seqüenciadas para uma máquina, o método resume-se em criar uma árvore de decisão contendo 30 ramos para escolha da 1 ordem (primeiro nível). Cada ramo do primeiro nível gera outros 29 ramos possíveis, tendo agora 870 ramos no segundo nível e assim por diante. No nível 30<sup>th</sup> teríamos  $2 \times 10^{32}$  ramos. Mesmo que seja possível verificar todas as soluções e avaliá-las, nos podemos desenvolver meios para podar certos ramos da árvore que possamos identificar ter somente soluções não ótimas, reduzindo com isto o número final de soluções avaliadas.

Ainda no período dos anos 60 alguns autores usaram a programação dinâmica no problemas de seqüenciamento, utilizando o conjunto de ordens como elementos de um espaço de estado. Este método compete com *branch-and-bound* em uma classe restrita de problemas. Tanto a programação inteira e quanto a programação dinâmica são adequados para resolver problemas de pequeno porte, entretanto, os de grande porte permanecem intratáveis. Por esta razão vários métodos heurísticos começaram a ser desenvolvidos para resolver aproximadamente grandes problemas matemáticos.

### 2.2.1 Modelos mais comuns aplicados a programação da produção

Segundo os trabalhos discutidos por BUFFA (1969) e mais tarde por MOREIRA (1998), no campo da pesquisa operacional, os modelos mais comuns são:

Probabilidade e Distribuição de Probabilidade (Análise Estatística) – úteis na análise de problemas envolvendo risco, onde uma ou mais variáveis não tem valor fixo, determinado, mas sim podem assumir muitos valores, de acordo com uma dada (ou

assumida) distribuição de probabilidade. Esses modelos estatísticos podem ser usados por si ou como complemento de outros modelos.

Programação Linear Simples – um dos modelos mais largamente usados na prática, é muito útil para escolher entre alternativas sujeitas à restrições de recursos atendendo a um objetivo prefixado. Como hipótese fundamental assume-se que as relações entre as variáveis são lineares.

Programação Linear Inteira – usada para os mesmos tipos de problemas que a programação linear simples. A diferença está em que, na programação inteira, pelo menos uma das variáveis deve obrigatoriamente assumir valores inteiros.

Os modelos citados, embora reconhecidamente não sejam os únicos, servem como idéia do número de modelos disponíveis. Dentre eles o mais importante no setor de composição de produtos e programação da produção, que segundo MOREIRA (1998), é a da Programação Linear.

### **2.3.Métodos Heurísticos**

Nos anos 50 e 60 o crescimento dos computadores fez com que fosse possível a estruturação de uma planta produtiva, com ordens de serviços, atividades nestas ordens e restrições com alguns níveis de detalhes tal que, em função de um dado de entrada e uma simples regra de alocação em pontos de decisão, o computador conseguia propor uma programação com relativo baixo custo. Investigações poderia ser feitas com o uso de vários tipos de dados artificiais ou históricos e simulação os efeitos de diferentes tipos de simples heurísticas sob diferentes condições.

A literatura sobre simulação em programação é vasta, vejam as referências citadas em MORTON e PENTICO (1993). A simulação pode representar muito bem um sistema real com modesto custo operacional e através de uma linguagem de simulação de alto nível tornar a programação uma atividade relativamente simples. A simulação têm também a vantagem de fornecer uma interface mais natural com o *expert* humano

apesar das dificuldades de estabelecer os dados necessários e o projeto que em geral é dedicado. Entretanto, a maior desvantagem está nos resultados obtidos uma vez que nem mesmo se aproximam do ótimo. Além disso, são limitados em estratégias capazes de avaliar quanto boas são as soluções obtidas ou qual a maneira eficiente de obtê-las.

### 2.3.1 Métodos Heurísticos mais comuns

Os métodos de busca heurísticas estão divididos em três categorias:

- a) Métodos de intensificação/diversificação
- b) Métodos do gargalo
- c) Sistemas experts

Como métodos de intensificação/diversificação podemos citar:

- *Tabu search* – Programação heurística usando *tabu search* tem sido reportado em diversos trabalhos, em sua forma mais simples é uma extensão do método de busca em vizinhança, onde é utilizada uma lista das recentes posições pesquisadas. O método leva em consideração o fato de que as posições listadas, enquanto ativas, não sejam repetidas. Possui a característica de evitar que seja apanhado um ótimo local através do método de diversificação para outro território com provável solução ótima.
- *Simulated annealing* – originalmente desenvolvido para estudo do resfriamento e recristalização de materiais aquecidos têm, portanto, uma origem diferente do método de *tabu search*. Novamente, de forma simples, um valor randômico é adicionado a cada possível avaliação de movimento que é representado por uma função objetivo. Essa função objetivo fornece um valor que é comparado com o valor desejado; entretanto, nem sempre será escolhido o melhor movimento e sim aquele de maior probabilidade, depois a segunda maior e assim por diante. Esse método possui a capacidade de balancear a intensificação e a diversificação em cada movimento através da variação de seus parâmetros. Sua formulação e aplicações podem ser obtidos em MORTON et PENTICO (1993) ou nos vários autores nele citado.

- *Algoritmo genético* – refere-se a qualquer processo de busca na vizinhança que simula o processo de evolução natural. Parte-se de uma população corrente de possíveis soluções para o problema; em cada geração a melhor solução (o mais apto indivíduo) é permitida a produzir novas soluções (criança) pela mistura das aptidões dos pais (ou por mutação). A pior criança morre para manter a população estável. Com leves diferenças de ponto de vista, *tabu search*, *simulated annealing* e *algoritmo genético* podem ser chamados de busca de vizinhança estendida.

Ainda como métodos heurísticos podemos citar:

- *Beam search (método de enumeração parcial)* – faz parte de um grupo de métodos desenvolvidos por engenheiros de software para inteligência artificial com aplicação em busca parcial em árvore de decisão. Estes métodos têm sido responsáveis pelos potentes programas para jogos de xadrez nos computadores. Eles empregam uma cuidadosa habilidade misturando estratégias de intensificação e diversificação. *Beam search* é antes de tudo um tipo de procedimento *Branch and Bound*, entretanto nesse método são desprezadas não somente as soluções garantidamente inaproveitáveis mas também as que provavelmente sejam inaproveitáveis. A essência do método está em ter uma boa medida do que significa o tempo provavelmente.
- *Métodos tais como:* Método do gargalo e suas derivações, sistemas experts e redes neurais tem sido aplicados em problemas de seqüenciamento de ordens e tem sua teoria discutida por vários autores citados e inclusive em MORTON et PENTICO (1993).

## 2.4 Outros Métodos Aplicados a Sistemas de Produção

PERT (Program Evaluation and Review Techniques) e CPM (Critical Path Method) – são modelos semelhantes, usados na programação e no controle da execução de grandes projetos.

Modelos de rede – Aplicáveis a estudos de sistema de transporte para obtenção e processamento de informação, bem como no planejamento de projetos de pesquisa e desenvolvimento. Podem ser usados para encontrar a rota mais curta ou maximizar o fluxo através de uma rede, ou ainda encontrar o caminho mínimo ligando pontos dados em uma rede.

Modelos de Linhas de Espera (Filas) – usados para melhorar a eficiência de instalações com relação a demanda do consumidor, a hora em que ela acontece, a duração do atendimento e o comportamento do consumidor quando este chega para ser atendido ou quando aguarda na fila. Estas variáveis são caracterizadas pela incerteza.

Simulação – envolve a construção de um modelo e o seu teste, ou seja, a sua operação e o seu comportamento sob variadas condições. A idéia básica é estudar tentativamente o comportamento do modelo, visando obter soluções ou conhecer melhor as condições de operação da realidade que se está representado pelo modelo. Usualmente, exceto em casos muito simples, a simulação é feita com o auxílio de computadores.

Teoria dos Jogos – utilizado para desenvolver estratégias competitivas em situações de tomada de decisão envolvendo dois ou mais oponentes considerados racionais.

Análise de Regressão – modelo usado para determinar a relação entre um conjunto de variáveis independentes e uma variável dependente. As regressões mais comuns são: a linear simples (uma variável dependente e uma variável independente) e a linear múltipla (uma variável dependente e várias independentes).

Portanto, a programação em sistemas de produção pode ser definida como uma competição entre atividades a serem executadas restritas a um conjunto de recursos na qual se busca a maximização da satisfação do cliente, a maximização do uso dos recursos disponíveis na planta e a minimização de seus custos de operação. As decisões na programação devem incluir o seqüenciamento, a roteirização, a inserção de espera, suspensão e reprogramação e outras atitudes que visem uma boa operação dos sistemas de produção.

### 3. Teoria de Redes de Petri

#### 3.1 Introdução

As redes de Petri configuram-se como uma linguagem com capacidade para descrever processos concorrentes. Isto está garantido nos inúmeros trabalhos já publicados desde que foram propostas por Carl Adam Petri em 1962.

Através de sua sintaxe podemos especificar com clareza a execução de um processo envolvendo alocação de recursos, dando uma descrição explícita das ações e estados necessários à compreensão do processo como um todo. Já sua semântica impõe regras comportamentais que descrevem a dinâmica do processo.

Como uma ferramenta gráfica, as redes de Petri podem ser usadas como uma auxiliar na comunicação visual similar a gráficos de fluxo, diagrama de blocos, e redes de comunicação. Marcas podem ser utilizadas nestas redes para simular a dinâmica e a concorrência de atividades do sistema. Como ferramenta matemática, é possível levantar equações de estado, equações algébricas, e outros modelos matemáticos que governam o comportamento do sistema. As redes de Petri são uma importante ferramenta para descrever e estudar sistemas de processamento de informações que são caracterizados por serem concorrentes, paralelos, distribuídos, não determinísticos e/ou estocásticos.

Apesar de suas potencialidades acima descritas, a modelagem de processos com redes de Petri deve seguir alguns cuidados para que o modelo resultante não seja por demais genérico, gerando com isto uma modelagem bastante complexa. Por exemplo, modelos baseados em redes de Petri tendem a tornar-se muito grandes para análise mesmo que representem pequenos sistemas. Em aplicações de redes de Petri, é frequentemente necessário adicionar modificações especiais ou certas restrições para aplicações particulares.

Uma rede de Petri pode potencialmente modelar uma variedade de atividades, MURATA (1989), envolvendo características tais como:



- Execução seqüencial,
- Conflitos
- Concorrência
- Sincronização
- União,
- Priorização.

Execução seqüencial - implicam o processamento de restrições de precedência na análise da rede. Um estado posterior somente pode ser atingido se o estado precedente estiver sido completado.

Conflitos – Quando mais de uma transição pode ser disparada a partir de uma precedência.

Concorrência – Implica em operações de multitarefas. Nesta situação, por exemplo, uma simples operação envolverá a execução de diferentes atividades ou tarefas concorrentes.

Sincronização – é a situação na qual uma única operação envolve a utilização sincronizada de várias entradas ou recursos.

União – é a situação determinada por múltiplas precedências necessárias a se atingir o próximo estado da rede.

Priorização – implica em estabelecer prioridades entre várias atividades.

Uma rede de Petri clássica como definida por Carl Adam Petri e mais tarde discutida por PERTERSON (1981) e outros é identificada pela quintupla  $(P, T, I, O, M)$ , onde  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  é o conjunto de lugares.  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  é o conjunto de transições;  $[I \subseteq P \times T]$  é a função de entrada de  $P$  para  $T$ ;  $[O \subseteq T \times P]$  é a função de saída de  $T$  para  $P$ ; e  $M$ , chamada marcação, é a função que define um mapeamento de

um conjunto de lugares  $P$  para  $Z$  (onde  $Z$  é o conjunto de todos os inteiros não negativos)

$$M : P \rightarrow Z \text{ onde } M_i = M(p_i) \in Z, p_i \in P \quad (3.1)$$

$$i = (0, 1, \dots, n)$$

Lugares podem ser entrada ou saída de uma transição ( um conjunto de requerimentos ou condições os quais quando satisfeitas resultam no disparo que representa uma mudança de estado) e podem representar condições, recursos ou saídas. Lugares de entrada ( conjuntos de lugares que podem disparar uma transição) estão definidas por funções de entrada. Lugares de saída ( conjunto de lugares associados com saídas de uma transição) são definidas por funções de saída. As funções de entrada e saída representam assim relações unidirecionais entre lugares de entrada e transições, e transições e lugares de saída respectivamente.

O estado de um sistema num dado tempo é definido por marcas (denotado por pontos) associado a lugares. O estado de um lugar  $p_i$  (ex. número de marcas em  $p_i$ ) é definido pela sua correspondente marcação  $M_i$ ; O estado da rede de Petri, o qual corresponde ao estado do sistema sendo modelado é definido por  $R(M_0) = \{M_0, M_1, \dots, M_n\}$ .

O comportamento dinâmico de uma rede de petri é descrito por uma seqüência de disparo. A transição  $t_i$  ( $t_i \in T$ ) pode disparar se e somente se cada um de seus lugares entrada contenha no mínimo uma marca. Como resultado do disparo, uma marca é removida do lugar de entrada e outra é adicionada em cada um de seus lugares de saída. Uma transição que pode ser disparada é conhecida como habilitada.

A maior força das redes de Petri é sua base matemática que permite a análise de muitas propriedades e aos problemas associado com sistemas concorrentes. Dois tipos de propriedades podem ser estudadas com modelos de redes de Petri: aquelas que dependem da marcação inicial, chamadas propriedades comportamentais, e aquelas que são independentes da marcação inicial, chamadas propriedades estruturais.

## 3.2. Propriedades das Redes de Petri

### 3.2.1 Propriedades Comportamentais

**a) Alcançabilidade**, o disparo de uma transição habilitada mudará a distribuição de marcas (marcação), de acordo com regras de disparo da transição. Uma seqüência de disparo resultará numa seqüência de marcações. Uma marcação  $Mn$  é dita alcançável a partir de uma marcação inicial  $Mo$  se existir uma seqüência de disparo que transforme  $Mo$  em  $Mn$ , tal que:

$$Mo \xrightarrow{Y} Mn, \quad (3.2)$$

onde,  $\xrightarrow{Y}$  é seqüência de disparo de um sistema modelado por uma rede de Petri.

O problema da alcançabilidade de uma rede de Petri é o problema de encontrar se uma determinada marcação  $Mn \in R(Mo)$ , conjunto de todas as marcações alcançáveis a partir de  $Mo$ .

**b) Limitabilidade**, uma rede de Petri é dita limitada se o número de marcas não excede a uma número finito  $k$  para qualquer marcação alcançável a partir de  $Mo$ , ou seja  $M(p) \leq k$ , para cada lugar  $p$  e cada marcação  $M \in R(Mo)$ .

**c) Vivacidade**, o conceito de vivacidade está intimamente relacionado com a completa ausência de deadlocks em sistemas de operação. Uma rede de Petri, com uma determinada marcação inicial, é dita ser viva se nenhum problema foi encontrado para atingir as marcações possíveis a partir de  $Mo$ . Uma relaxação do conceito de vivacidade pode ser encontrado em MURATA (1989)

**d) Reversibilidade**, uma rede é dita reversível se para cada marcação  $M'$  em  $R(Mo)$ ,  $Mo$  é alcançável a partir  $M'$ . Em muitas aplicações é necessário retornar ao estado inicial.

e) Cobertura, Persistência, Distância Síncrona, são outras propriedades que analisam comportamento de certas subclasses das redes de Petri e são descritas por vários autores na abrangente literatura sobre redes de Petri.

### 3.2.2. Propriedades Estruturais:

As propriedades estruturais são aquelas que dependem da estrutura topológica da rede de Petri. Elas são independentes da marcação inicial  $M_0$ , no sentido que estas propriedades são mantidas para qualquer marcação inicial, ou são afetadas com a existência de certas seqüências de disparo de alguma marcação inicial. Assim estas propriedades podem freqüentemente ser caracterizadas em termos da matriz de incidência  $A$  e suas equações homogêneas ou inequações associadas.

Propriedades tais como: vivacidade estrutural, controlabilidade, limitação estrutural, conservabilidade, repetibilidade, consistência e invariantes entre outras podem ser facilmente encontrado na literatura de redes de Petri, tais como: PETERSON (1981); GIRANIT (1982); REISIG (1985) e MURATA (1989).

### 3.2.3. Métodos de Análise:

Os métodos de análise podem ser classificados dentro dos seguintes três grupos: 1) Método da árvore de cobertura (alcançabilidade), 2) Equações-matrizes e 3) Técnicas de redução e decomposição, conforme MURATA (1989).

O primeiro tipo de método envolve essencialmente a enumeração de todas as marcações alcançáveis. O principal problema está na explosão de estados alcançáveis. Por outro lado, técnicas de redução e equações-matrizes são fortes, mais em muitos casos, são aplicáveis somente para certas subclasses de redes de Petri ou situações especiais.

a) **Árvore de cobertura**, a partir de uma marcação inicial  $M_0$ , obtêm-se tantas marcações quanto ao número de transições habilitadas. Para cada nova marcação, podemos alcançar outras marcações. Este processo resulta numa árvore representando as marcações alcançadas. Os nós representam a marcação gerada a partir de  $M_0$  e seus sucessores, e os ramos representam a transição disparada que transforma uma marcação em outra. Um algoritmo para construção da árvore de cobertura pode ser obtido em MURATA (1989). Para uma rede limitada, a árvore de cobertura é chamada de árvore de alcançabilidade, desde que contenha todas as possíveis marcações alcançáveis.

b) **Matriz de Incidência e Equação de Estado**, o comportamento de muitos sistemas estudados na engenharia podem ser descritos por meio de equações diferenciais ou equações algébricas. Seria bom se pudéssemos analisar completamente o comportamento dinâmico de sistemas concorrentes modelados por redes de Petri. No entanto, a solução destas equações é algumas vezes limitada particularmente devido à natureza não determinística inerente a modelos de rede de Petri e devido a restrições onde somente soluções com inteiros não-negativos devem ser encontradas.

Para uma rede de Petri  $N$  com  $n$  transições e  $m$  lugares (rede pura), uma matriz de incidência  $A$  é uma matriz  $n \times m$  é dada por:

$$A_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-, \quad (3.3)$$

onde  $a_{ij}^+ = w(i,j)$  é peso dos arcos da transição  $i$  de seu lugar de saída  $j$  e  $a_{ij}^- = w(j,i)$  é o peso do arco para a transição  $i$  do lugar de entrada  $j$ .

Uma transição  $i$  está habilitada dada uma marcação  $M$  se somente se:

$$A_{ij}^+ \leq M(j), \quad j=1, \dots, m \quad (3.4)$$

Equação de Estado, pode-se escrever a seguinte equação de estado para redes de Petri:

$$M_K = M_{K-1} + A^T U_K, \quad (3.5)$$

Onde:

$M_K$  = vetor da nova marcação no próximo estado

$M_{K-1}$  = vetor da marcação do estado atual

$A^T$  = transposta da matriz de incidência  $A$

$U_K$  = vetor de transição representando as transições a disparar.

Condição necessária de alcançabilidade e demais propriedades podem ser vistas em MURATA (1989).

c) **Regras de redução**, para facilitar análises de grandes sistemas, freqüentemente reduz-se o modelo do sistema para um mais simples, enquanto preservam-se as propriedades a serem analisadas. Pode-se facilmente levantar na literatura de redes de Petri, que certas operações de redução preservam propriedades de vivacidade e limitabilidade, MURATA (1989).

A maior fragilidade das redes de Petri está em sistemas complexos. Assim, é muito importante o desenvolvimento de métodos de transformação os quais permitam reduções hierárquicas e de passos que preservem as propriedades a serem analisadas. Muitos trabalhos nesta linha permanecem na área de pesquisa.

#### 3.2.4. Subclasses de Redes de Petri

a) **Máquina de Estado (SM)**, é uma rede de Petri ordinária tal que cada transição  $t$  tem exatamente um lugar de entrada e um lugar de saída.

$$|{}^{\circ}t| = |t^{\circ}| = 1 \text{ para todo } t \in T \quad (3.6)$$

b) **Grafo Marcado (MG)**, é uma rede de Petri ordinária tal que cada lugar  $p$  tem exatamente uma transição de entrada e exatamente uma transição de saída.

$$|{}^{\circ}p| = |p^{\circ}| = 1 \text{ para todo } p \in P \quad (3.7)$$

c) **Rede de livre-escolha (FC)**, é uma rede de Petri ordinária tal que cada arco de um lugar é ou um único arco de saída ou um único arco de chegada para uma transição.

$$\begin{aligned} & \text{para todo } p \in P, |p| \leq 1 \text{ ou } {}^{\circ}(p) = \{p\}; \text{ equivalentemente,} \\ & \text{para todo } p_1, p_2 \in P, p_1^{\circ} \cap p_2^{\circ} \neq \emptyset \Rightarrow |p_1^{\circ}| = |p_2^{\circ}| = 1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

d) **Rede de livre-escolha estendida (EFC)**, é uma rede ordinária tal que,

$$p_1^{\circ} \cap p_2^{\circ} \neq \emptyset \Rightarrow p_1^{\circ} = p_2^{\circ} \text{ para todo } p_1, p_2 \in P. \quad (3.9)$$

e) **Rede de livre-escolha assimétrica (AFC)**, é uma rede de Petri ordinária tal que

$$p_1^{\circ} \cap p_2^{\circ} \neq \emptyset \Rightarrow p_1^{\circ} \subseteq p_2^{\circ} \text{ ou } p_1^{\circ} \supseteq p_2^{\circ} \text{ para todo } p_1, p_2 \in P. \quad (3.10)$$

Condições de vivacidade, segurabilidade e alcançabilidade referente as subclasses citadas são encontradas na ampla literatura sobre redes de Petri e em especial em MURATA (1989).

#### f) Rede de Petri temporizada

O conceito de tempo não é explicitado na definição original das redes de Petri. Entretanto, para avaliação de desempenho em problemas de planejamento e programação, alvo maior deste trabalho, é necessária a introdução de temporização associada com transições ou com lugares no modelo. Se os tempos forem determinísticos, o modelo é conhecido simplesmente como modelo de rede de Petri temporizada e para tempos probabilísticos, como modelo de rede de Petri estocástica. A definição formal da rede de Petri temporizada utilizada no modelo proposto é apresentada nos próximos capítulos.

Uma rede de Petri estocástica (SPN) é uma rede de Petri onde cada transição está associada a uma variável randômica, que expressa o atraso de uma habilitação para o disparo de uma transição. Como extensão das redes de Petri estocásticas surgiram as redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN) como forma de resolver a explosão de estados das redes estocásticas. Uma GSPN tem transições temporizadas e imediatas, a redução de estados é obtida pelo descarte de marcações que correspondem a algum estado na qual o sistema possui um tempo desprezível ou nulo. Mais detalhes são encontrado na literatura, como em MURATA (1989). O trabalho de EL-HARAKSY et al (1990) apresenta uma metodologia para análise de desempenho de modelos de rede de Petri temporizada aplicado a protocolos de comunicação.

### **3.2.5. Redes de Alto Nível**

As redes de alto nível, tais como redes de Petri colorida e redes predicado/transição, estão agora em ampla utilização para muitos diferentes objetivos práticos. A principal razão de tanto sucesso está no fato delas possuírem uma representação gráfica e uma semântica bem definidas que ainda permitem análises formais. Nas redes de baixo nível como as citadas anteriormente, as marcas são somente de um tipo e um estado é definido pela marcação da rede. Já nas redes de alto nível, cada marca pode conter complexas informações, podendo descrever todo o estado de um determinado processo.

O caso estudado é uma classe de problemas de programação onde se requer estados, ações, temporização e decisões gerenciais com o objetivo de facilitar a interpretação do processo modelado e auxiliar na análise das propriedades comportamentais do modelo. As redes de Petri colorida e temporizada suporta estas requisições e sua definição formal é descrita a seguir.



### 3.3.Redes de Petri Colorida e Temporizada

As redes de Petri e suas extensões, como já foi mencionado, se prestam a um grande número de aplicações. Entretanto, buscou-se identificar uma classe de redes de Petri de alto nível com capacidade de atender aos requisitos de modelagem para uma classe de problemas descritos nos objetivos deste trabalho.

As redes de Petri Coloridas pode transportar em suas marcas um grande número de informações, o que reduz o tamanho o modelo que representa um determinado processo analisado e facilitam as análises das propriedades do modelo, bem como a visualização de aderência ao processo real.

Em redes de Petri Coloridas pode-se modelar e investigar: “O que”, “Como” e “Onde”, num processo de planejamento e programação da produção. Entretanto, a necessária resposta a “Quando” dependeria de uma investigação sobre o desempenho do processo, por exemplo, o máximo tempo usado para a execução de certas atividades e a média de tempo de espera para certas requisições. Para este tipo de análise é necessário introduzir no modelo de redes de Petri colorida o conceito de tempo que aqui, dado ao processo modelado, é representado por um relógio global. A extensão para as redes coloridas e temporizadas aqui utilizada é apresentada por JENSEN (1996), o qual admite que cada marca carregue um selo de tempo adicionado à cor da marca. O selo de tempo identifica quando uma marca está pronta para ser utilizada por uma transição. Isto significa que é possível especificar todos os tipos de atrasos ( constantes, intervalos, distribuição de probabilidade ).

Existem vários outros caminhos pelos quais redes de Petri Coloridas podem ser estendidas com relação ao conceito de tempo. Algumas extensões forçam um atraso entre a habilitação e a ocorrência de uma transição. Outros têm o atraso entre remoção da marca de seu lugar de entrada e sua criação no seu lugar de saída, ou o atraso entre a criação de uma marca e o tempo o qual a marca pode ser utilizada.

Tem sido mostrado, como no trabalho de VALERO et al (1987), que muitas das extensões de tempo possuem o mesmo poder de modelagem, no sentido que é

relativamente fácil transladar um modelo de rede de Petri usando um das extensões de tempo em um modelo que usa outros tipos de extensão de tempo. A extensão de tempo descrita por JENSEN (1996), atende adequadamente à classe de problemas tratados neste trabalho no sentido de que estamos preocupados tão somente com o tempo necessário para a execução de uma ou mais tarefas, todas com tempo determinístico. A definição formal para as redes de Petri Coloridas e Temporizadas e seu comportamento vem a ser modificações diretas das definições correspondente para as redes de Petri Colorida e não Temporizadas (UTCPN), como apresentaremos a seguir.

### 3.3.1 Definição Formal

Uma rede de Petri colorida e temporizada é definida por:

$$TCPN = \langle \Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I, R, r_0 \rangle \quad (3.11)$$

onde:

1.  $\Sigma$  é um conjunto finito não vazio de tipos, chamados de conjunto de cores,
2.  $P$  é um conjunto finito de lugares,
3.  $T$  é um conjunto finito de transições,
4.  $A$  é um conjunto finito de arcos, tal que:

$$\bullet \quad P \cup T = P \cap T = T \cap A = \emptyset$$

5.  $N$  é uma função de Nó. Este é definido de  $A$  em  $P \times T \cup T \times P$

6.  $C$  é uma função de cor. Este é definido de  $P$  em  $\Sigma$

7.  $G$  é uma função de guarda. Este é definido de  $T$  em expressões tal que:

$$\bullet \quad \forall t \in T : [ \text{type}(G(t)) = B \wedge \text{Type}(\text{Var}(G(t))) \subseteq \Sigma ]$$

8.  $E$  é uma função de arco. Este é definido de  $A$  em expressões tal que:

$$\bullet \quad \forall a \in A : [ \text{type}(E(a)) = C(p(a))_{MS} \wedge \text{Type}(\text{Var}(E(a))) \subseteq \Sigma ]$$

9.  $I$  é uma função de inicialização. Este é definido de  $P$  em expressões tal que:

$$\bullet \quad \forall p \in P : [ \text{type}(I(p)) = C(p)_{MS} ]$$

10.  $R$  é um conjunto de valores de tempo, também chamada de selos de tempo. Este é um subconjunto dos números reais  $\mathcal{R}$  positivos contendo o zero 0.

11.  $r_0$  é um elemento de  $R$ , chamado de tempo inicial.

### 3.3.2 Regras de Disparo

A marcação inicial  $Mo$  é uma marcação obtida a partir da expressão de inicialização:

$$\bullet \quad \forall p \in P : Mo(p) = I(p)r_0 \tag{3.12}$$

Um estado é um par  $(M, r)$  onde  $M$  é a marcação e  $r$  um valor de tempo. O estado inicial é um par  $(Mo, r_0)$ .

Um passo está habilitado num estado  $(M1, r1)$  no tempo  $r2$  se somente se as seguintes propriedades são satisfeita:

1.  $\forall p \in P : \sum_{(a,b) \in Y} E(p, t) < b > r2 \leq M1(p)$  (3.13)
2.  $r1 \leq r2$
3.  $r2$  é o menor elemento de  $R$  para o qual existe um passo satisfazendo os passos (1) e (2).

Quando um passo  $Y$  está habilitado num estado  $(M1, r1)$  no tempo  $r2$  este pode ocorrer, mudando o estado  $(M1, r1)$  para outro estado  $(M2, r2)$ , sendo definido por:

$$\forall p \in P : M2(p) = (M1(p) - \sum_{(t,b) \in Y} E(p,t) \langle b \rangle r2) + \sum_{(t,b) \in Y} E(t,p) \langle b \rangle r2 \quad (3.14)$$

A primeira soma é chamada: marcas removidas enquanto a segunda é chamada: adicionando marcas. Entretanto, dizemos que  $(M2, r2)$  é *diretamente alcançável de*  $(M1, r1)$  pela ocorrência do passo  $Y$  no tempo  $r2$ , o qual também denotamos:

$$(M1, r1) [Y, r2] (M2, r2) \quad (3.15)$$

A regra de ocorrência na definição acima é idêntica a regra de ocorrência para redes de Petri colorida não temporizada, exceto para as duas aparências de  $r2$ . Nota-se que a regra de ocorrência é local, enquanto a regra de habilitação seja global. A seguinte definição de seqüência de ocorrência e alcançabilidade são idênticas as correspondentes definições para redes não temporizadas, exceto pela adição de valores de tempo.

Por definição: Uma finita seqüência de ocorrência é uma seqüência de estados, passos e valor de tempo.

$$S1 [Y1, r2] S2 [Y2, r3] S3 [Y, r4] \dots \dots \dots Sn [Yn, rn+1] Sn+1 \quad (3.16)$$

Tal que  $n \in \mathbb{N}$  e  $S_i [Y_i, r_{i+1}]$  para todo  $i \in 1 \dots n$ . O estado  $S1$  é chamado o estado inicial da seqüência de ocorrência, enquanto o estado  $S_{n+1}$  é chamado estado final. O número inteiro não negativo  $n$  é o número de passos na seqüência de ocorrência ou o comprimento deste. Analogamente, tratamos com seqüência de ocorrência infinita, onde:

$$S1 [Y1, r2] S2 [Y2, r3] S3 [Y, r4] \dots \dots \dots \quad (3.17)$$

Neste caso,  $S1$  continua sendo o estado inicial da seqüência de ocorrência, entretanto, é dito ter um comprimento infinito.

Um estado  $S''$  é alcançável a partir de um estado  $S'$  se e somente se existir uma finita seqüência de ocorrência tendo  $S'$  como estado inicial e  $S''$  como estado final. O conjunto de estados os quais são alcançáveis de um estado  $S$  é denotado por  $[S>$ .

Algumas propriedades com pequenas modificações de suas definições podem também serem utilizadas para redes de Petri Coloridas e Temporizadas, tais como:

- Propriedade de limitabilidade: somente necessitamos trocar  $[Mo>$  por  $[So>$
- Propriedade de Reversibilidade: nos trocamos a marcação  $Mo$  e  $M'$  pelos estados  $So$  e  $S$ .

Uma marcação não temporizada  $M \in S_U$  é uma marcação reversível se e somente se:

$$\forall S' \in [So>: M \in [S'>_U \quad (3.18)$$

Um conjunto de marcações não temporizadas  $X \subseteq S_U$  é uma marcação reversível se e somente se:

$$\forall S' \in [So>: X \cap [S'>_U \neq \emptyset. \quad (3.19)$$

- Para propriedade de vivacidade, necessitamos apenas substituir a marcação  $M$ ,  $M'$  e  $M''$  pelos estados  $S$ ,  $S'$  and  $S''$ .

Pelo que apresentamos acima podemos verificar que uma rede de Petri temporizada pode ser transformada numa rede de Petri não temporizada pelo simples descarte das informações de tempo das expressões dos arcos e expressões de inicialização.

Por definição: Cada rede de Petri colorida temporizada  $TCPN=(CPN,R,ro)$  determina uma rede de Petri colorida não temporizada, que obtemos de uma CPN pela substituição de cada expressão de arco temporizada  $E(a)$  e cada expressão de inicialização  $I(p)$  por  $E(a)_U$  e  $I(p)_U$  respectivamente.

Cada seqüência de ocorrência finita de TCPN:

$$S1[Y1,r2> S2[Y2,r3> S3[Y,r3> .....Sn[Yn,rn+1> Sn+1, \quad (3.20)$$

determina uma seqüência de ocorrência finita de uma UCPN definida por:

$$(S1)_U[Y1> (S2)_U[Y2> (S3)_U[Y3> .....(Sn)_U[Yn1> (Sn+1)_U, \quad (3.21)$$

O resultado mostrado acima é consequência direta das regras de ocorrência e habilitação das redes de Petri colorida quer seja temporizadas ou não.

Freqüentemente nota-se que uma UCPN possui uma seqüência de ocorrência que não pode ser determinada de uma seqüência de ocorrência de TCPN. Isto é devido ao fato que as restrições de tempo em uma TCPN que limitam estas possibilidades nas expressões de guarda e arcos de entrada.

### 3.4. Análise geral de rede de Petri colorida e temporizada

#### a) Simulação

A simulação de uma rede de Petri colorida e temporizada é efetuada da mesma maneira como para as redes não temporizadas, exceto que o simulador agora usa as regras de habilitação e de ocorrência de uma rede temporizada.

O caminho para o uso de um simulador passa pela construção de uma aplicação capaz de interpretar o modelo da rede ampliando adequadamente as regras de habilitação e geração das novas marcações, bem como incorpora características para analisar propriedades dinâmicas. Como o objetivo principal do simulador é a medida de desempenho do sistema modelado, é necessário ter facilidades que tornem fácil a

medida de fluxo de marcas através de um dado lugar, por ex., número médio de marcas e tempo médio de espera.

Devido ao fato de uma TCPN ter uma regra de habilitação não-local, gera um problema de maior complexidade para a simulação de redes grande, pois os cálculos das habilitações crescem com o número de transições instanciadas, ao invés de ser independente do tamanho do modelo. Um caminho para ultrapassar esta complexidade deve ser trocar o único relógio global por um conjunto de relógios locais. Tal atitude poderia também ter interessantes implicações teóricas. Entretanto, tais implicações teóricas não fazem parte dos objetivos deste trabalho, podendo ser analisados em outros trabalhos.

#### **b) Gráfico de Ocorrência**

O gráfico de ocorrência de uma rede de Petri colorida e temporizada é definido da mesma maneira que para as redes de Petri não temporizadas, exceto que os nós agora representam estados ao invés de marcações, isto significa que cada nó possui um valor de tempo e uma marcação temporizada.

Para uma rede de Petri não cíclica, um gráfico de ocorrência temporizado freqüentemente será muito menor que o gráfico de ocorrência de uma rede não temporizada correspondente, devido a restrição de tempo que limitam as possibilidades dos elementos de ligação ocorrerem. No entanto, se nos usamos atrasos de tempo não determinístico, com grande número de possíveis valores de tempo, nos podemos obter um grande gráfico de ocorrência.

Para um sistema cíclico, um gráfico de ocorrência temporizado usualmente torna-se infinito, porque cada aparência repetida de uma marcação corresponde a um novo estado e portanto implica na criação de um novo nó. Para gráficos de ocorrência com equivalência de classe, nos podemos usar a relação de equivalência para evitar esta explosão no número de nó. Por outro lado, pode torna-se necessário a construção de um gráfico parcial, por ex., o sub-gráfico que contenha todos aqueles estados os quais são criados antes de um certo momento de tempo. Tais sub-gráficos, embora parcial, pode

ser muito útil para determinar propriedades dinâmicas e as características de desempenho do sistema modelado.

### c) Invariantes

Infelizmente, não é fácil modificar o método invariante tal que ele torne-se aplicável a provar propriedades sobre o selo de tempo anexado a marca numa rede de Petri colorida e temporizada. O principal problema está no fato que o conjunto de marcas removidas não são totalmente determinada pelo elemento de ligação, pois somente necessitamos que o selo de tempo seja pequeno o bastante, ao invés de necessitarmos que tenham um valor exato. Isto significa que a linearidade das funções de peso (entre multi-conjuntos temporizados) é insuficiente para garantir que cada fluxo determine um invariante.

É possível usar de invariantes para analisar uma UCNP determinada a partir uma TCPN. Nesta linha é possível provar propriedades dinâmicas que são independentes da restrição de tempo.

### d) Considerações Gerais

Um considerável número de diferentes extensões tem sido definido para as redes de Petri, e muitas dessas tem sido generalizadas tal que elas podem ser usadas também para redes de Petri colorida. Muitas das extensões de tempo usam o relógio global que pode ser contínuo ou discreto. No entanto, a concepção do tempo é descrita de muitas maneiras diferentes. Algumas extensões forçam o atraso entre a habilitação e a ocorrência de uma transição. Outras, tem o atraso gerado entre a remoção da marca de entrada e a criação da marca de saída, ou o atraso entre a criação da marca e o momento em que a marca pode se usada. O último método é muito próximo ao aqui definido, porque o selo de tempo usualmente cria novas marcas indisponíveis por algum período de tempo. A idéia de usar selo de tempo é compartilhada pelo grupo envolvido com o *ExSpect tool* desenvolvido pela *Eindhoven University of Technology*.



Tem sido mostrado que muitas das extensões mencionadas acima tem o mesmo poder de modelagem, no sentido de que é relativamente fácil transladar um modelo de rede Petri usando uma das extensões em outro modelo que usa um outro tipo de extensão. Nós escolhemos o selo de tempo anexado individualmente as marcas, porque é uma maneira direta e natural, em particular para redes de alto nível, onde cada marca já carrega um conjunto de informações referenciadas pela cor da marca. Como já mostrado, a definição formal da TCPN e seu comportamento torna-se diretamente modificáveis da correspondentes definições para UCPN. Entretanto, nos obtemos uma simples relação entre o comportamento de uma TCNP e o comportamento da Correspondente UCPN, como já descrito anteriormente.

É também importante considerar os vários tipos de atrasos que as diferentes extensões permitem. Alguns extensões somente permitem atrasos constantes. Outras permitem atrasos randômicos dentro de intervalos, ou atrasos os quais são determinados por distribuição de probabilidade, p. ex., função exponencial negativa.

Para certos tipos de atrasos, é possível transladar uma TCPN em uma cadeia de Markov ( que é um bem conhecido tipo de modelo estatístico) . A cadeia de Markov determina um sistema de equações, por meio do qual nos encontramos soluções analíticas para diferentes medidas de performance. As soluções são encontradas diretamente de um sistema de equação e assim eles são gerais (enquanto os resultados encontrados via simulação sempre depende, no mínimo de alguma extensão, sobre a escolha da seqüência de ocorrência). Para alguns tipos de CPN é rápido (em termos de tempo CPU), obter soluções analíticas, comparada com o total de tempo necessário na simulação. Entretanto, muitos CPN são tão complexas de se analisar via cadeia de Markov ( devido ao fato do sistema de equações vir a possuir um grande número de variáveis desconhecidas e assim tornando-se bastante complexa a obtenção de uma solução).

As redes de Petri são adequadas a estruturação de um processo decisório, porém, elas possuem restrições quando tratamos com heurísticas necessárias num processo de decisão, uma vez que estas decisões atendem, em geral, a objetivos conflitantes, que devem ser tratados adequadamente por ferramentas apropriadas para

este fim, que na ferramenta de apoio a decisão, aqui proposta, é executado pela Teoria dos Conjuntos Difusos.

### 3.5. Exemplo Redes de Petri Colorida e Temporizada

Como ilustração de do uso das redes de Petri Coloridas e Temporizadas tomamos como exemplo o processo de programação de pedidos de produção gerados por uma demanda. Estamos supondo que é um caso de produção por encomenda e que os pedidos são atendidos na ordem em que chegam. Estamos supondo também que um árbitro aplicado a rede definirá a seqüência de atendimento.

Apresentamos a figura 3, uma ilustração da chegada de pedidos de produção e a requisição de recursos para a execução destes pedidos.

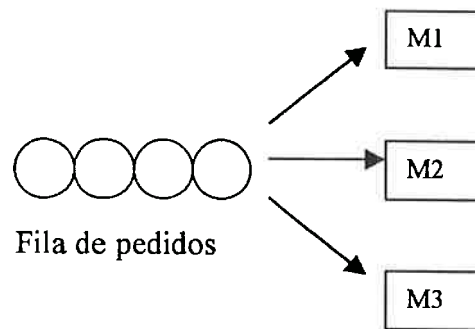


Figura 3 : Alocação de recursos por pedido de produção

A ordem de fabricação considera neste exemplo apenas a matéria prima, que será chamada de material, e o recurso, que será chamado de máquinas, onde o pedido será processado. Cada máquina, M1, M2 e M3 pode executar diversas operações e estas operações estão relacionados com o material necessário ao atendimento ao pedido de fabricação tal que a escolha da máquina é função da ordem de fabricação e do material requisitado.

O pedido gera a ordem de fabricação que dispara a requisição de material e, em função da operação e do material, escolhe o recurso de produção. Portanto, as operações podem ser executadas por mais de uma máquina em um conjunto de máquina disponíveis, por exemplo:

- A máquina M1 pode executar as operações tipo 1 e tipo 2;
- A máquina M2 pode executar as operações tipo 2 e tipo 3 ;
- A máquina M3 pode executar as operações tipo 3 e tipo 4.

Da mesma maneira as máquinas podem trabalhar com materiais específicos em certas operações, tais como:

- As máquinas M1 e M2 trabalham com materiais referência 1 e referência 2;
- A máquina M3 trabalha somente com material referência 1.

A rede de Petri Colorida e Temporizada modelando o processo acima descrito é mostrada na figura 4:

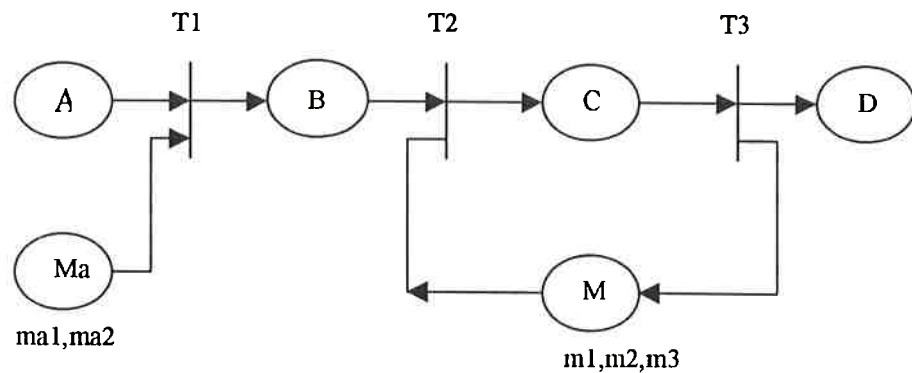


Figura 4 : Rede de Petri Colorida Modelando um processo produtivo

Os elementos que compõe a rede são:

- A = Fila de Pedidos
- B = Pedido com material selecionado
- C = Pedido sendo processado com máquina escolhida
- D = Pedido pronto
- M = Máquinas

Ma = Material

O tempo de processamento do pedido é função do material utilizado e da máquina alocada na operação. Os tempos apresentados na tabela 1 são utilizados apenas para configurar o exemplo dado.

Material 1					Material 2		
	M1	M2	M3			M1	M2
Op. 1	2				Op. 1	4	
Op.2	3	4			Op.2	4	5
Op.3		5	4		Op.3		5
Op.4			2		Op.4		

Tabela 1 : Tempos de máquina associada a operação e material utilizada

Simulando para 2 pedidos o processo modelado pela rede apresentada na figura 4 , temos:

No início T1 está habilitada para as marcas P1 e P2, entretanto pela heurística de FIFO, primeiramente o elemento de ligação (P1,T2) irá ocorrer, retirando a marca P1 do lugar A e ma1 pela função do arco A1 do lugar Ma, conforme figura 5. Tendo ocorrido a transição T1, agora tanto T1 quanto T2 podem ocorrer, com (P2,T1) e (P1,T2). O resultado da ocorrência de (P1,T1) e (P2,T1) é apresentado na figura 6.

O pedido de produção é representado pela marca definida por  $(P_i; m_j; o_k; m_z, t_0)@[0]$  onde:

- $P_i$  = Número da ordem;
- $m_j$  = Material para a ordem  $P_i$ ;
- $o_k$  = Operação a ser executada na ordem  $P_i$ ;
- $m_z$  = Máquina a ser utilizada na ordem  $P_i$ ;
- $t_0$  = Tempo global do início da operação;
- $@[0]$  = Registro do tempo de operação.

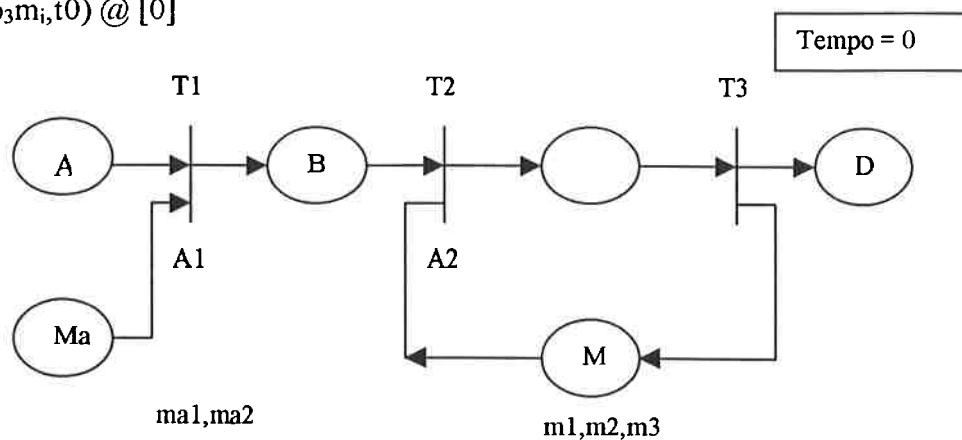
$(P_1 ma_1 o_3 m_i, t_0) @ [0]$ 
 $(P_2 ma_2 o_3 m_i, t_0) @ [0]$ 


Figura 5: Rede TCP da modelagem de um processo de manufatura – Ocorrência de  $(P_1, T_2)(P_2, T_1)$

Na figura 6 temos  $T_2$  habilitada para  $P_1$  e  $T_2$  habilitada para  $P_2$ . A heurística em uso é FIFO. O pedido  $P_1$  utiliza o material referência 1 e requisita uma operação do tipo 3, portanto pelo arco  $A_2$ , atendem este requisito as máquinas  $m_2$  e  $m_3$ . Como não há heurística de escolha, a requisição é da máquina  $m_2$ . O resultado do disparo de  $T_2$  é mostrado na figura 7.

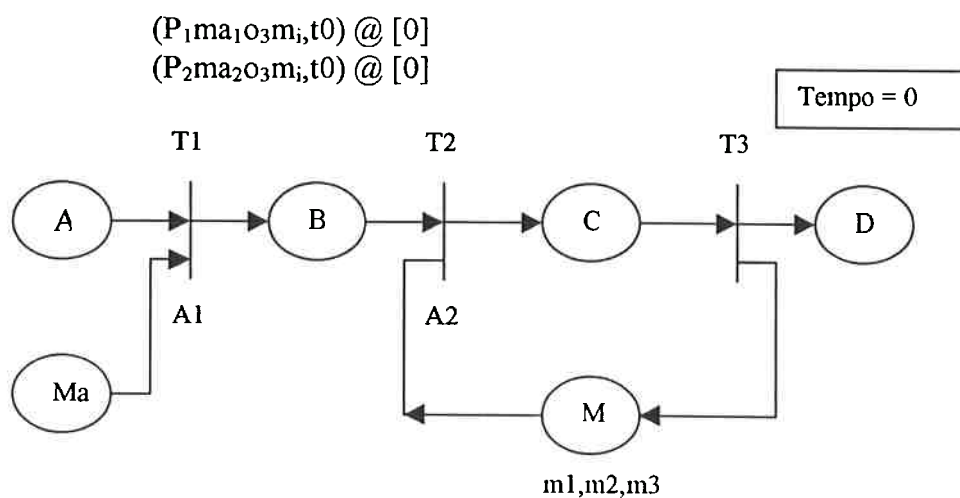


Figura 6: Rede TCP da modelagem de um processo de manufatura – ocorrência de  $(P_2, T_2)$

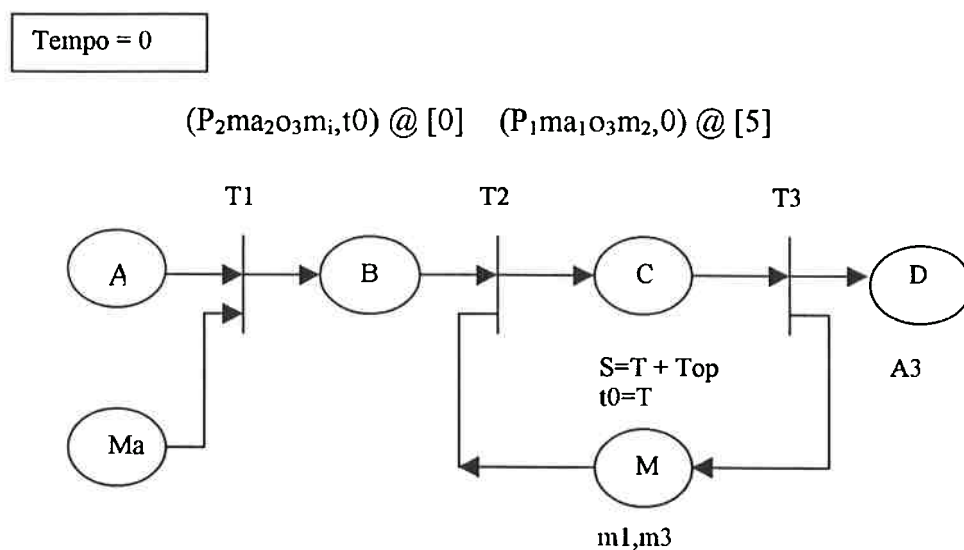


Figura 7: Rede TCP da modelagem de um processo de manufatura – Ocorrência de  $(T_2,P_1)$

Tendo ocorrido o disparo de  $T_2$  para  $P_1$ , nenhuma outra transição estará habilitada para o modelo de tempo  $Tempo=0$ , tendo em vista que pedido  $P_2$  utiliza o material referência 2 e requisita uma operação do tipo 3, portanto pelo arco  $A_2$ , atendem este requisito apenas a máquina  $m_2$ . Não havendo mais transição a disparar, o modelo de tempo avança para o próximo possível disparo, ou seja,  $Tempo=5$ . Neste caso,  $T_3$  fica habilitado com relação a  $P_1$ . O disparo de  $T_3$  retira a marca do lugar C e colocada a marca em D, devolvendo a máquina  $m_2$  ao lugar M, através da função  $A_3$ , conforme figura 8.

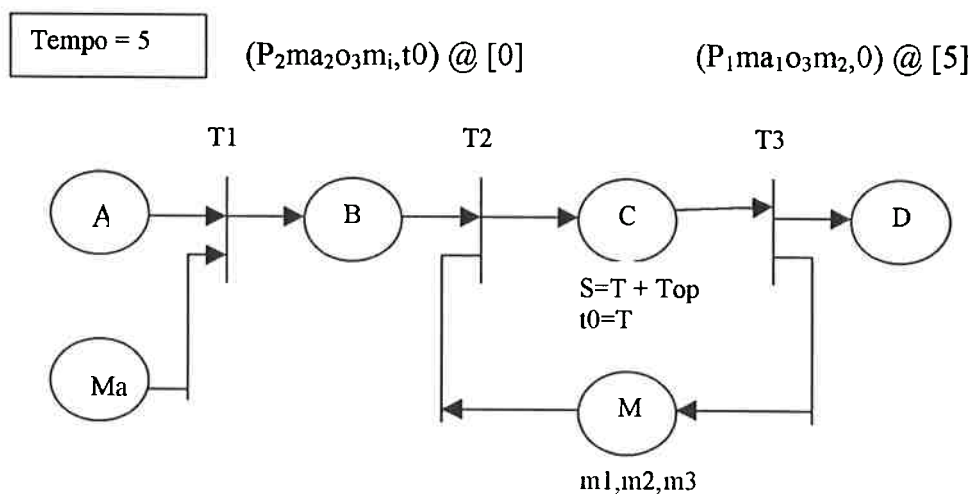


Figura 8: Rede TCP da modelagem de um processo de manufatura – Ocorrência de  $(T_3,P_1)$

Tendo ocorrido o disparo de T3 para P1 e o retorno da marca m3 ao lugar M, a transição T2 fica habilitada para P2, podendo ocorrer o disparo de T2 para o modelo de tempo  $\text{Tempo}=4$ , conforme figura 9. O tempo de operação neste caso será o fornecido pela tabela 1 para material referencia 2, operação 3 e máquina 2, ou seja, tempo de operação  $\text{Top}=5$ .

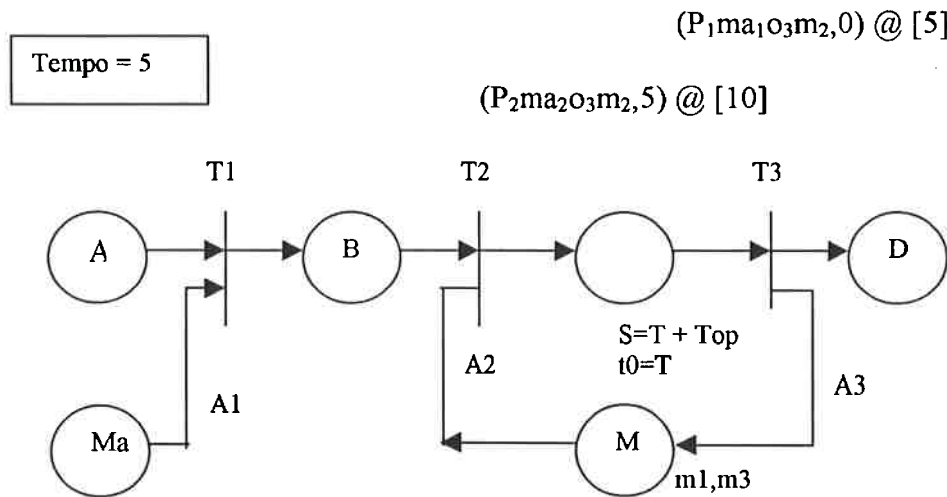


Figura 9: Rede TCP da modelagem de um processo de manufatura – Ocorrência de (T2,P2)

No  $\text{Tempo}=5$ , nenhuma outra transição está habilitada. Neste caso, o modelo de tempo avança até ao próximo modelo de tempo em que alguma transição fique habilitada. Assim, o novo modelo de tempo será  $\text{Tempo}=10$ , tornando a transição T3 habilitada com relação a P2. A ocorrência de T3 tira a marca do lugar C e coloca a marca em D, devolvendo a marca m3 ao lugar M, terminando assim o processo, conforme figura 10. O resultado é mostrado no gráfico da figura 11.



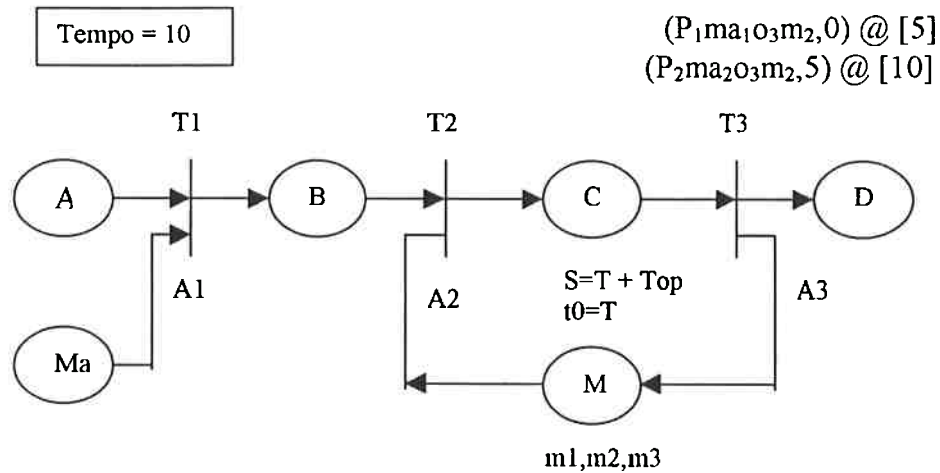


Figura 10: Rede TCP da modelagem de um processo de manufatura – Ocorrência de (T3,P2)

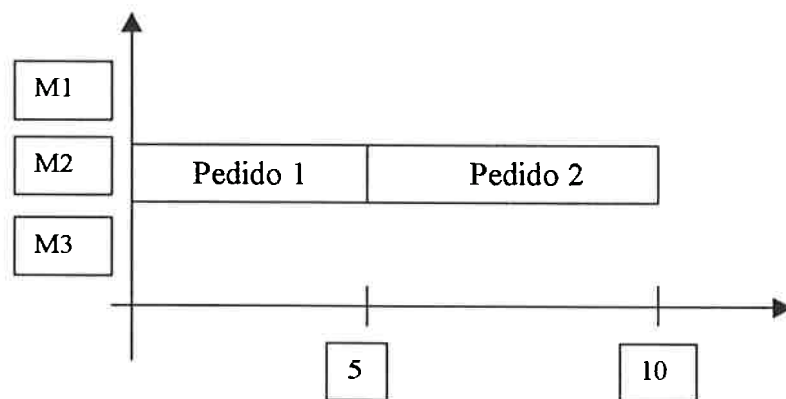


Figura 11: Resultado da Simulação

Analisando o resultado, pode-se verificar que existem outras soluções que atenderiam melhor aos dois pedidos que a solução obtida. Esta solução seria melhor se houvesse uma heurística mesmo que simples na escolha da máquina para a execução da operação 3, uma vez que o pedido 1 pode ser feito tanto pela máquina 2 quanto pela máquina 3. Neste caso, a escolha foi arbitrária, portanto, uma heurística seria necessário para obtenção de uma boa solução. Entretanto, heurísticas complexas não são adequadamente modeladas por redes de Petri. É o que será mostrados nos capítulos seguintes deste trabalho.

## 4. Teoria de Conjuntos Difusos

### 4.1 Introdução

A todo momento o ser humano está tomando decisões. Normalmente construí-se modelos matemáticos que se aproximam da realidade para auxiliar na tomada de decisão, aos quais é válido somente para o modelo desenvolvido. Na tentativa de precisar melhor os modelos e com isto melhorar o nível de certezas na tomada da decisão, busca-se utilizar ferramentas com potencial de modelagem que incorporem as incertezas envolvidas num processo modelado, como por exemplo: a teoria de conjuntos difusos. Os conjuntos difusos constituem-se numa teoria que representa as expressões próprias da linguagem natural e suas imprecisões, isto é, pode-se realizar operações com palavras facilmente.

Um conjunto difuso pode ser definido como aquele em que não há uma diferenciação clara entre o fato de seus elementos pertencerem ou não a ele. Zadeh em 1965, mais tarde discutidos nos trabalhos de KANDEL (1986); KICKERT (1978) e KLIR et FOLGER, descreveu esse tipo de conjunto como:

- Seja  $x$  um elemento qualquer de um conjunto  $X$ . Um conjunto difuso  $A$ , contido em  $X$ , é um conjunto de pares ordenados

$$A = \{(x, \mu_A(x))\}, x \in X, \quad (4.1)$$

onde o valor  $\mu_A(x)$ , chamado *grau de pertinência*, associa a cada elemento em  $X$  um número real contido no intervalo  $[0,1]$ , de modo que, se  $\mu_A(x) = 1$ ,  $x$  pertence decididamente ao conjunto  $A$ , e se  $\mu_A(x) = 0$ ,  $x$ , com certeza não pertence a ele. Valores intermediários de  $\mu_A(x)$  indicam a medida de possibilidade de  $x$  estar contido em  $A$ . Em geral o grau de pertinência pode se representado por valores discretos ou funções de pertinência.

O grau de pertinência depende da opinião de quem observa o conjunto em questão, considere um indivíduo que esteja com uma dor intensa e toma uma dose média de analgésico. Não melhorando, liga para um médico que lhe recomenda outro medicamento e diz: “se a dor continuar intensa aumente a dose de remédio ,e se a dor melhorar, diminua a dose do remédio”. A intensidade da dor é algo subjetivo e portanto, o conselho do médico é difuso. Uma modelagem do conselho do médico pode ser feita, utilizando-se os conjuntos difusos.

$$\begin{aligned} \text{Sejam } X_1 &= \text{dor} & (4.2) \\ X_2 &= \text{remédio contra a dor} \end{aligned}$$

A palavra dor pode assumir “valores” como, por exemplo: muito intensa, menos intensa e pouco intensa.

Numa escala de números naturais de 0 a 10 podemos dizer:

0 a 3 são números baixos,  
4 a 7 são números médios, e  
8 a 10 são números grandes.

Assumindo-se um conjunto no intervalo  $[0,1]$  de números reais:

0 representa não pertence,  
1 representa pertence totalmente, e  
0.7 representa pertence mais do que menos.  
0.3 representa pertence pouco.

Estes valores definem o grau de pertinência e depende da sensibilidade de cada pessoa ao classificar sua sensação a dor, definindo as informação contidas nas tabelas abaixo.

Logo, podemos resumir essas informações em tabelas, como se segue:

Dor	0	2	4	6	8	10
Dor intensa	0	0	0.3	0.7	1	1

Dor	0	2	4	6	8	10
Menos intensa	0	0.3	1	1	0.3	0

Dor	0	2	4	6	8	10
Pouco intensa	1	1	0.7	0.3	0	0

Tabelas 2: Valores para a dor – Conjunto Difuso

Outro exemplo, é mostrado na figura 12, onde alguém pode definir os seguintes graus de pertinência associados ao conjunto P, de pontos à direita do ponto A:  $\mu_P(B) = 0.8$ ;  $\mu_P(C) = 0.8$ ;  $\mu_P(D) = 0.6$ ;  $\mu_P(E) = 0,6$ ;  $\mu_P(F) = 0,6$ .

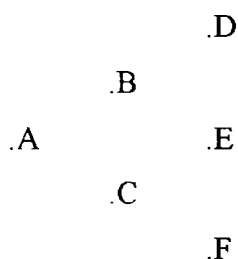


Figura 12 : Pontos considerados a direita do ponto A – Conjunto Difuso

Deve-se notar que um conjunto A contendo elementos cujos graus de pertinência possuem apenas valores 0 ou 1 tornam-se um conjunto não difuso. Na verdade, a teoria dos conjuntos difusos é uma generalização da teoria dos conjuntos.

A imperfeição da informação basicamente apresenta dois principais aspectos: imprecisão e incerteza. A incerteza tem sido tratada pela conhecida teoria de probabilidades (aspectos sistemáticos da informação), enquanto a imprecisão vem sendo tratada pela teoria dos conjuntos difusos (aspectos vagos da informação). Estas duas

características são intrinsecamente ligadas e opostas entre si: quanto mais se aumenta a incerteza mais se diminui a imprecisão, KLIR et FOLGER (1988); COX (1994).

A teoria dos conjuntos difusos e a teoria de possibilidades são intimamente ligadas. Por exemplo, o conjunto difuso que modela a informação “jovem” pode ser usada para modelar a distribuição de possibilidade da idade de uma pessoa, da qual só sabemos que ela é jovem. O fato destas teorias serem ligadas é muito importante no sentido de que é possível tratar-se tanto a imprecisão quanto a incerteza de um conjunto de informações em um único ambiente formal.

Estas teorias têm sido cada vez mais usadas em sistemas que utilizam informações fornecidas por seres humanos para automatizar processos, como por exemplo, no controle de processos, no auxílio a decisão, etc. As aplicações vão do controle de eletrodoméstico ao controle de satélites, do mercado financeiro à medicina, e tendem a crescer cada vez mais, sobretudo em sistemas híbridos, que incorporam abordagem conexionistas e evolutivas, no que é chamado hoje, de “soft computing”, COX(1994).

A teoria de conjuntos difusos, quando utilizada em contexto lógico, como o de sistema baseado em conhecimento, é conhecida com lógica difusa.

## 4.2 Definições básicas

### a) Grau de pertinência:

Dado um universo de discurso  $U$ , um conjunto difuso  $A$  de  $U$  é definido por uma função de pertinência  $\mu_A: U \rightarrow [0,1]$ , que associa a cada elemento  $x$  de  $U$  o grau  $\mu_A(x)$ , com o qual  $x$  pertence a  $A$  [7].  $\mu_A(x)$  indica o grau de compatibilidade entre  $x$  e o conceito expresso por  $A$ :

$$\mu_A(x) = 1, x \text{ é completamente compatível com } A$$

$$\mu_A(x) = 0, x \text{ é completamente incompatível com } A \quad (4.2)$$

$0 < \mu_A(x) < 1$ ,  $x$  é parcialmente compatível com  $A$  com grau  $\mu_A(x)$ :

Para exemplificar, ao se observar um objeto, pode-se decidir o que é “grande”, “pequeno”, “médio”, e atribuir graus de pertinência do objeto.

- “grande” pode se uma pertinência 0.7.
- “pequeno” pode ser uma pertinência 0.2.

Se existem várias entidades em situações semelhantes, os conjuntos “grande” e “pequeno” não têm fronteira bem definida ou seja, têm fronteira difusa, pois existem vários elementos que pertencem aos dois conjuntos, com graus de pertinência diferentes.

Um conjunto finito difuso  $A$  em  $U$  é representado como:

$$A = \sum_{i=1,n} \mu_A(x_i)/x_i \quad (4.3)$$

Ou seja,

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n \quad (4.4)$$

onde, o símbolo  $\mu_A(x_i)/x_i$  indica que o elemento  $x_i$  possui grau de pertinência  $\mu_A(x_i)$  em relação ao conjunto  $U$ , KLIR et FOLGER (1988).

O complemento, a interseção, a união, a igualdade, a contenção e outras, que são facilmente encontradas na literatura de conjuntos difusos, são implementados por famílias de operações. Assim, dados os conjuntos difusos  $A$  e  $B$  em  $U$ , o complemento  $A^c$ , a interseção  $A \cap B$  e a união  $A \cup B$ , são usualmente caracterizados, respectivamente, por:

$$\begin{aligned} \mu_{A^c}(x) &= 1 - \mu_A(x) \\ \mu_{A \cap B}(x) &= \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \\ \mu_{A \cup B}(x) &= \max(\mu_A(x), \mu_B(x)), \end{aligned} \quad (4.5)$$

As funções de pertinência ficam definidas após a consulta de pessoas especialistas no assunto, bastando 15 a 20 pessoas (comprovado por Zadeh). A formulação do questionário pode ser simplesmente respostas tipo “sim” ou “não”, como por exemplo;

Considere o conjunto dos números naturais 3,4,5,...,9 a variável básica do conjunto difuso “GRANDE”. Pergunta-se a cada um dos 20 entrevistados: 3 é grande? 4 é grande?...9 é grande? E os entrevistados respondem “SIM” ou “NÃO”. Suponha o seguinte resultado, Tabela 3:

Respostas	3	4	5	6	7	8	9
SIM	0	0	3	6	7	13	20
NÃO	20	20	17	14	12	7	0
$\mu$	0	0	0.15	0.30	0.4	0.65	1

Tabela 3: Síntese dos resultados de pesquisa para números naturais

Os valores de pertinência são calculados considerando o número de respostas “SIM” para cada variável e o número total de entrevistados.

$$\text{GRANDE} = 0|3 + 0|4 + 0.15|5 + 0.30|6 + 0.40|7 + 0.65|8 + 1|9$$

Outras operações em conjuntos difusos;

#### b) Produto

Se  $\alpha$  é um número real maior ou igual a 0 tal que

$$\alpha \text{ Sup}_X \mu_A(x) \leq 1 \quad (4.6)$$

então,

$\alpha A = \sum_i \alpha \mu_A(x^i) / x^i$ , para o caso de A ser um conjunto discreto, e substituindo a somatória pela integral para o caso de conjuntos contínuos.

### c) Produto Cartesiano

Se  $A^1, A^2, \dots, A^n$  são subconjuntos difusos de  $X^1, X^2, \dots, X^n$ , respectivamente, o produto cartesiano de  $A^1, A^2, \dots, A^n$  é representado por  $A^1 \times A^2 \times \dots \times A^n$  e definido como um subconjunto de  $X^1 \times X^2 \times \dots \times X^n$  cuja função de pertinência é expresso por:

$$\mu_{(A^1 \times A^2 \times \dots \times A^n)}(x^1, x^2, \dots, x^n) = \mu_{A^1}(x^1) \wedge \mu_{A^2}(x^2) \wedge \dots \wedge \mu_{A^n}(x^n). \quad (4.7)$$

### d) Implicação

Denomina-se implicação o conceito “se A então B senão C”, indicado por  $A \Rightarrow B$  e definido como  $(A \times B) \cup (A^C \times C)$ , isto é a união entre o produto cartesiano de A e B e o produto cartesiano de  $A^C$  e C, onde A é um subconjunto difuso de U e B é um subconjunto difuso de V.

Em termos gerais, se  $A^1, A^2, \dots, A^n$  são subconjuntos difusos cuja união é U e  $B^1, B^2, \dots, B^n$  são subconjunto difusos cuja união é V, podemos dizer que a expressão,

“se  $A^1$  então  $B^1$  senão se  $A^2$  então  $B^2$  ..... senão se  $A^n$  então  $B^n$ ”

é definida por,

$$(A^1 \times B^1) \cup (A^2 \times B^2) \cup \dots \cup (A^n \times B^n). \quad (4.8)$$



### e) Relação Difusa

Uma relação difusa  $R$  de um conjunto  $X^1$  para um conjunto  $X^2$  é um subconjunto difuso do produto cartesiano  $X^1 \times X^2$ . A relação  $R$  é caracterizada por uma função de pertinência e é expressa por

$$R = \text{integral}_{X^1 \times X^2} \mu_R(x^1, x^2, \dots, x^n) / (x^1, x^2, \dots, x^n), \quad x^i \in X^i, 1 \leq i \leq n \quad (4.9)$$

Quando os universos de discurso forem discretos, a relação  $R$  poderá ser descrita através da notação para conjuntos difusos discretos ou através de matriz, quando tivermos somente 2 universos de discurso discretos.

### f) Indução

Se  $R$  é uma relação difusa de  $X^1$  para  $X^2$  e  $A^1$  é um subconjunto difuso de  $X^1$ , então o subconjunto difuso  $A^2$  de  $X^2$ , induzido por  $A^1$ , é dado pela regra de inferência

$$A^2 = A^1 \circ R = \text{integral}_{X^1 \times X^2} \text{Sup}[\mu_{A^1}(x^1) \wedge \mu_R(x^1, x^2)] / (x^1, x^2), \quad x^1 \in X^1, x^2 \in X^2 \quad (4.10)$$

Se os domínios das variáveis  $x_1$  e  $x_2$  são conjuntos finitos, então a matriz de relações para  $A^1 \circ R$  é o produto max-min, segundo ZADEH, entre  $A^1 \circ R$ , entendendo-se que esta operação é equivalente ao produto aritmético entre matrizes, substituindo-se as operações de adição e multiplicação pelas de máximo e mínimo, respectivamente.

## 4.3 Aplicações

Entre as várias classes de problemas utilizando conjuntos difusos, amplamente apresentado na literatura, a classe que nos interessa para os objetivos propostos neste trabalho, é aquele que envolve os processos de decisão difusa com múltiplos objetivos que será apresentado a seguir.

### 4.3. Processo de Decisão Difuso com Múltiplos Objetivos

BELLMAN et ZADEH (1970) sugeriram um modelo de decisão difusa que deve satisfazer certas restrições  $C$  e objetivos  $G$ . Neste caso, ambos restrições e objetivos são tratados como conjuntos difusos caracterizados por funções de pertinência, tais como:

$$\begin{aligned} \mu_C: X \rightarrow [0,1] \quad e \\ \mu_G: X \rightarrow [0,1] \end{aligned} \quad (4.11)$$

onde  $X$  é o conjunto o conjunto universal de ações alternativas.

Esta classe de problemas refere-se a situações em que a quantidade de alternativas que o decisor possui foi definida previamente. Neste caso, o decisor deve avaliar, classificar e selecionar um número limitado de alternativas, tendo em vista um conjunto de objetivos e restrições, muitas vezes mal definidos ou vagos.

Um processo de decisão difuso com múltiplos objetivos e restrições pode ser representado através da matriz tipo:

	$G_1$	....	$G_n$	$C_1$	....	$C_s$
$A_1$	$\mu_{G_1}(A_1)$	....	$\mu_{G_n}(A_1)$	$\mu_{C_1}(A_1)$	....	$\mu_{C_s}(A_1)$
.		....			....	
$A_m$	$\mu_{G_1}(A_m)$	....	$\mu_{G_n}(A_m)$	$\mu_{C_1}(A_m)$	....	$\mu_{C_s}(A_m)$

Onde,

$A_i, i=1,..m$ , são as possíveis alternativas ou ações,

$G_j, j=1,..n$ , são as objetivos através dos quais as alternativas são avaliadas,

$C_k, k=1,..s$ , são as restrições através dos quais as alternativas são avaliadas,

$\mu_{G_j}(A_i)$  é o grau de pertinência da alternativa  $A_i$  em um dado objetivo  $G_j$ ,

$\mu_{C_k}(A_i)$  é o grau de pertinência da alternativa  $A_i$  em uma dada restrição  $C_k$ .

A decisão difusa  $D$  pode então ser definida como a escolha que satisfaz ambos objetivos  $G$  e restrições  $C$ . Interpretando isto como uma lógica “and”, pode-se modelar esta decisão como a interseção dos conjuntos difusos  $G$  e  $C$

$$D = G \cap C \quad (4.12)$$

o qual pode ser estendido para qualquer número de objetivos e restrições. Então a decisão difusa fica especificada por:

$$\mu_D(A_i) = \min [\mu_G(A_i), \mu_C(A_i)] \quad (4.14)$$

A seleção neste caso é feita através da classificação da alternativa levando em conta um índice que agrega a importância de todos os objetivos e restrições conjuntamente, em geral obtida por:

$$\lambda(A_i) = \max_{Ai} \{ \min [p_j \mu_{G_j}(A_i), q_k \mu_{C_k}(A_i)] \}, \quad i=1..m, j=1..n \text{ e } k=1..s. \quad (4.15)$$

onde,

(4.16)

$$\min [p_j \mu_{G_j}(A_i), q_k \mu_{C_k}(A_i)] = [p_1 \mu_{G_1}(A_i) \wedge \dots \wedge p_n \mu_{G_n}(A_i) \wedge q_1 \mu_{C_1}(A_i) \wedge \dots \wedge q_s \mu_{C_s}(A_i)]$$

onde,

$\lambda(A_i)$  é o grau de satisfação de atendimento da alternativa  $R_i$  na presença dos objetivos considerados e,

$p_j, q_k$  são pesos fixados para cada objetivo difuso  $G_j$  e cada restrição difusa  $C_k$ , respectivamente, tal que:

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n + q_1 + q_2 + \dots + q_k = 1. \quad (4.17)$$

Uma vez que este método ignora informações a respeito de qualquer outra alternativa, pode não ser desejável em todas as situações. Métodos que calculam a média ou o centro de gravidade do conjunto difuso  $D$  podem, entretanto, ser utilizadas.

#### 4.4. Raciocínio Difuso

O conjunto de variáveis que devem ser analisadas pelo decisor em sua tomada de decisão pode ser facilmente mensurável ou não. As variáveis facilmente mensuráveis são representadas por funções de pertinência conhecidas. As variáveis de difícil mensuração são representadas por termos lingüísticos, tais como, baixo, médio, alto, forte, fraco, etc, e são fortemente dependentes do raciocínio, percepção, sentimentos e sensações para representar o conhecimento sobre um determinado processo. Neste caso, a definição dos graus de pertinência dependem da opinião de um determinado indivíduo sobre a situação analisada.

Para determinar se ou não um certo grau de causalidade entre diferentes modelos de problemas de estados e tomar decisões sobre um valor esperado para estes problemas de estados, devemos construir uma relação funcional entre estes estados. Diferentes de sistemas "Experts" onde as sentenças são executadas serialmente, o protocolo principal do raciocínio através da lógica difusa está no paradigma do processamento paralelo. Em sistemas de base de conhecimento, algoritmos e heurísticas são aplicadas para reduzir o número de regras examinadas, entretanto em sistemas difusos todas as regras são disparadas, embora algumas não provoquem qualquer efeito no resultado desejado.

A raiz do mecanismo de um modelo difuso é a proposição, que são sentenças que relacionam um modelo variável em uma ou mais regiões difusas. Uma série de associações difusas condicionais e não condicionais ou proposições é avaliada para graus de certeza e todas aquelas que tem algum grau de certeza contribuem para o estado final do conjunto de soluções variável. A ligação funcional de graus de certeza entre regiões difusas é conhecido como método de implicação. A ligação funcional entre regiões difusas e o valor esperado de um objetivo é chamado de defusificação

(“defuzzification”). Juntos implicação e defusificação constituem a espinha dorsal do raciocínio aproximado.

Um sistema de raciocínio converte cada solução variável em uma região difusa temporária, assim,

$$z_i \rightarrow Z_i, \quad (4.18)$$

onde  $z$  é uma solução variável (algumas vezes chamada de saída) e  $Z$  é a correspondente conjunto de solução difusa (“fuzzy”). Como cada proposição é avaliada, uma conseqüente região difusa é usada para atualizar a região difusa solução. Este processo de atualização é executada por uma função de transferência ( $g$ ) que implementa uma regra de implicação entre o conseqüente estado difuso e o estado difuso de saída, assim,

$$g(w_i) \rightarrow Z_i \quad (4.19)$$

Existem muitas funções de implicação, mas cada uma correlaciona no modelo difuso, o significado semântico da região difusa antecedente (se muitas) com a da conseqüente, para assim gerar uma solução compatível com o significado do estado difuso para cada variável de saída.

Para entender o raciocínio aproximado é necessário entender alguns conceitos fundamentais, tal como significado e uso de variáveis lingüísticas e a natureza das proposições difusas (sentenças de conhecimento), que podem ser obtidas em COX (1994).

Podemos explorar o raciocínio difuso através de um simples método chamado de raciocínio proporcional, que é uma técnica de implicação difusa básica. Assim, o raciocínio proporcional é aquele quando duas regiões difusas estão relacionadas através de uma simples função de implicação “proporcional”, ou seja:

$$\text{Se } x \text{ é } Y \text{ então } z \text{ é } W, \quad (4.20)$$

funcionalmente representado por:

$$z = f((x, Y), W). \quad (4.21)$$

Então, sob um restrito conjunto de circunstâncias, o sistema de raciocínio difuso pode desenvolver um valor esperado sem passar pela composição e decomposição. O valor esperado de saída é estimado diretamente de um correspondente nível de satisfação da região difusa antecessora. Esta forma de inferência difusa obedece um método de implicação chamado seleção proporcional. Para ilustrar este exemplo considere dois conjuntos difusos representados pela “Alto” e “pesado” para o universo de “altura” e “peso” de homens americanos, figura 13:

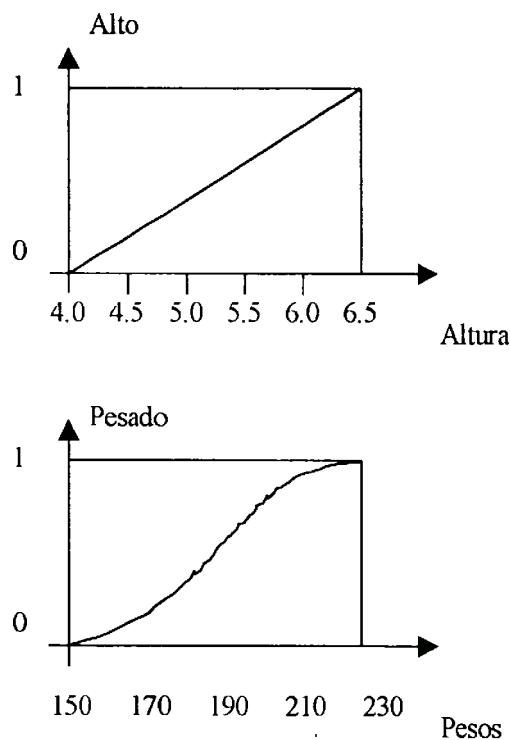


Figura13: Funções de pertinência para “Alto” e para “Pesado”

Estes conceitos difusos fornecem a base para o modelo de estimação de peso. O modelo está baseado na relação percebida entre a altura de um indivíduo e seu peso e é expressado por uma única regra.

*Se altura é alto então peso é pesado.*

A figura 14, ilustra o processo de implicação para este modelo. Quando a altura é 5'0"; a pertinência do conjunto difuso alto é [.42]. Este valor é usado para o conjunto difuso pesado para encontra o valor esperado de peso.

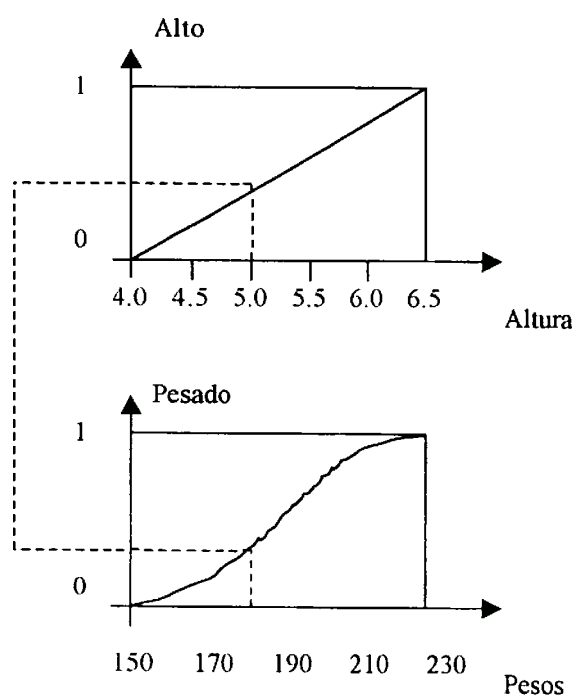


Figura 14: Funções de pertinência para “Alto” e para “Pesado” - Resultado

#### a) Composição difusa de regras de inferência

Diferente do raciocínio proporcional, o espaço de implicações gerado pela composição de regras de inferência é derivado de um espaço difuso agregado e correlacionado produzido pela interação de muitas sentenças. Assim, todas as proposições rodam em paralelo para criar um espaço de saída que contenha as

informações de todas as proposições. Há dois métodos principais de inferência em sistemas difusos: o método  $\min = \max$  e o método aditivo. Estes métodos diferem na maneira de atuarem a representação difusa da solução de saída.

### b) Método de decomposição e defusificação

Usando as regras gerais de inferência difusa, a evolução de uma proposição produz um conjunto difuso associado com cada modelo de solução variável. Como exemplo, as seguintes proposições, quando executada, correlacionará os conseqüentes conjuntos difusos  $A, B$ , e  $C$  para produzir o conjunto difuso representando a solução variável  $D$ .

Se  $w$  é  $Y$  então  $D$  é  $A$

Se  $x$  é  $X$  então  $D$  é  $B$

Se  $y$  é  $Z$  então  $D$  é  $C$ .

Para encontrar a solução para o correspondente escalar  $d$ , devemos encontrar o valor que melhor represente as informações contidas no conjunto difuso  $D$ . Este processo é chamado de defusificação, como apresentado na figura 15.

Este processo produz um valor esperado da variável para uma particular execução do modelo difuso. A defusificação é a fase final do raciocínio difuso. Em modelos difusos, há vários métodos de determinar o valor esperado da região difusa da solução. Estes métodos chamados de defusificação ou decomposição e descrevem os caminhos que podemos derivar um valor esperado para um certo espaço de solução difusa final. Um destes métodos é o centroide, centro de gravidade, que encontra o ponto de balanço da região difusa solução. Aritmeticamente, para uma certa região  $A$ , o valor esperado, é formulado como:

$$\mathfrak{R} \leftarrow \sum d_i \mu_A(d_i) / \sum \mu_A(d_i), \quad i = 0, \dots, n \quad (4.22)$$



onde  $d$  é a  $i$ ésimo valor do domínio e  $\mu(d)$  é o grau de pertinência para aquele ponto do domínio. Outras técnicas de defusão podem ser obtidas em COX (1994).

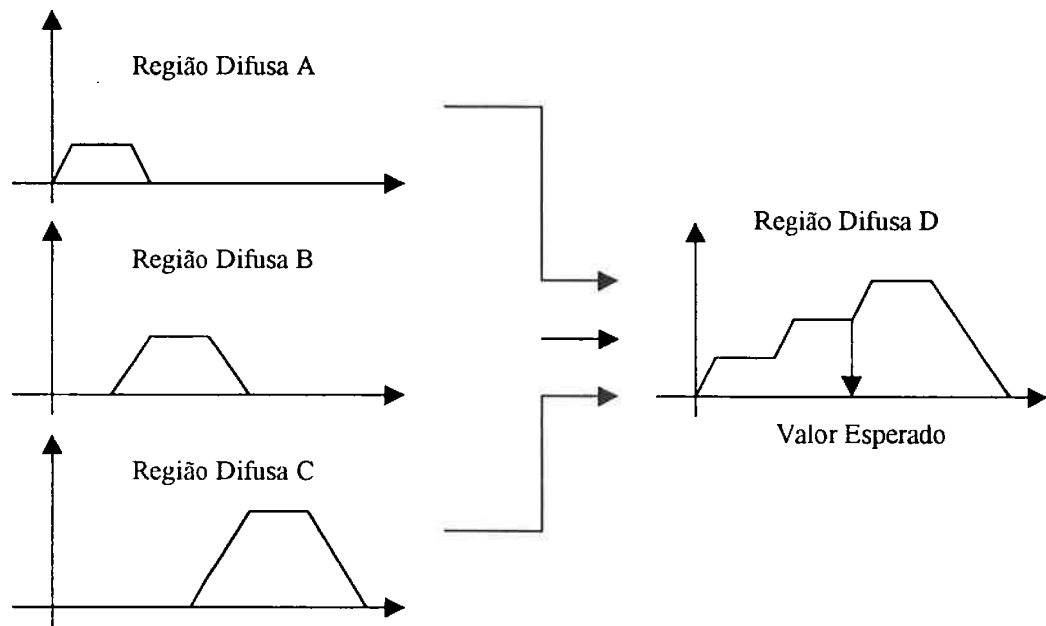


Figura15: Processo de agregação e defusão

Para a obtenção do valor esperado em modelos difusos com mais de uma entrada é necessário utilizar o algoritmo proposto por COX (1994).

## **5. Modelo Proposto**

### **5.1 Introdução**

Na busca de atender os requerimentos necessários ao processo de planejamento e programação da classe de problemas citadas nos objetivos deste trabalho, pesquisou-se entre as ferramentas de modelagem, aquelas que pudessem incorporar de uma maneira natural, clara e formal o processo estudado. Esta ferramenta surgiu com a junção de duas ferramentas formais: as redes de Petri Coloridas e Temporizadas e a teoria dos Conjuntos Difusos, onde cada uma delas trata parte do problema, naquela característica que lhe é mais peculiar. A soma destas potencialidades, fez surgir uma ferramenta para a modelagem dos processo de planejamento e programação dos processos produtivos, que é apresentada a seguir.

### **5.2 Modelagem do processo de decisão**

Na figura 16, é apresentado a estrutura do modelo proposto para uma ferramenta de apoio à decisão para uma classe de problemas envolvendo mudanças de estados com informações complexas e que necessitem fazer uso de alguma inteligência para o tratamento destas informações. Além disso, esta estrutura tem como resultado a diminuição da complexidade do processo de decisão modelado tornando também sua análise mais simplificada. O modelo de apoio a decisão está dividido em dois níveis, o primeiro nível é o que passa a chamar-se de “estruturante”, que usa a rede de Petri Colorida e Temporizada, para modelar a relação de estados, associados ao tempo em que estes estados devem ocorrer. Neste nível, o processo de decisão é compreendido e estruturado, definindo onde e quando uma decisão deverá ser tomada. O segundo nível, é o que passa a chamar-se de “tático”, que incorpora a inteligência na tomada de decisão, e que tem a função de avaliar as alternativas e decidir a melhor, atendendo a um objetivo global ou a um nível de satisfação adequado as expectativas proposta para o problema. O segundo nível atua diretamente nas regras de disparo da rede de Petri, obtendo com isto uma construção orientada da árvore de alcançabilidade, evitando a

explosão de estados atingíveis, que passam a conter somente os estados viáveis facilitando a análise do comportamento dinâmico da modelagem do problema pela rede de Petri do primeiro nível.

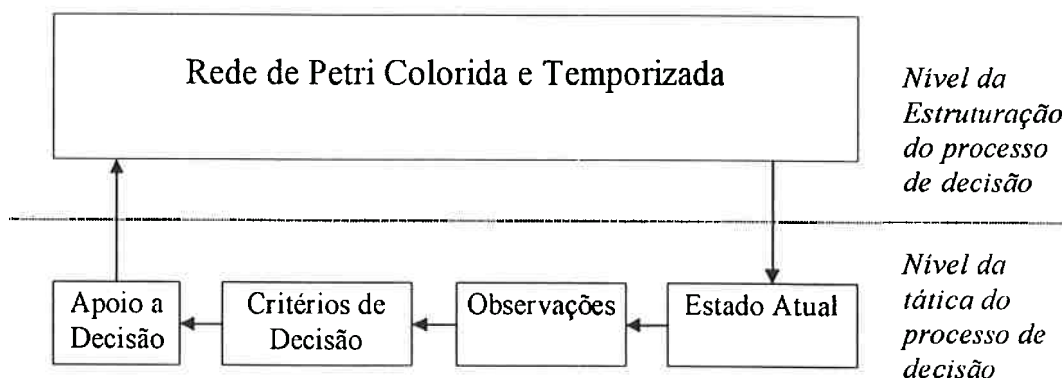


Figura 16: Representação do Processo de Decisão

### 5.2.1 Nível Estruturante do Processo de Decisão

Na rede de Petri Colorida e Temporizada, as transições representam as decisões que implicam na mudança de estados, que são representados por lugares. As decisões decorrem de um estado atingido e dos recursos necessários para se alcançar um novo estado, conforme modelagem apresentada pela figura 17. O estado 1 é formado por um conjunto fatos que geram a demanda por recursos, a decisão sobre o uso destes recursos promovem o estado 2, formando um novo conjunto de fatos, que é função dos recursos escolhidos, e assim por diante.

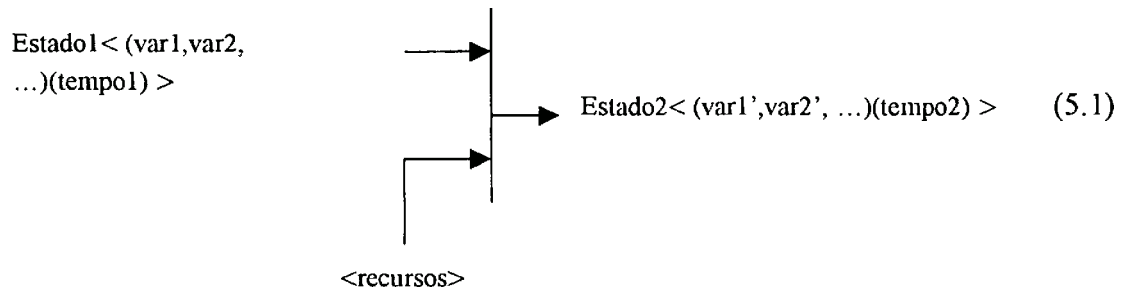


Figura 17 : Topologia da transição entre Estados numa TCPN

Os estados atingíveis num processo de tomada de decisão, para o problema de programação aqui tratado, resulta numa árvore de alcançabilidade que é a própria árvore de decisão, o que os tornam com características de eventos discretos, sendo portanto, adequada a modelagem pelas redes de Petri.

Como exemplo, poderíamos considerar o “estado 1” como um pedido de produção originado por uma venda. O pedido deve incorporar todas as características necessária a avaliação e à execução do pedido, tais como: tipo de produto, quantidade, data de entrega, nível qualidade, multa por atraso, etc. Cada característica dispara necessidades de recursos e de estratégias de uso destes recursos que, uma vez impostos, resultarão num “estado2”, que neste exemplo, representa a execução do pedido na linha de produção, que seria ocupada por um período de tempo. As informações contidas nos estados possíveis e os recursos formam o conjunto de cores possíveis da Rede de Petri Colorida e Temporizada.

### 5.2.2 Nível Tático do Processo de Decisão

Neste nível usamos a teoria dos conjuntos difusos para propor decisões logicamente consistentes no uso de recursos modelados no nível da rede de Petri, por sua capacidade de modelar o conhecimento característico da atividade de planejamento

e programação, que envolve a análise de diversos objetivos, em geral, conflitantes em atendimento.

A partir de uma marcação inicial e da matriz de incidência, a árvore de alcançabilidade é construída com base nas regras de disparo. Estas regras são as responsáveis pela dinâmica da rede que em nosso formalismo é arbitrada no segundo nível, onde ocorre a decisão sobre a utilização dos recursos da planta.

Para a ferramenta de apoio à decisão aqui proposta, a união dos dois níveis, estruturante e tático, acontece por meio de uma alteração nas regras de disparo da rede de Petri, conforme é mostrado a seguir.

### 5.2.2.1 Alteração das regras de disparo

Para atender ao Modelo proposto e necessário alterar as regras de disparo da rede TCP de maneira a satisfazer a integração do Nível Estruturante e o Nível Tático, conforme está proposto a seguir:

#### a) Regra de Habilitação

Uma transição esta habilitada num estado  $(M1, r1)$  no tempo  $r2$  se somente se as seguintes propriedades são satisfeita:

1.  $p \in P : \sum_{(t,b) \in \gamma} E(p,t) < b > r2 \leq Cl_{min(\mu)} [M1(p)]$ ,
2.  $r1 \leq r2$  (5.2)
3.  $r2$  é o menor elemento de R para o qual existe um passo satisfazendo (1) e (2).

$Cl_{min(\mu)}$  = Operador de Classificação da Marcação para o Mínimo Nível de Satisfação

### b) Regra de Ocorrência

Quando uma transição está habilitado num estado  $(M1,r1)$  no tempo  $r2$ , este pode ocorrer, mudando o estado  $(M1,r1)$  para outro estado  $(M2,r2)$ , sendo definido por:

$$\forall p \in P : M2(p) = (Or_{max(\mu)}[M1(p)] - \sum_{(t,b) \in Y} E(p,t) <b>r2) + \sum_{(t,b) \in Y} E(t,p) <b>r2, \quad (5.3)$$

$Or_{max(\mu)}$  = Operador de Ordenação da Marcação para o Nivel de Máxima Satisfação.

A primeira soma é chamada: marca removida com nível de satisfação máxima, enquanto a segunda é simplesmente chamada: adicionando marcas. Entretanto, dizemos que  $(M2,r2)$  é diretamente alcançável de  $(M1,r1)$  pela ocorrência do passo  $Y$  no tempo  $r2$ , o qual também denotamos:

$$(M1,r1)[Y,r2 > (M2,r2) \quad (5.4)$$

#### 5.2.2.2 Tomada de Decisão

O processo de decisão difuso necessário aos requisitos previstos ao grupo de caso que a ferramenta pretende atingir ocorre em duas etapas. A primeira etapa reserva-se a obtenção de uma valor que represente o conhecimento aproximado do usuário com respeito a um objetivo ou uma restrição do processo modelado, e a segunda etapa é caracterizada pela decisão que deve satisfazer restrições e objetivos, que são compostos a partir dos valores obtidos na primeira etapa.

Portanto, primeiramente deve-se construir o modelo difuso como mostrado na figura 18, isto é, os conjuntos difusos antecedente e conseqüente, representados por termos lingüísticos que modelam o imprecisão do conhecimento que o operador possui sobre o processo. Além disso, devemos estabelecer as regras de inferência que serão

aplicadas à máquina de inferência, relacionando funcionalmente os conjuntos difusos antecedente e consequente. O conjunto difuso consequente revela o estado do conhecimento para um determinado objetivo ou restrição.

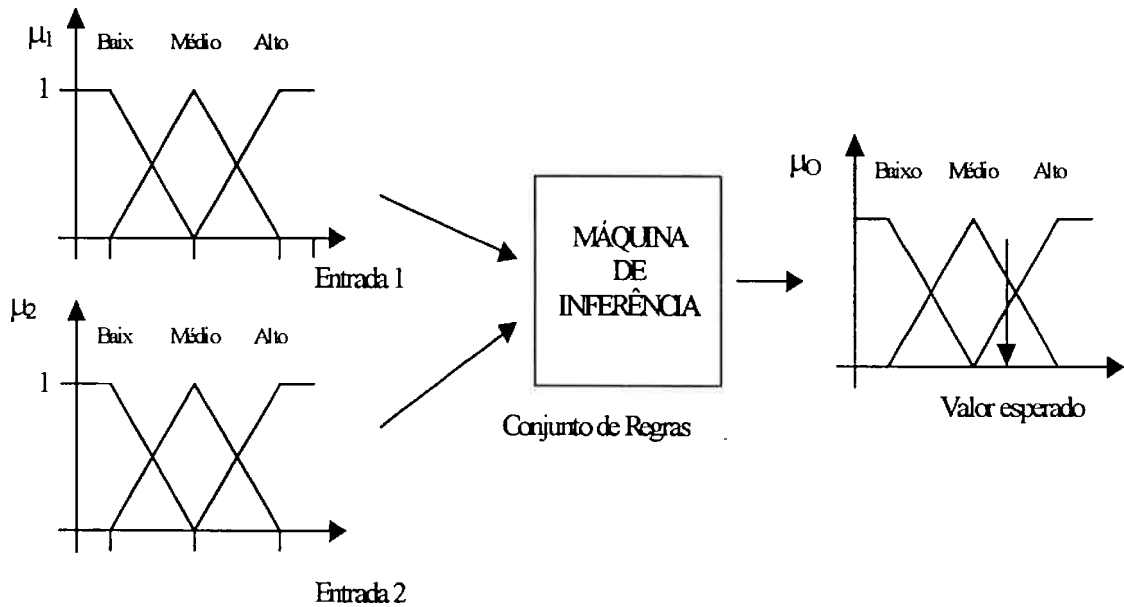


Figura 18 – Representação de um modelo difuso

Neste caso, o valor esperado representa o conhecimento do processo para cada objetivo para um certo estado, que é representado pelos recursos disponíveis na planta e pela demanda. Na segunda etapa, estes valores são condensado no quadro abaixo, que chamamos de “Matriz do Conhecimento”. Um algoritmo para obtenção do valor esperado pode ser obtido em COX (1994).

	$O1$	....	$On$
$r1$	$v_{O1}(r1)$	....	$v_{On}(r1)$
.		....	
$rm$	$v_{O1}(rm)$	....	$v_{On}(rm)$

onde

$ri, i=1,..m$ , são as marcas que representam os recursos disponíveis no processo.  
 $Oj, j=1,..n$ , são os objetivos e ou restrições através dos quais as marcas representando os recursos são avaliadas.

$v_{Oj}(ri)$  é o valor esperado que leva em conta o conhecimento do usuário do uso do recurso  $ri$  em um dado objetivo  $Oj$ . O domínio do conjunto solução difusa de saída tem como resultado um valor de satisfação, tal que  $v_{Oj}(ri) \in [0,1]$ . Logo, pode-se associar o valor esperado de satisfação ao nível de pertinência do universo de discurso  $R$ , formado pelas rotas disponíveis, para cada objetivo ou restrição. Então, para este caso particular:

$$v_{Oj(Ri)} = \mu_{Oj}(ri), j=1..n \text{ e } i=1..m. \quad (5.5)$$

A seleção neste caso é feita através da classificação do recurso levando em conta um índice que agrega a importância de todos os objetivos conjuntamente, em geral obtida por:

$$D(ri) = \{P1\mu_{O1}(ri) \wedge \dots \wedge Pn\mu_{On}(ri)\} i=1..m \quad (5.6)$$

onde

$D(ri)$  é o valor mínimo de atendimento do recurso  $ri$  na presença dos objetivos considerados,

$Pj$  é o grau de prioridade do objetivo  $Oj$ , de acordo com sua importância na alternativa  $Ri$ , de tal modo que  $P1+P2+\dots+Pn=1$ .

Portanto, ficam assim definidos os operadores  $Cl_{min(\mu)}$  e  $Or_{max(\mu)}$ , estabelecendo a interface entre os níveis estruturante e tático e que se passa a fazer parte da regra de ocorrência da rede de petri na modelagem do ambiente de programação, ou seja:



$$1. Cl_{min(\mu)}(x) = \{ x/x = D(ri), \forall D(ri) \geq \text{mínimo de satisfação} \} \quad i=1..n \quad (5.7)$$

$$2. Or_{max(\mu)}(x) = \{ \{ x/x = \text{ordenação}( \max [D(ri)] \}, \forall D(ri) \in Cl_{min(\mu)} \} \} \quad (5.8)$$

Os operadores  $Cl_{min(\mu)}$ ,  $Or_{max(\mu)}$  estabelecem para as marcas disponíveis uma ordenação que determinará a seqüência de ocorrência de uma transição com respeito ao conjunto de marcas que a habilitaram.

Os objetivos considerados pelo decisor em sua tomada de decisão podem ter variáveis que são facilmente mensuráveis ou não. No estudo de caso apresentado os objetivos serão avaliados através de funções de pertinência conhecidas, com a finalidade de melhorar o entendimento do processo como um todo.

## 6. Aplicação do modelo

### 6.1 Os Requisitos do Sistema

O formalismo das redes de Petri coloridas e temporizadas permite modelar os processos decisórios com relação à estruturação de suas ações num período de tempo. Aqui usou-se, como exemplo, um porto de granel, onde as ações de planejamento e programação estão no atendimento, pelo recursos existentes no porto, a uma fila de navios, com pedidos de carga (quantidade e tipo) e datas limites de atendimento. Num caso mais geral, poderia estar tratando do atendimento a um pedido de produção, quer seja intermitente ou contínua, com base na demanda de mercado.

A figura 19 apresenta um desenho esquemático de uma planta portuária, envolvendo os piers, os pátios de estocagem e os transportadores formando as várias possíveis rotas entre os pátios (origem) e pieres (destino).

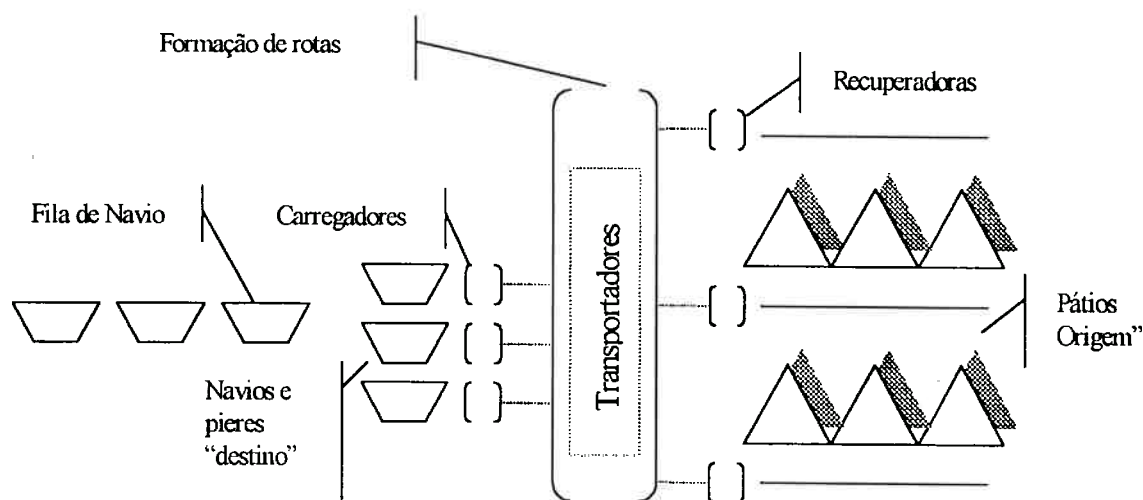


Figura 19: Representação do ambiente do porto

As rotas são formadas por conjuntos de equipamentos que ligam uma origem (pátio) a um destino (píer). A planta é extremamente complexa e a escolha da rota que será usada é dependente das informações operacionais e das gerenciais. No pátio, o minério é retirado por meio de uma recuperadora e no píer o minério é embarcado por meio de um carregador de navios. A recuperadora e o carregador de navio estão ligados por várias unidades de correias transportadoras e “shuts” móveis. O atendimento a todas as opções de pátios e piers associado a um grande número de correias e “shuts”, gera um grande número de rotas e conseqüentemente um grande número de possibilidades de atendimento. As correias transportadoras e “shuts” existentes, em geral, são utilizados por mais de uma rota, gerando a possibilidade de conflito quando mais de um navio está sendo atendido. Isto é, a utilização de uma rota inviabiliza todas as outras opções de rotas que utilizam os equipamentos já em uso. As rotas possuem custos e estratégias diferenciadas de operação, que em geral, provocam grandes incertezas no momento de decidir qual será utilizada.

O problema está caracterizado por transição de estados no tempo associados com forte análise de informações operacionais e gerenciais, para ocorrência destes estados. Portanto, este problema possui aderência ao modelo de decisão proposto, onde usamos as redes de Petri colorida e temporizada para tratar as transições de estados no tempo e a teoria de conjuntos difusos para avaliar as informações complexas e auxiliar na escolha de um novo estado da rede de Petri.

No exemplo da fila de navios, suas características individuais disparam alternativas de atendimento personalizados tais como:

- Um navio adequado a um píer pode ser atendido por outro píer menos qualificado desde que isto gere ganhos no atendimento global.
- A indicação de um local de onde o material será retirado e a escolha de quais possíveis rotas (caminhos que ligam origem a um destino) poderão atender a aquele navio, em obediência aos critérios operacionais e gerenciais.

Na estocagem do material em pilhas nos pátios de armazenagem, o homem de planejamento das operações do porto pode optar em dividir uma pilha numa mesma área ou em áreas diferentes para possibilitar a recuperação simultânea das pilha destinada a um embarque e com isto obter o máximo fluxo a um determina pier. A expedição é formada por 3 piers tal que a capacidade de pier 2 é a soma dos piers 1Sul e 1Norte. A divisão de material nas pilhas nunca é inferior a uma mínimo por pilha, para não causar perda de produtividade ao final da recuperação.

As pilhas devem ser localizadas de maneira a prevenir concorrência entre empilhadeira (formação de pilha) e recuperadora, num mesmo pátio ou entre pátios adjacentes.

A descrição de atendimento a navio pode chegar a tratamento individualizado para cada situação do atendimento global do Porto.

## **6.2 Solução**

Na figura 20, apresentamos a modelagem do estudo de caso tomando como base uma rede de Petri Colorida, como aplicação da extensão, aqui proposta, para o problema de programação das atividades operacionais do Porto de Granel, onde a modelagem apresenta a estruturação do atendimento a pedidos de navio com características do cliente, quantidade e tipo de minério a embarcar. O atendimento é FIFO, isto é, o primeiro que chega é o primeiro a ser atendido. A estruturação do processo de decisão é imposto pela característica do atendimento, e aqui é mantida na mesma ordem, facilitando o entendimento da atividade de planejamento e programação.

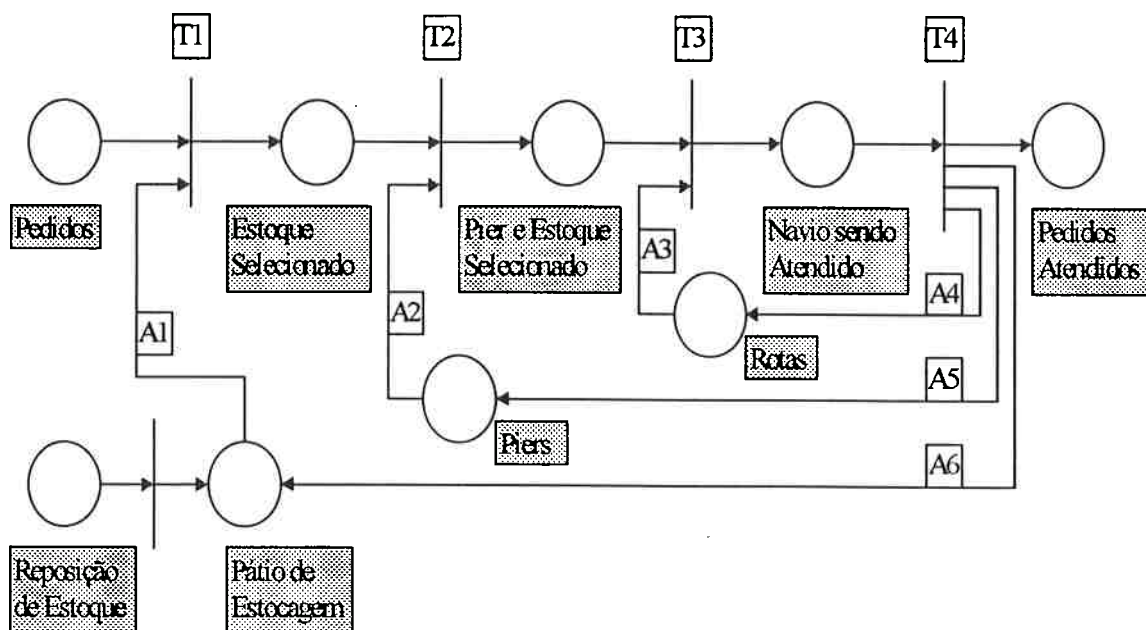


Figura 20: Rede TCP do Porto de Granel -Funcional

As funções apresentadas na rede e definidas abaixo são as permissões, sem restrição, ao fluxo de marcas, que representam os recursos disponíveis na planta, em função da lista de pedidos dos navios, quantidade e tipo de minério. Estas funções são:

A1: Seleciona material estocado e localização.

- Neste ponto, o planejador através pedido de carga e do plano de carga do navio, escolhe a pilha ou pilhas de onde o material será retirado.

A2: Seleciona píer.

- Neste ponto, o planejador através da porte do navio, o tipo de cliente, condição em que a fila de navio se encontra, etc, determina o píer onde será carregado do navio.

A3: Seleciona rota.

- Neste ponto, a partir de informações da localização do navio e da localização da(s) pilha(s), escolhe entre as possibilidades de rotas, quais atendem a origem destino, considerando, capacidade a ser transportada, bloqueios por uso compartilhado de equipamentos por outras rotas, bloqueios por manutenção, **etc.**

A4: devolve rota utilizada.

- Após decorrido o tempo necessário para o carregamento, no caso aqui estudado, é medido por um fluxo médio para cada tipo diferente de material, devido a formação triangular da pilha e pelo baixo fluxo ao término da pilha, o planejador disponibiliza a rota para outras utilizações

A5: devolve pier.

- Terminado o carregamento o navio deixa o pier, tornando este disponível para outros embarques.

A6: Debita a quantidade material retirado naquela localização.

- A áreas nos pátios são liberadas para novas formações de pilha.

Esta é uma visão macro das operações portuárias, pois existem outras ações operacionais, como:

- Parada para troca de porão para atender uma plano de carga
- Parada para mudança de material a ser embarcado para atender um plano de carga.
- Parada para deslastre.
- Saída baseada em carta de maré.
- Etc

Estas operações não foram retratadas aqui, pois adicionariam um certo nível de complexidade ao modelo, sem com isto adicionar valor à metodologia aqui proposta.

### 6.2.1 Modelagem do estudo de caso

A seguir apresentamos na figura 21 o modelo simplificado da rede de Petri colorida e temporizada, cujos elementos necessários à sua descrição e dinâmica serão incluídos nas figuras subsequentes.

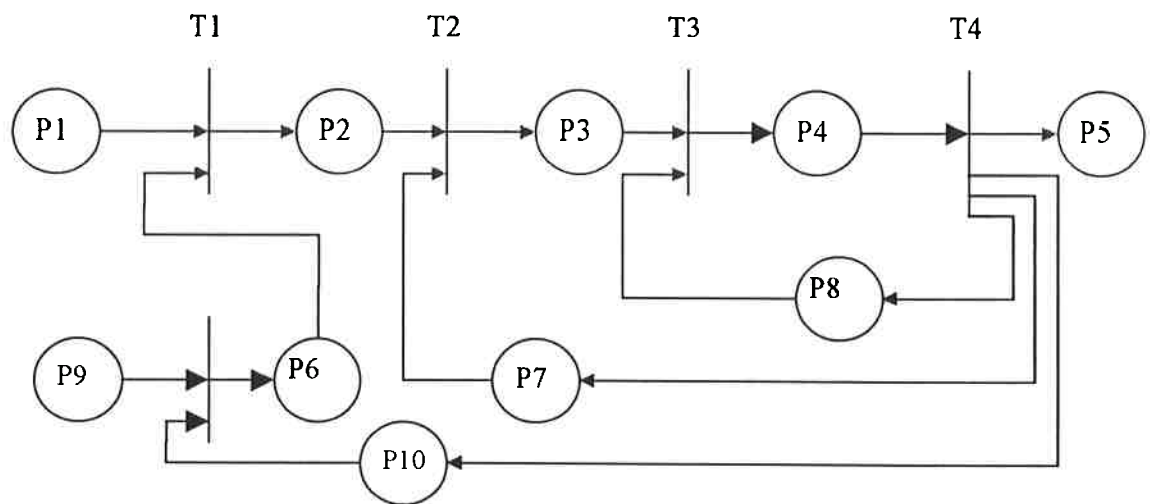


Figura 21: Rede TCP do Porto de Granel - Formal

Os lugares estão assim definidos:

P1=Navio com pedido de carga aguardando atendimento

P2=Navio com origem do material no pátio de estocagem identificado

P3=Navio com origem e pier destino selecionado

P4=Navio com rota definida em função da origem de estocagem e pier destino

P5=Navio atendido

P6=Patio de estocagem com material

P7=Piers disponíveis

P8=Rotas disponíveis

P9=Reposição de estoque

P10=Patio de estocagem vazio

A notação do JESSEN (1996) com respeito ao modelo temporizado é representada pela introdução do tempo corrente através de um relógio global. JESSEN (1996) propôs que uma marca carregasse um valor de tempo chamado de “selo de tempo”, estabelecendo no modelo de tempo o limite de tempo necessário para que a marca possa ser removida pelo disparo de uma transição.

No modelo de tempo, uma transição é dita habilitada, com respeito a uma cor, quando esta satisfaz os requisitos definidos pelas regras de habilitação descritas na seção 4.4 . No modelo de tempo, um novo conceito de disparo da transição é introduzido. Este conceito está referenciado à condição de marca pronta, ou seja além de satisfazer as regras de habilitação a marca deve estar pronta para ocorrer o disparo da transição. Isto significa que o selo de tempo da marca removida de seu lugar de entrada deve ser menor ou igual ao modelo de tempo corrente, seguindo as mesmas regras do modelo não temporizado.

Num modelo em que uma atividade toma  $\Delta t$  unidades de tempo, a transição  $T$  de entrada cria um selo de tempo na marca que sai desta, sendo  $\Delta t$  unidades de tempo maior que o valor do tempo global em que  $T$  ocorreu. Isto implica que a marca produzida por  $T$  estará indisponível por  $\Delta t$  unidades de tempo. Um conceito com relação ao modelo temporizado está no fato da transição reter uma marca por  $\Delta t$  unidades de tempo. Isto é, uma marca pronta é removida e somente depois de  $\Delta t$  unidades de tempo, esta seria gerada no lugar de saída. Este caso resultaria na geração de marcações intermediárias, ou seja, uma marcação na qual marcas de entrada tenha sido removidas, mas marcas de saídas ainda não foram geradas. Isto tornaria as relações mais complexas entre o comportamento de uma rede temporizada e o de uma não temporizada. O primeiro dos simuladores propostos por JESSEN (1996) é o simulador por eventos.

O modelo de tempo por eventos se resume em executar todos os eventos habilitados para aquele modelo de tempo quando nenhuma transição estiver mais habilitada com relação a uma determinada cor, no modelo de tempo, o sistema avança o



relógio para o próximo modelo de tempo, ou para próxima lista de evento a ser disparado.

A execução de uma rede temporizada é na forma de tempo dirigido, e trabalha de maneira similar as filas de eventos encontradas em várias linguagens de programação para simulação de eventos discretos. O sistema permanece em um dado modelo de tempo enquanto houver elemento de ligação em estado habilitado e pronto para a execução, “disparo da transição”. Quando nenhum outro elemento pode ser executado naquele tempo corrente, o sistema avança o relógio para o próximo modelo de tempo, ou evento, na qual outro elemento de ligação habilitado esteja pronto para ser executado. Para cada marcação existe um pequeno intervalo de tempo ( pode ser um ponto, por ex., ou um simples momento). A ocorrência de um elemento de ligação é instantâneo.

Vejamos agora como se aplica a simulação temporizada em nosso estudo de caso apresentado na figura 21. Em nosso modelo, usamos um relógio discreto, partindo do zero. Além disso, somente a marca do tipo N são temporizadas (isto é, carregam o selo de tempo), enquanto as marcas dos tipos PA, PI, e R são de uso imediato. O pequeno retângulo associado ao modelo de TCPN contendo o valor de  $t_0$  indica o corrente tempo.

O sinal @ associada a marca do tipo “N” seria lido “No Tempo”. Cada sinal @ é seguida de uma lista de selos de tempo.

#### a) Marcas em P1

No início o lugar P1, figura 21, contém marcas “N” contendo as seguintes características:

$(N_i m_i q_i p_i r_i, t_0)$ , onde

$N_i$ : Identificação do navio

$m_i$  : Material solicitado para embarque

$q_i$  : Quantidade de material solicitado para  $m_i$

$p_i$  : Pier a ser escolhido, "0" indica o uso de qualquer pier

$r_{i,j(1..k)}$  : Vetor de rotas sendo, a rota da posição "i" está relacionada com a que será utilizada ligando o ponto de origem ou estocagem ao destino ou pier escolhido, e as demais  $k$  rotas que ficam bloqueadas pela rota  $i$ .

$t_0$  : tempo em que o navio inicia o carregamento

No tempo  $t=0$  todas as marcas "N" estão localizada em P1, assim poderíamos ter como exemplo:  $(N_1 m_1 q_1 p_0 r_0, t_0)$  onde:

$N_1$  : O navio é o de número 1 e está associado a um cliente

$m_1$  : O material requisitado pelo navio "N1" é  $m_1$ , está associado a uma lista de materiais estocados no pátio.

$q_1$  : é a quantidade de material  $m_1$  para o navio  $N_1$

$p_0$  : representa o pier onde o material será embarcado. Se "0", indicada que o pier é qualquer, caso contrário o navio somente poderá ser colocado no pier indicado.

$r_{0..}$  : vetor de rotas onde a primeira posição do vetor é a rota disponível, as demais carrega as rotas bloqueadas

$t_0$  : inicializa com zero no início da simulação

### **b) Marcação em P6**

Analogamente, o lugar P8 possui "n" marcas contendo as seguintes informações.

$(PA_n p_m)$ , onde

$PA_n$  = número do pilha, está relacionado com o nome do pátio entre que balizas se encontra o material.

$p_m$  = referencia-se ao material estocado na pilha.

No tempo  $t=0$  supomos que exista pilhas formadas e estocadas no pátio capaz de suprir a demanda geradas pelo atendimento aos navio na serem atendidos durante a simulação, por exemplo:

$(PA_1 p_1)$  onde,

$PA_1$  = pilha de nº 1, localizada no pátio “x” entre as balizas “y a z”,

$p_1$  = material da pilha  $PA_1$

### **c) Marcação de P7**

O local P7, figura 21, contém as marcas representando os piers existentes no ponto contendo as seguintes informações:

$(PI_n)$  onde ,

$n$  = Número do Píer.

No tempo  $t=0$  todos os piers estão disponíveis, logo todas as marcas representando os piers estão localizados em P7, assim podemos ter como exemplo:

$P1S, P1N$  e  $P2$ , onde

$P1S, P1N$  = Píer sul/ Píer norte, com capacidade para receber navios de menor porte

$P2$  = Píer com característica para receber de grande porte

### **d) Marcação de P8**

No lugar P8, figura 21, encontramos marcas que representam as rotas disponíveis no porto. Existe um conjunto de rotas que atende uma origem e um destino, tendo um ou mais caminhos , por exemplo, retirar o material simultaneamente de duas

ou três pilhas direcionando para um único embarque. As rotas em nosso modelo são representadas simplesmente por “r” associado a um número inteiro.

As rotas, portanto, são formadas por um subconjunto de equipamentos contido em conjunto formado por todos os equipamentos utilizados na operação de carregamento de navio. Em geral, os subconjuntos formando as rotas possíveis possuem um ou mais equipamento de outros subconjuntos, ou seja, a interseção de dois subconjuntos em geral não é vazio, por exemplo:

Equipamentos do porto = {m1, m2, m3, m4, m5, m6}

rota1=(m3, m4)

rota2=(m1, m5, m6)

rota3=(m2, m3, m6)

rota4=(m4, m5)

As rotas concorrem entre si pelas máquinas necessária a interligação entre a origem, pátio e o destino, pier. No exemplo acima podemos verificar que:

- r1 exclui r3 e r4;
- r2 exclui r3 e r4;
- r3 exclui r2 e r1;
- r4 exclui r2 e r4.

A decisão de se utilizar uma rota impacta sobre a planta como um todo, ou seja, usar uma rota significa não utilizar todas as outras que possuam pelo menos um equipamento concorrente com a escolhida. Para tanto, o processo de uso de rota acontece em dois momentos:

Primeiro momento: a rota pode ser escolhida pelo menor impacto sobre as outras possíveis.

Segundo momento: uma vez que a rota foi escolhida, todas as outras que compartilham dos mesmos recursos, tornam-se indisponíveis para que outros navios a utilizem.

No estudo de caso aqui tratado evitou-se a modelagem do processo de inserção de espera, pois acreditamos que tornaria o modelo extremamente complexo, não trazendo a contribuição necessária para a ferramenta que propomos, que trata da modelagem do processo de decisão. Entretanto, a inserção de espera é um caso clássico de programação de produção visando otimização da fila de espera. O caso da inserção de espera é o atendimento a um navio trocando a ordem de chegada visando uma solução otimizada, colocando em estado de espera um navio que estivesse pronto para o atendimento.

No exemplo do porto, isto é possível, porém é raro e ocasional, uma vez que a programação segue a ordem de chegada dos navios, e possíveis mudanças nesta ordem requerem negociações complexas. Portanto, omitimos em nosso modelo o processo de inserção de espera .

### **6.3. Simulação do Modelo**

#### **6.3.1. Simulação do Nível Estruturante, excluindo o Nível Tático**

Analisando a dinâmica no primeiro nível, aqui chamado de nível estruturante do processo de decisão, podemos dizer que a partir da marcação inicial  $M_0$  e se o elemento de ligação  $b_1=(N_1, T_1)$  encontra-se habilitado, então este transforma  $M_0$  na marcação  $M_1$ . A habilitação ocorre porque os dois lugares de entrada, P1 e P6, figura 22, possuem as marcas necessárias. O elemento de ligação também está pronto porque o selo de tempo das marcas a serem removidas são menores ou igual ao modelo de tempo (neste caso existe somente uma marca com selo de tempo e seu valor é menor ou igual ao tempo corrente. As demais marcas são de utilização imediata.

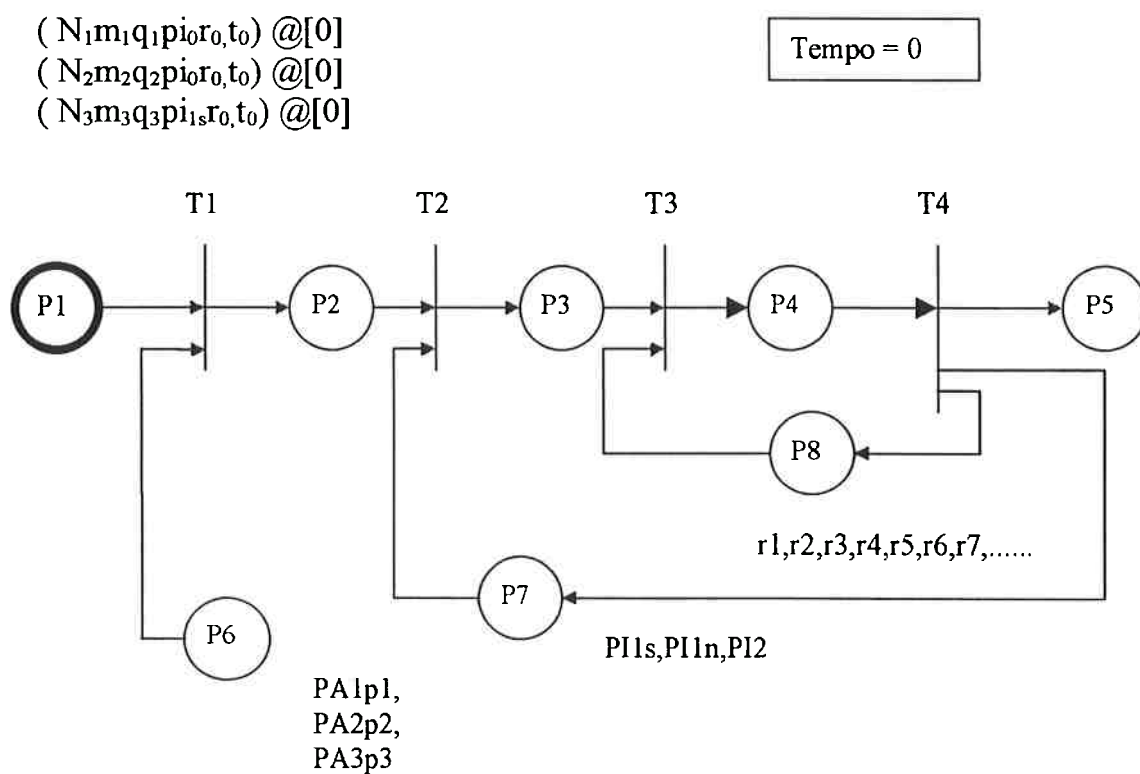


Figura 22: Rede TCP do Porto de Granel

Portanto,  $b_1$  está habilitado e este pode ocorrer. A ocorrência de  $b_1$  remove a marca de  $P_1$  e  $P_6$ . Podemos observar que as funções nos arcos utilizadas são funções simples, supondo não haver escolha em mais de um ponto de armazenagem, o que em geral não representa a realidade do processo, mas suficiente para entendimento da técnica. A ocorrência de  $b_1$  irá adicionar uma nova marca em  $P_2$ , que representa a escolha pelo navio da pilha onde será retido o material demandada pelo navio. O resultado é apresentado na figura 23.

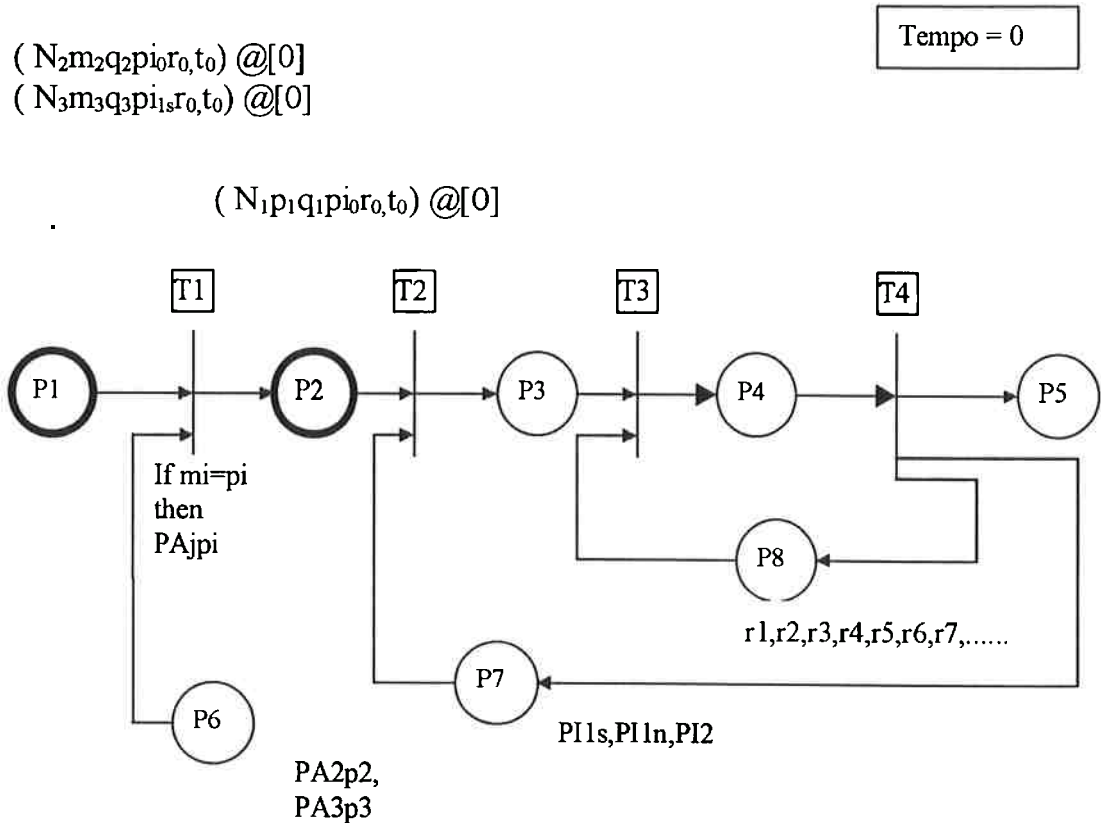


Figura 23: Rede TCP do Porto de Granel– (T1,N1)

PA1p1 está relacionado com a pilha onde o material está localizado. Isto significa que a nova marca gerada em P2 possui informações sobre a localização exata da pilha.

A marca modificada, que representa uma nova marca colocada em P2 é calculada de acordo com o que está especificado em seu do arco de entrada. Ainda neste lugar não houve o cálculo de tempo de atraso com relação ao modelo de tempo global. Na marcação apresentada na figura 23, as marcações em P1 estão habilitadas e prontas no tempo  $t=0$ , entretanto, escolhemos simular a ocorrência da marcação em P2, para avaliarmos o comportamento da rede a evolução de uma marca.

- b2(T2,N1), para Pier disponível em P7,
- b3(T1,N2), para pilha disponível em P6,
- b4(T1, N3), para pilha disponível em P6

Havendo Píer disponível em P7, (não considerando critérios de escolha ou diferenciação entre os recursos). Logo, o navio poderá escolher qualquer um dos 3 piers disponíveis. O resultado do disparo de T2 para a marca N1 é apresentado na figura 24.

### Disparo de T2 para N1

$(N_2m_2q_2pi_0r_0,t_0) @ [0]$

$(N_3m_3q_3pi_1s_0,t_0) @ [0]$

Tempo = 0

$(N_1p_1q_1pi_1s_0,t_0) @ [0]$

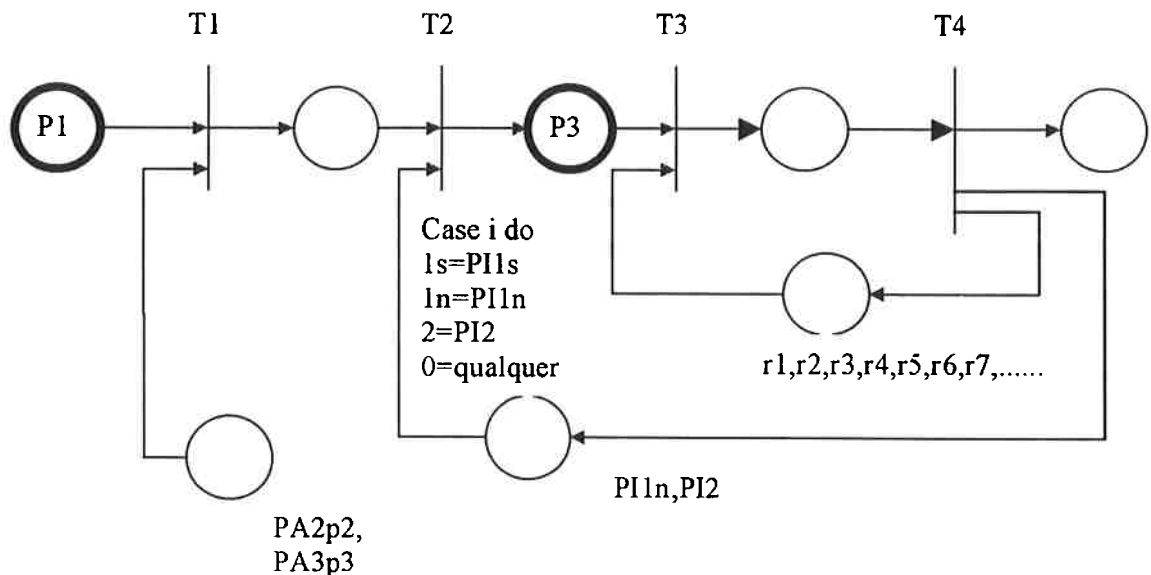


Figura 24: Rede TCP do Porto de Granel – (T2,N1)

Neste caso o píer escolhido foi píer  $PI_{1s}$ . Não consideramos ainda as heurísticas gerenciais para esta escolha, que será vista no nível tático do modelo de decisão proposto. Os novos elementos de ligação estão habilitados e prontos no tempo corrente seriam;  $b_5(T_3, N_1)$ ,  $b_3(T_1, N_2)$  e  $b_4(T_1, N_3)$ .

O elemento de ligação  $b_5(T_3, N_1)$  está habilitado uma vez que existam rotas que atendam a requisitos de transporte da origem determinada pelo endereço da pilha, “ $PA_i p_i$ ”, e pelo destino do material no embarque, representado pela variável “ $PI_i$ ”, assim, a tabela 4 apresenta um exemplo de rotas que atendem uma origem e um destino



com os respectivos fluxos. Esta tabela será utilizada como referência a simulação para o caso estudado.

Rota	Pai	Pii	Fluxo
R1	PA1,PA2,PA3	Todos	10.000t/h
R2	PA1,PA2	Todos	7.000t/h
R3	PA1,PA2	Todos	7.000t/h
R4	PA1,PA2,PA3	Todos	9.000t/h
R5	PA1,PA2	Todos	7.000t/h
R6	PA1,PA2	Todos	11.000t/h
R7	PA1,PA2	Todos	7.000t/h

Tabela 4: Tabela simplificada de rotas ligando origem/destino e fluxos médios

Para  $(N_1 p_1 q_1 p_{i_s} r_0, t_0) @ [0]$  e pelo conteúdo da Tabela 4, todas as rotas atendem a solução para ligar a origem "PA<sub>1</sub>" ao destino "PI<sub>1s</sub>". Neste caso, a rota r2 é escolhida arbitrariamente e estando disponível, o elemento de ligação b5 está habilitado e pronto, cujo resultado é retirar a marca de P3 e gerar esta marca em P4, conforme é apresentado na figura 25.

Rota	Conflito
R1	R4
R2	R3
R3	R2
R4	R1
R5	
R6	R7
R7	R6

Tabela 5: Relação de conflito entre rotas

Na tabela 5 é definido o conflito existente entre o conjunto de rota possíveis. No exemplo, observamos que a rota r2 é conflitante com as rotas r3. Isto significa que a

utilização da rota r2 desabilita o uso das rotas r3. As mesmas considerações são feitas para as demais rotas.

Neste instante, o registro do tempo global, que ainda se encontra no valor zero, tendo em vista que os eventos ocorridos até agora eram independentes do tempo. Portanto, a nova marcação é mostrado na figura 25. O relógio no início da simulação ainda registra 0 (zero) e supondo que a quantidade transportada  $q_1 = 70.000$  ton. e que o fluxo da rota  $r_2 = 7.000$  ton./h, logo a nova marcação será:

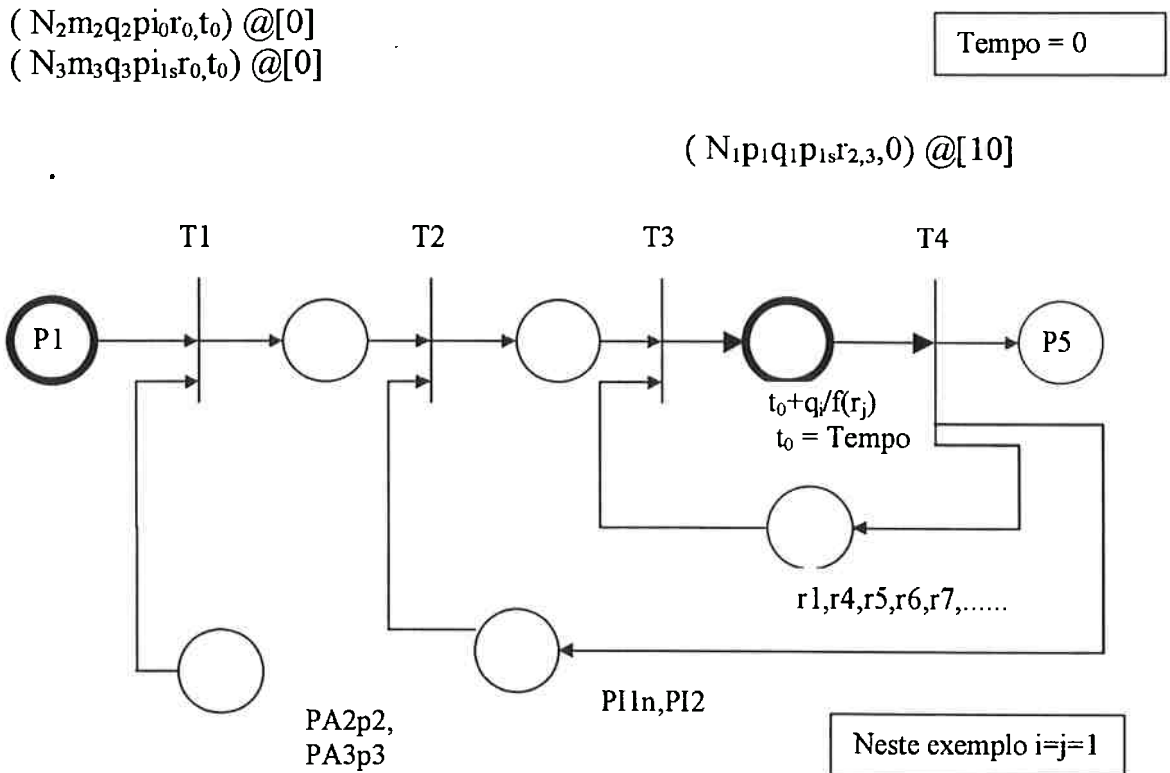


Figura 25: Rede TCP do Porto de Granel –  $(T1, N1), (T2, N1), (T3, N1)$

O tempo de atraso depende da carga e do fluxo médio previsto para aquele embarque.

Existem outras limitações que influenciam o tempo médio de atendimento, tais como paradas para deslastre, atendimento a plano de carga, troca de porões, etc. Entretanto, nos preocupamos aqui tão somente com valores médios que são responsáveis pelo tratamento dado a maioria dos casos.

Para uma da rede de Petri colorida e temporizada, necessita-se que cada passo existam elementos de ligação os quais estejam igualmente habilitados e prontos. Portanto, uma seqüência de ocorrência possível de uma TCPN sempre gera um subconjunto das possíveis seqüências de ocorrência da correspondente NTCPN.

Isto significa que tem-se uma bem definida, entendida e fácil relação entre o comportamento de uma rede de Petri Colorida e Temporizada e o comportamento da correspondente rede de Petri Colorida não-Temporizada.

Com a marca em P5, a mesma alcança um estado onde o elemento de ligação encontra-se habilitado e não pronto para ocorrer no corrente modelo de tempo=0(zero). Logo, avaliamos outras marcas que estão habilitadas e prontas para o corrente tempo. Caso contrário ajustariamos o relógio para o próximo evento, por exemplo, tempo global=10 e assim por diante para todos os elementos de ligação habilitados.

Os novos elementos de ligação habilitados e prontos nova seriam:

$b_3(T_1, N_2)$ ,

$b_4(T_1, N_3)$ , e assim por diante.

Podemos, então, ter a marca N2 em P3, com pátio e píer escolhido, de acordo com a figura 26:

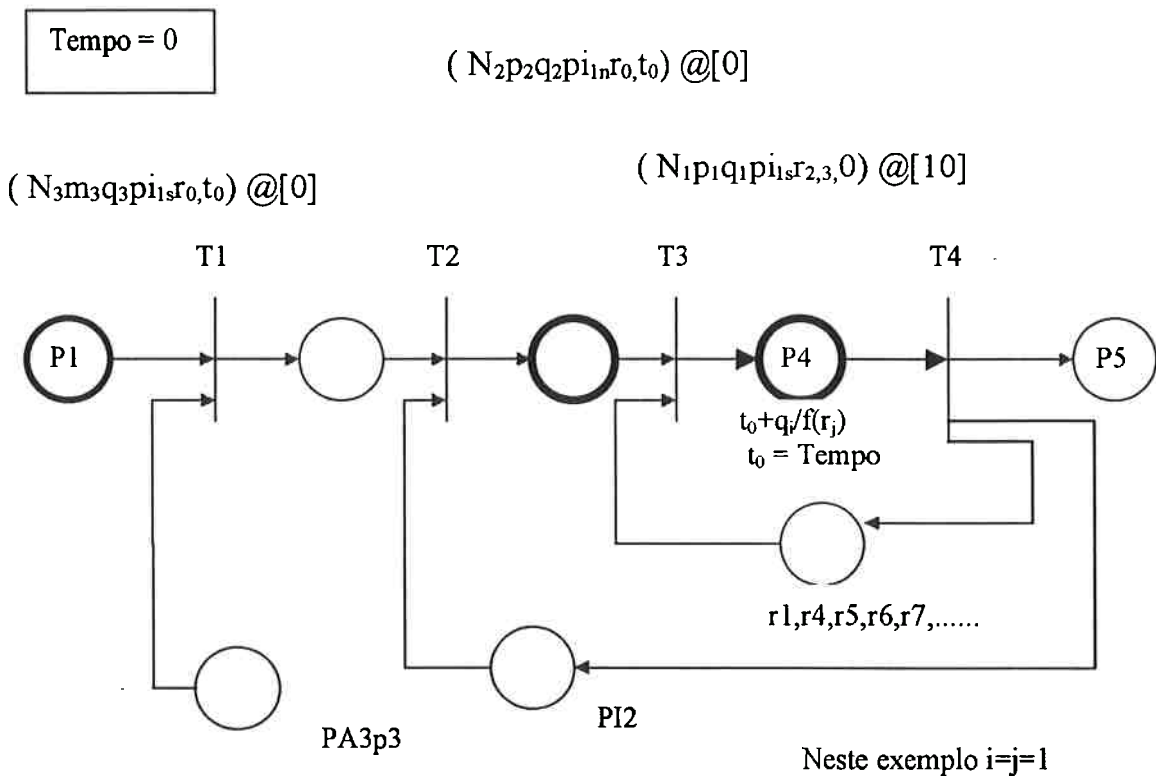


Figura 26: Rede TCP do Porto de Granel – (T1,N2),(T2,N2)

Supondo que para N2 a rota escolhida seja a rota r4 e pelo uso da tabela 4 onde  $f(r_4)=9.000$  t/h e  $q_2=135.000$  ton., o resultado da nova marcação é o apresentada na figura 27:

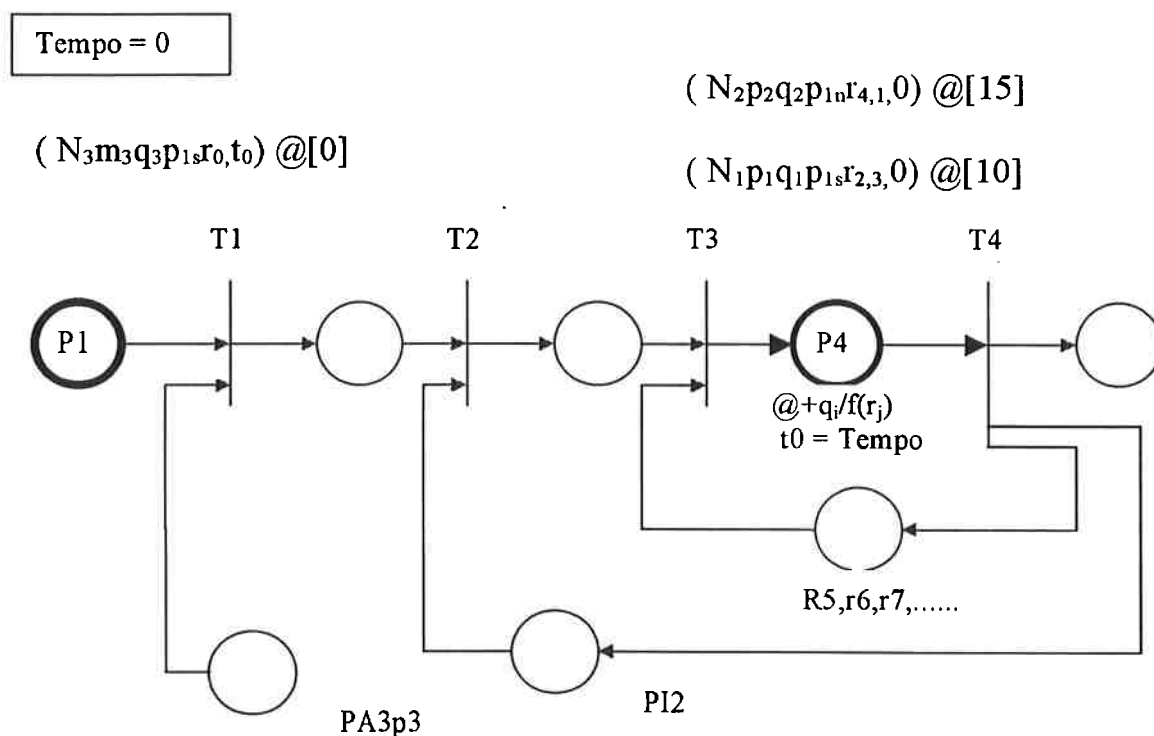


Figura 27: Rede TCP do Porto de Granel – (T3,N2)

No tempo corrente somente as marcações geradas pela evolução da marca representando o navio 3, N3, pode ocorrer. Entretanto, por questões técnicas o navio 3 somente pode ser ancorado no píer PI1s. Logo, a marca N3 não esta habilitada em P2, conforme mostrado na figura 28:

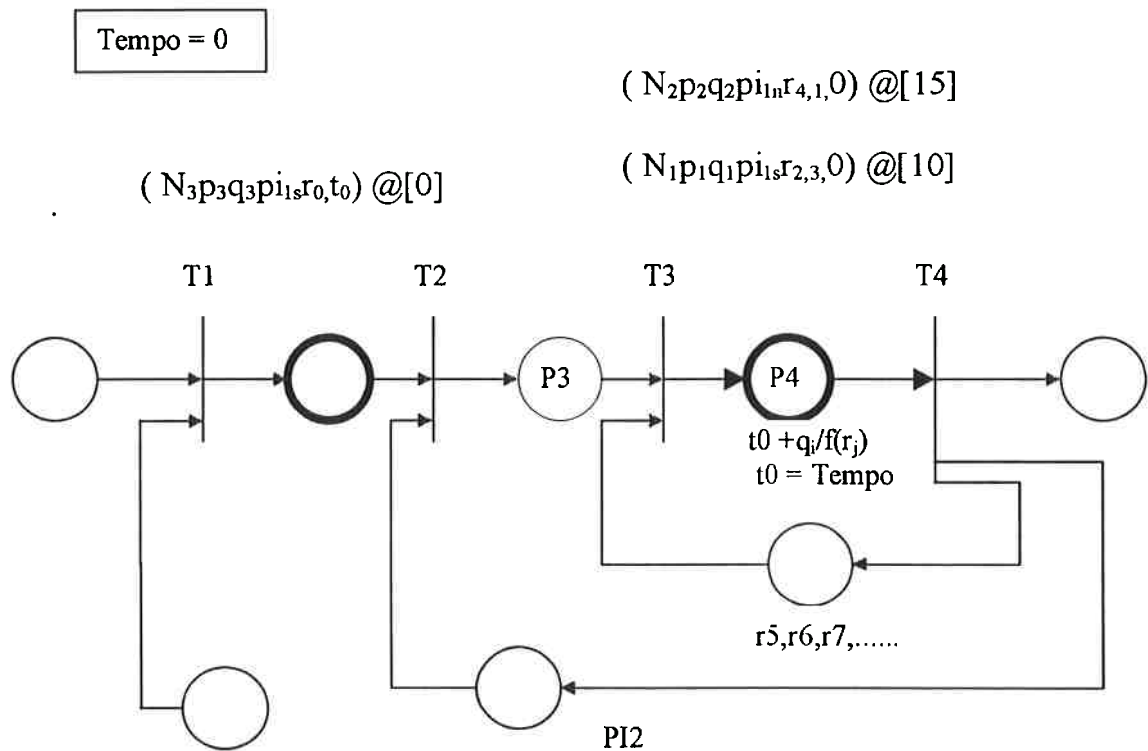


Figura 28: Rede TCP do Porto de Granel – (T1,N3)

Em P2, a marca representando o navio 3 somente será habilitada para recurso do píer P1s em função da restrição imposta pelo próprio navio. Em geral, isto ocorre por critérios técnicos. Logo, como somente o píer PI2 está disponível, isto implica que  $b_7(T_2, N_3)$  não está habilitada. Entretanto  $b_7$  ficará habilitada com a disponibilização do recurso retido por  $N_1$  ao final de seu processamento.

Não havendo nenhum elemento de ligação neste corrente tempo habilitado e pronto, (por ex.  $N_3$  não está habilitado e  $N_1$  e  $N_2$  apesar de habilitado não estão prontos). Neste casos havendo elementos de ligação habilitado nos avançamos o relógio global até que o primeiro elemento de ligação habilitado torna-se pronto, por exemplo em  $t=10$ . Logo o elemento de ligação  $(T_4, N_1)$  está habilitado e pronto gerando uma nova marcação, conforme figura 29.

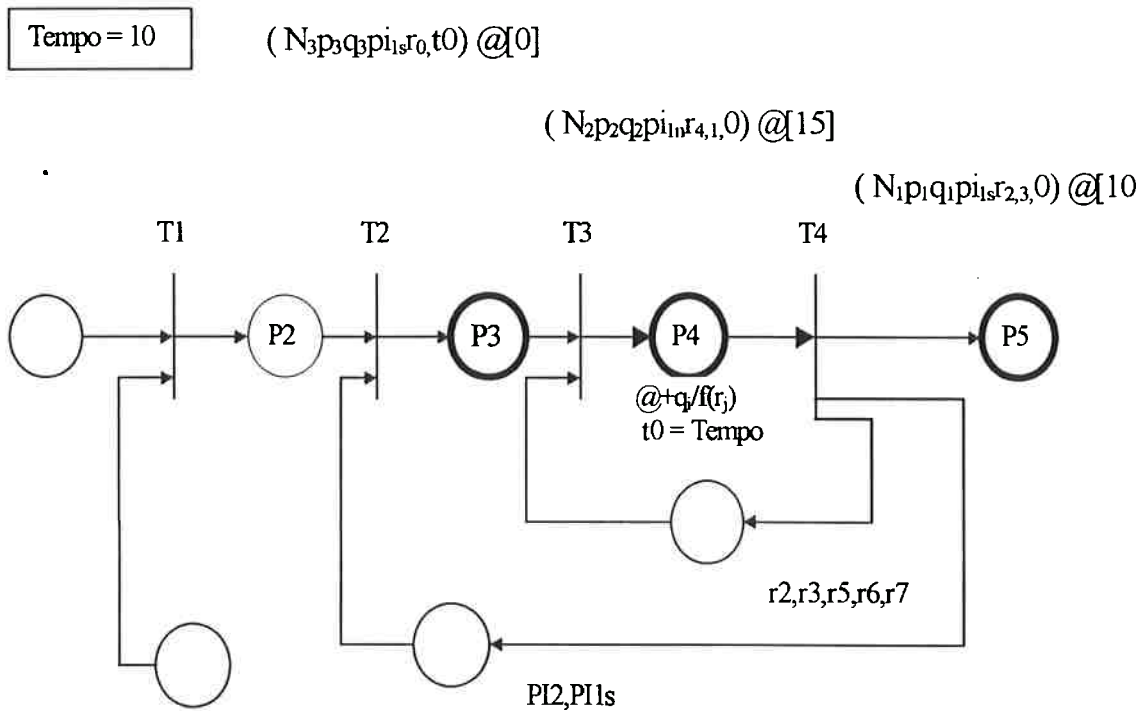


Figura 29: Rede TCP do Porto de Granel –  $(T_4, N_1)[10]$

Os recursos utilizados neste instante, tais como  $r_1$  e  $r_3$  utilizados por  $N_1$  em  $T_3$  bem como  $PI_{1s}$  utilizado em  $T_2$ , retornam respectivamente para  $P_8$  e para  $P_7$ . Neste momento o elemento de ligação  $(T_2, N_3)$  torna-se habilitado e pronto, gerando uma nova marcação em  $P_3$ , conforme figura 29.

Não há rotas disponíveis em  $P_8$ , neste instante, para ligar a origem  $PA_3$  ao destino  $PI_{1s}$ , uma vez que segundo a tabela 4, são as rotas  $r_1$  e  $r_4$ . Neste caso, não havendo nenhum elemento de ligação habilitado, então o relógio global é alterado para  $t=15$ . Neste instante o elemento de ligação  $(T_4, N_2)$  torna-se habilitado e pronto, gerando assim, uma nova marcação, conforme figura 30.

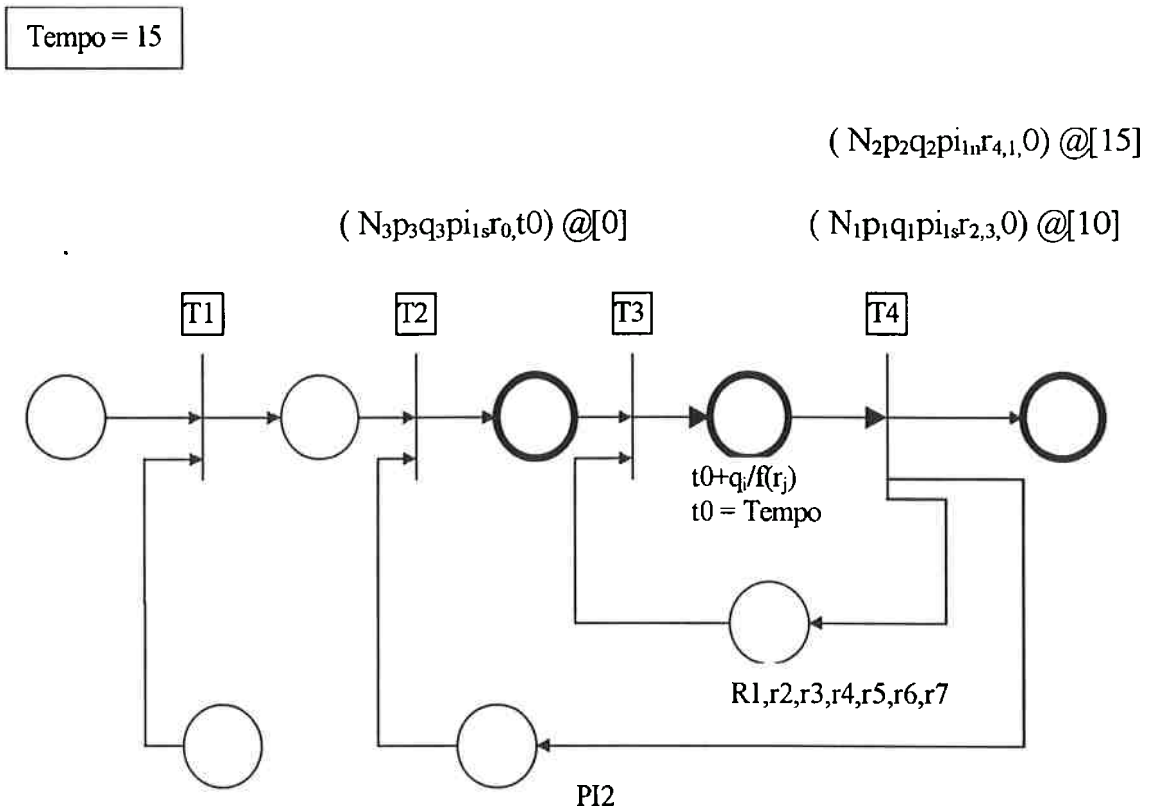


Figura 30: Rede TCP do Porto de Granel –  $(T_4, N_2)[15]$

Havendo neste instante rotas disponíveis em P8, isto é as rotas  $r_1$  e  $r_4$ , torna o elemento de ligação  $(T_3, N_3)$  habilitado e pronto dentro do tempo do relógio global  $t=15$ , gerando assim uma nova marcação, conforme figura 31.

Pelo uso da tabela 4 e supondo que a carga solicitada pelo navio  $N_3$  é de 84.000 ton., e que a rota utilizada seja  $r_1$ , temos que o tempo de processamento de embarque médio será de 8,4 horas, sendo portanto, este valor acrescido ao tempo de termino que é adicionado a marca  $N_3$  em P4.

Não havendo mais nenhum elemento de ligação habilitado e pronto, avançamos o tempo corrente para o próximo elemento de ligação habilitado para torná-lo pronto.



Neste caso o relógio passaria para  $t=23,4$ , logo  $N_3$  está habilitado e pronto, e portanto a nova marcação e apresentada na figura 32.

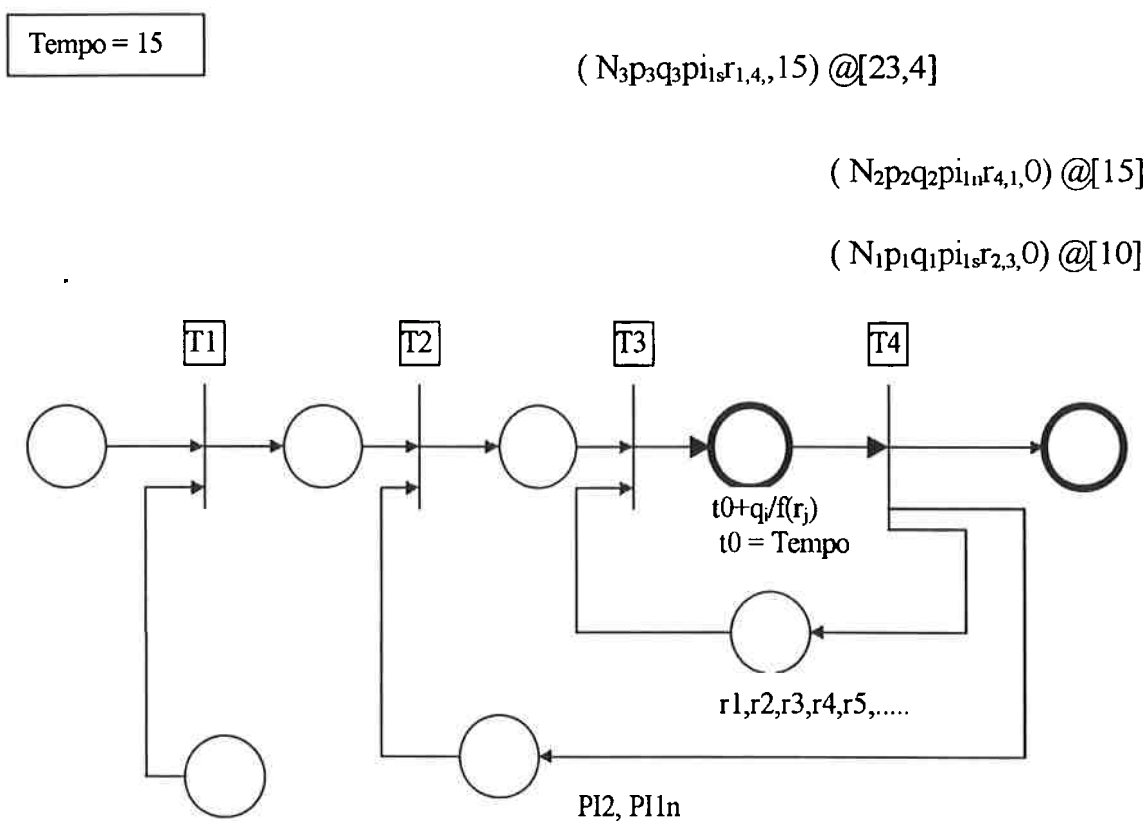


Figura 31: CP-net do Porto de Granel –  $(T3, N3)[15]$

Para atendimento dos 3 (Três) navios a simulação teria chegado ao fim no tempo corrente  $t=23,4$ , onde todas as marcas estariam em  $P_6$ , que é o ponto final da rede. O conteúdo das marcas registram o histórico de sua evolução na rede e com este histórico podemos montar gráficos, avaliar desempenho, levantar estatística de atendimento, multa e prêmio, etc., conforme figura 33.

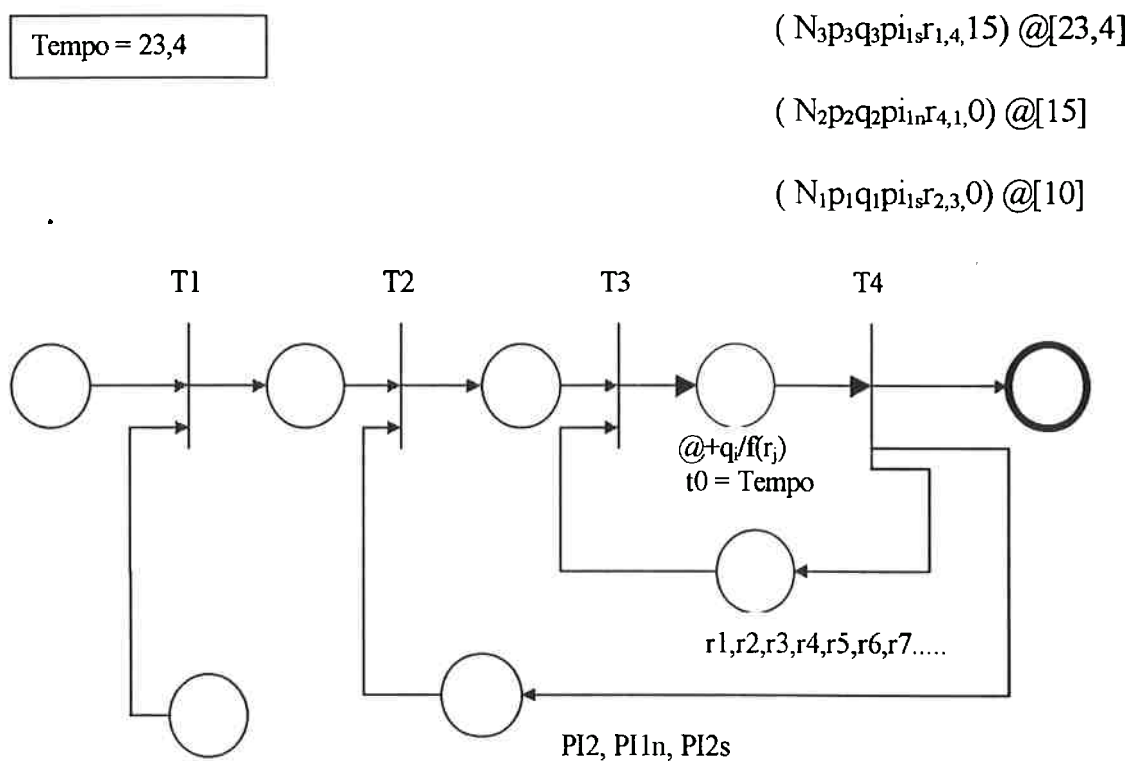


Figura 32: Rede TCP do Porto de Granel – Final da Simulação

Como resultado da simulação a marcação final depende da chegada de novos navios e da reposição das pilhas de material a embarcar nos pátios, entretanto, olhando apenas para cenário representado pelos três navios obtêm-se o resultado apresentado na figura 33.

Plotando o resultado em um gráfico teríamos:

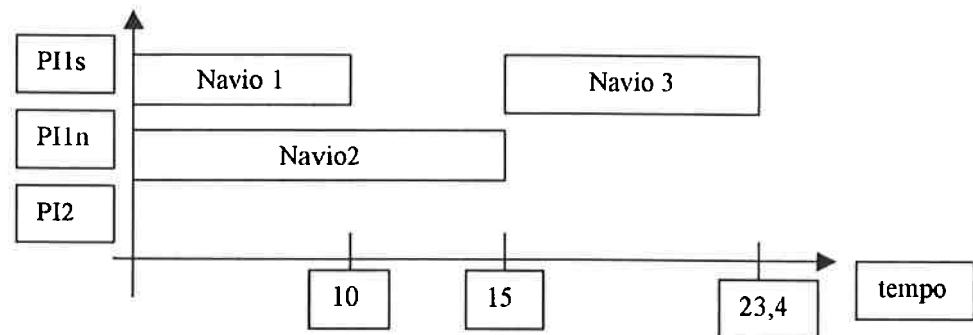


Figura 33: Resultado da Simulação

A seqüência da simulação ocorreria pela realimentação dos pátios em P9 com P10 e formação de novas pilhas em P6, além da chegada de novos navios em P1. Poderíamos verificar que com 3 navios a tarefa de programar seu atendimento utilizando um pequeno número de recursos, por exemplo, a pilha onde está estocado o material e as rotas. É relativamente simples utilizar a metodologia proposta para o problema de planejamento. Entretanto, o problema começa a ganhar complexidade a medida que crescem o número de recursos e as decisões sobre o uso destes recursos com o objetivo de encontrar uma boa solução, passando a ser de fundamental importância para o programador. Como já citado, a escolha sobre os recursos disponíveis é fortemente influenciada pelo homem de programação. A escolha do recurso no nível da rede de Petri (Nível estruturante da decisão em nosso modelo proposto) foi meramente arbitrada sem levar em conta os critérios utilizados pelo planejador nos setores de planejamento e programação para o caso de uma programação real. Em casos mais complexos, a escolha passa por análises complexas ou decisões nebulosas em que o programador não têm a visão correta dos limites e conseqüências ao se adotar esta ou aquela decisão na busca de uma boa solução para o todo. Para o exemplo, o gráfico de ocorrência obtido pela evolução da marcação da rede pode ser construída, conforme figura 34.

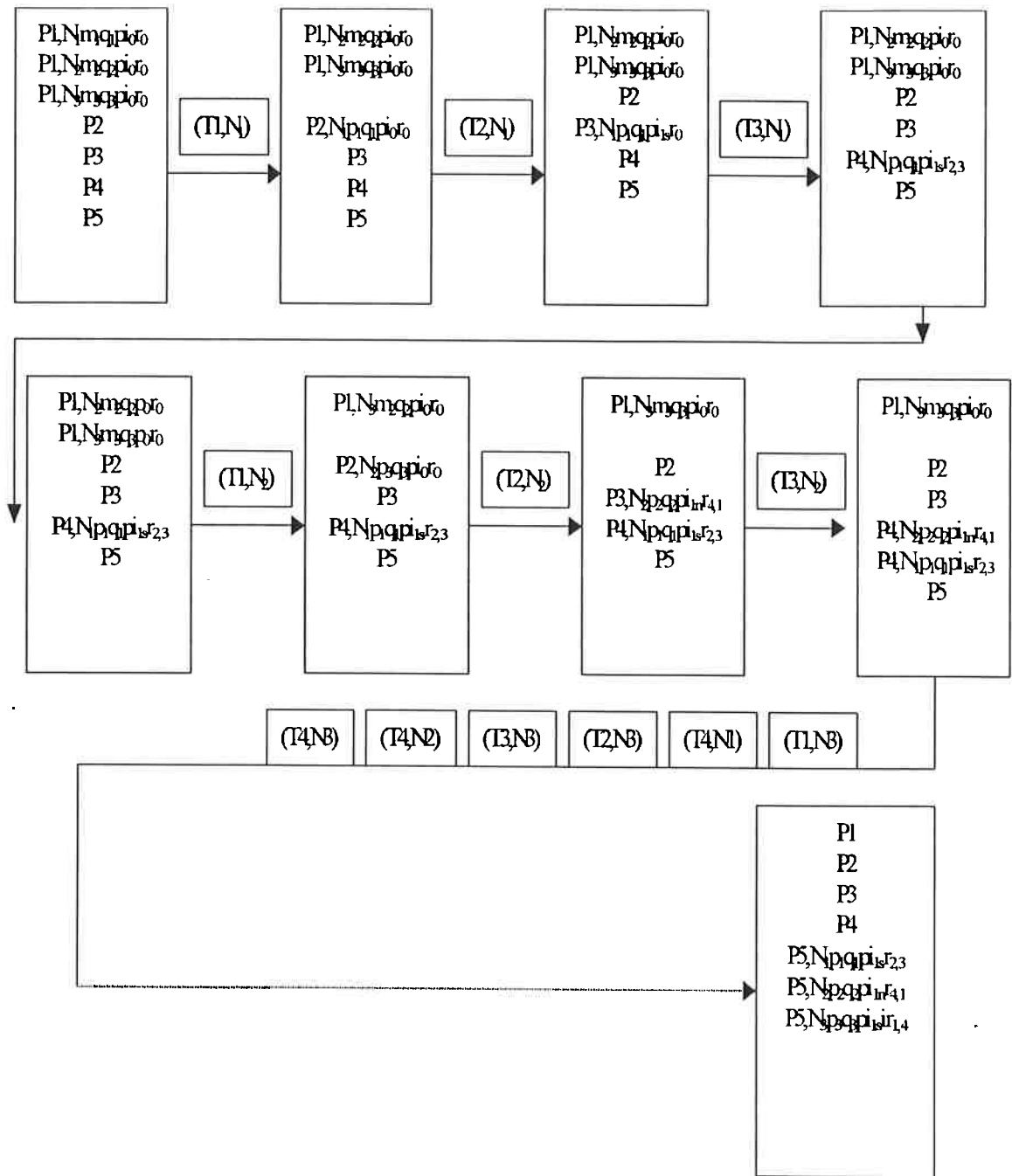


Figura 34: Gráfico de ocorrência

Na figura 27, observamos que a seqüência de disparo (T4,N1) e (T3,N3) é determinada pelo fato da rede ser temporizada, uma vez que o recurso necessário a N3 fica retido por um determinado tempo por N1. Esta seqüência poderia não ser a mesma em redes não temporizada, o que resultaria num outro gráfico de ocorrência.

A seqüência de ocorrência em uma rede de Petri colorida não temporizada é consequência direta das regras de habilitação e regras de ocorrência, e portanto, provas aqui são omitidas. Nota-se que uma rede de Petri colorida não temporizada, devido a restrição de tempo de uma TCPN, freqüentemente possui seqüência de ocorrência que não pode ser determinada de uma seqüência de ocorrência de uma rede temporizada.

Considerando o estudo de caso tratado até aqui, o gráfico de ocorrência de uma rede colorida não temporizada é a mesma para rede colorida e temporizada a menos da seqüência obrigatória descrita na figura 34, em função da restrição de tempo imposta a uso do recurso  $PI_{1s}$ . Para a TCPN, em geral, somente é possível alcançar algumas das marcações alcançadas pela UCPN. Quando uma TCPN alcança uma marcação, a marcação seguinte não mais depende do elemento de ligação estar habilitado, caso da rede não temporizada, e sim de estar pronto, no modelo de tempo corrente. Portanto, certas marcações de uma UCPN nunca serão “teoricamente” alcançadas por uma TCPN. Os conflitos comuns numa UCPN passam a deixar de existir ou serem raros numa TCPN. Entretanto o comportamento de uma TCPN é totalmente determinístico.

A figura 33 apresenta uma solução que está contida no conjunto possíveis de soluções para o exemplo considerado. A árvore contendo todas as possíveis soluções para o problema é apresentada pelo quadro a seguir, contido entre as páginas 104 e 116. Neste quadro enumeramos apenas as soluções em que estão mantida as ordens de chegada dos navios. As soluções com mudança de ordem são descartadas uma vez que no problema do porto a ordem de chegada dos navios é sempre mantida, FIFO. A enumeração garante para a dimensão do problema proposto todas as possíveis soluções, não sendo portanto, necessário o uso de simuladores.

A notação utilizada no quadro que se segue está assim definida: Navio(N1,N2,N3)\_Pier(P1S,P1N,P2)\_ROTAS( (Rota Utilizada) , (Rotas Bloqueadas) ) [(Tempo início de alocação da rota e bloqueios), (Tempo fim de alocação da rota e bloqueios)].

**QUADRO DE SOLUÇÕES (PAGINAS 101 À 115)**

<b>Solução</b>	<b>Tempo de Espera</b>	<b>Tempo de Término</b>
N1_P1S_ROT(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[10,18.4]	10	18.4
<b>Média</b>	3.33	15.89
N1_P1S_ROT(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1N_ROT(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[7.8,16.2]	7.8	16.2
<b>Média</b>	2.6	14.42
N1_P1S_ROT(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1N_ROT(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROT(1,4)[7.8,16.2]	7.8	16.2
<b>Média</b>	2.6	12.09
N1_P1S_ROT(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1N_ROT(7,6)[0,19.8]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[7.8,16.2]	7.8	16.2
<b>Média</b>	2.6	14.42
N1_P1S_ROT(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	15.13
N1_P1S_ROT(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[10,18.4]	10	18.4
<b>Média</b>	3.33	15.89
N1_P1S_ROT(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	15.06
N1_P1S_ROT(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1N_ROT(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[7,15.4]	7	15.4
<b>Média</b>	2.33	13.89

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1S_ROTA(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1N_ROTA(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[7,15.4]	7	15.4
<b>Média</b>	2.33	13.89
N1_P1S_ROTA(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[10,18.4]	10	18.4
<b>Média</b>	3.33	15.89
N1_P1S_ROTA(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROTA(1,4)[10,18.4]	10	18.4
<b>Média</b>	3.33	13.55
N1_P1S_ROTA(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1N_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[7,15.4]	7	15.4
<b>Média</b>	2.33	13.89
N1_P1S_ROTA(2,3)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	15.14
N1_P1S_ROTA(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(1,4)[13.5,21.9]	15	21.9
<b>Média</b>	4.5	15.14
N1_P1S_ROTA(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1N_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[7.8,16.2]	7.8	16.2
<b>Média</b>	2.6	14.42
N1_P1S_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	15.13

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1S_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1N_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	13.92
N1_P1S_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(4,1)[0,15]	0	15
N3_P1S_ROTA(1,4)[15,23.4]	15	23.4
<b>Média</b>	5	16.13
N1_P1S_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[10,18.4]	10	18.4
<b>Média</b>	3.33	
N1_P1S_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[10,18.4]	10	18.4
<b>Média</b>	3.33	15.89
N1_P1S_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROTA(1,4)[10,18.4]	10	18.4
<b>Média</b>	3.33	13.55
N1_P1S_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[10,18.4]	10	18.4
<b>Média</b>	3.33	15.89
N1_P1S_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1N_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[6.36,14.76]	6.36	14.76
<b>Média</b>	2.12	13.46
N1_P1S_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1N_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[6.36,14.76]	6.36	14.76
<b>Média</b>	2.12	13.46



Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1S_ROTAS(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1N_ROTAS(4,1)[0,15]	0	15
N3_P1S_ROTAS(1,4)[15,23.4]	15	23.4
<b>Média</b>	5	14.92
N1_P1S_ROTAS(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1N_ROTAS(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTAS(1,4)[6.36,14.76]	6.36	14.76
<b>Média</b>	2.12	13.46
N1_P1S_ROTAS(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTAS(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTAS(1,4)[10,18.4]	10	18.4
<b>Média</b>	3.33	15.89
N1_P1S_ROTAS(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1N_ROTAS(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTAS(1,4)[7.8,16.2]	7.8	16.2
<b>Média</b>	2.6	14.42
N1_P1S_ROTAS(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTAS(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTAS(1,4)[10,18.4]	10	18.4
<b>Média</b>	3.33	15.89
N1_P1S_ROTAS(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTAS(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTAS(4,1)[10,19.33]	10	19.33
<b>Média</b>	3.33	16.2
N1_P1S_ROTAS(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1N_ROTAS(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTAS(4,1)[7.8,17.13]	7.8	17.13
<b>Média</b>	2.6	14.74
N1_P1S_ROTAS(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTAS(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTAS(4,1)[10,19.33]	10	19.33
<b>Média</b>	3.33	16.2

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1S_ROT(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(4,1)[10,19.33]	10	19.33
<b>Média</b>	3.33	16.2
N1_P1S_ROT(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1N_ROT(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(4,1)[7.8,17.13]	7.8	17.13
<b>Média</b>	2.6	14.74
N1_P1S_ROT(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1N_ROT(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROT(4,1)[7.8,17.13]	7.8	17.13
<b>Média</b>	2.6	12.4
N1_P1S_ROT(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1N_ROT(7,6)[0,19.8]	0	19.28
N3_P1S_ROT(4,1)[7.8,17.13]	7.8	17.13
<b>Média</b>	2.6	14.74
N1_P1S_ROT(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	15.44
N1_P1S_ROT(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(4,1)[10,19.33]	10	19.33
<b>Média</b>	3.33	16.2
N1_P1S_ROT(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	15.44
N1_P1S_ROT(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1N_ROT(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(4,1)[7,16.33]	7	16.33
<b>Média</b>	2.33	14.2

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1S_ROTA(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1N_ROTA(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[7,16.33]	7	16.33
<b>Média</b>	2.33	14.2
N1_P1S_ROTA(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[10,19.33]	10	19.33
<b>Média</b>	3.33	16.2
N1_P1S_ROTA(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROTA(4,1)[10,19.31]	10	19.33
<b>Média</b>	3.33	13.86
N1_P1S_ROTA(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1N_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[7,16.33]	7	16.33
<b>Média</b>	2.33	14.2
N1_P1S_ROTA(2,3)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	15.44
N1_P1S_ROTA(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(4,1)[13.5,22.83]	10	22.83
<b>Média</b>	3.33	15.44
N1_P1S_ROTA(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1N_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[7.8,17.1]	7.8	17.1
<b>Média</b>	2.6	14.73
N1_P1S_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	15.44

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1S_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1N_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	14.23
N1_P1S_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(4,1)[0,15]	0	15
N3_P1S_ROTA(4,1)[15,24.33]	15	24.33
<b>Média</b>	5	16.44
N1_P1S_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[10,19.33]	10	19.33
<b>Média</b>	3.33	16.2
N1_P1S_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[10,19.33]	10	19.33
<b>Média</b>	3.33	16.2
N1_P1S_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROTA(4,1)[10,19.33]	10	19.33
<b>Média</b>	2.33	13.86
N1_P1S_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[10,19.33]	10	19.33
<b>Média</b>	3.33	16.2
N1_P1S_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1N_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[6.36,15.69]	6.36	15.69
<b>Média</b>	2.12	13.77
N1_P1S_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1N_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[6.36,15.69]	6.36	15.69
<b>Média</b>	2.12	13.76

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1S_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1N_ROTA(4,1)[0,15]	0	15
N3_P1S_ROTA(4,1)[15,24.33]	15	24.33
<b>Média</b>	5	15.23
N1_P1S_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1N_ROTA(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[6.36,15.69]	6.36	15.69
<b>Média</b>	2.12	13.76
N1_P1N_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	19.29
N1_P1N_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	19.29
N1_P1N_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROTA(4,1)[12.27,21.6]	12.27	21.6
<b>Média</b>	4.09	14.62
N1_P1S_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROTA(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	19.29
N1_P1N_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1S_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	18.08
N1_P1N_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1S_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	18.08

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1N_ROTA(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.98
N1_P1N_ROTA(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1S_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.25
N1_P1N_ROTA(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1S_ROTA(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROTA(1,4)[12.27,20.67]	12.27	20.67
<b>Média</b>	4.09	13.58
N1_P1N_ROTA(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1S_ROTA(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.25
N1_P1N_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	15.13
N1_P1N_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.98
N1_P1N_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	15.13
N1_P1N_ROTA(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1S_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	17.98

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1N_ROT(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1S_ROT(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[19.28,27]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	17.98
N1_P1N_ROT(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.98
N1_P1N_ROT(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROT(1,4)[12.27,20.68]	12.27	20.68
<b>Média</b>	4.09	14.31
N1_P1N_ROT(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1S_ROT(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	17.98
N1_P1N_ROT(2,3)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	15.13
N1_P1N_ROT(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	15.13
N1_P1N_ROT(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1S_ROT(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.25
N1_P1S_ROT(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	15.13

<b>Solução</b>	<b>Tempo de Espera</b>	<b>Tempo de Término</b>
N1_P1N_ROT(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1S_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(1,4)[13.5,21.9]	13.5	21.9
<b>Média</b>	4.5	13.92
N1_P1N_ROT(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(4,1)[0,15]	0	15
N3_P1S_ROT(1,4)[15,23.4]	15	23.4
<b>Média</b>	5	16.13
N1_P1N_ROT(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.98
N1_P1N_ROT(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.98
N1_P1N_ROT(5)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROT(1,4)[12.27,21.9]	12.27	20.67
<b>Média</b>	4.09	14.31
N1_P1S_ROT(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.98
N1_P1N_ROT(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1S_ROT(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	17.77
N1_P1N_ROT(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1S_ROT(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	17.77



<b>Solução</b>	<b>Tempo de Espera</b>	<b>Tempo de Término</b>
N1_PIN_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1S_ROTA(4,1)[0,15]	0	15
N3_P1S_ROTA(1,4)[15,23.4]	15	23.4
<b>Média</b>	5	14.92
N1_PIN_ROTA(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1S_ROTA(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	17.77
N1_PIN_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.98
N1_PIN_ROTA(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1S_ROTA(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.25
N1_PIN_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(1,4)[19.28,27.68]	19.28	27.68
<b>Média</b>	6.43	18.98
N1_PIN_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(3,2)[0,19.8]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	19.29
N1_PIN_ROTA(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1S_ROTA(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	18.56
N1_PIN_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	19.29

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1N_ROTA(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	19.29
N1_P1N_ROTA(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1S_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	18.56
N1_P1N_ROTA(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1S_ROTA(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROTA(4,1)[12.27,21.6]	12.27	21.6
<b>Média</b>	4.09	13.89
N1_P1N_ROTA(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1S_ROTA(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	18.56
N1_P1N_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	15.44
N1_P1N_ROTA(5)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	19.29
N1_P1N_ROTA(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROTA(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROTA(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	15.44
N1_P1N_ROTA(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1S_ROTA(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROTA(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	18.29

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1N_ROT(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1S_ROT(7,6)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	18.29
N1_P1N_ROT(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(5)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	19.29
N1_P1N_ROT(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(6,7)[0,12.27]	0	12.27
N3_P1S_ROT(4,1)[12.27,21.6]	12.27	21.6
<b>Média</b>	4.09	14.62
N1_P1N_ROT(1,4)[0,7]	0	7
N2_P1S_ROT(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	18.29
N1_P1N_ROT(2,3)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	15.44
N1_P1N_ROT(3,2)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	15.44
N1_P1N_ROT(4,1)[0,7.8]	0	7.8
N2_P1S_ROT(2,3)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	18.56
N1_P1S_ROT(5)[0,10]	0	10
N2_P1N_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	15.44

Solução	Tempo de Espera	Tempo de Término
N1_P1N_ROT(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1S_ROT(1,4)[0,13.5]	0	13.5
N3_P1S_ROT(4,1)[13.5,22.83]	13.5	22.83
<b>Média</b>	4.5	14.23
N1_P1N_ROT(7,6)[0,10]	0	10
N2_P1S_ROT(4,1)[0,15]	0	15
N3_P1S_ROT(4,1)[15,24,33]	15	24,33
<b>Média</b>	5	16.44
N1_P1N_ROT(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1S_ROT(4,1)[0,15]	0	15
N3_P1S_ROT(4,1)[15,24,33]	15	24.33
<b>Média</b>	5	15.23
N1_P1N_ROT(6,7)[0,6.36]	0	6.36
N2_P1S_ROT(3,2)[0,19.28]	0	19.28
N3_P1S_ROT(4,1)[19.28,28.61]	19.28	28.61
<b>Média</b>	6.43	18.08

No quadro de soluções mostrado o tempo médio de término variou de 12.09 a 19.29 e o tempo médio de espera variou de 2.12 a 6.43. Estes dados serão considerados para medir a qualidade da solução a ser obtida com a simulação considerando o nível tático.

### 5.3.2. Simulação do Nível Tático.

No exemplo do porto, para a modelagem da rede de Petri no primeiro nível, as funções anexadas aos arcos apenas caracterizam a permissão ao fluxo de marcas, quando a transição habilitada é disparada. Entretanto, o operador numa situação real aplica seus conhecimentos sobre o processo e juntamente com uma estratégia de atendimento baseado numa política vigente, que envolve os níveis superiores da empresa, executa o planejamento e a programação de atendimento a demanda gerada pela fila de navios. Para isto, leva em conta as etapas estruturadas no primeiro nível,

“Nível Estruturante”, considerando em cada etapa da decisão de usos dos recursos compartilhados da planta, adotando uma das estratégias descritas abaixo.

Em T1:

- Havendo mais de uma localização que atenda a carga solicitada, retire do local com menor estoque.
- Havendo mais de uma localização que atenda a carga solicitada, retire do local mais próximo do píer.
- Havendo mais de uma localização que atenda a carga solicitada, retire dos dois ou mais lugares ao mesmo tempo.

A decisão ao se adotar uma das estratégias acima provoca efeitos diferenciados sobre a planta. Por exemplo, a retirada de material em mais de uma localização, em geral, causa grande impacto; entretanto, ao se adotar esta estratégia, busca-se atender a um navio com um fluxo maior e com isto diminuir sua permanência no porto. Em geral, a fila de espera influencia nesta tomada de decisão, ou seja, quanto maior a fila, maior o tempo de espera e maior a multa pelo atraso no atendimento.

As demais estratégias seguem a mesma análise, uma vez que a política de formação das pilhas de materiais é para evitar o cruzamento entre rotas ou em regiões com poucas opções de retirada e com isto evitando formar gargalos de escoamento.

Em T2:

- Havendo mais de um píer liberado, escolha o berço por tipo de navio.
- Havendo mais de um píer liberado, associe este píer às localizações de materiais para avaliar o píer de melhor atendimento.
- Os piers atendem prioritariamente navios específicos; entretanto, esta prioridade pode mudar para atender uma função objetivo global.

O porto em estudo possui 3 berços de atracação (pier), sendo um *off-shore* com capacidade de embarcar até 16.000 ton./hora e com capacidade de receber navios com até 300.000 ton., diferentemente dos outros dois, que são de menor capacidade, para navios com até 100.000 ton.. Impõe-se ao porto a necessidade da formação de 2(duas) filas de navios, sendo que ambas utilizam uma estratégia de atendimento “FIFO”. Entretanto, não havendo navios para o pier de maior capacidade, pode haver sua utilização por navios menores, desde que seu tempo estimado de carregamento não ultrapasse um tempo limite de chegada de um navio preferencial, que venha gerar uma multa maior ou um prêmio menor que o não cruzamento das filas.

Outra situação é encontrada para os casos em que a fila do pier de maior capacidade está grande, enquanto o de menor capacidade está com uma fila menor ou vazia. Pode-se usar este berço menor até valor de carga compatível com o calado do navio para o berço, e então, trocá-lo para o berço de maior capacidade, para completar sua carga.

Em tese, o atendimento com duas filas e com regras de atendimento FIFO e com políticas não muito claras de quando deve ser realizada uma eventual alteração da fila, não é difícil provar que qualquer atendimento utilizando uma heurística inteligente, por mais simples que seja, resultará num melhor atendimento do porto ao carregamento dos navios.

Em T3:

- Havendo mais de uma rota, escolha a solução que atenda os objetivos de menor tempo médio de espera, menor custo de operação e menor médio tempo de término.

Neste caso, o programador avalia, classifica e seleciona uma determinada rota levando em consideração os objetivos propostos, muitas vezes mal definidos ou vagos, de uma determinada alternativa com relação a uma determinada variável, como por exemplo o tamanho da carga, buscando sempre atender aos objetivos globais que são a menor multa ou o maior prêmio.

De maneira a simplificar o estudo de caso sem perder a essência da proposta para uma ferramenta adequada ao tratamento de processos decisórios, como exemplo de aplicação, utiliza-se apenas o processo de escolha de rota, uma vez que é o processo de decisão de maior impacto no processo de atendimento do porto, não esquecendo, entretanto, que o seqüenciamento no atendimento à fila, também, traria substancial melhoria no processo de atendimento global do porto. Outra questão é o fato da fila ser dinâmica, o que dificulta o uso de heurísticas, uma vez que é comum em fila dinâmica o uso conceito de inserção de espera, não sendo contudo o alvo deste trabalho. Portanto, considera-se que a fila de navio seja estática por um certo período de tempo e que as cargas destinadas ao atendimento neste período estejam disponíveis nos pátios de armazenagem.

#### **6.3.2.1 Avaliação do nível tático pela análise da transição T3**

O exemplo que se segue é o tratamento dado ao processo de decisão sobre o uso dos recursos na transição T3. Para isto, utilizamos a teoria dos conjuntos difusos para a modelagem do conhecimento do operador sobre a utilização destes recursos, sendo que as demais transições teriam tratamento semelhante.

A modelagem do conhecimento utilizando a teoria de conjuntos difusos inicia-se pela construção das funções de pertinência que possuem a capacidade de modelar o grau de satisfação que uma determinada ação possui, avaliando as condições presentes no momento de decidir por esta ou aquela ação.

Para construir as funções de pertinência buscamos pesquisar as ações operacionais e gerenciais, juntamente com as políticas de atendimento, que melhor representassem o conhecimento operador sobre o processo de planejamento e programação do porto. O critério utilizado foi modelar um conjunto difuso, para cada objetivo ou restrição, em razão da natureza imprecisa que determina a escolha de cada rota de acordo com suas características, no momento de selecioná-las para atendimento

de um determinado embarque. Esta modelagem foi feita de maneira que os dados colhidos representassem qualitativamente o conhecimento sistemático dos operadores sobre a planta.

Os conjuntos difusos foram montados para 3 objetivos, em geral conflitantes que norteiam a tomada de decisão na transição T3, ou seja: bloqueio de uma rota sobre planta, fluxo nominal da rota e custo operacional da rota. O grau de satisfação de uma determinada rota com relação a um determinado objetivo é definido pelos valores esperado de cada objetivo levando em consideração as características do embarque num determinado estado do processo, por ex.: carga a ser embarcada.

A carga total embarcada em um navio pode ser formada por um ou mais materiais diferentes. O ordem em que estes materiais são embarcados é definida por um plano de carga executado pelo comandante do navio. Entretanto, para simplificar a análise, estamos considerando que cada navio demande por apenas uma carga, sem que isto cause prejuízo para a validação do método proposto.

#### **a) Impacto do uso rota sobre a dinâmica da planta**

O grau de satisfação ao objetivo de impacto representa o bloqueio que o uso de uma rota provoca na planta pela possibilidade de que as máquinas usadas por uma rota sejam concorrente de outras rotas. Este bloqueio tem um atenuante que é a carga a ser embarcada, ou seja, admite-se um maior bloqueio quanto maior for a carga a ser embarcada. Neste exemplo, as rotas foram classificadas pelo nível de bloqueio que é um elemento do conjunto de termos lingüísticos  $Bloqueio = \{\text{baixo, médio, alto}\}$  cujos valores possuem associados graus de pertinência. O operador não sabe avaliar o verdadeiro impacto gerado pelo bloqueio sem avaliar a carga a ser embarcada. A figura 35 apresenta o uso do raciocínio aproximado para a obtenção do valor esperado que representa o grau de conhecimento ao nível de impacto gerado pelo bloqueio considerando a carga a ser embarcada, que é um elemento do conjunto de termos lingüísticos  $Carga = \{\text{baixo, médio, alto}\}$ .



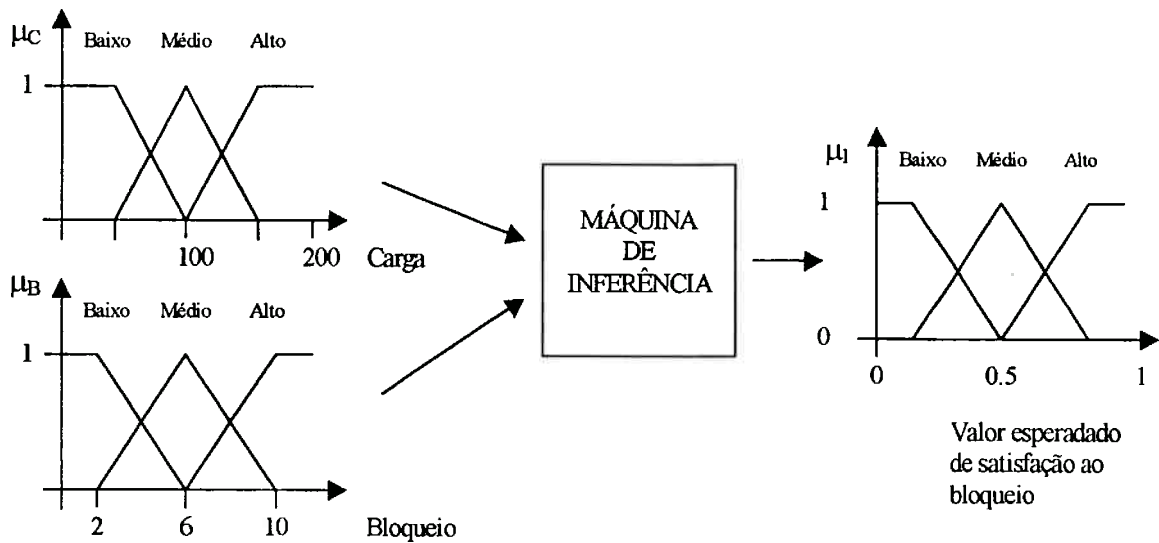


Figura 35: Obtenção do valor do conhecimento para a satisfação ao bloqueio

Conjunto de regras para a obtenção do grau de satisfação ao Bloqueio x Carga:

- Se a Carga é baixa e o Bloqueio baixo então a satisfação é média*
- Se a Carga é baixa e o Bloqueio médio então a satisfação é baixa*
- Se a Carga é baixa e o Bloqueio alto então a satisfação é baixa*
- Se a Carga é média e o Bloqueio baixo então a satisfação é alta*
- Se a Carga é média e o Bloqueio médio então a satisfação é média*
- Se a Carga é média e o Bloqueio alto então a satisfação é baixa*
- Se a Carga é alta e o Bloqueio baixo então a satisfação é alta*
- Se a Carga é alta e o Bloqueio médio então a satisfação é alta*
- Se a Carga é alta e o Bloqueio alto então a satisfação é média*

Os conjuntos difusos que fazem parte do universo de discurso bloqueio e carga podem ter suas curvas ajustadas dinamicamente em função dos resultados obtidos, isto é, busca-se através de uma função objetivo global, por exemplo menor tempo de atendimento, ajustar os limites de cada conjunto *fuzzy*. Para isto, repete-se a simulação alterando estes limites, buscando otimizar a função objetivo global. Isto, propicia a que cada cenário a programar tenha funções de pertinência ajustadas as características próprias do grupo de navios a serem atendidos pela programação.

### **b) Fluxo Nominal da Rota**

Agora, o universo de discurso é o fluxo nominal da rota. Para isto, tomamos por base o fluxo médio histórico da rota (representação qualitativa do fluxo nominal), que no nível estruturante será utilizado para a cálculo do tempo médio de atendimento do navio. O fluxo real da rota é influenciado pelo tipo de material a transportar e pelas condições físicas da pilha. Entretanto, optamos pelo fluxo histórico médio qualitativo para simplificarmos a abordagem do estudo de caso.

Assim, como no nível de impacto, as rotas foram classificadas pelo nível de fluxo que é um elemento do conjunto de termos lingüísticos  $Fluxo = \{ \text{baixo, médio, alto} \}$  cujos valores possuem associados graus de pertinência. Neste caso, as rotas com fluxo nominal grande são preferencialmente utilizados para as grandes cargas, as de fluxo nominal pequena são preferencialmente utilizadas para as cargas pequenas e as de fluxo médio são preferencialmente utilizados para as cargas médias. Entretanto, assim como no universo do nível de impacto, os limites de cada conjunto podem ser ajustados dinamicamente através da avaliação dos resultados, que podem ser obtidos por diferentes limites de cada conjunto, visando a otimização de uma função objetivo global, como já citada no nível de impacto. A figura 36 apresenta o uso do raciocínio aproximado para a obtenção do valor esperado que representa o grau de conhecimento ao fluxo da rota considerando a *Carga* a ser embarcada.

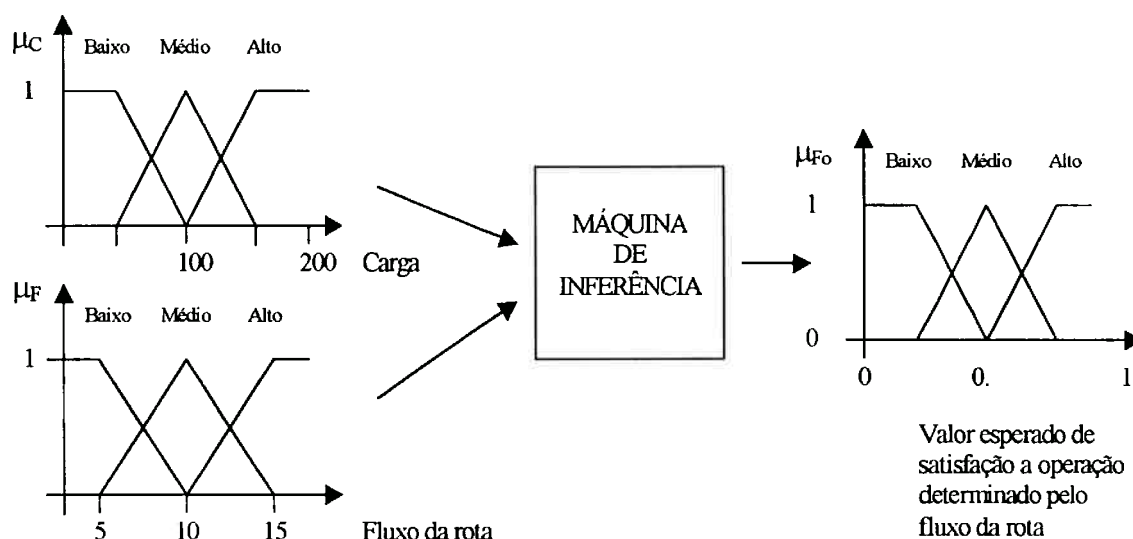


Figura 36: Obtenção do valor do conhecimento para a satisfação ao fluxo

Conjunto de regras para a obtenção do valor do conhecimento para a satisfação ao fluxo:

- Se a Carga é baixa e o Fluxo baixo então a Satisfação alta*
- Se a Carga é baixa e o Fluxo médio então a Satisfação baixa*
- Se a Carga é baixa e o Fluxo alto então a Satisfação baixa*
- Se a Carga é média e o Fluxo baixo então a Satisfação média*
- Se a Carga é média e o Fluxo médio então a Satisfação alta*
- Se a Carga é média e o Fluxo alto então a Satisfação baixa*
- Se a Carga é alta e o Fluxo baixo então a Satisfação baixa*
- Se a Carga é alta e o Fluxo médio então a Satisfação média*
- Se a Carga é alta e o Fluxo alto então a Satisfação alta*

Portanto, podemos ter diferentes conjuntos para cada universo de discurso, em função da carteira de navios a ser atendida num determinado período. A dinâmica de formação dos conjuntos num certo universo de discurso diminui a responsabilidade do acerto que o especialista deveria ter ao formular os limites para cada um dos conjuntos

fuzzy, além de focalizar a solução para a amostra sem se preocupar com uma possível diferença entre outras amostras, isto é, outros períodos de programação.

### c)Custo de Operação

Neste caso, o universo de discurso é o custo de operação de cada rota, que é função do número de equipamentos envolvidos na formação da rota, manutenções por tempo médio de uso, etc. Assim como no universo de nível de impacto e fluxo nominal, as rotas foram classificadas pelo nível de custo que é um elemento do conjunto de termos lingüísticos  $Custo = \{ \text{baixo, médio, alto} \}$  cujos valores possuem associados graus de pertinência. Os valores dos custos de operação na figura 37 é uma representação qualitativa, entretanto, por interesse interno da empresa seria facilmente ajustáveis à realidade dos custos da empresa. A figura 37 apresenta o uso do raciocínio aproximado para a obtenção do valor esperado que representa o grau de satisfação ao custo da rota considerando a *Carga* a ser embarcada.

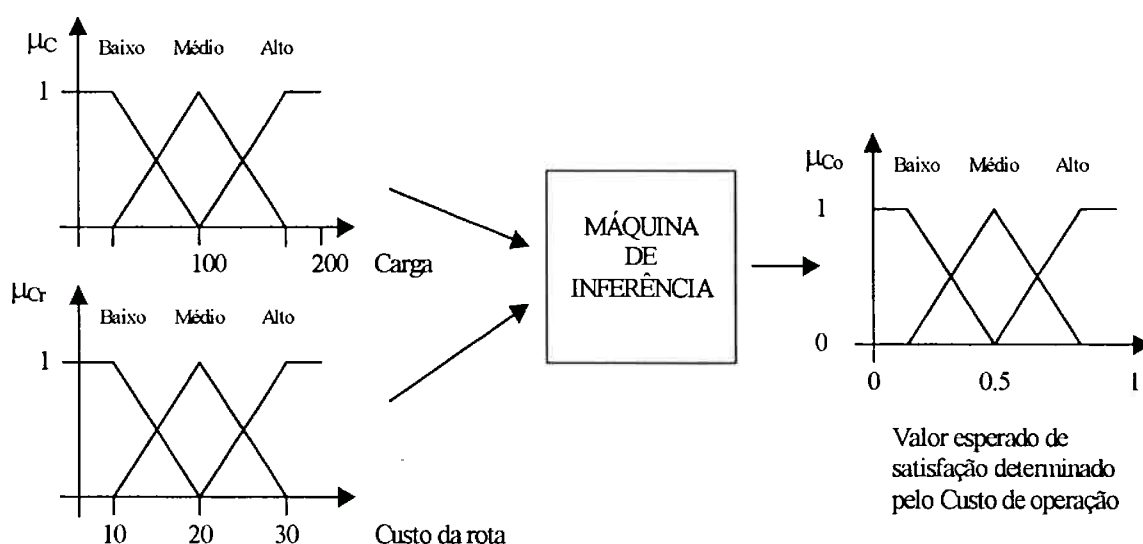


Figura 37: Obtenção do valor do conhecimento para a satisfação ao Custo

Conjunto de regras para a obtenção do valor do conhecimento para a satisfação ao Custo:

*Se a Carga é baixa e o Custo baixo então a Satisfação alta*  
*Se a Carga é baixa e o Custo médio então a Satisfação baixa*  
*Se a Carga é baixa e o Custo alto então a Satisfação baixa*  
*Se a Carga é média e o Custo baixo então a Satisfação alta*  
*Se a Carga é média e o Custo médio então a Satisfação média*  
*Se a Carga é média e o Custo alto então a Satisfação baixa*  
*Se a Carga é alta e o Custo baixo então a Satisfação alta*  
*Se a Carga é alta e o Custo médio então a Satisfação alta*  
*Se a Carga é alta e o Custo alto então a Satisfação média*

Novamente aqui, os limites de cada conjunto no universo de discurso tratado variam dinamicamente e podem ser ajustados por meio de uma avaliação dos resultados, olhando para uma função objetivo global. Neste caso, podemos obter limites diferentes para cada universo de discurso para diferentes carteiras de navios e por período a programar.

#### **6.3.2.2. Simulação do nível tático**

Para ilustrar nosso estudo de caso, é apresentado na tabela 6 os valores que representam características de um grupo de rotas que servirão para avaliação do nível tático na habilitação da transição T3 da figura 21, que novamente apresentamos na figura 38. Neste modelo foi considerado que a escolha do pier obedece o critério de seleção onde o nível de impacto do recurso pier está relacionado com uma análise de toda a fila e também da carga. No nosso exemplo o navio número 3 está direcionado para o pier PI1s enquanto os demais para os pier PI1s e PI1n. Portanto uma simples regra para alocação de navio em pier seria:

*Se a Carga é baixa e o Impacto de uso é alto então a Satisfação baixa*

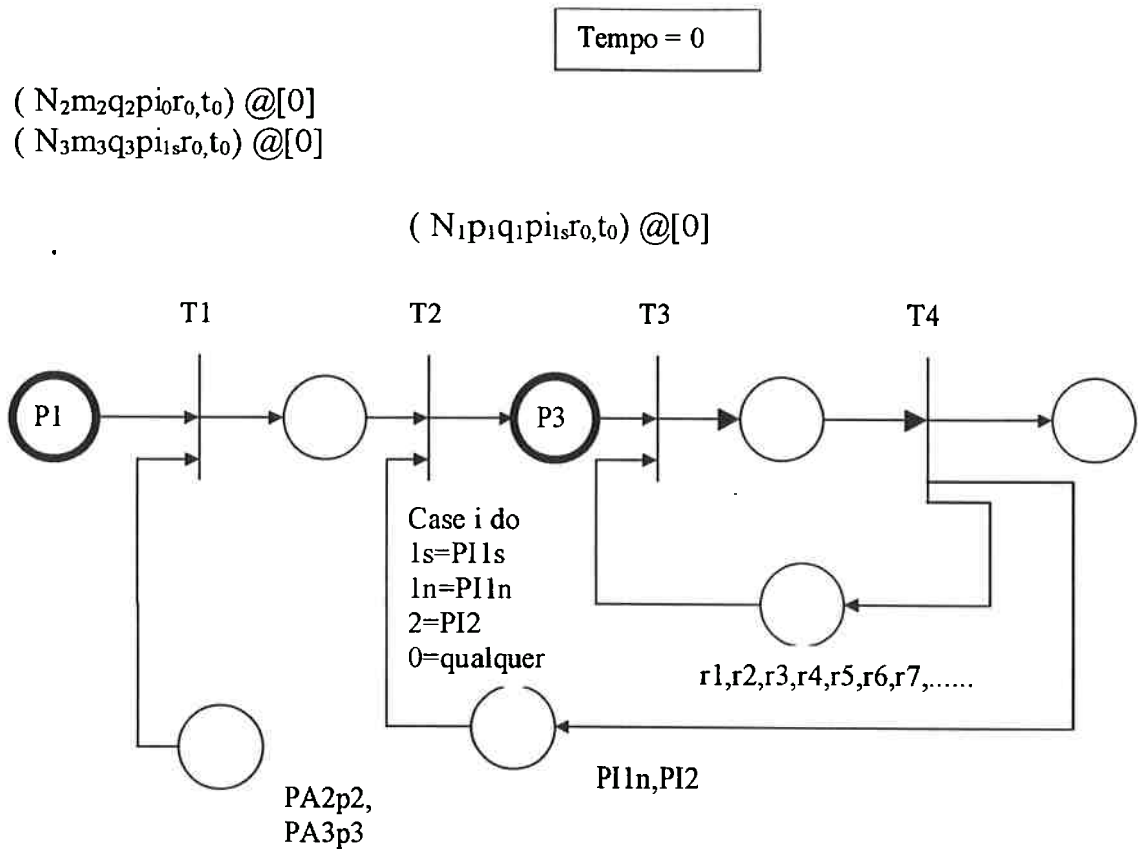
*Se a Carga é alta e o impacto de uso é alto então a Satisfação alta*

Portanto, utilizando estas regras para o exemplo a pier escolhido para o navio número 1, cuja carga de 70.000 é considerado baixa, e o pier PI1s que têm um impacto de utilização alto comparado com o pier PI1n quando analisamos a fila a ser atendida.

O valor de bloqueio de cada rota da Tabela 6 foi obtido por julgamento ao número de impedimentos de outras rotas sobre a planta. Os demais dados como fluxo operacional e custo operacional são dados determinados pelas características associadas aos recursos disponíveis da planta.

Rota	Bloqueio	Fluxo Nominal	Custo Operacional
R1	5	10.000t/h	26
R2	8	7.000t/h	15
R3	8	7.000t/h	11
R4	8	9.000t/h	17
R5	7	7.000t/h	19
R6	5	11.000t/h	15
R7	7	7.000t/h	19

Tabela 6: Tabela simplificada de rotas em função do Nível de Bloqueio, Fluxo nominal e Custo Operacional



figuras 35, 35 e 37, juntamente com os seus respectivos conjunto de regras, e aplicados ao algoritmo proposto por COX (1994) ou diretamente através do software “MATLAB”, iremos construir uma tabela 7, que representa o matriz de conhecimento para os objetivos propostos, isto é: impacto sobre a planta ( $Im$ ), fluxo nominal da rota ( $Fl$ ) e custo de operação ( $Co$ ).

	Impacto sobre a Planta $v_{Im}(ri)$	Fluxo Nominal $V_{Fl}(ri)$	Custo Operacional $v_{Co}(ri)$
R1	0.454	0.343	0.214
R2	0.320	0.523	0.340
R3	0.320	0.523	0.507
R4	0.320	0.410	0.340
R5	0.340	0.523	0.339
R6	0.454	0.340	0.434
R7	0.340	0.523	0.339

Tabela 7: Matriz de conhecimento para carga de 70.000 ton.

A classificação  $v(ri)$  é então é feita entre as rotas disponíveis no momento da decisão, uma vez que a classificação final é dependente do navio a ser atendido e da carga requisitada. Neste caso o valor esperado do conhecimento representa a satisfação a cada objetivo limitado no intervalo  $[0,1]$ , o que neste caso particular, representa uma pertinência no conjunto difuso satisfação. Logo para cada objetivo teríamos:

$$\text{Satisfação ao Impacto } (ri) = \mu_{Im}(ri)/ri, \text{ onde } \mu_{Im}=v_{Im}, i = 1..n \quad (6.2)$$

$$\text{Satisfação ao Fluxo } (ri) = \mu_{Fl}(ri)/ri, \text{ onde } \mu_{Fl}=v_{Fl}, i = 1..n \quad (6.3)$$

$$\text{Satisfação ao custo } (ri) = \mu_{Co}(ri)/ri, \text{ onde } \mu_{Co}=v_{Co}, i = 1..n \quad (6.4)$$

Então, a classificação desta rota seria dado por:



$$D(ri) = \{P1\mu m(ri) \wedge P2\mu Fl(ri) \wedge P3\mu Co(ri)\} \quad (6.5)$$

onde,

$$P1+P2+P3 = 1. \quad (6.6)$$

Estes pesos representam a importância relativa entre os objetivos e atendem a uma política de objetivo global, que neste caso pode ser menor tempo de fila que minimiza as multas por atrasos de atendimento, contratos especiais, etc.

Considerando que cada navio, representado por  $N_i$ , possui uma diferente distribuição de peso e que neste exemplo, estamos considerando que o nível de satisfação ao impacto, o fluxo nominal e o custo de operação tem seus pesos iguais. Os resultados estão sintetizados na tabela 8.

Alternativas	$P1\mu m(ri)$	$P2\mu Fl(ri)$	$P3\mu Co(ri)$	$Min(v(ri))$
R1	0.454	0.343	0.214	0.214
R2	0.320	0.523	0.340	0.320
R3	0.320	0.523	0.507	0.320
R4	0.320	0.410	0.340	0.320
R5	0.340	0.523	0.339	0.339
R6	0.454	0.340	0.434	0.34
R7	0.340	0.523	0.339	0.339
			$Max(v(ri))$	0.34

Tabela 8: resumo da Classificação e Ordenação das rotas R1 a R7

Logo :

$$D(ri) = .214/R1 + .32/R2 + .32/R3 + .32/R4 + .339/R5 + .34/R6 + .339/R7$$

O final do processo de classificação e seleção é a aplicação dos operadores (5.7) e (5.8) juntamente com as regras de disparo (5.2) e (5.3). Portanto, a decisão para a rota a ser usada será aquela que obtiver o maior nível de satisfação considerando todos os objetivos. Se o nível de satisfação for inferior a um certo valor a decisão pode ser o de não disparar a transição e aguardar a liberação de rotas que venha a proporcionar maior satisfação. O uso de uma rota com baixo nível de satisfação pode impactar outros processos no futuro, gerando custos para o atendimento como um todo. Por exemplo, um navio pode ser atendido em um determinado píer, porém uma vez ancorado, os custos de mudança de um píer para outro são grandes o bastante para que a troca seja inviável, e a interferência causada por ele prejudica o atendimento nos demais píers.

Portanto, a rota a ser selecionada no disparo da transição T3 para o exemplo utilizado será a rota R6, como proposto Tabela 8. Usamos neste exemplo a mesma tabela 5 de conflitos utilizada nos outros exemplos.

Como resultado do disparo de T4, a marca N1 é retirada de P3 juntamente com a rota R6 e o Conflito R7, gerando com isto uma nova marca em P4. Pela aplicação da Tabela 4, o tempo de atraso da marca N1 em P4 será de  $t1=6,36$ . Este resultado é apresentado na figura 39.

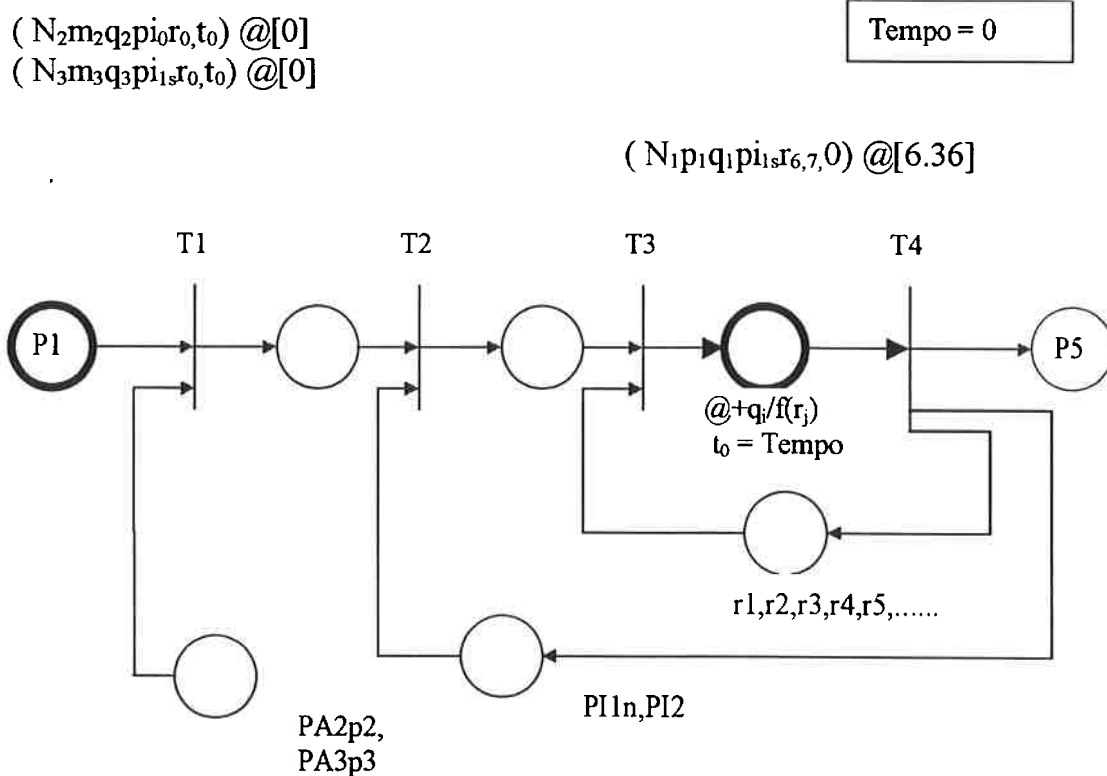


Figura 39: Rede TCP do Porto de Granel –  $H(T1, N2), H(T2, N2)$

Para o segundo navio N2, o procedimento segue ao primeiro com a habilitação e ocorrência dos elementos  $(T1, N2)$  e  $(T2, N2)$  e tornará a transição T3 habilitada, ainda no mesmo modelo de tempo, no caso de existir os recursos necessários em P6 e P7. A análise para a avaliação dos recursos necessários a habilitação e ocorrência de  $(T3, N2)$  é feita a seguir. A figura 40 mostra a condição atual da rede TCP.

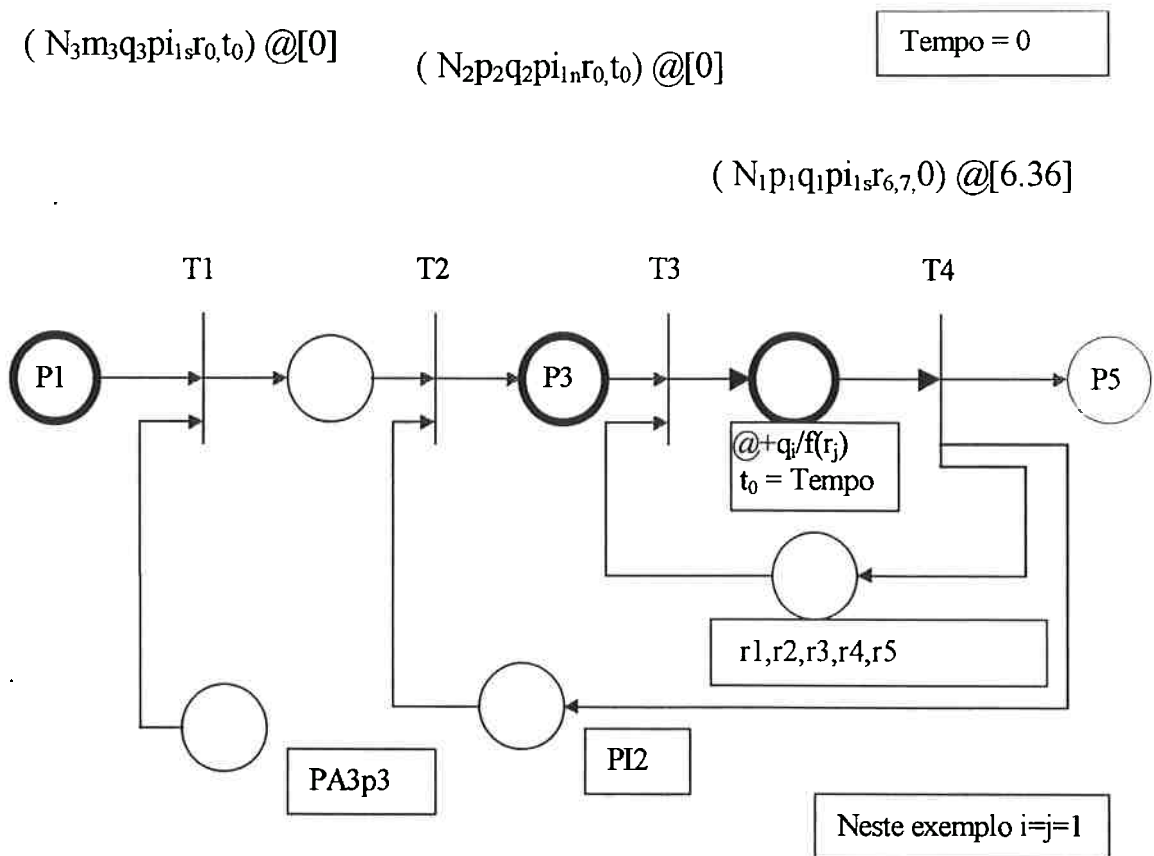


Figura 40: CP-net do Porto de Granel – (T3,N2)

Analisando a escolha de rota apresentada na figura 40, a marca localizada em P3 contém as informações da quantidade da carga a ser embarcada, representada pela variável “ $q_2$ ”, o conjunto de rotas que atendem a uma determinada origem, previamente escolhida “ $p_2$ ”, e um determinado destino, também previamente escolhido “ $p_{i_1}$ ”. Neste modelo de tempo, somente as rotas de R1 a R5 listadas na tabela 4 atendem ao requisito de origem e de destino. Supondo que a carga a ser embarcada seja de 135.000 ton., construiu-se a Tabela 9 com o nível de satisfação de cada rota para cada objetivo proposto, isto é: impacto sobre a planta ( $Im$ ), fluxo nominal da rota ( $Fl$ ) e custo de operação ( $Co$ ).

Os valores obtidos na tabela 9 foram extraídos de forma semelhante ao obtido na tabela 7.

	Impacto sobre a Planta $vIm (Ri)$	Fluxo Nominal $VFl (Ri)$	Custo Operacional $vCo (Ri)$
R1	0.293	0.192	0.190
R2	0.207	0.550	0.191
R3	0.207	0.550	0.517
R4	0.207	0.319	0.201
R5	0.204	0.550	0.214

Tabela 9: Nivel de satisfação por rota para carga de 135.000 ton.

Considerando a mesma distribuição de peso que o caso anterior, aplicadas com as equações (6.2) , (6.3) e (6.4) e onde o satisfação ao impacto, o fluxo nominal e o custo de operação tem seus pesos iguais, modifica-se a Tabela 9 e gera-se a Tabela 10.

Alternativas	$P1\mu Im (Ri)$	$P2\mu VFl (Ri)$	$P3\mu Co (Ri)$	$Min(v(Ri))$
R1	0.293	0.192	0.190	0.190
R2	0.207	0.550	0.191	0.191
R3	0.207	0.550	0.517	0.207
R4	0.207	0.319	0.201	0.201
R5	0.204	0.550	0.214	0.204
			$Max(v(Ri))$	0.207

Tabela 10: resumo da Classificação e Ordenação das rotas R1 a R5

Logo :

$$D(ri) = .19/R1 + .191/R2 + .207/R3 + .201/R4 + .204/R5$$

Portanto, a rota a ser selecionada no disparo da transição T3 para N2 dado pela Tabela 10 será a rota R3. Com o disparo de T3 resulta em um novo estado representado

pela figura 41. Como resultado da ocorrência de T3, considerando os mesmos passos da seleção e classificação anterior, a marca N2 juntamente com a rota R3 e seu conflito, representado na tabela 5, R2 é retirada de P3 e P8 respectivamente gerando uma nova marca em P4. Pela aplicação da Tabela 4, o tempo de atraso da marca N2 em P4 será de  $t_1=5$ . Este resultado é apresentado na figura 41.

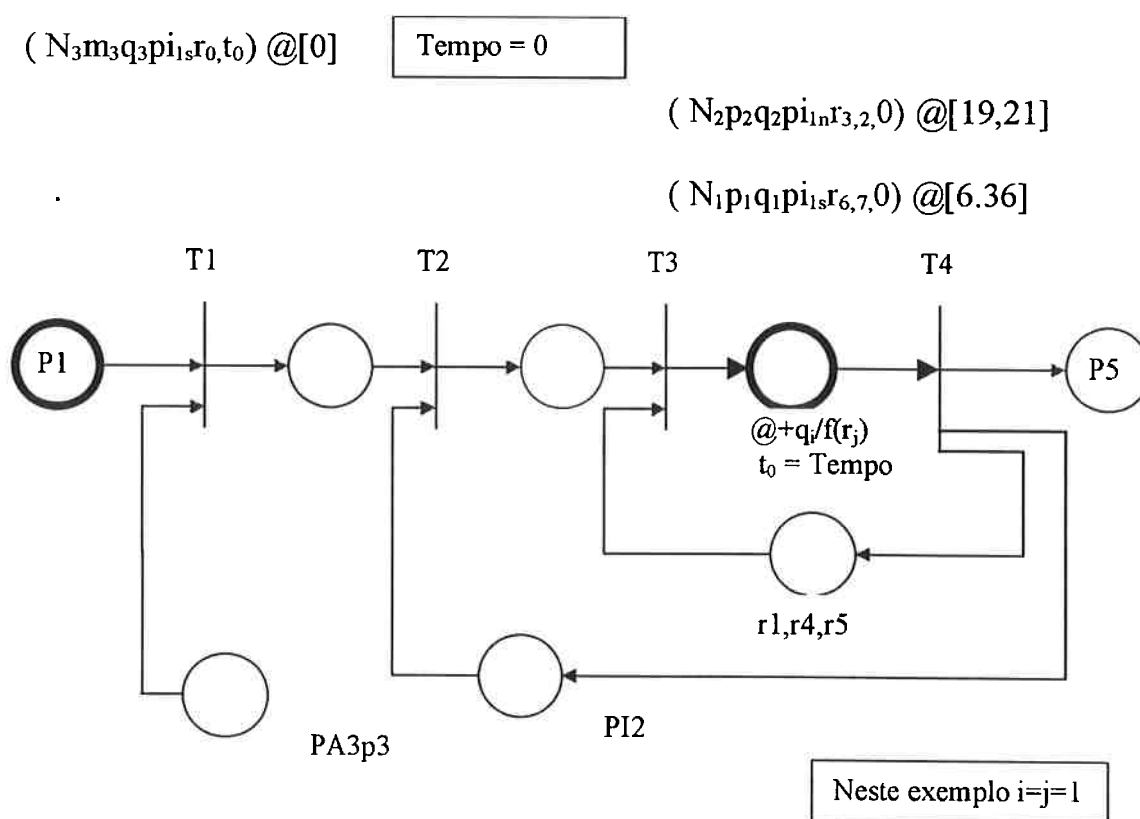


Figura 41: Rede TCP do Porto de Granel – H(T1,N3)

Para o terceiro navio N3, o procedimento segue ao primeiro e segundo, com a habilitação e ocorrência do elemento (T1,N3) e tornará a transição T2 habilitada, ainda no mesmo modelo de tempo, no caso de existir os recursos necessários em P7, Neste caso não existe recurso disponível em P7 uma vez que para habilitação da transição é necessário que tenha uma marca do tipo P1s em P7. O recurso necessário está sendo utilizado pela marca N1. Neste caso não existe mais nenhuma marca habilitada neste modelo de tempo, conforme figura 42. Então é necessário avançar o modelo de tempo para o Tempo=6.36 para a ocorrência do elemento (T4,N1). Neste instante os recursos

necessários a habilitação do elemento (T2,N3) ficam disponíveis em P7 e P8, conforme é mostrado na figura 43.

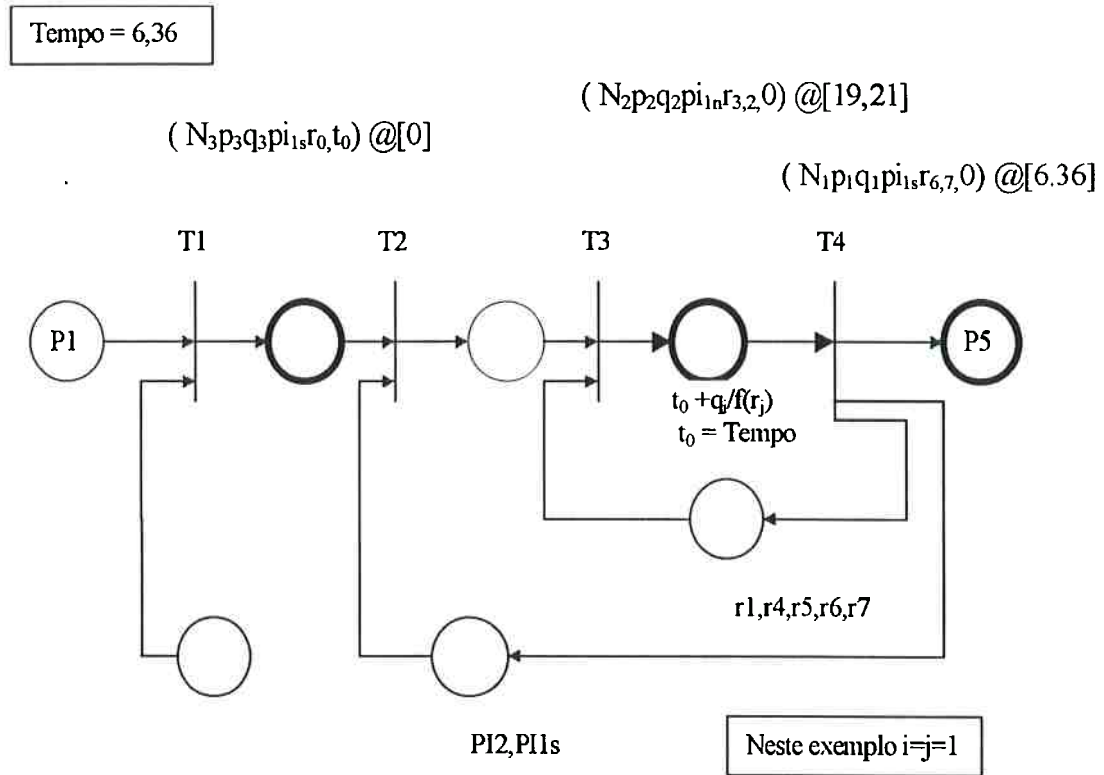


Figura 42: Rede TCP do Porto de Granel – (T4,N1)[6.36]

Neste instante o elemento de ligação (T2,N3) fica habilitado dentro do modelo de tempo podendo, portanto, ocorrer. Neste caso, a marca é retirada de P2 e colocada em P3.

Seguindo o mesmo raciocínio dos casos anteriores, analisando a primeira escolha de rota, representada pela figura 43, neste caso a marca localizada em P3 contém as informações da quantidade da carga a ser embarcada, representada pela variável “ $q_3$ ”, o conjunto de rotas que atendem a uma determinada origem, previamente escolhida “ $p_3$ ”, e um determinado destino, também previamente escolhido “ $p_{i_1}$ ”. Pela Tabela 4 somente as rotas de R1 e R4 listadas na tabela 3 atendem ao requisito de origem e de destino e supondo que a carga a ser embarcada seja de 84.000 ton. da mesma maneira que as etapas anteriores construí-se a tabela 11.

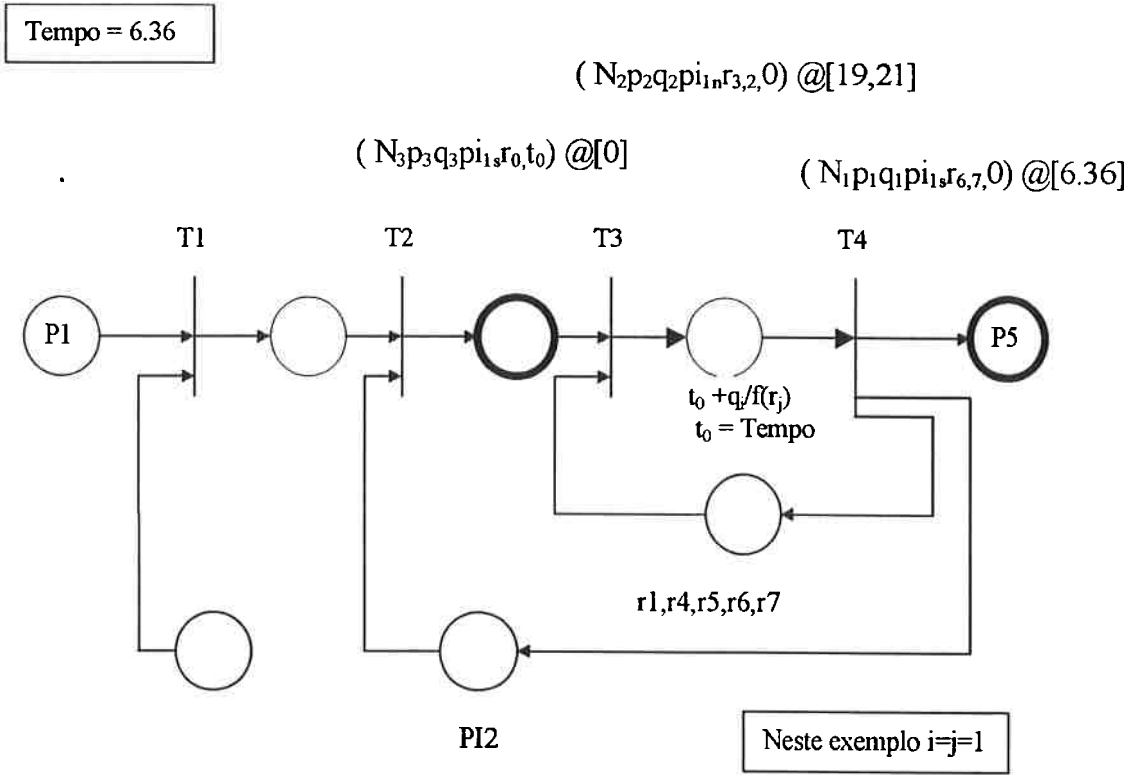


Figura 43: Rede TCP do Porto de Granel –  $(T_2, N_3)[6.36], H(T_3, N_3)[6.36]$

	Impacto sobre a Planta $vIm (R_i)$	Fluxo Nominal $vFl (R_i)$	Custo Operacional $vCo (R_i)$
R1	0.517	0.630	0.202
R4	0.299	0.628	0.408

Tabela 11: Nível de satisfação por rota para carga de 84.000 ton.

Considerando a mesma distribuição de peso que o caso anterior e aplicando as equações (6.2), (6.3) e (6.4), montamos a Tabela 12.



Alternativas	$P1\mu l m (Ri)$	$P2\mu F l (Ri)$	$P3\mu C o (Ri)$	$Min(v(Ri))$
R1	0.517	0.630	0.202	0.202
R4	0.299	0.638	0.408	0.299
			$Max(v(Ri))$	0.299

Tabela 12: resumo da Classificação e Ordenação das rotas R1 e R4

Logo :

$$D(ri) = 0.202/R1 + .299/R4$$

Portanto, a rota a ser selecionada no disparo da transição T3 para N3 segundo a Tabela 11 será a rota R4. Com o disparo de T3 resulta em um novo estado representado pela figura 44.

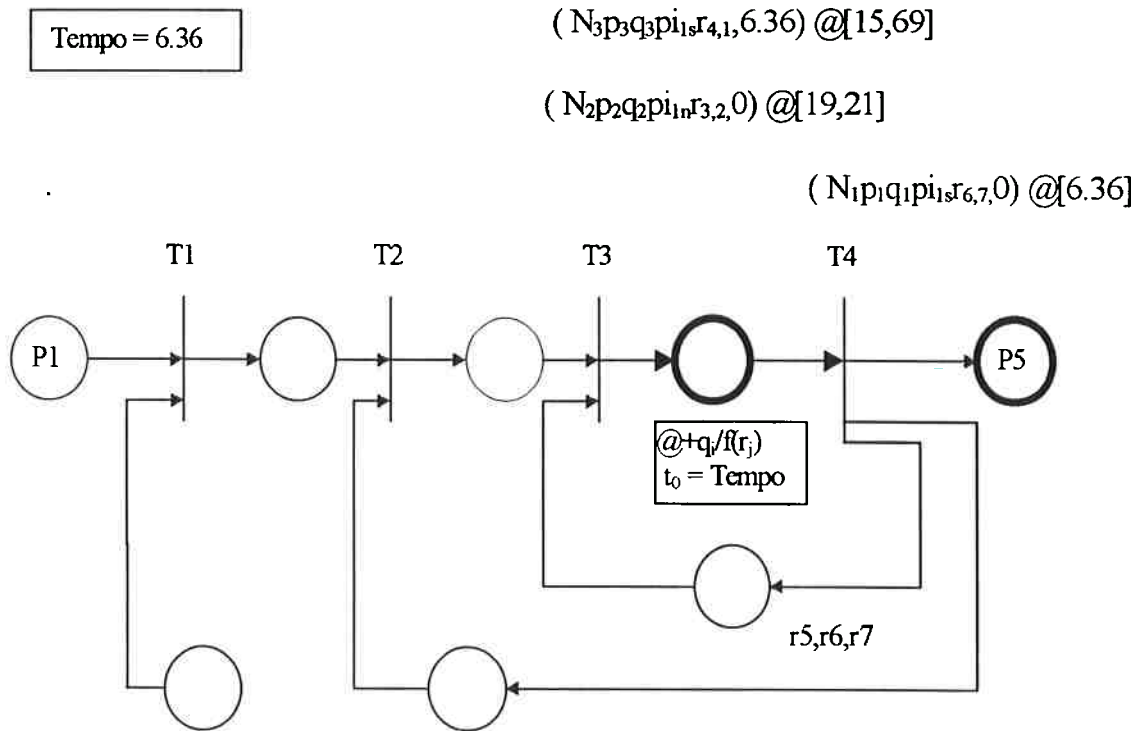


Figura 44: Rede TCP do Porto de Granel – H(T4,N3)[15.69],H(T4,N2)[19,21]

O relógio global teria três estados, ou seja  $t_1=6,36$ ,  $t_2=15,69$  e  $t_3=19,21$ , e ao final destes estados teríamos uma solução do processo de programação, como apresentado na figura 45. A solução apresenta um tempo médio de término de 13.75 e um tempo médio de espera de 2.12.

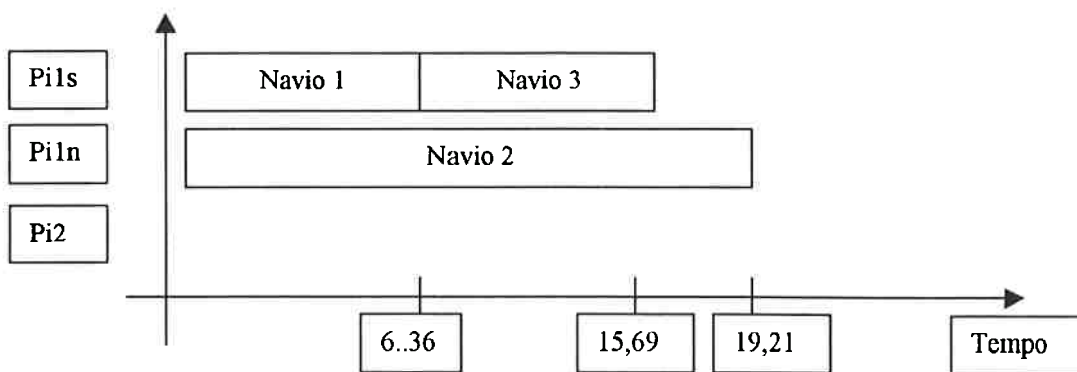


Figura 45: Resultado da Simulação com inclusão do nível tático

## 7.Comentários Finais

O formalismo aqui apresentado provou ser de grande utilidade na atividade de planejamento e programação de processos de produção, que necessitam avaliar não somente dos recursos a serem utilizados durante o processo produtivo mas também os vários níveis de estratégias de produção que sem dúvidas viabilizam a cadeia produtiva. As redes de Petri modelam claramente o uso de recursos e são adequadas para tratar o problema da concorrência no uso destes recursos. Já a Redes de Petri Colorida ajudam na simplificação do modelo auxiliando no entendimento do processo de decisão, que na maioria das vezes é bastante complexo. A extensão para redes de Petri colorida e temporizada se faz necessário a obtenção de uma solução temporal das ações envolvidas no processo.

A deficiência encontrada nas redes de Petri está no tratamento heurísticas que representam decisões que envolvem vários objetivos e restrições que em certos problemas contém um certo grau de incerteza e que estão presentes no processo da manufatura. O que aqui foi apresentado, é um formalismo que possibilite o uso de heurística sem contudo prejudicar a definição formal da rede de Petri, uma vez que o segundo nível da ferramenta proposta tem a função de auxiliar na escolha de partes da árvore de solução gerada pela rede que sejam viáveis para o cenário tratado pelo planejador.

A teoria de conjuntos difusos foi utilizada para tratar as heurísticas gerenciais mais usadas nos processos de programação. Formalmente esta modela a natureza do processo decisório difuso considerando as imprecisões comuns sobre o conhecimento do ambiente estudado. É fácil perceber que as decisões envolvidas no processo a cada evento, perfeitamente modelado no primeiro nível com o uso das redes de Petri colorida e temporizada, chamado nível estratégico, contém um grau de incerteza sobre qual seria, entre várias possibilidades, aquela que representa a melhor decisão a tomar. Isto nós levaria a examinar todas as possíveis soluções a cada evento, inclusive reavaliando os passos anteriores, e portanto, provocando uma explosão combinatória e consequentemente uma grande árvore de soluções.

A programação num ambiente real parte do princípio básico de que o programador é capaz de encontrar uma solução viável, e então, conhecendo como ele a obtém na realidade, pode-se com uso de ferramenta formal varrer um número maior de possibilidades e com isto melhorar as soluções rotineiramente alcançadas pelo programador

A análises dos resultados da simulação de um cenário, mostraram que as heurísticas envolvendo a política de uso de recursos da planta, até então utilizadas, eram inadequadas para o melhor atendimento a fila de navios, e que a mudança nesta política podem trazer melhorias nas soluções de atendimento. Como exemplo, uma política que prioriza os recursos de transporte e pátios para as maiores cargas, pode causar grandes impactos no restante dos recursos na planta, uma vez que uma maior quantidade de recursos estratégicos para a operação da planta ficam retidos para um certo atendimento, prejudicando o restante da planta e comprometendo os futuros atendimentos.

A ferramenta que propomos provou se capaz de gerar uma solução não garantidamente ótima, porém, como podemos observar no exemplo discutido; que o valor médio de término da solução obtida a partir do nível tático foi de 13.75 e que esse valor está próximo ao valor ótimo do objetivo, isto é, entre 12,09 à 19,29 do conjunto de soluções. De forma similar analisamos o tempo médio de atraso, que na solução encontrada é de 2,12 e que a faixa varia de 2.12 à 6.43.

Apesar do tempo médio de término da solução obtida pelo uso do nível tático ser maior que o menor valor obtido no conjunto de todas as soluções viáveis, o custo operacional desta solução, a partir dos dados listados na tabela 4, foi de 465,32 contra 539,05 da solução de menor tempo médio de término do conjunto de soluções. Isto fortalece a idéia que o modelo é capaz de obter uma solução que se aproxima da solução ótima.

Para futuros trabalhos, sugerimos a construção de um produto com base na metodologia aqui proposta e conseqüente ampliação para outras classes de problemas em sistemas de produção. Além disso, pode-se buscar nesta metodologia uma abrangência para o tratamento generalizado do problema de tomada de decisão.

## 8. Referências bibliográficas

- ALANCHE, P., AT AL, PSI: A Petri Net Based Simulator for Flexible Manufacturing Systems, **Advances Petri Net's 84**, p.1-14, 1984
- ALLA, H., AT ALL, Modelling and Validation of Complex System by Coloured Petri Nets Application to a Flexible Manufacturing System, **Advances Petri Net's 84**, p.15-31, 1984
- ALPAN, G. AND JAFARI, M.A ., Dynamic Analysis of Time Petri Nets: A case of Two Processes and a Shared Resource, **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, vol. 13. No. 3, p. 338-346, June 1997
- ASIIMAKOPOULOS, N., Distribut Decision Making in Cybernetic Sytems, **Control Engineering**, Vol 13, No. 1, p.3-13, 1988.
- BACCELLI, F., Ergodic Theory of Stochastic Decision Free Petri Nets, **Proceeding of the 28<sup>th</sup> IEEE Conference on Dicision and Control**, Vol. 2, p.1521-1527, 1989.
- BAKO, BABOU, Une Approche Mixte Reseaux de Petri et Systemes de Regles. **THESE de Docteur de L'Universite Paul Sabatier de Toulouse**, 1990
- BELLMAN, R., ZADEH, L.A., Decision making in a fuzzy environment, **Management Science**, v.17, n.4, p.141-164, 1970.
- BUFFA, E. S., **Modern Production Management**, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1969.
- CARLIER, J., CHRETIENNE, P., Timed Petri Net Schedules, **Advances Petri Net's 88**, p.62-84, 1988
- CARLIER, J., PH. CHRETIENNE, GIRAULT, C., Modelling Scheduling Problems with Time Petri Net, **Advances Petri Net's 84**, p.68-82, 1984
- CORBEEL,D.,GENTINA,J.C.,VERCAUTER,C, Aplication of an Extension od Petri Net to Modelization of Control and Production Processes. **Lecture Notes 1985**
- COX, EARL, **The Fuzzy Systems Handbook**: a practitioner's quide to building, using, and maintaining fuzzy system, Academics Press, Inc, 1994.
- CROWE, T.J.,NUÑO, J.P., A Fuzzy Parametrical Forward- and Backward Chained Two-Dimensional Attribute Decision Model, **IEEE Transactions on Systems**, vol 27, no. 2, p.184-194, march 1997
- DEMAEL, J.J., LEVIS, A H., **Generation of a Variable Structure Airport Surface Traffic Control System**, Massachusetts Inst. Of Technology, Technical report LIDS-P-1989.

- EL-HARAKSY, M. R., NOUH, A. S., AL-OBAIDAN, A. R., Performance Analysis of Timed Petri Net Models for Communication Protocols: a Methodology and a Package, **Computer Communications**, Vol. 113, No.2, p.73-82, 1990.
- ELSAAYED, A S., BOUCHER, T. O., **Analysis and Control of Production Systems**, Prattice Hall - International, Inc., London, 1985.
- FORRESTER, J.W., **Industrial Dynamics**. Cambridge, The M.I.T. Press, 1961.
- GENRICH, H.J., **Colored Petri Nets**, Computer Science Department, Aarhus University, Denmark.
- GIRANIT, C., RELGING, W. ET ALIA, **Application and Theory of Petri Nets**, Springer-Verlang, 1982
- GOUTIS, C., A Graphical Method for Solving a Decision Analysis Problem, **IEEE Transaction on Systems**, vol. 25, no. 8, august 1995
- HO, Y.C., ED., Special Issue on Discrete Events Dynamic Systems. **Proc. IEEE**, Jan. 1989.
- JESEN, K., **Coloured Petri Nets. Vol. 1**, Springer, 1996.
- JESEN, K., **Coloured Petri Nets. Vol. 2**, Springer, 1996.
- KANDEL, A. ., **Fuzzy mathematical Techniques with applications**. Reading, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1986
- KICKERT, W. J. M., Fuzzy theory on decision making – a critical review. Leiden, **Martinus Nijhof Sciences Division**, 1978.
- KLIR, G. J., FOLGER, T.A., **Fuzzy sets, uncertainty, and information**, Prentice Hall International Editions, 1988.
- KUSIAK, A. ., **Intelligent Manufacturing Systems**, Dep. of Ind. And Management Engineering, University of Yowa, 1990.
- LEU, B.-Y., Simulation Analysis of scheduling Heuristics in a Flow-Line Manufacturing Cell with Two types of Order Shipment Environments, **Simulation**, vol.66 i2, p.106-116, 1996
- LOTAN, T., Modelling Discrete Chose Behavior Based on Explicit Information and Its Application to the Route Choice Problem, , **IEEE Transactions on Systems**, vol. 28, no.1, p.100-114, 1998
- MARTINEZ, J. AND SILVA, M., A Language for the Description of Concurrent Systems modeled by Colored Petri Nets: Application to the Control of Flexible manufacturing systems, **IFAC/IFIC-SOCOCO**, p.234-248

- MEHREZ, A., Muzundar, M., Acar, W., Weinroth, G., A Petri Net Model View of Decision Making: na Operational Management Analysis, **Omega-International Journal of Management Science**, vol.23, no. 1, p.63-78, 1995
- MOREIRA, D. A., **Administração da Produção e Operações**, Livraria Pioneira Editora – SP, 1998.
- MORTON, T. E, PENTICO, D.W., **Heuristic Scheduling Systems**, John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- MURATA, T, Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. **Proceedings of the IEEE**, vol. 77, no. 4, p.541-579, april 1989
- MUSZYNSKI, W., BANASZAK, Z., Nets Generation and Decision Making Algorithm for Modelling of Conflict Situations in FMS-like Systems., **Second National Conference on Robotic**, Konferencje No 33. 1988.
- NAKAMURA, T., VLACIC, L.J.B. AND OGIWARA, Y., Multiattribute-based CIE/CIM implementation decision model, **Computer Integrated Manufacturing Systems**, vol. 9, no.2, p.73-89, 1996
- PERDU, D.M., LEVIS, A H., Analysis and Evaluation of Decision Aids in Organizations, **Fourth IFAC Conference**, p.19-25, 1989.
- PETERSON, J.L., **Petri Net Theory and The Modeling of Systems**, Prentice Hall, inc., 1981
- REISIG, W, **Petri Nets – An Introduction**, Springer-Verlnag Berlin, 1985.
- SEIFODDINI, H. AND ZHANG, J., Application of simulation and Petri Net Modelling em Manufacturing controkl Systems, **Int. J. Prod. Ress**, vol.34 il, p.191-207, 1996
- SILVA, M., VALETTE, R., Petri Nets and Flexible Manufacturing. **Lecture Notes** 1989.
- TAGAWA, S., A new concept of job shop scheduling System – Hierarchical decision model, **International Journal of Production Economics**, vol.44, p. 17-26, 1996
- TÖRN, A .A., Decision Suport by Rapid Simulation Using Simulation Nets, **Decision Support Systems**. , Vol. 6, No.4, p. 299-305, 1990.
- ULUSOY, G. AND ÖZDAMAR, L., A Framework for na Interactive Project scheduling System under limeted resources, **Europen Jounal of Operational Research**, vol. 90 i2, p.362-375, 1996
- VALERO, V., DE FRUTOS, D., CUARTERO, F., Timed Processes of Time Petri Nets. **Lecture Notes**, p.490-509, 1987
- WADHWA, S., BROWNE, J., Modeling FMS with Decision Petri Nets, **Journal Flexible Manufacturing Systems**, Vol. 1, No. 3, p.255-280, 1989.