

# **Redes de Petri Aplicada como Metodologia de Análise Operacional em Atividades Portuárias**

**Prof. Dr. Marcos Aurélio Scopel Simões, DEM-CT-UFES**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Área de**  
**sistemas de Transportes**  
**Av. Fernando Ferrari, s/n**  
**Campus Universitário de Goiabeiras**  
**Goiabeiras - Vitória – ES - CEP 29060-970.**

e - mail: [scopel@npd.ufes.br](mailto:scopel@npd.ufes.br)

Resumo: Este artigo propõe a utilização das Redes de Petri Coloridas e Temporizadas (TCPN) juntamente com a teoria de conjuntos difusos para modelar e simular processos de tomada de decisão. A idéia foi aplicada nas decisões de planejamento e programação das atividades operacionais envolvidas num porto de embarque de minério de ferro. A TCPN é responsável pela estruturação do processo de decisão, ou seja, qual decisão será feita primeiro, e para manter as informações sobre os estados alcançados durante o processo de decisão como um todo. Para cada decisão a ser tomada, um conjunto de heurísticas são aplicadas. Utilizamos a teoria de conjuntos difusos para modelar heurísticas que representam incertezas ou preferências da gerência ou operador. Para atender a mais de uma heurística, aplicamos esta técnica a um problema com múltiplos objetivos.

Abstract: This paper proposes the use of an extension of Timed, Colored Petri Nets (TCPN) in conjunction to fuzzy evaluation criteria for decision-making. The ideas were applied to planning and scheduling in a ore port. The TCPN is responsible for the ordering of the decision process (i.e. which decision to make first) and for keeping the state information regarding to resource usage/ availability during the decision process. Therefore the decision process itself is described by a TCPN. Each decision is taken by applying a set of specific heuristics, appropriated to the situation. The fuzzy theory is used to grasp uncertainty and operator's preference. Decisions are then weighted, in an attempt to accomplish the multiple objectives of the decision process

Keywords: Fuzzy Theory, Petri Nets, Modeling, decision-making

## 1. Introdução

O processo de tomada de decisão tem um papel central em todas as atividades industriais. Este papel focaliza em decisões diárias em uma cadeia de produção; estão relacionados principalmente com a programação da produção, os estoques e a administração de recursos. Nestas situações, um gerente toma normalmente uma decisão baseada em atitudes heurísticas, por exemplo, uma prioridade dada para um consumidor, forçando uma parada de atender uma necessidade de prioridade mais alta, etc.

A metodologia adotada aqui é gerar uma árvore de decisão que busque alcançar uma boa solução para um problema estudado. Uma árvore de decisão configura-se por um grande

número de nós e cada nó envolve um processo de decisão. Um nó de decisão tem um conjunto de entradas (fatos, estados conhecidos) e um conjunto de saída (i.e. decisões). Para cada nó de decisão, será aplicado um conjunto de regras. Finalmente, o conjunto de decisões vem de uma simulação da árvore de decisão: são imputadas pré-condições, são tomadas decisões.

Formalmente, uma extensão de uma Rede de Petri Colorias e Temporizada (TCPN) é proposta para descrever uma árvore de decisão. TCPN's são utilizadas para formalizar os nós de decisão (mapeados pelas transições de TCPN), recursos (mapeados pelas marcas da TCPN) e sua disponibilidade (mapeados pelas marcas em lugares que representam lugares da rede) a cada instante. Um conjunto de fatos conhecidos (mapeados como marcas em lugares) é à entrada de uma decisão. A decisão produz mudanças na alocação de recursos (novamente, marcas em lugares). O modelo intrinsecamente incorpora a noção de tempo pela evolução de tempo da TCPN. O processo de decisão é heurístico (embora também pudessem ser usadas técnicas de otimização, como discutido depois): são resolvidos conflitos baseado em regras, aplicado durante simulação. A regra de disparo de uma TCPN foi redefinida a partir de uma CPN para permitir uma transição disparar baseada em regras de transições temporizadas. Um procedimento baseado em teoria nebulosa é proposto para avaliar o grau de uso das marcas no disparo de uma transição em um determinado estado de uma TCPN, como artifício para modelar a incerteza de uma decisão a ser tomada.

Então, o processo de decisão e o método de decisão para cada fase de um processo de decisão são completamente separados, ajudando o tomador da decisão entender primeiro o processo de decisão e então se concentrar sobre as técnicas a ser adotada.

Este artigo apresenta as idéias gerais nas quais o processo de decisão proposto é baseado. Então, é mostrada a formalização de TCPN e como o processo de decisão será organizado em TCPN, seguindo pela apresentação do método de decisão heurístico e processo decisão com múltiplos objetivos. Finalmente, idéias iniciais para simulador são apresentadas.

## 2. Visão do Processo

O método de tomada de decisão proposto foi desenvolvido a partir de uma busca para um método de programação para um porto de movimentação de minério de ferro, Porto de Tubarão-Vitória-ES-Brasil: O navio tem que ser servido, programando recursos para levar minério de ferro da origem (pátios) para o navio (em um dos três piers), usando uma rede compartilhada de correias transportadoras. Então, para um determinado navio qual entre os três piers existentes será mais conveniente (cada uma com capacidade de receber navios de diferentes tamanhos)? Qual rota será usada (conjunto de correias transportadoras)? De qual pilha o material será retirado?

A possível rotas levando de uma pilha a um pier configura alternativas de custo distinto, produtividade e impacto geral (várias possíveis rotas compartilham partes umas das outras). Frequentemente, diferentes pilhas possuem o mesmo material disponível, devido à política de suprimento adotada. Então, várias possibilidades deverão ser analisadas pelo tomador de decisão.

O processo de decisão proposto é estruturado em dois níveis:

Nível Estruturante: onde cada tipo de decisão está definido e o processo global visto como uma árvore de decisões. Isto é um pouco semelhante ao GRAInet [Doumeingts, 92]. Uma rede de Petri Colorida e temporizada (TCPN) é usada para representar recursos (marcas de TCPN), a sua disponibilidade (marcas em lugares) e pontos de decisão (transições). Uma decisão é então um mapeamento de cores de entrada para cores de saída de uma TCPN (a cor representa uma determinada informação contida na marca).

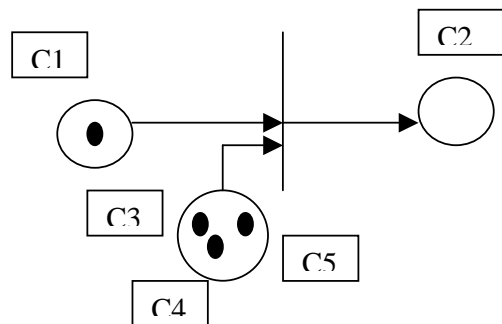
Nível tático é ativado pelo nível estruturante (transições no TCPN), onde são aplicadas heurísticas para determinar uma solução otimizada. Uma solução multi-objetivo pode ser obtida através do método do melhor entre alternativas com pesos ponderados. A aceitabilidade de cada alternativa é avaliada por conceitos nebulosos.

### 3.Nível Estruturante

O Nível estruturante:

- Determina qual tipo de decisões será tomada;
- Determina o sequenciamento da decisão;
- Mantém o estado da decisão (mantendo informação sobre uso e disponibilidade dos recursos);
- Dispara o Nível Tático.

Neste nível, uma decisão é vista como um conjunto de fatos conhecidos (o conhecimento sobre decisões prévias e disponibilidade de recurso para esta decisão) da qual uma decisão é tomada, gerando um conjunto novo de fatos conhecidos. Por exemplo, para problema discutido aqui, nós temos que decidir de qual pilha será tirado o minério para um determinado navio e em que pier o navio deve ser colocado. Esta fase de decisão pode ser representada como:



Onde as cores representam:

C1:<navioID, necessárioMaterial, necessáriaQuantidade>

C2:< navioID, necessárioMaterial, necessáriaQuantidade, pilhaID>

C3-5:< pilhaID, pilhaMaterial, pilhaQuantidade>

Este exemplo assume que uma única pilha será escolhida: Uma que possua o material e quantidade necessárias ao embarque. Uma decisão mais complexa (múltiplas pilhas, remoção parcial, etc.) poderia também ser descrita.

Puras decisões, como no exemplo acima, não ocupariam nenhum tempo, neste caso uma TCPN não seria necessária, entretanto, para outras atividades (por exemplo, carregamento de navio), a transição temporizada será necessária.

A decisão virá da simulação de TCPN: estímulos são aplicados (para o sistema do porto de minério, a chegada de um navio na fila), a TCPN é simulada e as decisões são tomadas.

O formalismo de TCPN é mostrado abaixo, em seguida um exemplo é aplicado ao sistema do porto de minério.

### 3.1. Rede de Petri Colorida com Transição Temporizada.

Redes de Petri coloridas são redes de alto nível onde são associadas cores as marcas para representar a informação conectada a elas. Estas cores podem ser modificadas pelo disparo de transições a partir de funções associadas aos arcos. Neste papel, uma Rede de Petri Colorida é temporizada pela associação de uma duração de tempo determinístico com respeito à cor.

Formalmente, uma rede de petri colorida com transições temporizada é definida por  $R = \langle P, T, C, POST, PRE, Mo, r \rangle$  onde:

1.  $P$  é um conjunto finito de lugares;  $p \in P$  representa um lugar;
2.  $T$  é um conjunto finito de transições;  $t \in T$  representa uma transição;
3.  $C$  é uma função de cor definida por  $P \cup T$  dentro de um conjunto não vazio de possíveis cores  $Cpos$ ,  $C: P \cup T \rightarrow c \subseteq Cpos$ ;
4.  $PRE$  é a função de precedência, com todo elemento  $PRE(p,t)$  uma função:  $PRE(p,t): C(p) \times C(t) \rightarrow N$ ;
5.  $POS$  é a função consequente, cada elemento  $POS(t,p)$  uma função:  $POS(t,p): C(t) \times C(p) \rightarrow N$ ;
6.  $Mo$  é a marcação inicial, definida pela função:  $Mo(p): C(p) \rightarrow N$ ;
7.  $R(t)$  é a duração de transição com respeito a uma cor e está definido como:  $r(t): C(t) \rightarrow \mathcal{R}^+$ ;

Detalhes em (Peterson, 81,; Giranit, 82,; Razouk,Bako,90; Genrich,92; Carlier,85).

A dinâmica de uma Rede de Petri é governada por suas regras de disparo. Então, uma transição será dita como habilitado com respeito a uma cor  $c$  de  $C(t)$  ( produzirá uma decisão de cor  $c$ ), se para todo lugar de entrada  $i$  uma cor  $c_i' \in C(p)$  existe com:

$$PRE\{(p,t)(c_i', c)\} \leq Mnr(p)(c_i')$$

Onde,  $Mnr$  = marcação não-reservada;

$Mr$  = marcação reservada;

$Mnr(p)(c_i')$  = será lido como marcação “não-reservada de cor  $c_i'$  no lugar  $p$ ”

$PRE\{(p,t)(c_i', c)\}$  = será interpretado como “peso de cor  $c_i'$  necessária pela topologia de rede em lugar  $p$  para uma cor  $c$  produzir uma transição  $t$ ”;

e  $c_i'$  é determinado pelo Nível Tático (veja abaixo).

Para introduzir as transições temporizadas, as regras passarão a atender: (o índice de lugar de entrada  $i$  é descartado por mera simplicidade da análise):

1. reserve marcas em lugares de entrada  
 $M'r(p)(c') = Mr(p)(c') + PRE\{(p,t),(c',c)\}$   
 $M'nr(p)(c') = Mnr(p)(c') - PRE\{(p,t),(c',c)\}$
2. temporize  $r(t)$
3. remova marca dos lugares de entrada  
 $M'r(p)(c') = Mr(p)(c') - PRE\{(p,t),(c',c)\}$
4. mova as marcas para os lugares de saída  
 $M'nr(p)(c) = Mnr(p)(c) + POST\{(t,p),(c,c)\}$

### 3.2. Exemplo

Fig.2 mostra uma aplicação desta técnica modelando ao sistema de programação de atendimento a navios em um porto de embarque de minério. Alguns detalhes são omitidos por causa da complexidade da operação e recursos envolvidos. O processo de decisão é um modelo das práticas da operação atual.

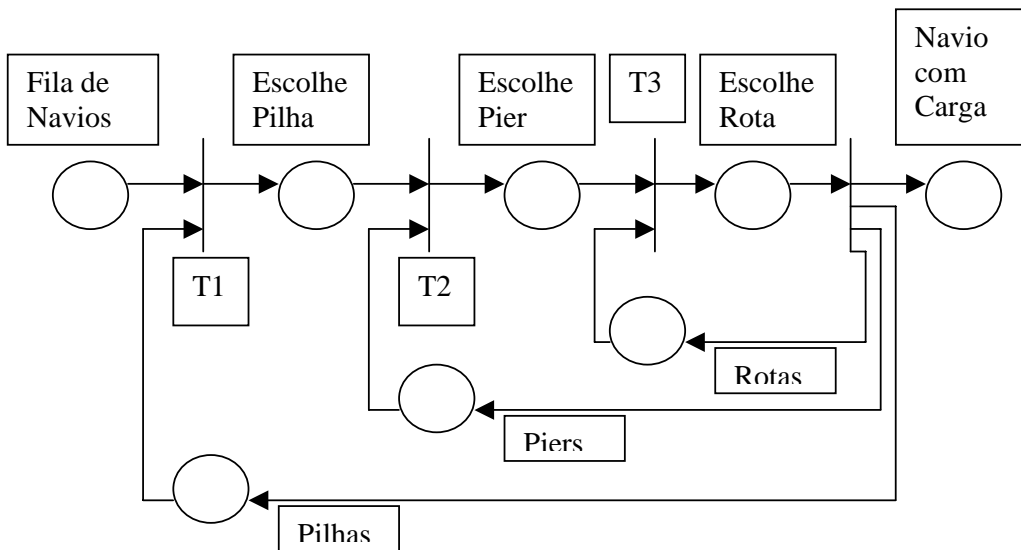


Figura 2. Nível Estrutural para problema do porto de minério.

Note que o processo dinâmico também é modelado: depois do uso, pilha, doca e rotas são devolvidas ao sistema para uso de futuro (se pilha não estiver vazia).

### 5. Nível Tático

O nível tático:

- Determina a alternativa a usar.

Este nível faz uso de teoria de conjuntos difusos para avaliar alternativas e decidir de forma conveniente a situação em análise. No que se segue, é apresentada uma introdução muito curta da teoria de conjuntos difusos (principalmente para apresentar a nomenclatura a ser usada nos outros itens), seguida pela metodologia proposta e um exemplo.

#### 4.1 Teoria de Conjuntos Difusos: alguns conceitos

Um conjunto difuso pode ser definido como um conjunto onde não está clara a pertinência de seus elementos. Zadeh (65) introduziu este conceito. Permita que  $x$  seja um elemento do conjunto  $X$ . Um conjunto difuso  $A$ , dentro de  $X$ , é um conjunto de pares:

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

Onde o  $\mu_A(x)$ , é conhecido como grau de pertinência, associando a cada elemento em  $X$  um real número dentro  $[0,1]$ . Se  $\mu_A(x)=1$ ,  $x$  definitivamente pertence ao conjunto difuso  $A$ , e se  $\mu_A(x)=0$ ,  $x$  seguramente não pertence ao conjunto difuso  $A$ . Valores intermediários para  $\mu_A(x)$  apresentam uma medida da possibilidade  $x$  para pertencer a  $A$ .

Um conjunto finito difuso  $A$  em  $X$  pode ser representado como:

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

Onde  $\mu_A(x_i)/x_i$  indica que o elemento  $x_i$  tem grau de pertinência  $\mu_A(x_i)$  em relação ao conjunto  $X$ .

#### 4.2 Processo de Decisão com Múltiplos Objetivos

Um processo de decisão com múltiplos objetivos pode ser representado por uma matriz como:

	$X_1$	.....	$X_n$
$A_1$	$\mu_{X_1}(A_1, f)$		$\mu_{X_n}(A_1, f)$
$A_2$	$\mu_{X_1}(A_2, f)$		$\mu_{X_n}(A_2, f)$
..			
$A_m$	$\mu_{X_1}(A_m, f)$		$\mu_{X_n}(A_m, f)$

Onde,

$A_i, i=1.. m$ , são as alternativas que serão avaliadas (i.e. recursos de alternativas ser selecionado);

$X_j, j=1.. n$ , são os objetivos a serem usados para avaliar a alocação de recursos;

$\mu_{A_j}(A_i, f)$  é o grau de pertinência para a alternativa  $A_i$  em relação ao objetivo  $X_j$ , que depende da alternativa e um conjunto de parâmetros difuso  $f$ .

A avaliação de alternativas é realizada pela adição de peso ao grau de pertinência para cada objetivo considerado:

$$v(A_i) = \sum P_j \mu_{X_j}(A_i, f), j= 1..n$$

onde,

$v(A_i)$  é a avaliação para a alternativa  $A_i$ ;  
 $P_j$  é o peso relativo de objetivo  $X_j$ , comparado a outros objetivos, enquanto tendo  $P_1+P_1+.. P_n=1$ .

Veja [Filho,97] para outros processos de tomada de decisão.

#### 4.3. Regra de habilitação em uma TCPN

A regra de habilitação em uma TCPN pode ser enunciada como segue:

Permita que  $A_k$  seja uma alternativa que maximiza  $v(A_i)$  para transição  $t$ . Então  $A_k$  corresponderá ao conjunto de cores  $\{c_i'\}$  com  $i$  como o conjunto de lugares de entrada para  $t$ . Então, a transição  $t$  será habilitada para uma cor  $c$  com respeito à  $c_i'$ , para cada lugar de entrada correspondente  $i$ .

#### 4.4. Exemplo

Tomando a Transição T3 para o exemplo de porto de minério, onde é decidido qual rota usar para carregar um navio (depois de decidir qual pilha o material será retirado de e qual pier se encontra o navio) a seguinte heurística poderiam ser adotada:

- Impacto geral: representa a impossibilidade de usar outras rotas se determinada rota for escolhida;
- Uso da capacidade nominal (fluxo): representa a possibilidade de usar a capacidade nominal para uma rota, dependendo de tamanho de pilha e equipamento de recuperação;
- Carga do Navio: representa a possibilidade de liberar recursos mais rapidamente;
- Custo operacional: representa o custo geral associado a uso de equipamento.

As funções de pertinência seguintes podem ser definidas:

	$R_i \quad I:1 .. n$
Impacto	$\mu_I(R_i, f); f=(\text{grupo}, \text{carga})$
Fluxo	$\mu_F(R_i, f); f=(\text{grupo}, \text{fluxo})$
Carga	$\mu_S(R_i, f); f=(\text{grupo}, \text{capacidade})$
Custo	$\mu_C(R_i, f); f=(\text{grupo}, \text{carga})$

A alternativa vencedora será calculada para as rotas disponíveis (marcas disponíveis no lugar Rotas na entrada da transição T3) no momento de decisão, computando:

$$v(R_i) = \sum P_j \mu_{X[I, F, S, C]j}(R_i, f), j= 1..n;$$

Para cada rota. A alternativa vencedora é aquela com  $Max v(R_i)$  entre as rotas pesquisadas;

Note que se  $Max v(Ri)$  for menor que um limite desejável, a regra de disparo pode não permitir o disparo, neste caso para esperar por uma situação futura quando outras rotas estarão disponíveis.

## 5.SIMULADOR

Um simulador que usa o formalismo descrito está sendo construído. O simulador irá não somente permitir uma aplicação fácil de metodologia proposta, mas também ajudará a achar uma solução satisfatória, mantendo todas as alternativas sobre um determinado limite mínimo desejável.

## 6.CONCLUSÃO

O processo de decisão proposto provou ser útil para o planejamento e programação da produção, quando aplicado a um caso real em um ambiente controlado. Os resultados principais estão relacionados a formalização de um processo de decisão pelo uso das redes de Petri Colorida e Temporizada (TCPN), modelando mesmo tempo o processo de decisão (passos a seguir numa tomada de decisão) e o estado da decisão (situação atual de cada recurso). Também ajudou a provar que algumas atitudes administrativas que são normalmente usadas produzem resultados globais ruins, tais como a troca de ordem de embarque e/ou priorização de determinados navios.

## 7.REFERENCIAS

Peterson, J.L., Petri Net Theory and Modeling of System, Prentice Hall, inc., 1981

Girani, C., Relging, W. et alli, Application and Theory of Petri Net, Springer-Verlang, 1982.

Razouk, R.R. & Estrin, G., The Graph Model of Behavior Simulator. In: Proc. Of Symp on Design Automation and Microprocessor, Palo Alto, Ca, Feb, 1977.

Bako, B., Une Approche Mixte Reseaux de Petri et Systemes de Regles. THESE de Docteur de L'universite Paul Sabatier de Toulouse, 1990.

Genrich, H.J., Colored Petri Nets, Computer Science Department, Aarhus University, Denmark, 92.

Carlier, J., Chretienne, Ph. And Girault, C., Modeling Sheduling Problems with Timed Petri Nets. In: Lecture Notes on Petri Nets, 89.

Filho, W.G., Aplicação da Teoria de sistemas Difusos em Processos de Decisão de Múltiplos Estágios com Múltiplos Objetivos, Tese de Doutorado pelo Dep. Prod. Da USP, 1977(in Portuguese).

Doumeings G., Chein D. and Marcotte: Concepts, Models and Methods for the Design of Production Management Systems. In: Computers in Industry, 19(1982) 89-111.