

# Incorporação de novas regras em uma Rede de Petri Colorida Adaptativa

H. I. Guibu e J. José Neto

**Abstract**— Este artigo apresenta a utilização de Rede de Petri Colorida Adaptativa (RdPCA) que incorpora o conhecimento de especialistas de diferentes áreas. A RdPCA é uma extensão da Rede de Petri Colorida (RdPC) que permite a alteração de sua topologia de forma dinâmica. Anteriormente, Camolesi definiu a Rede de Petri Adaptativa (RdPA) a partir de uma Rede de Petri (RdP) ordinária[2], utilizando o esquema de dispositivo subjacente envolto por uma camada adaptativa. Normalmente, os especialistas em uma determinada área conseguem estabelecer um conjunto de regras para o bom funcionamento de um empreendimento, de um negócio, ou mesmo de um processo de fabricação. Por outro lado, é possível que este mesmo especialista tenha dificuldade em incorporar este conjunto de regras a uma RdPC que descreva e acompanhe a operação do empreendimento e, ao mesmo tempo, seja aderente às regras de bom desempenho. Para incorporar as regras do especialista a uma RdPCA, transforma-se o conjunto de regras do formato IF – THEN para o formato de tabela de decisão adaptativa (TDA) e, em seguida, funções adaptativas da RdPCA incorporam estas regras à RdPCA.

**Keywords**— Redes de Petri Adaptativas, Redes de Petri Coloridas, Redes de Petri Adaptativas Coloridas.

## I. INTRODUÇÃO

As Redes de Petri Coloridas são um aperfeiçoamento das Redes de Petri introduzidas por Carl Petri na década de 60. Em função de sua capacidade na descrição de problemas complexos, sua utilização se espalhou tanto na área de engenharia como também na área administrativa.

Na área de sistemas de apoio à tomada de decisão, as ferramentas mais utilizadas pelos especialistas são as tabelas de decisão, que deram origem a diversos métodos com o objetivo de auxiliar os gestores em suas escolhas.

Entre os métodos desenvolvidos para apoio à decisão estão os denominados métodos multicritério, que envolvem a adoção de múltiplas tabelas de decisão encadeadas de forma hierárquica.

No processo de aperfeiçoamento das tabelas de decisão, observa-se o surgimento de novas características que, apesar de mais complexas, proporcionam aos especialistas a capacidade de descrever de forma mais realista o seu modelo de trabalho.

Neste artigo estão descritos o modo de operação das tabelas de decisão e o modo de transcrever as regras das tabelas para funções estendidas das redes de Petri.

Ao embutir uma tabela de decisão em uma rede de Petri, as ferramentas de simulação e análise disponíveis nos ambientes de desenvolvimento das redes de Petri podem ser utilizadas, o

que gerar um aumento da confiança nos critérios de decisão adotados.

## II. TABELAS DE DECISÃO

A Tabela de Decisão é uma ferramenta auxiliar na descrição de procedimentos de problemas complexos [8].

Uma Tabela de Decisão Convencional, apresentada na Tabela 1, pode ser considerada como um problema composto por condições, ações e regras onde as condições são variáveis que devem ser avaliadas para a tomada de decisão, as ações são o conjunto de operações a serem executadas dependendo das condições neste instante, e as regras são o conjunto de situações que são verificadas em resposta às condições [8].

TABELA I  
Tabela de Decisão Convencional

|                      | Colunas de Regras     |
|----------------------|-----------------------|
| Linhas das Condições | Valores das Condições |
| Linhas das Ações     | Ações a serem tomadas |

Uma regra é constituída pela associação das condições e das ações em uma dada coluna. O conjunto das colunas de regras devem cobrir todas as possibilidades que podem ocorrer em função das condições observadas e das ações a serem tomadas.

Em função das condições atuais de um problema, procuram-se quais regras da tabela satisfazem estas condições:

- Se nenhuma regra satisfaz as condições impostas, nenhuma ação é tomada;
- Se apenas uma regra se aplica, então as ações correspondentes à regra são executadas;
- Se mais de uma regra satisfaz as condições, então as ações correspondentes às regras são aplicadas em paralelo.
- Uma vez aplicadas as regras, a tabela pode ser utilizada novamente.
- As regras de uma tabela de decisão são previamente definidas e novas regras só podem ser acrescentadas ou suprimidas através de uma revisão da tabela.

## II - 1 - TABELAS DE DECISÃO ADAPTATIVAS.

Em 2001 Neto [7] introduz a Tabela de Decisão Adaptativa (TDA) a partir de um dispositivo adaptativo dirigido por regras.

Além da consulta às regras, uma TDA permite que se inclua ou que se exclua uma regra do conjunto de regras durante a operação do dispositivo.

Como exemplo de seu potencial, Neto simula um autômato adaptativo para reconhecer sentenças de linguagens dependentes de contexto.

Na TDA uma tabela de decisão convencional é o dispositivo subjacente ao qual será acrescentado um conjunto de linhas para definição das funções adaptativas.

As funções adaptativas constituem a camada adaptativa do dispositivo adaptativo dirigido por regras. A modificação do conjunto de regras implica no aumento do número de colunas no caso de inserção de regras, ou na diminuição do número de colunas, no caso de exclusão de regras. Em ambos os casos a quantidade de linhas permanece fixa.

A Tabela de Decisão Adaptativa (TDA) é capaz de alterar seu conjunto de regras como resposta a um estímulo externo através da ação de funções adaptativas [8]. Entretanto, a implementação de ações mais complexas não é uma tarefa simples em virtude da limitação das três operações elementares [9].

Quando um dispositivo adaptativo típico está operando e não encontra regras aplicáveis, ele interrompe a sua execução, indicando que esta situação não era prevista.

Para dispositivos de operação contínua, que não possuem estados terminais de aceitação ou rejeição, parar sua execução seria reconhecer uma situação não prevista e constitui um erro.

## II - 2 - TABELAS DE DECISÃO ADAPTATIVAS ESTENDIDAS.

Para superar este problema enfrentado pelos dispositivos de operação contínua, Tchemra [8] criou uma variante da TDA e a denominou Tabela de Decisão Adaptativa Estendida (TDAE).

Na TDAE, a adaptatividade não se aplica apenas durante a aplicação de uma regra, mas também na ausência de regras aplicáveis.

Um dispositivo auxiliar modificador é consultado e a solução produzida pelo modificador é incorporada à tabela na forma de uma nova regra, ou seja, na repetição das condições que provocaram a chamada do dispositivo auxiliar modificador, a nova regra será executada e o dispositivo modificador não precisará ser chamado.

## III. REDES DE PETRI

As redes de Petri (RdP) foram criadas por Carl Petri na década de 60 para modelar a comunicação entre autômatos.

Formalmente, uma rede de Petri é uma quádrupla  $RdP = [P, T, I, O]$  onde

$P$  é um conjunto finito de lugares;

$T$  é um conjunto finito de transições;

$I: (P \times T) \rightarrow \mathbb{N}$  é a aplicação de entrada, onde  $\mathbb{N}$  é o conjunto dos números naturais;

$O: (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$  é a aplicação de saída, onde  $\mathbb{N}$  é o conjunto dos números naturais.

Uma rede marcada é uma dupla  $RM = [RdP, M]$ , onde  $RdP$  é uma rede de Petri e  $M$  é um conjunto com a mesma dimensão

de  $P$  tal que  $M(p)$  contém o número de marcas ou fichas do lugar  $p$ .

No instante inicial,  $M$  representa a marcação inicial da RM e vai variando ao longo do tempo na medida em que as transições vão se sucedendo.

Além da forma matricial indicada na definição formal as redes de Petri, é possível interpretar as redes de Petri como um grafo com dois tipos de nós interligados por arcos que apresenta um comportamento dinâmico, e também como um sistema de regras do tipo “condição  $\rightarrow$  ação” que representam uma base de conhecimento.

A Figura 1 apresenta uma rede de Petri em forma de um grafo, no qual os círculos são os “Lugares”, os retângulos são as “Transições”. Os “Lugares” e as “Transições” constituem os nós do grafo e eles são interligados através dos arcos orientados.

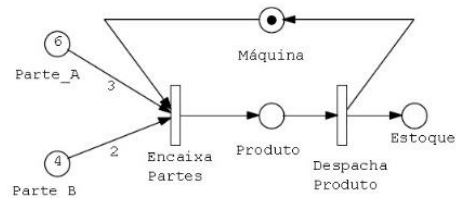


Figura 1. Exemplo de uma rede de Petri.

## III – 1 - REDE DE PETRI COLORIDA

A rede de Petri colorida é uma extensão da rede de Petri ordinária na qual os tipos das fichas não são apenas indicações do estado do sistema, mas sim todos os tipos de variáveis que uma linguagem de programação moderna possui [5].

A rede de Petri colorida está para uma rede de Petri ordinária da mesma forma que uma linguagem de programação de alto nível está para uma linguagem assembler.

Formalmente, uma rede de Petri colorida é definida por uma 9-tupla:

$RdPC = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)$  onde

$P$  é o conjunto finito de lugares,

$T$  é o conjunto finito de transições,

$A$  é o conjunto de arcos direcionados,

$\Sigma$  é o conjunto não vazio de cores,

$V$  é o conjunto de variáveis,

$C$  é o conjunto de funções de guarda,

$E$  é o conjunto de expressões dos arcos,

$I$  é a função de inicialização.

As cores da  $RdPC$  são diferentes tipos de ficha que, no caso da  $RdP$  ordinária, é de um único tipo que corresponde aos números naturais. Além disso, as transições podem depender de expressões

## III - 1 - REDES DE PETRI RECONFIGURÁVEIS

Diversas extensões das Redes de Petri foram desenvolvidas com o objetivo de simplificar a modelagem de Sistemas a Eventos Discretos, inclusive para ambientes distribuídos.

Entretanto, a maioria das extensões não foi projetada para modelar sistemas que se modificam durante sua operação.

Uma vertente das extensões das Redes de Petri que procura atacar o problema da modelagem de sistemas que se modificam durante sua operação é constituída pelas Redes de Petri Auto-modificáveis [10], pelas Redes de Petri Reconfiguráveis via reescrita de grafos [7], pelas Redes de Petri Reconfiguráveis via mecanismo modificador[4], pelas Redes de Petri Adaptativas [1], pelas Redes de Petri Difusas e Adaptativas [6].

Cada uma destas extensões possui características próprias, mas compartilham o fato de poderem modificar, durante a execução, as regras de disparo das transições ou a topologia da rede.

Com o mesmo nome, a mesma sigla, mas de origens diversas, encontramos na literatura as Redes de Petri Reconfiguráveis (Reconfigurable Petri Nets - RPN) introduzidos em [4] e em [7].

O trabalho de Llorens e Oliver é uma evolução do trabalho de Badouel e Oliver [[1] e combina as técnicas das gramáticas de grafos com a ideia de Rede de Petri Auto-Modificável de Valk, criando um sistema de reescrita da rede. Neste trabalho, Llorens e Oliver demonstraram a equivalência entre as RPN e as PN em termos de propriedades e também que as RPN são equivalentes às máquinas de Turing quanto ao poder de expressão.

Na Figura 2 temos esquematizado uma Rede de Petri Reconfigurável conforme Guan. Existem duas camadas interdependentes, a camada de controle e a camada de apresentação. Os lugares da camada de controle são diferentes em sua natureza dos lugares da camada de apresentação.

Cada lugar da camada de controle possui associado um conjunto de funções que são capazes de alterar a topologia da camada de apresentação, ou seja, reconfiguram a camada de apresentação.

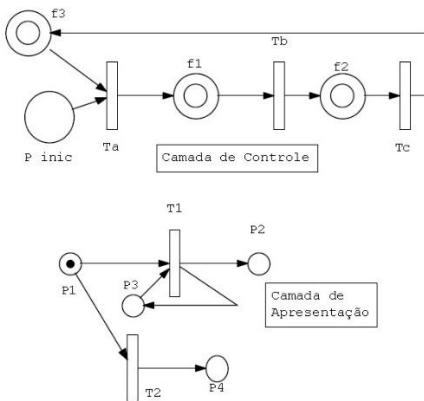


Figura 2. Rede de Petri Reconfigurável conforme Guan.

### III - 2 - REDES DE PETRI ADAPTATIVAS

Uma rede de Petri adaptativa foi definida por Camolesi [2] a partir do esquema dispositivo subjacente mais camada adaptativa da seguinte forma:

$RdPA = (C_0, AR_0, \Sigma, c_0, A, NA, BA, AA)$  na configuração inicial  $c_0$ .

Estímulos de entrada movimentam a RdPA para a próxima configuração se, e somente se, uma ação adaptativa não-vazia for executada.

No  $k$ -ésimo passo temos:

$RdPA_k = (C_k, AR_k, \Sigma, c_k, A, NA, BA, AA)$ , onde

$RdPA = (RdP_0, AM)$  é formado por um dispositivo inicial subjacente ( $RdP_0$ ) e um mecanismo adaptativo AM;

RdP é o dispositivo Rede de Petri no passo  $k$ .  $RdP_0$  é o dispositivo subjacente inicial e o conjunto  $CR_0$  representa o comportamento não-adaptativo inicial;

$C_k$  é o conjunto de todos os possíveis comportamentos de RdP no passo  $k$  e  $c_k \in C_k$  é o seu comportamento inicial no passo  $k$ ;

$\varepsilon$  ("cadeia vazia") denota ausência de elemento válido;

$\Sigma$  é o conjunto de todos os possíveis eventos de que se compõem a cadeia de entrada;

$A \subseteq C$  é o subconjunto de configurações de aceitação de RP;

$F = C - A$  é o conjunto das configurações de rejeição de RP;

BA e AA são conjuntos de ações adaptativas, que incluem a ação vazia;

$w = w_1 w_2 \dots w_n$  é a cadeia de entrada;

NA é um conjunto finito de todos os símbolos que podem ser gerados como saídas por RdPA em resposta à aplicação de regras adaptativas;

$AR_k$  é o conjunto das regras adaptativas que definem o comportamento adaptativo de RdPA no passo  $k$  e é dado por uma relação  $AR_k \subseteq BA \times \Sigma \times C \times RP \times AA$ .

$AR_0$  define o comportamento inicial da RdPA e as ações adaptativas de inserção ou eliminação de lugares e transições vão transformando o conjunto de regras.

As regras  $reg \in AR_k$  são da forma  $\langle ba, (P, T, I, O), \langle aa \rangle \rangle$  e operam da seguinte forma:

Um símbolo  $\sigma \in \Sigma$  faz  $reg$  executar a ação  $ba \in BA$ . Se a ação de  $ba$  eliminar  $reg$  de  $AR_k$ , a execução de  $reg$  é abortada, caso contrário, aplica-se a regra subjacente de  $reg = (P, T, I, O)$ . Finalmente, executa-se a ação adaptativa  $aa \in AA$ .

### III - 4 - REDE DE PETRI COLORIDA ADAPTATIVA

A rede de Petri Colorida Adaptativa utiliza o mesmo esquema de envolver o dispositivo subjacente (RdPC) com uma camada adaptativa (CA).

$RdPCA = (RdPC, CA)$  onde

RdPC é a rede de Petri colorida convencional,

$CA = (FA, RA)$  é a camada adaptativa.

Por sua vez, a camada adaptativa é composta pelo conjunto de funções adaptativas (FA) e pelo conjunto de regras tipo IF – THEN (RA).

FA é o conjunto de funções adaptativas e está embutida na rede de Petri Colorida Adaptativa.

RA é o conjunto de regras que deverá ser inserido na rede de Petri Colorida Adaptativa através da execução das funções adaptativas.

As funções adaptativas básicas são de inspeção, inserção ou incorporação e exclusão de uma regra.

Na Tabela II temos esquematizado um exemplo de conjunto de regras a serem inseridas em uma RdPCA.

TABELA II  
Regras para serem transformadas em funções da RdPA

|                    |   | Regras  |          |      |      |       |
|--------------------|---|---------|----------|------|------|-------|
|                    |   | R1      | R2       | R3   | R4   | R5    |
| Condições          | A | A = 4   | A > 4    | A=4  | A=6  | A=1   |
|                    | B | B= TRUE | B= FALSE | B    | B    | B     |
|                    | C | C >6    | C ≠6     | C=6  | C    | C     |
| Ações/<br>Decisões | D | A+2     | 5        | 4    | A-3  | 2     |
|                    | E | TRUE    | FALSE    | TRUE | TRUE | FALSE |

A regra R1 possui três condições (A<4, B=ON, C=X) e duas ações (D=A+2, E=ON).

Para transformar esta regra em uma parte de uma rede de Petri, é utilizado um modelo (Lugar,Transição,Lugar) esboçado na Figura 3.

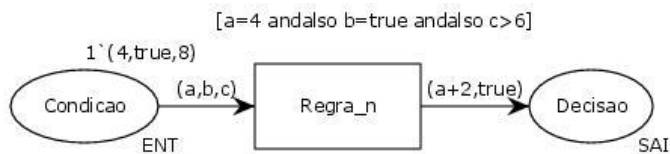


Figura 3- Modelo básico para transcrever uma regra da Tabela 3

Conforme as regras vão sendo inseridas, elas vão sendo agrupadas hierarquicamente, ou seja, a execução das regras vai depender da sequência de decisões que forem ocorrendo na rede de Petri.

Na Figura 4 está esquematizado o resultado da inserção de três regras que compõem um certo subconjunto que compõem o total de regras.

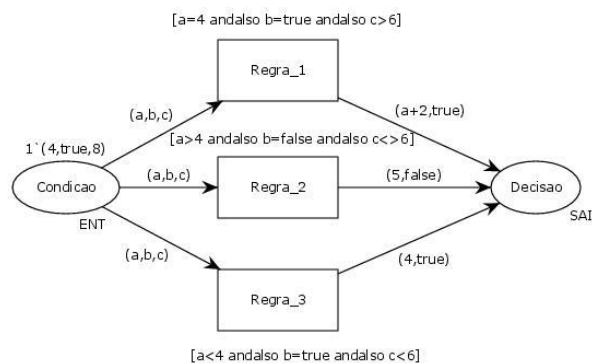


Figura 4- Subconjunto de regras em uma hierarquia

Ao inserirmos estas regras na rede de Petri, o conhecimento gerado pelo especialista passa a ser incorporado na rotina de acompanhamento do empreendimento, alertando o gestor em caso de alguma decisão implicar em não conformidade com as regras.

#### IV. EXEMPLO DE INSERÇÃO DE REGRA

Na Figura 5 está esquematizado o processo de fabricação de um produto a partir de 4 matérias primas, utilizando-se três máquinas.

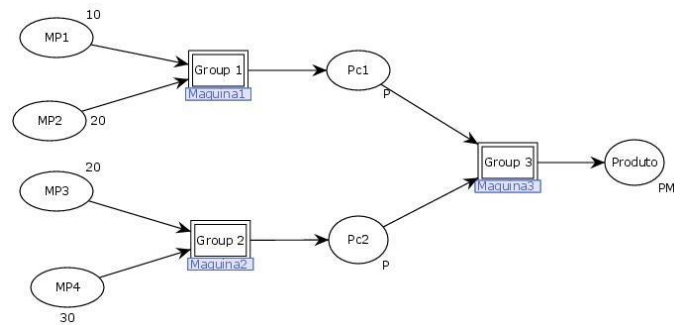


Figura 5- Rede de Petri de fabricação de um produto a partir de 4 matérias primas

A máquina 1 transforma as matérias primas MP1 e MP2 na peça 1, a máquina 2 transforma as matérias primas MP3 e MP4 na peça 2, e a máquina 3 utiliza as duas peças Pc1 e Pc2 para gerar o Produto.

Na Figura 6 está esquematizada a sub-rede correspondente ao funcionamento da máquina 1 e que é o mesmo para as máquinas 2 e 3.

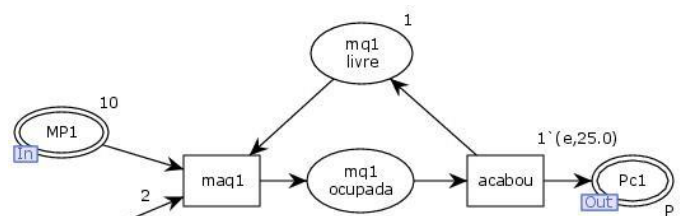


Figura 6- Rede de Petri de operação da Máquina 1

O funcionamento das máquinas especificado pela rede de Petri da Figura 5 foi definido pelo setor de fabricação.

Posteriormente, o setor de controle de qualidade detectou que o produto final não estava adequado, apresentando uma regra simples para melhorar a qualidade do produto.

Se x1 de Pc1 >= x2 de Pc2, então completar o produto, caso contrário, encaminhar Pc1 e Pc2 para reciclagem, onde x1 é um parâmetro da Peça 1 e x2 é um parâmetro da Peça 2.

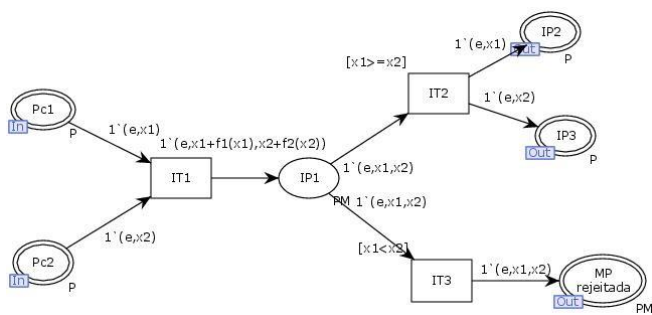


Figura 7- Sub-rede de Petri correspondente à regra de controle de qualidade inserida

A Figura 7 detalha a transformação da regra acrescentada na Rede de Petri de fabricação a partir de uma nova regra tipo IF-THEN, produzindo a nova Rede de Petri esquematizada na Figura 8.

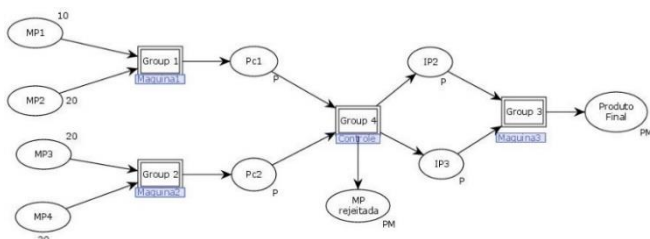


Figura 8- Rede de Petri modificada após a inserção de nova regra de controle

A transformação do formato de regras é útil quando o formato destino é mais adequado a uma aplicação que o formato original.

No exemplo fornecido, as Redes de Petri são mais utilizadas nos processos de fabricação que as Tabelas de Decisão. Além disso, diversas metodologias desenvolvidas para as Redes de Petri possibilitam detectar a existência de deadlocks e também a aplicação de esquemas que evitam seu aparecimento em redes de fabricação.

## V. CONCLUSÃO

Neste trabalho mostramos como prover adaptatividade às redes de Petri coloridas, definindo as redes de Petri adaptativas coloridas (RdPCA) que são capazes de incorporar tabelas de decisão em redes de Petri.

Esta característica tem implicação prática, pois possibilita a união de dois ou mais conjuntos de saberes que normalmente convivem em paralelo, interagem, mas muitas vezes sem um sincronismo adequado.

Como exemplo, as boas práticas de gestão muitas vezes são desconsideradas no dia-a-dia de um empreendimento em virtude do desconhecimento das consequências de certas decisões, nem sempre aparentes, ou seja, a ferramenta de acompanhamento de um empreendimento feita por um especialista não contempla os cuidados e recomendações de outro especialista.

Em outras áreas onde a utilização das redes de Petri está muito disseminada, também é possível obter um ganho como, por exemplo, nos sistemas de manufatura flexível.

As regras para operação em caso de falhas podem ser incorporadas à rede padrão, possibilitando maior agilidade na operação sem a necessidade de parar o processo até que os especialistas nas falhas assumam o controle.

As recomendações destes especialistas já seriam incorporadas à rede de Petri padrão utilizada no monitoramento da operação.

## REFERÊNCIAS

- [1] Badouel E. ; Oliver, J. Reconfigurable Nets, a Class of High Level Petri Nets Supporting Dynamic Changes with Workflow Systems. [S.l.],1998.
- [2] Camolesi, A. R. Proposta de um Gerador de Ambientes para a Modelagem de Aplicações usando Tecnologia Adaptativa. Tese (Doutorado) —Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- [3] Guan S. U. ; Yu, H. Y.; Yang, J.-S. A prioritized petri net model and its application in distributed multimedia systems. IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS, VOL. 47, NO. 4, APRIL 1998, 1998.
- [4] Guan S. U. ; Lim, S. S. Modeling adaptable multimedia and self-modifying protocol execution. Future Generation Computing Systems, vol.20, no 1, pp. 123-143, 2004.
- [5] K. Jensen and L. M. Kristensen, Coloured petri nets: modelling and validation of concurrent systems, 1st ed., Springer Publishing Company, Incorporated., 2009.
- [6] Little T. D. C.; Ghafoor, A. Synchronization and storage model for multimedia objects. IEEE J. Selected Areas Comm., pp. 413-427, Apr.1990., 1990.
- [7] Llorens, M. ; Oliver, J. Structural and dynamic changes in concurrent systems: Reconfigurable petri nets. IEEE Trans. Comput., vol. 53, no.9, pp. 11471158, 2004.
- [8] Neto, J. J. Adaptive rule-driven devices - general formulation and case study. Proc. 2001 Lecture Notes in Computer Science. Watson, B.W. and Wood, D. (Eds.): Implementation and Proc. 2001 Lecture Notes in Computer Science. Watson, B.W. and Wood, D. (Eds.): Implementation and Application of Automata 6th International Conf., Springer-Verlag, Vol.2494, pp. 234-250., 2001.
- [9] Tchemra, A. H. Tabela de decisão adaptativa na tomada de decisões multicritério. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2009.
- [10] Valk, R. Self-modifying nets, a natural extension of petri nets. Lecture Notes in Computer Science, vol. 62, pp. 464-476, 1978.



**Haroldo Issao Guibu** é graduado em Engenharia de Eletricidade e mestre em Engenharia Elétrica (1998) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo das áreas de Eletrônica e Automação. Tem experiência na área de Automação com CLPs e Sistemas de Operação baseados em falhas seguras.



**João José Neto** é graduado em Engenharia de Eletricidade (1971), mestre em Engenharia Elétrica (1975), doutor em Engenharia Elétrica (1980) e livre-docente (1993) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e coordena o LTA – Laboratório de Técnicas Adaptativas do PCS – Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da EPUSP. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase nos Fundamentos da Engenharia da Computação, atuando principalmente nos seguintes temas: dispositivos adaptativos, tecnologia adaptativa, autômatos adaptativos, e em suas aplicações à Engenharia da Computação, particularmente em sistemas de tomada de decisão adaptativa, análise e processamento de linguagens naturais, construção de compiladores, robótica, ensino assistido por computador, modelagem de sistemas inteligentes, processos de aprendizagem automática e inferências baseadas em tecnologia adaptativa.