



APLICAÇÃO DA MODELAGEM POR REDES DE PETRI PARA AVALIAÇÃO OCUPACIONAL DE TRABALHADORES

APPLICATION OF PETRI NETS MODELLING FOR WORKMANSHIP OCCUPATIONAL ASSESSMENT

Jonas Lied

Especialista em Engenharia de Segurança
Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança
Av. Unisinos 950, 93022-000, São Leopoldo, RS
51 3591-1166 jonaslied@gmail.com

Miguel Afonso Sellitto

Doutor em Engenharia de Produção
Universidade do Vale do rio dos Sinos - UNISINOS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS
Av. Unisinos 950, 93022-000, São Leopoldo, RS
51 3591-1166 sellitto@unisinos.br

RESUMO

Este trabalho introduz a modelagem por Redes de Petri Coloridas (RPC) como ferramenta para avaliação dos riscos ocupacionais de trabalhadores em uma linha de manufatura. O uso da ferramenta consiste em modelar a linha de manufatura por RPC, simular o modelo em computador, informando a situação inicial do processo. A partir deste ponto, com os resultados obtidos da simulação avaliar a carga de trabalho individual dos trabalhadores, permitindo verificar quais as tarefas desenvolvidas devem ser estudadas para diminuição dos riscos ocupacionais envolvidos. Foi possível verificar que alguns trabalhadores estão sobrecarregados e outros folgados na linha de montagem estudada.

Palavras-chave: Simulação; Redes de Petri Coloridas; Ergonomia.

ABSTRACT

This paper introduces the Color Petri Networks (CPN) modeling as a tool for assessing occupational risks for workers in a manufacturing line. The use of the tool is based on modeling the manufacturing line by CPN, running the model in a computer, loading it with the initial process situation. After that, with the obtained results, proceed the evaluation of the workload for individual workers checking which tasks should be studied to reducing the involved occupational risks. We checked out that some workers are overwhelmed and others are idle in the studied assembly line.

Key-words: Simulation; Colored Petri Nets; Ergonomic.



1. INTRODUÇÃO

Diante da crescente competitividade do mercado, um modo de aprimoramento do processo produtivo é a racionalização dos recursos materiais e humanos requeridos pela manufatura. Esta busca resulta em aumento da rentabilidade da empresa e permite à mesma manter-se dentro de mercados cada vez mais exigentes. Uma parte dos resultados que permitem que uma empresa se mantenha competitiva no mercado vem da gestão e do conhecimento que se possa adquirir acerca do sistema de manufatura nela operante. Em empresas de fabricação, é a manufatura que garante a produção dos bens que, vendidos, aportarão os recursos financeiros necessários à sustentação da empresa.

A manufatura evoluiu do simples ato de fazer com as mãos (*manu factum*), para um conjunto de ações que transforma matérias-primas em produtos. Os sistemas de manufatura agregam valor ao produto durante o processo de transformação. O objetivo de um sistema de manufatura é executar a transformação de maneira mais eficiente possível, assegurando o melhor retorno financeiro à empresa. Um sistema de manufatura é definido como um conjunto de entidades, por exemplo, pessoas e máquinas, que atuam e interagem segundo regras lógicas para a fabricação de um produto com um fim definido (WIENDAHL, 1989).

Um fator produtivo relevante em um sistema de manufatura são os trabalhadores. A gestão da manufatura não pode ter como objetivo somente alcançar o ponto ótimo técnico ou econômico do sistema, mas alcançá-lo com a melhor condição humana possível, dedicando parte dos esforços de gestão ao atendimento de necessidades de pessoas. Trabalhadores possuem características que devem ser respeitadas dentro do ambiente fabril, no mínimo em igualdade de importância em relação à otimização da manufatura.

Este artigo apresenta uma aplicação de uma ferramenta de modelagem, baseada em Redes de Petri Coloridas (RPC), como apoio à decisão sobre um tema que relaciona pessoas e manufatura, a análise ocupacional de trabalhadores. Foi estudada uma linha de montagem em uma manufatura, na qual foram avaliados o ritmo de trabalho e a carga de tarefas, a fim de verificar a situação de cada um dos trabalhadores e propor melhorias nos itens necessários. O objetivo principal do artigo foi analisar a situação ocupacional de trabalhadores em uma linha de montagem e eventualmente propor melhorias na distribuição de tarefas. Os objetivos específicos foram: (i) mapeamento da linha de montagem escolhida; (ii) modelagem da mesma por RPC, incluindo ajustes no modelo e validação com dados de campo; (iii) a partir



do modelo, verificar a carga de trabalho de cada um dos trabalhadores; e (iv) discutir a aplicação e eventualmente propor melhorias. A limitação do artigo é que foi desenvolvido em uma única empresa durante o período de duas semanas.

O método de pesquisa foi a simulação computacional. A contribuição do artigo está no fato de introduzir a modelagem por RPC como ferramenta de avaliação ocupacional, podendo o método ora testado ser aplicado em outros sistemas produtivos.

Durante o desenvolvimento da pesquisa foram consultadas algumas referências que podem ser citadas, pois possuem relação com o objetivo deste artigo. Silva (2002) aplica Redes de Petri (RdP) para redução de custos em manufatura. Aplicações similares surgem em Dicesare *et al.* (1993). Jeng *et al.* (2000) apresentam uma teoria para o uso de RdP na modelagem de sistemas de manufatura. Boucher *et al.* (1989) aplicam RdP para controle de células de manufatura. Lee e Dicesare (1994) usam RdP em conjunto com heurísticas de busca para programar manufatura flexível. Martinez *et al.* (1987) usam RdP para especificar um sistema de coordenação de produção. Zhou e Dicesare (1991) usam RdP em programação de manufatura com compartilhamento de recursos. Proth *et al.* (1997) e Jeng *et al.* (2000) propõem classes de RdP específicas para modelagem de sistemas de manufatura de alta complexidade. Fung *et al.* (2002) usam RdP em controle adaptativo de manufatura. Wu e Zhou (2001), Xiong e Zhou (1997), Banaszak e Krogh (1990) e Xing *et al.* (1996) aplicam diferentes métodos baseados em RdP para tratar de um problema que pode surgir em manufatura flexível, o *deadlock*, quando duas tarefas ficam esperando, uma pela outra.

O restante do artigo está organizado em: (i) revisão bibliográfica sobre RdP, RPC e fundamentos de modelagem; (ii) coleta de dados referentes ao processo produtivo; (iii) modelagem do processo por software específico; (iv) validação e comparação do modelo desenvolvido e alterações propostas; e (v) conclusões.

2. REDES DE PETRI COLORIDAS

Redes de Petri (RdP) são um tipo de representação gráfica de sistemas. Foram apresentadas por Carl Adam Petri no ano de 1962, em sua tese de doutoramento, cujo título original pode ser traduzido por Comunicação com Autômatos (PETRI, 1962). Mais tarde, pesquisadores do MIT lançaram as bases que permitiram usar as RdP como ferramenta de modelagem de sistemas contendo processos concorrentes e assíncronos, cuja modelagem por



outras técnicas, tais como Filas de Espera, Cadeias de Markov ou Redes PERT, é mais imprecisa. Pode-se definir RdP como um grafo orientado composto de dois tipos de nós, lugares e transições, onde arcos ligam lugares às transições ou transições à lugares. Na representação gráfica de uma RdP um lugar é representado por um círculo, transições são representadas por barras ou retângulos. Os arcos podem ser valorados, ou seja, possuírem peso, um valor inteiro positivo. Quando um arco possui valor unitário, omite-se a marcação. Já em arcos com peso maiores que um, o valor é assinalado ao lado do arco e pode ser interpretado como a existência de vários arcos em paralelo. Dentro dos lugares são colocadas as fichas ou marcas, as quais são representadas por pontos pretos para pequenas quantidades ou numeral para quantidades maiores (DRATH e SCHWUCHOW, 1997; JENSEN, 1997; MURATA, 1989; MACHADO *et al.*, 2006).

Na modelagem, ao se utilizar o conceito de condições e eventos, os lugares das RdP's representam as condições e as transições representam os eventos. Uma transição (um evento) possui certo número de lugares de entrada e saída que representam pré e pós condições do evento respectivamente. Uma RdP é uma quintupla, (P, T, W, Mo, F) na qual P representa um conjunto finito de lugares; T representa o conjunto finito de transições; W armazena os pesos aos arcos; Mo é a marcação inicial dos lugares; e $F [(P \times T) \cup (T \times P)]$ representa a união de subconjuntos de arcos no qual: o subconjunto $(P \times T)$ inclui os arcos que ligam lugares às transições; e o subconjunto $(T \times P)$ inclui os arcos que ligam transições aos lugares. O comportamento de muitos sistemas, inclusive produtivos, pode ser descrito em termos de estados e suas alterações (MURATA, 1989).

De modo a simular o comportamento dinâmico, um estado ou marcação em RdP é alterada de acordo com a seguinte regra de disparo: (i) uma transição T é dita habilitada se cada lugar de entrada p possui um número igual ou superior de marcas que os pesos dos arcos que ligam o lugar à transição; (ii) uma transição habilitada poderá ou não ser disparada, situação a qual depende se o evento deve acontecer neste passo; (iii) o disparo de uma transição T remove as marcas de cada lugar de entrada conforme o peso do arco que liga tal lugar à transição, e adiciona o número equivalente de fichas aos lugares de saída conforme o peso do arco que liga a transição aos lugares de saída (REISIG, 1998).

A Figura 1 apresenta um exemplo de uma RdP e mostra a aplicação da regra de disparo. Na parte superior da figura, tem-se a condição pré-disparo, duas marcas nos lugares $P1$ e $P2$. O arco que liga o lugar $P1$ à transição $T1$ possui peso 2, ou seja, irá remover duas marcas quando ocorrer o disparo da transição $T1$, enquanto o arco que liga o lugar $P2$ à



transição T1 tem o peso 1. Já na parte inferior da figura é apresentada a mesma rede, porém após o disparo de T1. Observa-se a remoção das duas marcas presentes em P1 e uma marca de P2. São colocadas em P3 duas fichas, conforme o peso do arco que liga a transição a este lugar. Não existe relação entre o número de marcas que “entram” e “saem” de uma transição (CASTRUCCI e MORAES, 2001; MURATA, 1989).

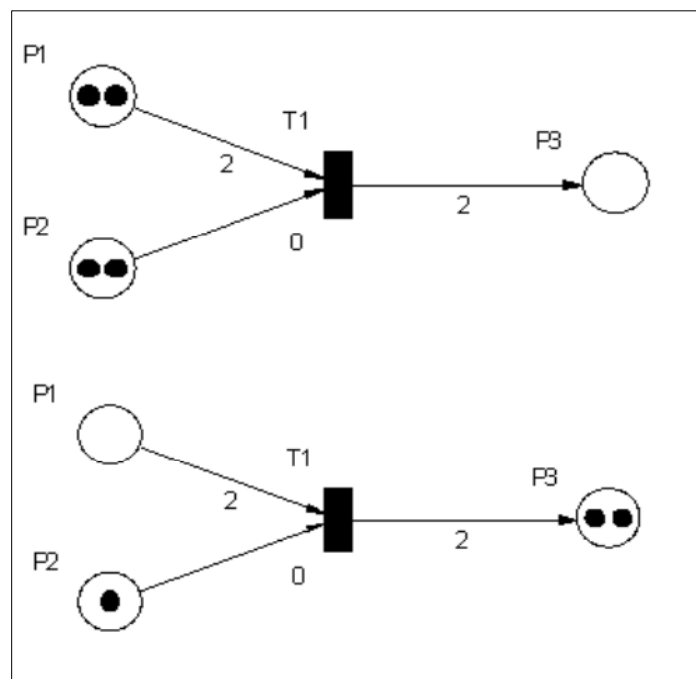


Figura 1 – RdP antes e depois do disparo de T1
Fonte: Murata (1989)

A utilização prática de modelagem aponta que muitos sistemas tendem a ser complexos, fazendo com que RdP ordinárias sejam insuficientes para representar um modelo de maior complexidade (HENNEMAN, 2004). Para simplificar o modelo de representação de sistemas, surgiram as redes de alto nível, com as quais é possível representar modelos de maiores dimensões em estruturas relativamente menores, as Redes de Petri Coloridas (RPC) (MACIEL *et al.*, 1996). As RPC associam parte dos dados às fichas e às transições, permitindo o dobramento (representar um conjunto de processos com uma mesma estrutura em um único componente conservativo) sem perda de informação referente ao processo, além de manter uma visualização gráfica adequada (PETERSON, 1981; CARDOS e VALLETTE, 1981)

Segundo Jensen (1997), uma RPC é definida como uma eneátupla $(\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I)$, na qual: (i) Σ é um conjunto finito e não vazio de cores, conjunto de cores determina



os tipos de dados, operações e funções que podem ser usados nas inscrições da rede, ou seja, nas expressões de arco, guardas, expressões de inicialização e conjunto de cores, assume-se que cada conjunto de cores tem, pelo menos, um elemento; (ii) P é um conjunto finito de lugares; (iii) T é um conjunto finito de transições; (iv) A é um conjunto finito de arcos tal que: $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$; (v) N é a função nó que é definida por $A \cap P \times T \cap T \times P$; (vi) C é uma função cor definida por $P \rightarrow \Sigma$; (vii) G é uma função guarda definida por T ; (viii) E é a função de arco definida por A ; e (ix) I é a função de inicialização definida por P .

Jensen (1997) apresenta um conceito importante para o estudo das RPC's, o multiconjunto. Este conceito possibilita o armazenamento de marcas individualizadas em um mesmo lugar. Um multiconjunto é um conjunto que apresenta uma particularidade: pode haver múltiplas ocorrências de uma mesma marca. Como exemplo, seja um conjunto $A = \{a, b, c\}$, e que se deseje adicionar um elemento "c" ao conjunto A . Pela regra da união de conjuntos, tem-se: $A = \{a, b, c\}$, mas em se tratando de multiconjuntos, ter-se-ia $A = \{a, b, c, c\}$. Como definição formal, um multiconjunto é $\sum (s \in S) m(s)S$, no qual: S é um conjunto não vazio e; $m(s)$ é o número de ocorrências do elemento s no multiconjunto m . A Figura 2 apresenta a propriedade de adição de multiconjuntos. O primeiro conjunto possui marcas do tipo a, c, e e, enquanto o segundo conjunto possui marcas do tipo a, b, c, e e. O conjunto resultante é o somatório de cada tipo de marcas presentes em cada um dos conjuntos iniciais.

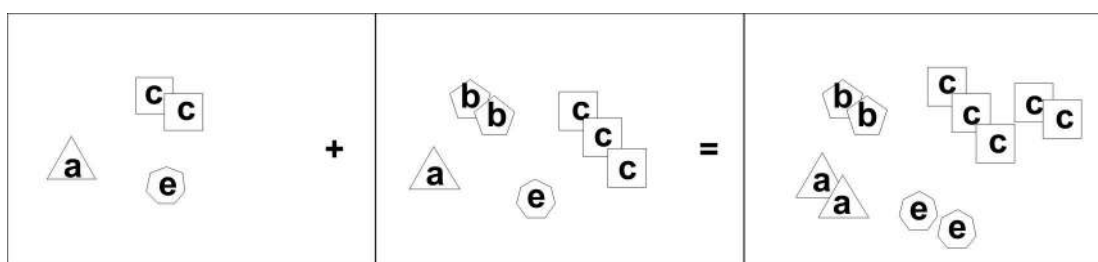


Figura 2: Propriedade de adição de multiconjuntos
Fonte: Jensen (1997)

Resumindo o formalismo exposto, pode-se dizer que o fato das fichas expressarem informações complexas aumenta o poder de descrição das redes RPC e, conseqüentemente, modelos mais compactos podem ser obtidos. Esta flexibilidade resulta na possibilidade do projetista distribuir a complexidade do modelo de um sistema entre as inscrições, declarações à estrutura da rede. Portanto, uma RPC compõe-se de três partes distintas: estrutura, declarações e inscrições. A estrutura é formada por lugares, transições e arcos direcionados,



tal como em RdP. As declarações definem conjuntos de cores (domínios), variáveis e operações (funções) usadas nas inscrições. As inscrições, por sua vez, podem ser de quatro tipos: (i) cores dos lugares: determinam à cor associada ao lugar e um lugar só pode comportar fichas cujos valores respeitem sua cor; (ii) guardas: são expressões booleanas que restringem a ocorrência das transições; (iii) expressões dos arcos: servem para manipular a informação contida nas fichas e; (iv) inicializações: associadas aos lugares, estabelecem a marcação inicial da rede (LEMOS, 2001).

Como as RdP's, as RPC's também são grafos direcionados e bipartidos. Entretanto, ao invés de pesos inteiros, são associadas aos arcos inscrições que determinam dinamicamente quantas e quais fichas devem ser removidas ou adicionadas aos lugares associados, na ocorrência de uma transição. Inscrições, denominadas guardas, podem ser também associadas às transições. Guardas restringem a ocorrência de transições a determinadas condições. O estado inicial de uma RPC também é determinado por inscrições associadas aos lugares. Cada inscrição é, em geral, uma expressão construída a partir de constantes, variáveis e operadores previamente definidos. Uma RPC também possui um conjunto de declarações para indicar a natureza dos elementos citados nas diversas inscrições, à semelhança de uma área de declarações de uma linguagem de programação qualquer.

As inscrições e declarações de uma RPC podem, em princípio, ser escritas em praticamente qualquer linguagem com sintaxe e semântica bem definidas. Em geral, as RPC's tem sido utilizadas em associação com uma linguagem denominada CPN-ML, derivada da linguagem Standard ML. A abreviação ML tem sua origem do inglês *Marking Language*, cuja sintaxe é semelhante à utilizada por linguagens de programação convencionais.

Na teoria das RPC's, utiliza-se a expressão conjunto de cores, em substituição a tipos de dados e, por consequência, cada valor é denominado cor, que pode ser de um tipo arbitrário de dados (inteiro, real, lista, etc.). Desta forma, cada lugar na estrutura interna, é associado a um conjunto de cores, que indica o tipo de fichas que o lugar pode conter, ou seja, para um dado lugar, todas as fichas devem ter cores que pertencem a um mesmo tipo. A linguagem CPN-ML dispõe de mecanismos que permitem a definição de conjuntos de cores relativamente complexos.

Variáveis de transição referem-se ao conjunto de variáveis presentes nas inscrições dos arcos e na guarda da referida transição. Uma ligação (*binding*) é a substituição de cada variável da transição por uma cor (valor). É requerido, entretanto, que as cores pertençam aos conjuntos de cores apropriados e que impliquem a avaliação da guarda como verdadeira.



Em cada marcação, a ocorrência de uma transição sob uma determinada ligação é dita habilitada, se todos os seus lugares de entrada tiverem fichas suficientes para satisfazer às expressões dos arcos. Cada expressão deve ser devidamente avaliada segundo as substituições determinadas pela ligação, a fim de determinar quantas e quais fichas são requeridas nos lugares de entrada. Caso a transição ocorra, então são retiradas fichas dos lugares de entrada e depositadas novas fichas nos lugares de saída. A quantidade de fichas é determinada também pela avaliação das expressões dos arcos, segundo as substituições implicadas pela ligação.

3. SIMULAÇÃO E MODELAGEM

A simulação é uma técnica oportuna de ser utilizada por acontecer em um ambiente controlado, onde os experimentos podem ser repetidos várias vezes sem prejuízo aos atores da cadeia. Além disso, permite comparar diferentes alternativas, analisar cenários futuros, analisar os efeitos de mudanças de políticas econômicas e sociais, modelar relações lineares e não-lineares (relação entre custos e nível de serviço, por exemplo), modelar fenômenos estocásticos e permitir a análise de desempenho sob situações de incertezas (demanda, prazos, sazonalidades de produção, entre outras). A simulação tem como idéia o fato que muitos fenômenos, normalmente de natureza complexa, podem ser mais bem entendidos como um sistema de agentes autônomos, pois eles são de concepção relativamente simples e seguem regras também relativamente simples quando precisam interagir com outros agentes do seu ambiente. Além disso, está interessada não somente no projeto e entendimento de agentes artificiais, mas também na modelagem do comportamento humano social e na tomada de decisão individual. Dessa forma, torna-se necessário representar interações sociais, comportamento de grupos, colaboração e a emergência de estruturas sociais (SAMUELSON e MACAL, 2006).

Para Banks (1998), simulação é a imitação de operações de processos reais. Para Ritzmann e Krajewski (2004), simulação é o ato de reproduzir o comportamento de um sistema. Nestas definições, o ato de antever o que acontecerá com o sistema real está presente. O conceito de modelo está intrinsecamente ligado ao conceito de simulação, já que é a base para este. Para Law e Kelton (2000), um modelo simulável em computador é um mecanismo que transforma parâmetros de entrada, conhecidos e associados às exigências de um processo, em parâmetros de saída e métricas de desempenho que ainda não aconteceram no mundo real. Para



Fitzpatrick *et al.*(1993), muitas decisões poderão ser tomadas apoiadas de modelos simulados em computadores que servirão para analisar e avaliar um amplo conjunto de problemas do mundo real. Para Prado (1999), dois fatores principais justificam o uso da simulação: (i) a inviabilidade da interferência com o sistema real, trata-se daquela situação em que alterar o sistema existente, sem ter certeza de que alteração vai dar certo, pode significar alto risco de prejuízo, por exemplo seria a alteração de leiaute de uma fábrica; e (ii) o sistema em estudo não existe, por exemplo, a construção de uma nova fábrica. Para Pidd (1998), os modelos desenvolvidos para as ciências administrativas devem ser simples e comunicáveis, pois são construídos para apoio a decisões empresariais, tomadas por gestores.

A simulação de sistemas tem sido utilizada para aperfeiçoar sistemas existentes e antever o funcionamento dos novos. Para obterem-se resultados confiáveis, duas etapas devem ser seguidas: (i) construção do modelo da situação atual: nesta etapa tentamos reproduzir em um modelo computacional as situações existentes no sistema atual, trata-se de construir um modelo, fornecer alguns dados e obter outros que sejam idênticos ao sistema atual em estudo, ou seja, o modelo construído deve reproduzir fielmente o sistema que está sendo estudado e; (ii) inclusão de alterações no modelo da situação atual para refletir a situação futura desejada: nesta etapa, efetuam-se alterações no modelo de modo a verificar se os resultados obtidos atendem aos valores desejados (PRADO, 1999).

Os modelos de simulação podem ser classificados de acordo com critérios. Segundo Tavieria (1997), os principais são: (i) determinísticos ou estocásticos: quando todas as variáveis do modelo são determinísticas (fixas), ou quando envolvem distribuições de probabilidade; (ii) estáticos ou dinâmicos; quando o modelo se altera ou não ao longo do tempo, e; (iii) discreto ou contínuo; quando as alterações de estado do modelo são feitas em pontos do tempo, ou se elas se desenvolvem de maneira contínua.

Os primeiros sistemas de apoio à decisão (SAD) nasceram nos anos 1960, mas foi a partir dos 1980 que apresentaram capacidade significativa de processamento e ajudaram no processo de tomada de decisão. Permitindo experimentar novas estratégias e determinar a eficácia das mesmas para os fins desejados, além de visualizar as interações inerentes ao processo, a simulação pode ser considerada um SAD, pois pode auxiliar o responsável na tomada de decisões frente a novos cenários e aumenta a chance de sucesso na escolha feita.



4. A PESQUISA

A pesquisa utilizou a técnica de simulação computacional. Foram feitas algumas simplificações ao desenvolver o modelo, mas sem perda da fidelidade e da replicabilidade. As etapas desenvolvidas foram: (i) escolha do processo, seu mapeamento e coleta dos dados; (ii) desenvolvimento do modelo por RPC; (iii) inserção dos dados da situação inicial do sistema no modelo, execução do modelo e ajustes finos; (iv) a partir dos resultados, verificar o nível de ocupação dos trabalhadores envolvidos; e (v) análise dos resultados e da aplicabilidade do método para análises ocupacionais em outros sistemas de manufatura. A pesquisa não teve por objetivo comparar o método de modelagem por CPN com outros modelos de simulação computacional. Foi escolhido como processo a ser modelado uma linha de montagem de um equipamento audiovisual, devido à sua disponibilidade e à facilidade de acesso.

4.1 Desenvolvimento do modelo

A manufatura escolhida produz equipamentos audiovisuais, tais como projetores, telas e materiais associados. O principal processo de fabricação inclui uma linha de montagem de projetores, composta por um arranjo de máquinas e operadores responsáveis pela montagem dos equipamentos, o que acontece em oito etapas: (i) controle de qualidade do gabinete, que é produzido por terceiros e recebido antes de entrar na linha; (ii) aplicação de itens de identificação no gabinete; (iii) colocação de acabamento plástico, fabricado em outro setor da manufatura; (iv) pré-montagem do gabinete; (v) instalação no gabinete do sistema de focalização de imagem, recebido já inspecionado de fornecedores externos; (vi) instalação do transformador rebaixador de tensão, também recebido de fornecedores externos; (vii) instalação do sistema de exaustão, suportes das lâmpadas e circuito de acionamento, da mesma forma recebido de fornecedores externos; e (viii) soldagem do circuito elétrico interno, teste, ajustes finais e colocação do lacre de garantia.

Cada etapa é executada de forma seqüencial. A empresa possui uma política interna de polivalência, ou seja, os funcionários recebem treinamento que os capacita a executarem diferentes tarefas e substituírem uns aos outros dentro do processo produtivo. O número total de funcionários envolvidos diretamente no processo estudado é de cinco pessoas. Dentre este grupo, existe uma divisão interna de tarefas, ou seja, as tarefas normalmente são executadas



pelos mesmos colaboradores, o que permite uma especialização no desenvolvimento das atividades, se bem que todos possam cumprir, eventualmente, outras tarefas.

O processo de montagem é executado em lotes de cem unidades para as etapas de 1 a 3 e de vinte unidades para as etapas de 4 a 8. A diferença entre os tamanhos de lotes está diretamente ligada às atividades desenvolvidas nas etapas, além da alocação dos funcionários em outras tarefas dentro da empresa, fora da linha de montagem estudada. Ao terminarem determinada etapa, os funcionários alocados podem ser liberados para a execução da próxima etapa ou para outras tarefas em setores diferentes da empresa. A linha pode operar com dois lotes de produtos diferentes, simultaneamente, em etapas diferentes para cada lote. Os tamanhos diferentes de lotes geram um estoque de itens semi-acabados ao final da etapa 3, o qual deve ser sincronizado com as entradas de novos pedidos, sob pena de ser gerar estoque intermediário total excessivo. Verificou-se que, em caso de necessidade, a fabricação do lote pode ser totalmente interrompida para permitir a alocação dos funcionários na fabricação de outro produto.

Os tempos de atravessamento foram obtidos por medição direta e confirmados ou corrigidos por entrevista com os funcionários envolvidos diretamente no processo. Também foi obtida a informação que uma etapa pode iniciar em um turno ou dia e ser finalizada no próximo. A produção de um lote de cem unidades é geralmente concluída em seis dias úteis, sendo cada dia útil considerado como dois turnos de oito horas. Os tempos obtidos e tarefas específicas executadas pelos funcionários foram usadas para a confecção do modelo em RCP.

O modelo foi desenvolvido utilizando o software CPNTools, uma ferramenta gráfica desenvolvida pelo grupo de pesquisa de RPC da Universidade de Aarhus, da Dinamarca. Este grupo trabalha com RPC há mais de 20 anos, podendo ser considerado um centro de excelência no assunto, principalmente em aplicações industriais das RPC's. Além da forma usual de representar um sistema por RdP, o software utiliza uma linguagem própria, a CPN ML, ou do inglês *Coloured Petri Net Marking Language*, para a programação de funções, condições, denominadas inscrições (CPN GROUP, 2009).

O software e sua linguagem de programação permitem a criação de sub-redes dentro do mesmo modelo, permitindo sua evolução. Esta funcionalidade permite que o modelo desenvolvido seja de fácil entendimento, pois encapsula sub-rotinas complexas de um sistema dentro de um lugar do modelo principal. A RPC responsável pela modelagem da sub-rotina fica separada do modelo principal, mas tem a capacidade de alocar e transferir recursos para o modelo principal e outras RPCs modeladas. Assim, é possível analisar a interferência no



modelo principal quando uma de suas sub-rotinas tem seus parâmetros alterados, tais como recursos disponíveis e tempos de transição (CPN GROUP, 2004).

Após a inserção dos tempos de transição, obteve-se o modelo em RPC. No modelo desenvolvido, foram definidos dois multiconjuntos. O primeiro, denominado de Gabinete, que incorpora as cores que representam as diversas etapas que o equipamento (gabinete) passa durante o processo de montagem. O segundo multiconjunto incorpora os operadores envolvidos no processo, denominado Funcionários. Este multiconjunto possui definição de tempo, permitindo a associação de um valor de tempo à alocação do funcionário. As transições no modelo desenvolvido representam a execução de determinada etapa do processo, com a alocação e liberação de recursos, além de permitirem a inserção do tempo necessário para a realização da tarefa.

Os tempos utilizados nas inscrições são os tempos médios medidos durante a execução do processo. Foram usadas técnicas usuais de medição de tempo em manufatura, ou seja, técnicas de cronoanálise, considerando a média de vinte medições e os desvios-padrão das medições. Os lugares inseridos armazenam as marcas referentes aos gabinetes em processamento, bem como o número de funcionários. No diagrama do modelo são apresentadas as relações intrínsecas do sistema modelado, alocação de recursos, tempo de transições, lugares e arcos. São levantadas as transições, suas relação com o processo real e os tempos associados conforme os dados coletados. Não foram consideradas substituições de funcionários na linha de montagem, o modelo desenvolvido considera a presença de todos os cinco funcionários. Durante a fase de desenho, o programa executa uma análise incremental da sintaxe, verificando inscrições em arcos, lugares e transições e apontando eventuais inconsistências no modelo. Concluído o desenho do modelo, inicia-se sua execução.

O software CPNTools permitiu rodar o modelo de forma automática e manual. A primeira executa o modelo até um determinado número de passos com um intervalo de tempo entre passos pré-determinado pelo usuário. Quando o número de passos programados for maior que o número de passos necessários para disparar todas as transições e não haverem mais a serem disparadas, a simulação é encerrada. A segunda modalidade permite executar de forma passo a passo. Esta permite visualizar de forma mais precisa o funcionamento da rede. Além de possibilitar a execução do modelo, o software CPNTools, permite a coleta de dados referentes ao funcionamento do modelo, por exemplo o tempo entre disparo de transições. Também durante a simulação, é possível colher dados de interesse, por exemplo, tempos de



disparo das transições, tempo de alocação dos recursos. Em modelos complexos, pode-se inserir funções avançadas para a coleta de dados.

O modelo em RPC é apresentado na Figura 3. Para se chegar ao modelo definitivo, o mesmo foi rodado em modo preliminar e seus resultados comparados com os dados de campo. Pequenas modificações em parâmetros foram necessárias para deixar o modelo definitivamente ajustado.

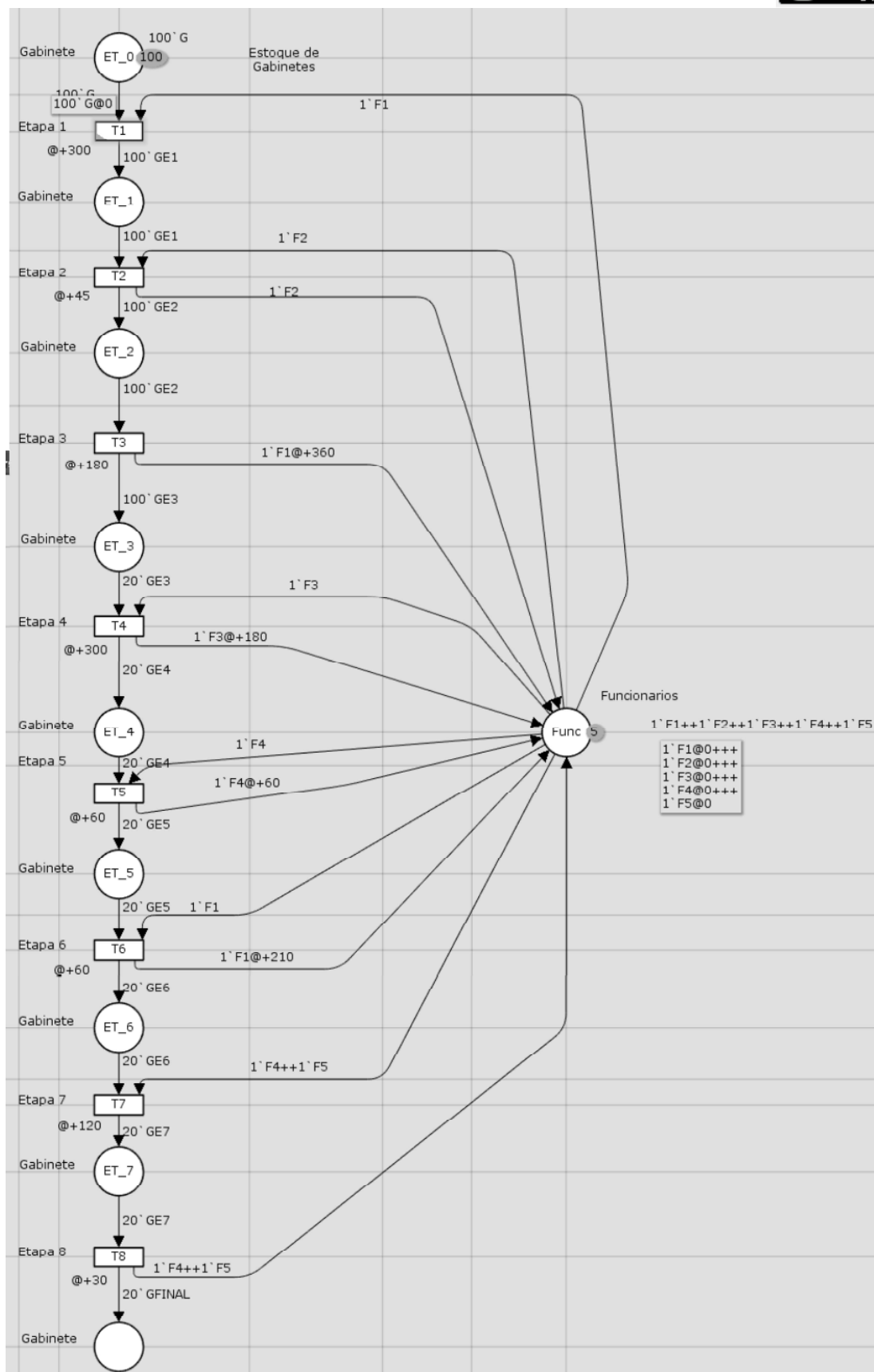


Figura 3 – Diagrama do modelo desenvolvido



4.2 Simulação do modelo

Uma vez definido o modelo, o mesmo foi liberado para a simulação do processo de montagem de retroprojetores. Executada a simulação, recolheram-se os dados gerados pelo programa de simulação CPNTools referente aos tempos de término dos lotes de itens montados. Foram simulados cinco lotes de produção de cem unidades cada. Os resultados apresentados comprovaram que o modelo representa corretamente o funcionamento da linha de montagem para o produto em estudo. O lote número 1 demorou mais do que os outros, devido a variabilidades que o modelo impôs às tarefas desenvolvidas nas etapas 1, 2 e 3. Concluídas estas etapas, um lote de 20 produtos é finalizado em média a cada turno de 8 horas. Quando o lote de cem peças é finalizado, o processo reinicia-se. Os resultados foram obtidos a partir do software de simulação através análise direta e leitura dos dados exportados para arquivos. Cada lote finalizado é representado por uma ficha e a chegada da ficha representativa de lote no lugar “Gabinete” do modelo possui seu tempo de chegada ao lugar anotado. O tempo de chegada ao lugar “Gabinete” corresponde ao tempo total de transição do lote, representado por sua ficha, através do modelo. Os tempos de transição dos lotes são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados obtidos por simulação: tempos das saídas dos lotes

| Lote | Tempo Decorrido em Minutos | Tempo Decorrido em Horas |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 1.095 min | 18,25 |
| 2 | 1.575 min | 26,25 |
| 3 | 2.055 min | 34,25 |
| 4 | 2.535 min | 42,25 |
| 5 | 3.015 min | 50,25 |

Outra informação apresentada durante a simulação e coletada utilizando-se funções específicas de exportação de dados foram os tempos de disparos das transições do modelo. O



intervalo de tempo do disparo das transições se mostra útil para a validação e entendimento do sistema modelado. A partir desta informação, pode-se verificar as relações internas de alocação e liberação de recursos. Deste modo pode-se verificar a situação real que ocorre na linha de montagem modelada, o disparo da transição T4 antes da transição T8. A Tabela 2 apresenta informações referente aos passos da simulação, intervalos de tempo de disparo das transições e a respectiva transição disparada. Observou-se também durante a simulação que alguns funcionários permanecem livres para alocação dentro do modelo, porém o modelo desenvolvido não contempla a alocação destes em outras tarefas, durante a montagem do produto estudado. Este tempo livre é utilizado em outras atividades externas à linha de montagem e não interfere na validade do modelo.

Tabela 2 – Tempos de disparo das transições no modelo

| Passo | Tempo de Disparo (min) | Transição Disparada | Passo | Tempo de Disparo (min) | Transição Disparada |
|-------|------------------------|---------------------|-------|------------------------|---------------------|
| 1 | 0 | T1 | 15 | 1845 | T6 |
| 2 | 300 | T2 | 16 | 1905 | T7 |
| 3 | 345 | T3 | 17 | 1965 | T4 |
| 4 | 525 | T4 | 18 | 2025 | T8 |
| 5 | 825 | T5 | 19 | 2265 | T5 |
| 6 | 885 | T6 | 20 | 2325 | T6 |
| 7 | 945 | T7 | 21 | 2385 | T7 |
| 8 | 1005 | T4 | 22 | 2445 | T4 |
| 9 | 1065 | T8 | 23 | 2505 | T8 |
| 10 | 1305 | T5 | 24 | 2745 | T5 |
| 11 | 1425 | T7 | 25 | 2805 | T6 |
| 12 | 1485 | T4 | 26 | 2865 | T7 |
| 13 | 1545 | T8 | 27 | 2985 | T8 |
| 14 | 1785 | T5 | | | |

A simulação também apresenta o número de alocações dos funcionários para a montagem de um lote de equipamentos, que serve como base para análise da carga individual de trabalho. A Tabela 3 apresenta o número de alocações e o tempo total de alocação dos trabalhadores dentro do sistema.



Tabela 3 – Número de alocações e respectivos tempos totais por funcionários

| Funcionário | Número de Alocações | Tempo total de alocação |
|-------------|---------------------|-------------------------|
| F1 | 6 | 2.010 min |
| F2 | 1 | 345 min |
| F3 | 5 | 2400 min |
| F4 | 10 | 1350 min |
| F5 | 5 | 750 min |

4.3 Discussão dos resultados

A partir da simulação e dos resultados coletados, verificou-se que o modelo é fidedigno ao sistema de manufatura. Muitas vezes, sem a construção de um modelo válido, a análise de um sistema não é possível, devido à complexidade presente nas relações internas e externas com os demais sistemas do ambiente fabril. Também fica mais mensurável a alocação dos recursos disponíveis para o sistema.

Como apresentado na Tabela 3, o funcionário representado no modelo pela variável F3 possui o maior tempo de alocação dentro do sistema, 2.400 minutos, para cinco alocações dentro do sistema. A partir deste valor, verifica-se que este operador está com uma carga de trabalho elevada frente aos outros. O operador representado pela variável F3 fica alocado internamente no sistema por um período de 1.500 minutos por lote e de 900 minutos efetuando tarefas acessórias em outros setores que fornecem itens para a linha de montagem. Os tempos sempre se referem a um lote de 100 unidades que passam pela linha de montagem. A disponibilidade deste tipo de informação orienta os profissionais de segurança e saúde ocupacional a direcionar sua atenção para os pontos mais críticos de uma manufatura fornecendo-lhes uma ferramenta de análise de sistemas. Sem estas informações, as ações desenvolvidas pelos profissionais de saúde e segurança não possuem subsídios para apoiarem a implantação de melhorias no ambiente de trabalho. As ações ficam sujeitas a não terem o efeito desejado na saúde do trabalhador.

Na linha de montagem estudada, as tarefas desenvolvidas são essencialmente operações manuais rotineiras e sujeitas a poucas modificações, assim deverão ser tomadas medidas de atenuação de esforços repetitivos e sobrecarga de pesos manipulados. No modelo



desenvolvido não foram discretizadas as tarefas desenvolvidas, apenas os tempos de alocação. Não foi objetivo deste modelo a discretização de tarefas, com a qual seria possível chegar a uma análise pontual dos esforços e movimentos desenvolvidos e seus tempos, permitindo assim uma análise completa do sistema, mas sim ter-se uma visão geral do nível de ocupação da força laboral no sistema, fornecendo assim subsídios para estudos futuros de melhorias. Uma possível alternativa de continuidade de pesquisa poderia ser integrar o modelo ora desenvolvido com uma análise ergonômica da tarefa, de modo a individualizar as atividades e identificar as mais contributivas para a má ocupação de trabalhadores.

Verificada a sobrecarga de tarefas executadas por um ou mais trabalhadores, pode-se simular pelo modelo uma nova ordem de trabalho, baseada em um lote menor de fabricação e nova redistribuição de tarefas. Um lote menor permitirá alternância de tarefas, evitando que o mesmo trabalhador esteja alocado por longos períodos na mesma tarefa, repetitivamente. Outra alteração a ser testada é uma nova divisão de tarefas, permitindo que dois ou mais trabalhadores executem a mesma tarefa, resultando em tempos menores de execução e menor carga individual. As alternativas propostas podem ser introduzidas no modelo desenvolvido para verificar sua viabilidade e impacto sobre o sistema de manufatura.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A RPC mostrou-se uma ferramenta relativamente simples e eficiente para a modelagem de uma linha de montagem em um sistema de manufatura. As RPC apresentaram-se como uma ferramenta útil para modelar sistemas complexos, devido a sua capacidade de sintetização das informações através da teoria dos multiconjuntos. O modelo desenvolvido apresentou resultados satisfatórios dentro do objetivo inicial proposto da modelagem para o sistema em estudo. A partir dos resultados e da análise do modelo, foi possível propor alterações na linha de montagem e na forma de alocação de recursos que podem possibilitar um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis além de permitirem uma forma mais ágil de fabricação.

A ferramenta proposta permite dar fundamentos para apoiar alterações num sistema de manufatura com alocação de recursos, permitindo inclusive modelar as alterações propostas e analisar o impacto destas alterações no modelo antes de sua implementação prática.



Alterações de sistemas de manufatura com uma visão voltada para a engenharia de segurança do trabalho são muitas vezes rotuladas como improdutivas ou inviáveis devido a questões produtivas. Neste ponto, a modelagem por RPC pode ser utilizada como fundamento para a aplicação de medidas de higiene ocupacional, permitindo-se avaliar previamente o impacto destas medidas sobre a produtividade de um sistema. Com estas informações, os profissionais responsáveis pela higiene ocupacional podem dirigir suas ações sobre os pontos realmente críticos do processo de maneira a prevenir lesões e o desenvolvimento de doenças ocupacionais ao longo do tempo.

Outros aspectos produtivos podem ser verificados com a ferramenta, apoiando decisões de logística interna. Uma possibilidade de aplicação direta é verificar o comportamento da linha de montagem no caso de falta de um de seus funcionários, tendo estas suas tarefas executadas por um outro funcionário. Assim determinar qual dos funcionários deverá realizar a tarefa dentro do sistema de maneira a suprimir o faltante com o menor impacto sobre a produtividade do sistema.

Um fator importante para a aplicabilidade do método é a facilidade de se obter o software de simulação. O CPNTools é distribuído gratuitamente, ao contrário de outros softwares de simulação que possuem elevado custo financeiro para a sua aquisição. Por fim, sugere-se usar a ferramenta para analisar os demais setores da empresa, para analisar e propor melhorias tanto no aspecto produtivo como no ocupacional.

REFERÊNCIAS

- BANASZAK, Z.; KROGH, B. Deadlock avoidance in flexible manufacturing systems with concurrently competing process flows. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**. V.6, n.6, p.724-734, 1990.
- BANKS, J. **Handbook of simulation**: principles, methodology, advances, applications, and practice. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- BOUCHER, T.; JAFARI, M.; MEREDITH, G. Petri net control of an automated manufacturing cell. **Computers and Industrial Engineering**. V.17, n.1, p.459-463, 1989.
- CARDOSO, J.; VALLETE, R. **Redes de Petri**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1981.
- CASTRUCCI, P.; MORAES, C. **Engenharia de automação industrial**. R. Janeiro: LTC, 2001.



CPN GROUP. **Coloured Petri Nets at the University of Aarhus**. Site. 2004. Disponível em: <<http://www.daimi.au.dk/CPnets/>>. Acesso em: 26 nov. 2006.

CPN GROUP. **CPNTools Computer Tool for Coloured Petri Nets Help**. Site. 2009. Disponível em: <<http://wiki.daimi.au.dk/cpn tools/cpn tools.wiki>>. Acesso em: 01 fev. 2009.

DICESARE, F.; HARHALAKIS, G.; PROTH, J. M.; SILVA, M.; VERNADAT, F. B. **Practice of Petri nets in manufacturing**. London: Chapman & Hall, 1993.

DRATH, R.; SCHWUCHOW, S. Modellierung diskret-kontinuierlicher Systeme mit Petri-Netzen. In: Schneider E. (Org.); **Entwurf komplexer Automatisierungssysteme**, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Institut für Regelungs-und-Automatisierungstechnik, 1997.

FITZPATRICK, K., BAKER, J.; DAVE, D. An Application of Computer Simulation to Improve Scheduling of Hospital Operating Room Facilities in the United States", **International Journal of Computer Applications in Technology**. V.6, n.2, p.205–224, 1993.

FUNG, R.; JIANG, Z.; ZUO, M.; TU, P. Adaptive production scheduling of virtual production systems using object-oriented Petri nets with changeable structure. **International Journal of Production Research**. V.40, n.8, p.1759-1785, 2002.

HENNEMANN, F. **Uma Abordagem Híbrida para Sistemas de Apoio à Decisão utilizando Redes de Petri e Técnicas de Simulação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Florianópolis: PGEEL, UFSC, 2004.

JENG, M.; XIE, X.; HUANG, Y. Manufacturing modeling using process nets with resources. **Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 2000.

JENSEN, K. **Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use** Volume 1. Berlin: Springer-Verlag, 1997.

LAW, A.; KELTON, W. **Simulation modeling and analysis**. Boston: McGraw-Hill, 2000.

LEE, D.; DICESARE, F. Scheduling flexible manufacturing systems using Petri nets and heuristic search. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**. V.10, n.2, p.123-133, 1994.

LEMOES, A. **Reuso de Modelos em Redes de Petri Coloridas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). J. Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2001.

MACHADO, R.; SILVA, M.; MACHADO, C.; LEITE, H. Avaliação do desempenho logístico do transporte rodoviário de madeira utilizando Rede de Petri em uma empresa florestal de Minas Gerais. **Revista Árvore**. V.30, n.6, p.999-1008, 2006.

MACIEL, P.; LINS, R.; CUNHA, P. **Introdução às redes de Petri e aplicações**. Campinas: Instituto de computação - UNICAMP, 1996.

MARTINEZ, J.; MURO, P.; SILVA, M. Modeling, validation and software implementation of production systems using high level Petri nets. **Proceedings of the IEEE International**



Conference on Robotics and Automation. V.4, p.1180-1185, Raleigh, North Carolina, Março-Abril, 1987.

MURATA, T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. **Proceedings of the IEEE**, v.77, n.4, p.541-580, 1989.

PETERSON, J. **Petri nets: theory and modelling of systems.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981.

PETRI, C. **Kommunikation mit Automaten.** Ph.D. Dissertation, Darmstadt Universitat, West Deutschland, 1962.

PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão.** Bookman: P. Alegre, 1998.

PRADO, D. **Teoria das filas e da simulação.** Belo Horizonte: DG, 1999.

PROTH, J.; WANG, L.; XIE, X. A class of Petri nets for manufacturing system integration. **IEEE Transactions on Robotics and Automation.** V.13, n.3, p.317-326, 1997.

REISIG, W. **Elements of distributed algorithms: modeling and analysis with Petri Nets.** Berlin: Springer Verlag, 1998.

RITZMAN, L.; KRAJEWSKI, L. **Administração da produção e operações.** São Paulo: Pearson, 2004.

SAMUELSON, D.; MACAL, C. Agent-Based Simulation. **Operations Research / Management Science Today.** V.33, n.4, p.34-38, 2006.

SILVA, A. **Modelagem de custos em sistemas de manufatura utilizando Redes de Petri.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. USP, São Carlos, 2002.

TAVIERA, R. **Uma metodologia para aperfeiçoamento da mudança para um sistema de produção just-in-time em uma indústria metalúrgica, usando simulação discreta e técnicas de projeto de experimentos de Taguchi.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção e Sistemas). PPGEPS - UFSC, Florianópolis, 1997.

XING, K.; HU, B.; CHEN, H. Deadlock avoidance policy for Petri-net modeling of flexible manufacturing systems with shared resources. **IEEE Transactions on Automatic Control.** V.41, n.2, p.289-295, 1996.

XIONG, H.; ZHOU, M. Deadlock-free scheduling of an automated manufacturing system based on Petri nets. **Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation.** V.2, p.945-950, Albuquerque, New Mexico, Abril, 1997.

WIENDAHL, H. **Betriebs-organisation für ingenieure.** Deutschland: Carl Hansen Verlag, 1989.

WU, N.; ZHOU, M. Avoiding deadlock and reducing starvation and blocking in automated manufacturing systems. **IEEE Transactions on Robotics and Automation.** V.17, n.5, p.658-669, 2001.



ZHOU, M.; DICESARE, F. Parallel and sequential mutual exclusions for Petri net modeling of manufacturing systems with shared resources. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**. V.7, n.4, p.515-527, 1991.

Artigo recebido em 2009 e aceito para publicação em 2009