

REDE DE PETRI PRODUTIVA: EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM DIFERENTES CARACTERÍSTICAS EM PROCESSOS PRODUTIVOS

CAIO CESAR FATTORI*, GUSTAVO LOPES DUARTE OLIVEIRA*, GABRIEL SOUZA PONTES*, FABRÍCIO JUNQUEIRA*, DIOLINO JOSÉ DOS SANTOS FILHO*, PAULO EIGI MIYAGI*

**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, Brasil*

Emails: paicaio@usp.br, gustavo.lopes.oliveira@usp.br, gabriel.pontes@usp.br, fabri@usp.br, diolinos@usp.br, pemiyagi@usp.br

Abstract— The evolution of demands for the industrial production directly affects the requirements for companies organization. It is increasingly necessary the rational use of resources beyond ensuring products and services quality, with low cost and customization. This set of requirements is modifying the production structure, sharing the challenges with several companies. In this context, it is increasing the search for collaborative production among companies focused on their capacities and adopting concepts like virtual enterprises. To assure the effective participation of companies to meet demands, it is necessary that the needs of products or services are described as processes using standard languages and which may understood with same result by different companies. A tool that allows to describe processes as standard and which proposes to unify its understanding by different entities is the productive Petri net. This work presents, as application example, the modeling of the productive process in automated machines for production of a piece described in productive Petri net.

Keywords— Productive Petri net, discrete event system, STEP, virtual enterprise, interpreted Petri net for control

Resumo— A evolução das exigências para a produção industrial afetam diretamente nos requisitos para a forma de organização das empresas. É cada vez mais necessário o uso racional dos recursos além de garantir produtos e serviços de qualidade, a baixos custos e altamente personalizados. Tal conjunto de requisitos tem modificado a estrutura de produção de modo a dividir os desafios entre várias empresas. Neste contexto, cresce a busca pela produção colaborativa entre empresas focadas em suas especialidades e a adoção de conceitos como de empresas virtuais. Para assegurar participação efetiva de empresas para atender o mercado, é necessário que as demandas de produtos ou serviços sejam descritas na forma de processos utilizando linguagens padronizadas e que podem ser compreendidas da mesma forma por diferentes empresas. Uma ferramenta que permite descrever processos de forma padronizada e que se propõe a unificar sua compreensão por diferentes entidades é a rede de Petri produtiva (RdPP). Este trabalho apresenta, como exemplo de aplicação, a modelagem do processo produtivo em máquinas automatizadas para a produção de uma peça descrita em rede de Petri produtiva.

Palavras-chave— Rede de Petri produtiva, sistema a eventos discretos, STEP, empresa virtual, rede de Petri interpretada para controle

1 Introdução

Entende-se que a produção industrial cresce para atender o aumento da demanda dos consumidores por produtos e serviços. Essa demanda impõe também requisitos de redução de preços, aumento de qualidade, menor prazo de entrega e maior personalização. Para se adequar a essa demanda, as empresas têm buscado novas estratégias de negócios, assim como têm alterado as estruturas das cadeias produtivas, colaborando uma com as outras em uma rede de produção e, focando seus esforços em suas principais competências ou habilidades e terceirizando as atividades produtivas que não estão em seu foco. Assim, a produção industrial migrou de sistemas de produção em massa para sistemas de produção enxuta e de manufatura ágil (Fattori et al., 2011; Vinodh e Kuttaligam, 2011).

Uma solução para a colaboração de empresas focadas em suas principais competências é o conceito de empresa virtual (EV). A EV integra as camadas de negócios das empresas utilizando os avanços da tecnologia de informação e de au-

tomação (Tao et al., 2012; Vinodh e Kuttaligam, 2011). Uma EV é um acordo entre empresas formado para atender uma oportunidade de negócio específica e ao final dessa, a EV se desfaz. Para isso, ela utiliza um ambiente computacional com aplicações que auxiliam no cumprimento das etapas de projeto e negociação das empresas. Entretanto, para que as diferentes empresas, interessadas em participar de uma EV, possam oferecer seus serviços para uma dada oportunidade de negócio, é necessário que todas estas empresas, com suas estruturas de gestão e controle particulares, possam se comunicar umas com as outras de forma que todas possuam a mesma compreensão das mensagens (Leitão, 2009; Wang et al., 2012).

Uma solução para assegurar essa compreensão única das mensagens de empresas é a descrição de forma padronizada dos processos produtivos que atendem as oportunidades de negócio (Bhandarkar e Nagi, 2000).

Em ambientes de trabalho heterogêneos, como o ambiente da produção industrial, a comunicação que assegure a mesma compreensão por todos é um grande desafio. Um processo produ-

tivo para atender uma oportunidade de negócio pode conter atividades produtivas de diferentes áreas (como a fabricação de um carro que inclui processos de usinagem, conformação, montagem, pintura, dentre outros) de modo que envolve necessariamente empresas que não detêm o mesmo conhecimento do processo, a menos das atividades produtivas específicas atribuídas a elas. Entretanto, observa-se que as relações entre atividades produtivas de diferentes áreas que estejam num mesmo processo produtivo ainda não possui muita atenção nas pesquisas atuais.

Uma forma de modelar as relações entre atividades produtivas de diferentes áreas é interpretá-las como uma classe de sistemas a eventos discretos, que possui ferramentas para modelagem e controle de sistemas, como a rede de Petri (RdP) por exemplo (Yoo et al., 2010). Existem, assim, várias propostas de extensões e variações da RdP que são capazes de modelar atividades produtivas em ambientes heterogêneos, mas nem todos os modelos gerados com as ferramentas existentes facilitam a compreensão do processo produtivo a ser realizado. Extensões como a RdP colorida permitem a modelagem detalhada dos processos, mas, inevitavelmente, requerem conhecimento especializado para a construção dos modelos. Para auxiliar o processo de formação de uma EV, é preciso considerar um método para simplificar a interpretação de um modelo da RdP, ou seja, alterar graficamente o modelo, sem prejuízos para a sua lógica.

Este trabalho propõe a utilização de uma interpretação da RdP para modelagem das relações entre atividades produtivas de diferentes áreas, chamada de rede de Petri produtiva (RdPP). Na seção 2, é apresentado um resumo das pesquisas existentes sobre a descrição dos processos produtivos. Na seção 3, são apresentadas a formalização da RdPP e a modelagem das características das atividades produtivas de diferentes áreas. Na seção 4, é apresentado um exemplo da utilização da RdPP em um processo produtivo de uma área que já possui um padrão de descrição dos processos produtivos definido, que é para máquinas automatizadas de torno. Na seção 5, é apresentada a conclusão da pesquisa até então desenvolvida.

2 Pesquisas correlatas

A colaboração de empresas focadas em suas principais competências é fundamental no âmbito de EV que integra as camadas de negócios das empresas. Na EV cada empresa é vista como uma prestadora de um serviço específico (que pode ser processos de manufatura, de transporte, e outros) e, uma demanda específica é vista como uma oportunidade de negócio pela empresa que busca, utilizando a infraestrutura da internet, outras empresas capazes de realizar atividades produtivas

necessárias para atender a parte da demanda que essa não seja capaz ou não tenha interesse de atender (Fattori et al., 2011; Tao et al., 2012). Entretanto, conforme citado anteriormente, é necessário que todas as estruturas de gestão e controle particulares de cada empresa, possam se comunicar umas com as outras com uma compreensão comum das mensagens (Wang et al., 2012).

Em cada área da produção industrial (como STEP-nc nos processos de fresamento (Bhandarkar e Nagi, 2000) ou o STEP para montagem virtual para os processos de montagem (Bin et al., 2009)), existem iniciativas que buscam padronizar o entendimento dos respectivos processos produtivos realizados utilizando uma comunicação por linguagens de alto nível e amplamente divulgada pelas empresas fornecedoras de máquinas e sistemas de automação, tais como o STEP (Bhandarkar e Nagi, 2000).

Observa-se, entretanto, a ausência de trabalhos que tratam da padronização da descrição de processos de diferentes áreas de produção. O conceito de EV permite a integração de empresas independentes (cada uma com sua solução própria para conduzir um processo produtivo) para a realização de um produto ou de um serviço. Com isso, as empresas que trabalham juntas em uma EV podem utilizar as suas cadeias produtivas para fazer a produção de forma independente e as características da representação podem ser outras além das sequenciais (Leitão, 2009), que é a única característica representada nos padrões atuais, como o STEP.

3 Rede de Petri produtiva

A RdPP é uma 6-tupla $PPN = (P, T, F, W, M_0, B)$, em que P é o conjunto de elementos passivos chamados de *lugares*, T é o conjunto de elementos ativos chamados de *transições*, com P e T não vazios ($P \cup T \neq \emptyset$) e disjuntos ($P \cap T = \emptyset$), $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é o conjunto de relações entre *lugares* e *transições* chamados de *arcos*, $W : F \rightarrow \mathbb{N}^+$ o conjunto de pesos associados aos *arcos*, $M : P \rightarrow \mathbb{N}$ o conjunto de *marcas* associadas a um lugar em um certo estado da rede e M_0 o estado inicial, também chamado de *marcação inicial* (Yoo et al., 2010), e B o conjunto de atividades produtivas associadas às *transições* chamadas de *caixas de instruções* (Fattori et al., 2011).

Uma *caixa de instruções* $b_i \in B$ é uma sub-rede da RdP com *lugares*, *transições*, *arcos* e *marcas* e, para uma *transição* $t \in T$ se $b_i \times t \neq \emptyset$ a *caixa de instruções* b_i está associada a *transição* t , e se $b_i \times t = \emptyset$ a *caixa de instruções* b_i não está associada a *transição* t .

Cada *caixa de instruções* $b \in B$ possui *instruções*, descritas em linguagem de alto nível representada de forma textual internamente, como

etapas do processo produtivo que devem ser realizadas a cada momento. A linguagem de alto nível de forma textual permite a padronização das etapas do processo produtivo, se afastando do funcionamento específico e da configuração dos equipamentos que são capazes de realizar a etapa descrita por ela. Para o dispositivo de controle de um equipamento, uma *instrução* é uma sequência de comandos elementares de movimentos de atuadores. Da forma mais elementar, um comando pode ser representada como um modelo de RdP com sinais e portas (Takahashi et al., 1999) como na figura 1.

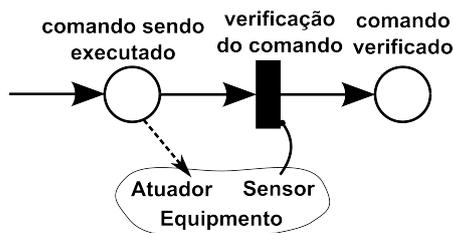


Figura 1: Representação de um comando

A figura 1 representa um comando elementar em que um sinal é enviado para um atuador de equipamento que pode mover um eixo ou outra alteração no mesmo e recebe um sinal de um sensor do mesmo equipamento para avaliar se o comando desejado foi atendido com sucesso. O conjunto de movimentos de eixos em equipamentos que produzam uma característica comum de todos os equipamentos semelhantes a esse a uma matéria-prima, em que se deseja aplicar o processo produtivo, pode ser compreendido como a *instrução* que esse equipamento deve realizar. Assim, em RdP, uma *instrução* é representada como na figura 2.

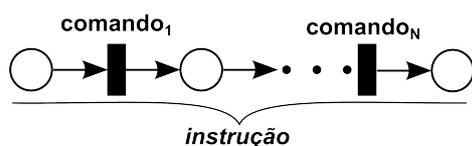


Figura 2: Representação de uma *instrução*

As *instruções* (i_1, i_2, \dots, i_n) são, então, modelos de RdP representadas na RdPP de forma textual por uma linguagem de alto nível. Para $i_k \subset b_l$, com $b_l \in B$, i_k é uma atividade que deve ser atendida em uma certa etapa da produção em que a *transição* t_j estiver habilitada para o disparo, com $t_j \in T$ e $b_l \times t_j \neq \emptyset$.

A RdPP é graficamente representadas pelos elementos da figura 3.

A RdPP pode modelar os processos produtivos, tanto os que utilizam sempre o mesmo equipamento, quanto os que usam mais de um equipamentos com a mesma função ou não. Além disso, a RdPP permite modelar características da exe-

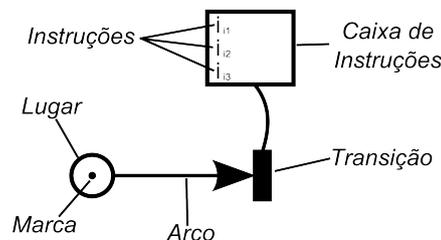


Figura 3: Elementos da RdPP

cução de etapas de processos produtivos que não sejam apenas sequenciais. A sequência de etapas do processo produtivo é a característica mais comum encontrada e na RdPP é feita como na figura 4.

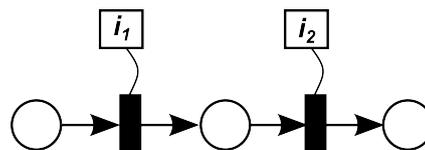


Figura 4: Sequência de *instruções* em RdPP

Nessa característica, uma etapa tem que ser finalizada para iniciar outra etapa. Na figura 4, a *instrução* i_1 antecede a execução da *instrução* i_2 , ou seja, para iniciar a execução de i_2 , é preciso finalizar a execução de i_1 .

Outra característica comum da execução de etapas dos processos produtivos é o paralelismo. O paralelismo é mais comum em produções que utilizam etapas independentes com funções distintas. A figura 5 representa a modelagem da característica de paralelismo de etapas do processos produtivo.

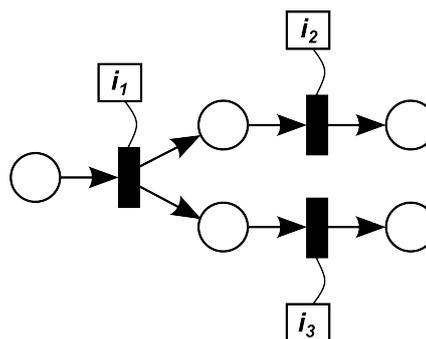


Figura 5: Paralelismo de *instruções* em RdPP

Na figura 5, as *instruções* i_2 e i_3 são executadas de forma independente uma da outra e podem ser feitas ao mesmo tempo ou não, por não compartilharem recursos. Para que essas etapas se iniciem, a etapa i_1 deve ser concluída, como o caso dos processamentos das partes a partir do fracionamento do petróleo.

Uma característica relacionada ao paralelismo é a sincronização de etapas. A sincronização é

uma característica comum em processos produtivos com duas ou mais etapas que ocorrem de forma independente, mas que de alguma forma tornam-se uma só etapa ao final. A figura 6 representa um modelo da característica de sincronização de etapas do processo produtivo.

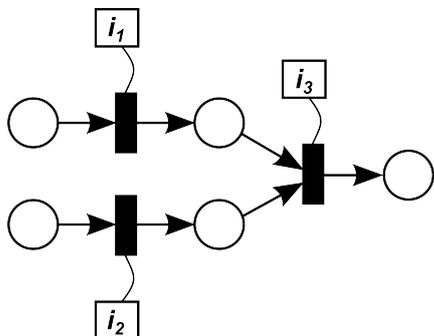


Figura 6: Sincronização de *instruções* em RdPP

Na figura 6, as *instruções* i_1 e i_2 são executadas de forma independente uma da outra e, apenas, quando ambas são concluídas a *instrução* i_3 tem a sua execução iniciada, que pode ser uma montagem do produto obtido por i_1 com o produto obtido por i_2 .

Em processos produtivos, algumas etapas da produção podem ser escolhidas ao invés de outras etapas para obter o mesmo resultado. Essa característica das etapas de processos produtivos é chamada de conflito, associado a escolha de qual etapa deve ser realizada. A figura 7 representa um modelo da característica de conflito entre etapas do processo produtivo.

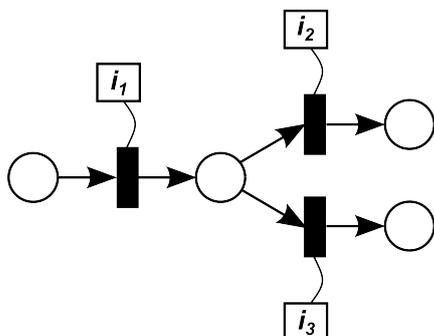


Figura 7: Conflito de *instruções* em RdPP

Na figura 7, as *instruções* i_2 e i_3 estão em conflito e qual dessas etapas será executada depende da escolha após a conclusão da *instrução* i_1 , entretanto apenas uma delas será executada. Neste caso, uma das *instruções* pode indicar como produzir um motor utilizando o processos de laminação e a outra *instrução* indicar como produzir o motor pelo processo de usinagem.

Uma característica pouco comum, mas encontrada em processos que utilizam um mesmo recurso para mais de uma etapa é a sequência aleatória de etapas. A característica de sequência aleatória

de etapas do processo produtivo é aquela em que duas ou mais etapas do processo devem ser executadas, não podem ocorrer em paralelo (por utilizarem o mesmo recurso), mas a ordem para que elas ocorram é independente para obter o mesmo resultado ao final. Essa característica é a formadora de uma *caixa de instruções* com mais de uma *instrução* dentro no modelo em RdPP. A figura 8 mostra a característica de sequência aleatória de etapas do processo produtivo.

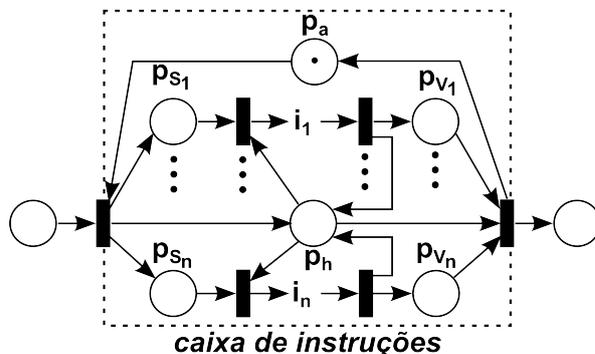


Figura 8: Sequência arbitrária de etapas ou *instruções*

Na figura 8, cada *instrução* é um modelo de RdP, como o da figura 2, e que tem uma representação textual na *caixa de instruções* o lugar p_h é um habilitador que escolhe qual das etapas do processo produtivo que será executada em cada instante. Após finalizada uma etapa, o lugar p_h escolhe outra etapa a ser realizada. Para indicar que todas as etapas de um processo produtivo foram concluídas, todos os lugares p_v e o lugar p_h devem possuir *marcas*, assim, não há mais etapas para serem concluídas. Na seção 4, é mostrado um exemplo de processo produtivo que possui a característica de sequência arbitrária de etapas.

O comportamento da RdPP é similar ao comportamento da RdP em que há um pré-conjunto $\bullet t$ de uma *transição* $t \in T$, tal que $\bullet t = \{p \in P | (p, t) \in F\} \cup \{p_v \in b \cup p_h \in b | b \times t \neq \emptyset | b \in B\}$. Quando $\forall p \in P | p \in \bullet t, M(p) \geq W(p, t)$, e, internamente a *caixa de instruções*, quando $\forall p_v \in \bullet t, M(p_v) = 1$, e $p_h \in \bullet t, M(p_h) = 1$, dizemos que a *transição* t está habilitada para o disparo. É definido também o pós-conjunto t^\bullet de uma *transição* $t \in T$, tal que $t^\bullet = \{p \in P | (t, p) \in F\}$. Uma *transição* t habilitada para o disparo pode disparar, levando a rede do estado i para o estado $i + 1$, e isso implica em:

- $\forall p \in P | p \in \bullet t, M_{i+1}(p) = M_i(p) - W(p, t)$;
- $\forall p \in P | p \in t^\bullet, M_{i+1}(p) = M_i(p) + W(t, p)$;
- $\forall p_v \in \bullet t, M_{i+1}(p_v) = 0$;
- $p_h \in \bullet t, M_{i+1}(p_h) = 0$; e
- $p_a \in b | b \times t \neq \emptyset | b \in B, M_{i+1}(p_a) = 1$.

Quando, para uma *transição* $t \in T$, tem $\forall p \in P | p \in \bullet t \ M(p) \geq W(p, t)$, e tem $p_a \in b | b \times t \neq \emptyset | b \in B$, $M(p_a) = 1$, dizemos que t esta habilitada para execucao. Uma *transicao* habilitada para execucao pode iniciar a execucao das *instrucoes* da *caixa de instrucoes* associada a ela. Neste caso, ha uma alteracao apenas no modelo interno da *caixa de instrucoes* com as seguintes mudancas:

- $p_a \in b | b \times t \neq \emptyset | b \in B$, $M(p_a) = 0$;
- $\forall p_S \in b | b \times t \neq \emptyset | b \in B$, $M(p_S) = 1$; e
- $p_h \in b | b \times t \neq \emptyset | b \in B$, $M(p_h) = 1$.

O modelo que RdP interno a *caixa de instrucoes* e uma $PN = (P_B, T_B, F_B, M_B)$, em que P_B e o conjunto de *lugares*, T_B e o conjunto de *transicoes*, com P_B e T_B finitos e disjuntos, $F_B \subseteq (P_B \times T_B) \cup (T_B \times P_B)$ o conjunto de *arcos* e M_B o conjunto de *marcas* nos *lugares* do modelo da *caixa de instrucoes*. Definimos para $t \in T_B$ dois conjuntos $\bullet t_B = \{p \in P_B | (p, t) \in F_B\}$ e $t_B^\bullet = \{p \in P_B | (t, p) \in F_B\}$. Quando $\forall p \in P_B | p \in \bullet t_B$, $M_B(p) = 1$ e $\forall p \in P_B | p \in t_B^\bullet$, $M_B(p) = 0$, dizemos que *transicao* do modelo interno da *caixa de instrucoes* esta habilitada para o disparo, e assim que dispara, $\forall p \in P_B | p \in \bullet t_B$, $M_B(p) = 0$ e $\forall p \in P_B | p \in t_B^\bullet$, $M_B(p) = 1$.

4 Exemplo

O exemplo de aplicacao da RdPP foi realizado com os tecnicos de Laboratorio de Maquinas de Operacao da Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo.

Inicialmente, os tecnicos especialistas em maquinas de torneamento foram consultados sobre as caracteristicas mais comuns nas operacoes, utilizando esses equipamentos. Uma lista foi gerada para as caracteristicas e suas descricoes na forma de *instrucoes*. A tabela 1 contem as informacoes dessa lista e representa as informacoes contidas em um manual entregue aos tecnicos em maquinas de torneamento.

Na tabela 1, a celula da primeira linha e primeira coluna a esquerda contem a representacao da materia-prima cilindrica utilizada para a usinagem no processo produtivo, chamada de *peca*. Para as celulas seguintes do quadro, o simbolo D se refere a distancia entre o inicio da usinagem e a ponta livre da *peca, \emptyset e o diametro final ou diametro do furo, \emptyset_e e o diametro maior, \emptyset_i e o diametro menor e L e o comprimento de *peca* usinado ou profundidade de furo. A celula da segunda linha e primeira coluna a esquerda representa uma atividade de furo no centro da *peca*, modelada pela funcao $furo(\emptyset, L)$. A celula da primeira linha e segunda coluna representa uma atividade de reducao de diametro na ponta da *peca* que e uma *instrucao* chamada de torneamento externo, modelada pela funcao $torneamento_externo(\emptyset, L)$.*

A celula da segunda linha e segunda coluna representa uma atividade de reducao de diametro de fora da ponta da *peca* que e uma *instrucao* chamada de canal, modelada pela funcao $canal(D, \emptyset, L)$. A celula da primeira linha e terceira coluna representa uma atividade de reducao conica de diametro em que o diametro menor se encontra mais proximo da ponta livre da *peca* que e uma *instrucao* chamada de torneamento conico da direita, modelada pela funcao $torneamento_conico_direita(D, \emptyset_i, \emptyset_e, L)$. A celula da segunda linha e terceira coluna representa uma atividade de reducao conica de diametro em que o diametro menor se encontra mais afastado da ponta livre da *peca* que e uma *instrucao* chamada de torneamento conico da esquerda, modelada pela funcao $torneamento_conico_esquerda(D, \emptyset_i, \emptyset_e, L)$.

Na figura 9 esta o desenho da *peca* final resultante.

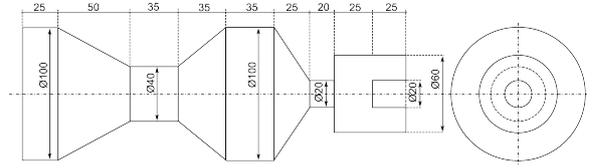


Figura 9: *Peça* final utilizada no exemplo

A figura 10 apresenta a RdPP que modela todo o processo produtivo acima mencionado. As *instrucoes* indicadas sao compativeis com a representacao de caracteristicas do STEP.

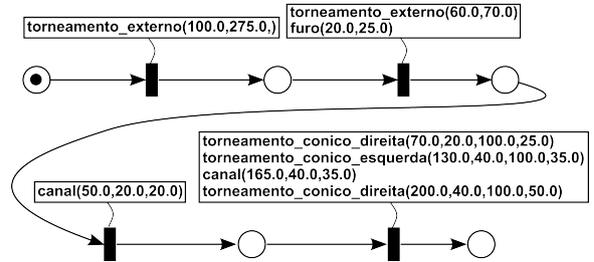


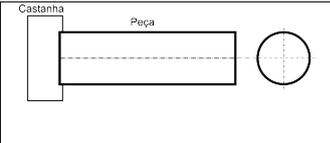
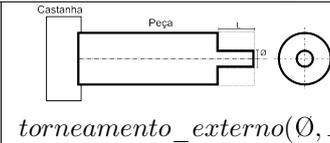
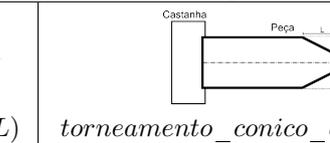
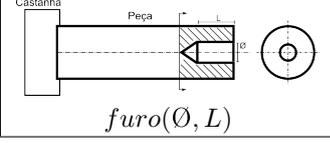
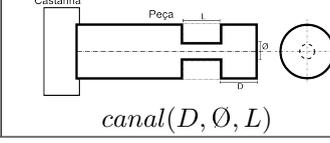
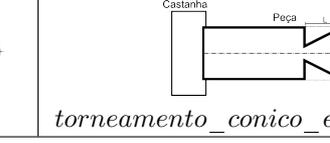
Figura 10: Modelo da *peca* de exemplo em RdPP

Este modelo foi entregue para os operadores da maquina de torneamento junto de um manual com as *instrucoes* e foi lhes solicitado que produzissem um esboço da *peca*. O esboço da *peca*, a partir do modelo da figura 10, obtido pela consulta aos operadores e apresentado na figura 11.

5 Conclusões

Além do exemplo apresentado, outros estudos de caso estão sendo condizidos e confirmam que a RdPP e capaz de descrever processos produtivos com caracteristicas de sequencia, paralelismo, sincronizacao, conflito e sequencia aleatoria de processos. Com esta descricao baseada na RdPP

Tabela 1: Informações contidas no manual entregue aos técnicos em máquinas de torneamento

		
	<i>torneamento_externo</i> (\emptyset, L)	<i>torneamento_conico_direita</i> ($D, \emptyset_i, \emptyset_e, L$)
		
<i>furo</i> (\emptyset, L)	<i>canal</i> (D, \emptyset, L)	<i>torneamento_conico_esquerda</i> ($D, \emptyset_i, \emptyset_e, L$)

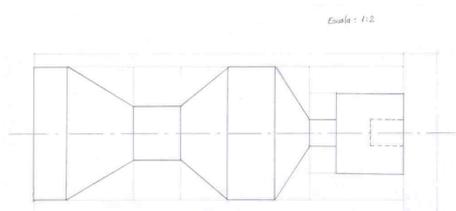


Figura 11: Esboço da peça gerada pelo técnico

amplia-se a capacidade de colaboração de empresas, pois esta evidencia os processos independentes que podem ser executados ao mesmo tempo e, eventualmente, as múltiplas empresas capazes de atender as mesmas etapas do processo produtivo.

A RdPP, mais do que um novo tipo de RdP, é uma interpretação da RdP, concebida inicialmente e especificamente para o estudo da relação entre processos produtivos em ambiente colaborativo. Ela procura manter a lógica e estrutura da RdP, mas com alguns elementos para facilitar e sistematizar a edição dos modelos e o detalhamento dos processos.

Com os testes que têm sido realizados, foi possível gerar esboços de diferentes máquinas operatrizes a partir de modelos em RdPP por técnicos e operadores destas máquinas. Como a linguagem utilizada é compatível com a linguagem do STEP-nc, a RdPP mostrou-se capaz de adaptar os padrões definidos no STEP-nc com a representação de características de processos de sequência arbitrária, não previsto pelo mesmo.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, FAPESP e CAPES pelo apoio financeiro ao atual projeto.

Referências

Bhandarkar, M. P. e Nagi, R. (2000). STEP-based feature extraction from STEP geometry for agile manufacturing, *COMPUT IND* **41**: 3–24.

Bin, Y., Wei, X. e Zu-wen, W. (2009). STEP-based research and realization on CAD data transformation for virtual assembly, *World Congress on Computer Science and Information Engineering*, Vol. 1, pp. 707–710.

Fattori, C., Dobrianskyj, G., Junqueira, F., Santos Filho, D. e Miyagi, P. (2011). Description of productive processes in a collaborative environment, *Industrial Electronics Conference*, number 37, Melbourne, pp. 379–384.

Leitão, P. (2009). Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-art survey, *ENG APPL ARTIF INTEL* **22**: 979–991.

Takahashi, K., Hasegawa, K. e Miyagi, P. (1999). Hierarchical programming of sequential control systems by mark flow graph, *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Vol. 2, pp. 1297–1305.

Tao, F., Qiao, K., Zhang, L., Li, Z. e Nee, A. Y. C. (2012). GA-BHTR: an improved genetic algorithm for partner selection in virtual manufacturing, *INT J PROD RES* **50**(8): 2079–2100.

Vinodh, S. e Kuttalingam, D. (2011). Computer-aided design and engineering as enablers of agile manufacturing: A case of study in an Indian manufacturing organization, *Journal of Manufacturing Technology Management* **22**(3): 405–418.

Wang, X., Wong, T. N. e Wang, G. (2012). Service-oriented architecture for ontologies supporting multi-agent system negotiations in virtual enterprise, *J INTELL MANUF* **23**(4): 1331–1349.

Yoo, T., Jeong, B. e Cho, H. (2010). A Petri nets based functional validation for services composition, *EXPERT SYST APPL* **37**(5): 3768–3776.