

PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS MULTIFUNCIONAIS PARA SISTEMAS PRODUTIVOS FLEXÍVEIS

MULTIFUNCTIONAL RESOURCE ALLOCATION CONTROL SYSTEM DESIGN FOR FLEXIBLE PRODUCTIVE SYSTEM

Ricardo Hideki Kubo ¹ Osvaldo Luís Asato ²Givanildo Alves dos Santos ³ Francisco Yastami Nakamoto ⁴Data de entrega dos originais à redação em: 08/09/2016
e recebido para diagramação em: 03/08/2017

A contínua necessidade de melhorias nos processos e equipamentos por razões das rápidas mudanças nos mercados globais requerem alta flexibilidade em um Sistema Flexível de Manufatura (SFM). Neste sentido, a concepção e o desenvolvimento de máquinas e dos meios de produção possuem como principal objetivo a máxima produtividade e dessa forma, foram desenvolvidas as máquinas-ferramentas que combinam e integram várias tecnologias de fabricação em um único recurso, denominadas de Máquinas-Ferramenta Multifuncionais (MFM) agregando ao SFM mais um nível de flexibilidade, a flexibilidade funcional. Entretanto, os atuais sistemas de controle para alocação de recursos não exploram a flexibilidade funcional das MFMs, isto é, após a etapa de planejamento, a MFM é vista como apenas mais uma máquina convencional, com uma única funcionalidade, não explorando a potencialidade deste nível de flexibilização no processo produtivo. O objetivo deste trabalho é apresentar um projeto de sistema de controle que considere a alocação de recursos multifuncionais em um sistema produtivo flexível que possa regenerar o SFM na ocorrência de um evento não programado, por exemplo, a quebra de uma máquina associado com a flexibilidade de rotas com o emprego de um sistema de transporte com AGVs (Automated Guided Vehicle). Será apresentada como é realizada a síntese dos módulos de controle, a comunicação entre os módulos, como é explorada a flexibilidade funcional e a forma como será designado o AGV. A arquitetura de controle para a alocação de recursos é modelada utilizando-se as redes de Petri.

Palavras-chave: Sistemas flexíveis de manufatura. Regeneração. Máquinas-ferramenta Multifuncionais. Rede de Petri.

The continuing need for improvements in processes and equipment for reasons of rapid changes in global markets require high flexibility in a Flexible Manufacturing System (FMS). Thus, the design and development of machinery and means of production have as main objective the maximum productivity and in this sense, it was developed machine tools that combine and integrate various manufacturing technologies into a single feature, called Multifunctional Machine Tools (MMT) adding to FMS another level of flexibility, functional flexibility. However, the current control systems for allocating resources do not exploit the functional flexibility of MMTs, ie after the planning stage, the MMT is seen as just a conventional machine with a unique feature, not exploiting the potential of this level of flexibility in the production process. The objective of this work is to present a control system design that considers the allocation of multifunctional resources in a FMS that regenerates the manufacturing systems in the occurrence of an event not programmed, for example, breakage of a machine associated with the flexibility of routes with the use of AGVs system (Automated Guided Vehicle). It will be presented how the synthesis of the control modules is performed, the communication between the modules, how functional flexibility is explored and how the AGV will be designated. The control architecture for the allocation of resources is modeled using Petri nets.

Keywords: Flexible Manufacturing Systems. Machine Breakdown. Multifunctional Machine Tool. Petri Net.

1 INTRODUÇÃO

A redução de custos e a minimização de recursos ociosos nos processos de fabricação são elementos essenciais para as empresas manterem a vantagem competitiva e sua atuação no mercado (YAMAZAKI, 2016). Com a evolução dos sistemas mecatrônicos por razões da alta flexibilidade dos Sistemas Flexíveis de Manufatura (SFM), foram desenvolvidas máquinas que integram múltiplas tecnologias de fabricação, possibilitando a combinação de processos de usinagem a laser e manufatura aditiva com os processos de fresamento, torneamento e furação em uma única máquina (MORIWAKI, 2008; EIMARAGHY et al., 2012; BRECHER et al., 2016). Um exemplo de Máquina-Ferramenta Multifuncional (MFM) é apresentada na figura 1.

Figura 1 – Exemplo de uma Máquina Ferramenta Multi Tecnológica (MAZAK)



1 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus São Paulo. < ricardo.hideki.kubo@gmail.com >.

2 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus Suzano.

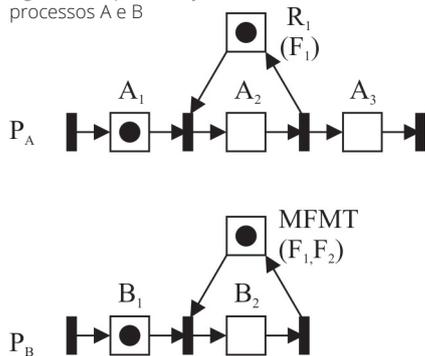
3 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus São Paulo.

4 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus São Paulo.

No entanto, diante da ocorrência de quebra de uma máquina no chão de fábrica, ainda não são exploradas em tempo real as múltiplas funcionalidades contidas nas MFM. Isto ocorre, porque após a definição da funcionalidade para a alocação da MFM realizada pelo planejamento, a MFM é tratada como uma máquina convencional, como se existisse uma única funcionalidade. Esta alocação determinística de recursos é derivada diretamente a partir do plano de produção (HE et al., 2008; LI et al., 2010).

A figura 2 descreve um sistema convencional de alocação de recursos modelado através da rede de Petri (MURATA, 1989), que não explora as múltiplas funcionalidades contidas na MFM.

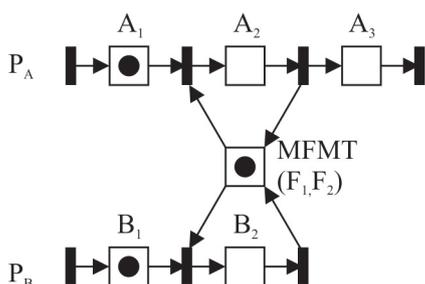
Figura 2 - Representação em rede de Petri dos processos A e B



O processo P_A possui o recurso R_1 com funcionalidade F_1 para a execução da atividade A_2 e o processo P_B possui o recurso MFMT com as funcionalidades F_1 e F_2 , sendo utilizada a funcionalidade F_2 nesse caso. Na ocorrência imprevista de quebra do recurso R_1 , existe o risco de travamento do processo P_A pela indisponibilidade do recurso R_1 , mesmo sabendo que a funcionalidade F_1 está disponível no recurso MFMT. Esse cenário ilustra a limitação da abordagem convencional, onde a alocação de recursos é baseada em uma sequência de tarefas previamente planejada (ASATO et al., 2011).

A proposta do trabalho é desenvolver um método de modelagem do sistema de controle de alocação de recursos que considere o conceito de flexibilidade funcional para regenerar o sistema produtivo diante de um evento não esperado, como por exemplo, a quebra de máquina. O método irá permitir a exploração da flexibilidade funcional da MFM e também definir o recurso de transporte (AGV) mais apropriado para realizar a atividade de transporte da peça que está sendo usinada a fim de regenerar o SFM. A figura 3 ilustra o compartilhamento do recurso MFMT entre os processos P_A e P_B .

Figura 3 - Representação dos processos compartilhando o recurso MFMT



2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

No presente trabalho o comportamento dinâmico de um Sistema Produtivo (SP) é classificado como um Sistema Dinâmico a Eventos Discretos (SDED), que são sistemas utilizados para descrever, analisar e controlar a execução dos processos de um SP. Os processos executados no SP são constituídos por um conjunto finito de atividades sequenciais e pré-definidas que caracterizam o comportamento dinâmico que rege a evolução dos estados do sistema através da ocorrência de eventos (NAKAMOTO et al., 2008). Para a modelagem, análise e especificação do controle, será utilizada nesse trabalho a ferramenta de modelagem e controle E-MFG (*Enhanced Mark Flow Graph*) que é uma extensão da rede de Petri.

2.1 Ferramenta de Modelagem e Controle E-MFG (*Enhanced Mark Flow Graph*)

A ferramenta de modelagem E-MFG inclui as marcas individuais e os elementos estruturais do MFG (*Mark Flow Graph*) (TAKAHASHI et al., 1999) e permite a manipulação de marcas com atributos sem fugir do modelo de rede elementar convencional. Possui a capacidade de modelar e controlar as alterações de informações das marcas e a seleção das tarefas associadas aos boxes (SANTOS FILHO et al., 2011). O E-MFG é composto basicamente dos elementos estruturais do MFG, conforme apresentado na figura 3: i) transição, representa a ocorrência dos eventos; ii) box, representa a pré-condição e a pós-condição dos eventos; iii) marca, indica a manutenção de uma condição; iv) box controlador, exerce a função de controlar o estado dos atributos de uma marca; v) arco orientado, relaciona a conexão entre o box e a transição, ou seja, a relação entre os eventos e as condições, vi) porta e transição inibidora, responsável por inibir a ocorrência de eventos e vii) porta e transição habilitadora, responsável por habilitar a ocorrência de eventos. A figura 4 ilustra os elementos básicos do E-MFG.

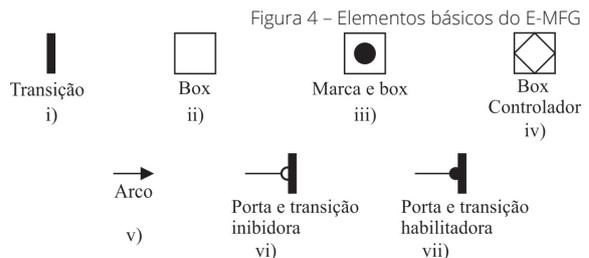


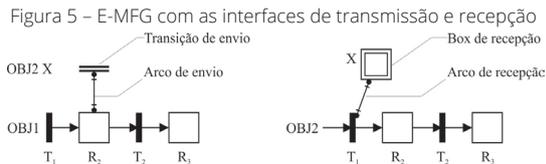
Figura 4 - Elementos básicos do E-MFG

As marcas individuais são acompanhadas de um vetor de atributos e que podem ser associado a diversas informações referentes ao controle, processo e ao produto. As dinâmicas das regras de disparo são divididas em três níveis hierárquicos estabelecidos por regras de decisão. No primeiro nível estão as regras de restrições adicionais de disparo, no segundo nível as regras de habilitação de disparo e no terceiro nível as regras de realização de disparo.

2.2 Interface de recepção e transmissão E-MFG com comunicadores

A incorporação de elementos comunicadores na técnica de modelagem E-MFG ocorreu devido a necessidade de uma modelagem que viabilizasse a

colaboração entre os sistemas (MATSUSAKI, 2006). A modelagem E-MFG com comunicadores, além de incluir os elementos da interface de transmissão e de recepção, mantém a individualidade das marcas nos elementos estruturais do E-MFG (SANTOS FILHO et al., 2011). A interface de transmissão envia eventuais mensagens assíncronas quando o *box* a ela conectada estiver marcado e a interface de recepção dependendo da informação recebida, realiza a ativação ou desativação da transição (MATSUSAKI, 2006). A figura 5 ilustra as interfaces de transmissão e recepção dos elementos comunicadores.



3 PROPOSTA DE ARQUITETURA

Inicialmente, as arquiteturas dos sistemas de controle de alocação de recursos possuíam um único módulo que era responsável tanto pelo controle dos recursos quanto pelo sequenciamento das atividades dos processos (MIYAGI, 1996). Dessa forma, nos SPs que possuíam o compartilhamento de recursos entre processos, ocorria à perda da estruturação do sistema e como consequência, a perda de controle do estado global do sistema. Diante dessa limitação, foi proposta a divisão do sistema de controle em dois níveis denominados de controle de processos (responsável pelo sequenciamento das atividades dos processos e pela requisição dos recursos) e do controle de recursos (responsável pela utilização dos recursos entre as atividades de cada um dos processos). Com a evolução tecnológica dos sistemas mecatrônicos, foi possível o uso cada vez maior das MFMs e diante desta nova realidade, foi necessário desenvolver uma nova arquitetura para alocar os recursos em tempo de execução (ASATO, 2015; NAKAMOTO, 2008) e baseado nesta arquitetura desenvolve-se este trabalho. A figura 6 ilustra a arquitetura proposta.

Descrição dos módulos da arquitetura proposta:

- **Módulo Controle de Processos (CP):** Responsável por realizar uma função de controle com a sequência de funcionalidades dos processos produtivos pertencentes ao SFM através de um grafo (derivado da rede de Petri). Estabelece também a sequência das

atividades a serem executadas por meio da alocação e liberação de recursos.

- **Módulo Designação de Funcionalidades (DF):** Responsável pela estruturação das funcionalidades de mesmo nome do SFM. A estruturação consiste no agrupamento das funcionalidades de mesmo nome e na conversão das sequências de produção em sequências de funcionalidades. Dessa forma, a alocação de recursos passa a ter referência na funcionalidade e não mais no recurso.
- **Módulo Designação de Recursos (DR):** Responsável pela execução de um algoritmo que resulte na designação do recurso mais adequado para substituir um recurso inoperante do SFM. Os critérios para a escolha do algoritmo são o tempo de resposta e a complexidade computacional.
- **Módulo Designação de Transporte (DT):** Responsável pela designação de transportadores (AGV) para a realização da atividade de transporte entre as estações de trabalho e a definição dos trajetos de transporte. O processo de transporte consiste em duas atividades, uma atividade de carregamento na origem (trajeto I) e outra atividade de descarregamento no destino (trajeto II). Os módulos de controle da Designação de Transporte são:
 - Designação de Transportadores (DT_{AGV}): Responsável pela designação de transportadores para a realização de transporte de itens entre as estações de trabalho e definição do trajeto I;
 - Cálculo de Rota (CR): Responsável pela definição do trajeto II dos transportadores.

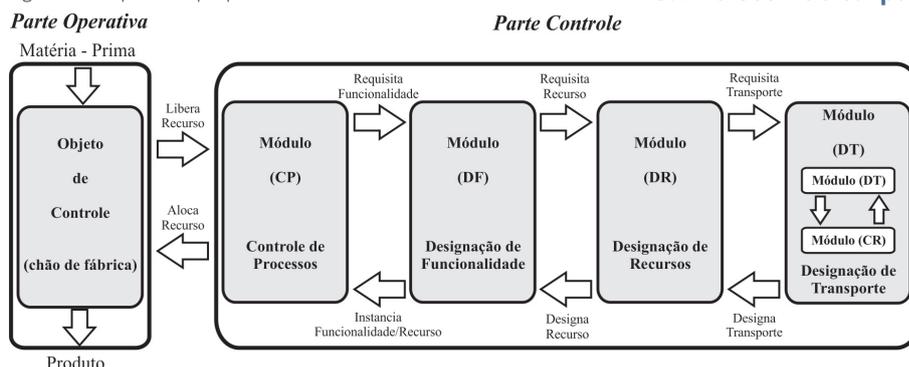
3.1 Dinâmica de funcionamento

O sistema de controle de alocação de recursos obedece a programação estabelecida pelo planejamento de produção, mas na presença imprevista de algum recurso inoperante no chão de fábrica, o módulo CP irá requisitar um novo recurso ao módulo DF, que irá identificar a funcionalidade afetada do recurso e enviar essa informação ao módulo DR, que irá executar um algoritmo para a escolha do recurso mais apropriado e enviar o resultado obtido ao módulo DT, que além de selecionar um transportador e fornecer as informações do processo de transporte, irá retornar o conjunto de informações ao módulo CP, que irá alocar o recurso no chão de fábrica, designar o transportador e fornecer informações a respeito do processo de transporte a ser executado. Uma vez concluída a utilização do recurso, ele ficará disponível para a próxima alocação.

3.2 Sistemática para síntese dos módulos de controle

Para melhor compreensão da síntese dos módulos de controle, serão exemplificados dois processos denominados de processo P_A e P_B . O processo P_A é composto pelas atividades A_1, A_2 e A_3 e o processo P_B é composto pelas atividades B_1 e B_2 .

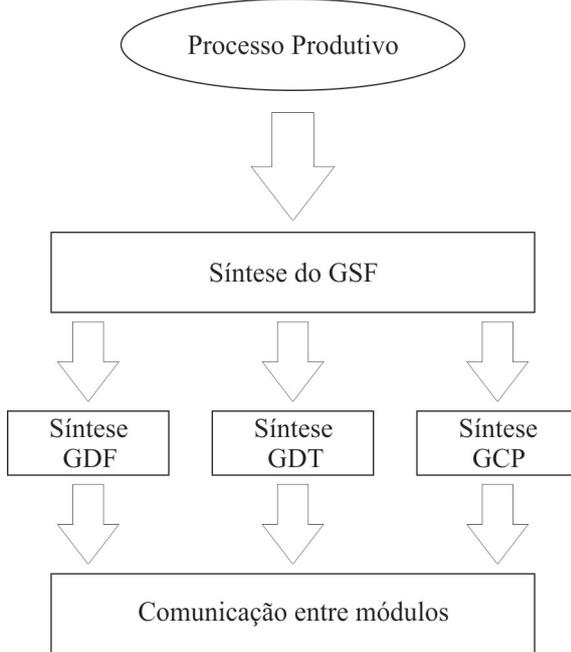
Figura 6 – Arquitetura proposta no trabalho



Para a implementação dos módulos de controle da arquitetura, é necessário gerar 4 grafos: Grafo Sequência de Funcionalidades (GSF), Grafo Controle de Processos (GCP), Grafo Designação de Funcionalidades (GDF) e Grafo Designação de Transporte (GDT).

Para iniciar a especificação das funções de controle da alocação de recursos, é necessário gerar primeiramente a sequência de recursos fornecida pelo setor de planejamento e converter os recursos em funcionalidades, essa conversão é denominada como GSF. A partir do GSF derivam os grafos GDF, GDT e o GCP. A figura 7 ilustra o procedimento para a síntese dos grafos do sistema de controle.

Figura 7 – Procedimento para síntese dos grafos do sistema de controle

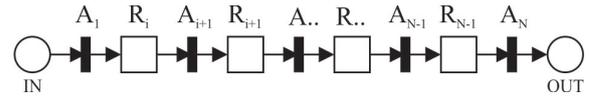


A seguir são apresentadas as etapas para a implementação dos módulos de controle.

Etapa 1: Síntese do Grafo Sequência de Funcionalidade (GSF)

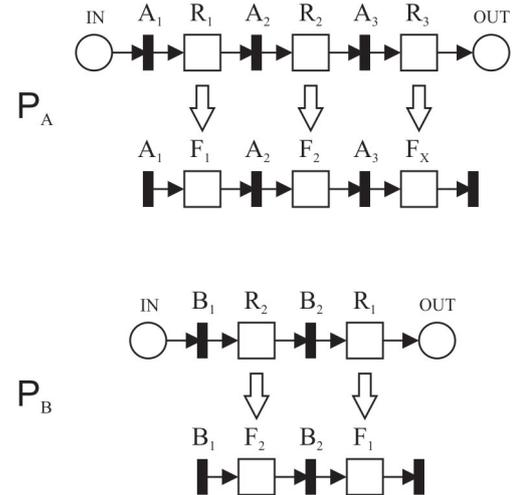
Através da sequência de recursos (*scheduling*) estabelecida pelo planejamento da produção, é obtido o grafo de sequência de funcionalidades (GSF). Na figura 8, apresenta-se um exemplo descrito por meio da ferramenta de modelagem E-MFG (*Enhanced-Mark Flow Graph*) de um processo com a sequência de recursos utilizados para a produção de um determinado produto. Onde i) IN, representa a entrada de matéria-prima; ii) A_i , representa o evento (transição) que indica o início de utilização do recurso R_1 (sendo $i=1, \dots, n$); iii) R_i , representa a utilização do recurso R_i (sendo $i=1 \dots n-1$) e iv) OUT, representa a saída do produto.

Figura 8 – Exemplo de sequência de recursos para um processo



Dessa forma, com a conversão do grafo de sequência de recursos em um grafo sequência de funcionalidades, é possível obter o grafo (GSF). A figura 9 ilustra a conversão da sequência de recursos em uma sequência de funcionalidades.

Figura 9 – Exemplo da síntese do GSF a partir da sequência de recursos

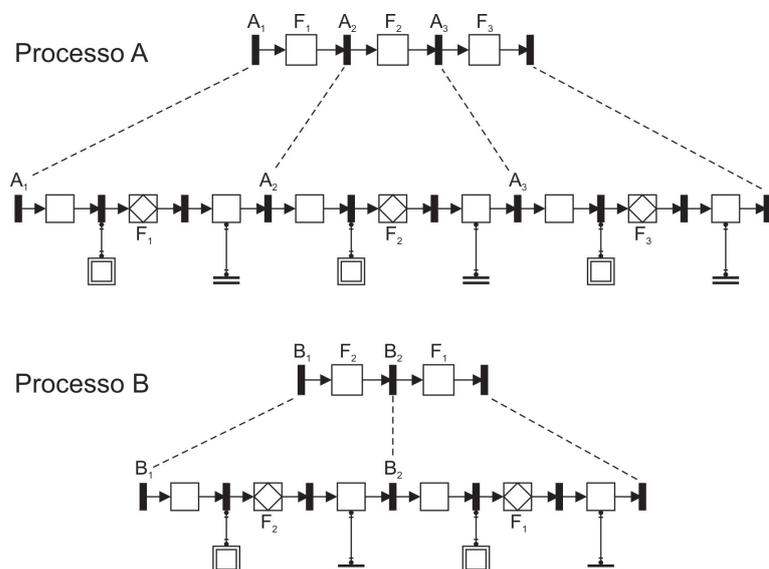


Etapa 2: Síntese do Grafo Designação de Funcionalidades (GDF)

Para a síntese do GDF é necessário realizar o refinamento e a fusão dos *boxes* controladores de mesmo nome.

No refinamento é considerada a funcionalidade descrita no módulo GSF entre as transições A_i e A_{i+1} . Com isso, o refinamento é realizado através da inclusão de um *box* de entrada (*buffer* de entrada), um *box* controlador (representação da funcionalidade) e de um *box* de saída (*buffer* de saída). O refinamento dos processos A e B estão ilustrados na figura 10.

Figura 10 – Refinamento dos processos A e B

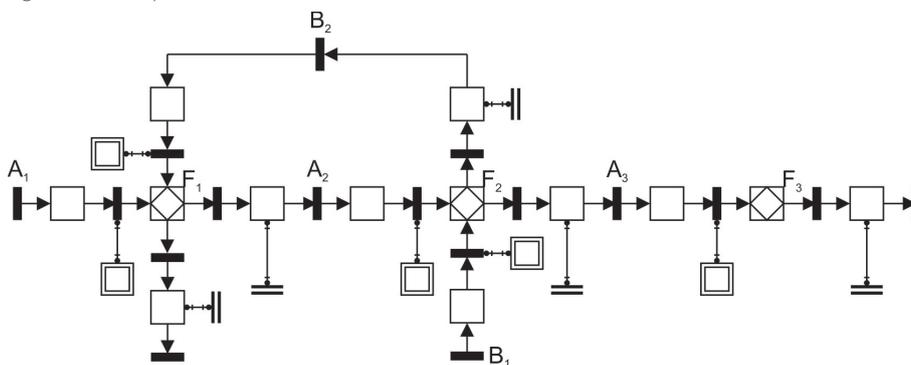


Concluída a etapa de refinamento das funcionalidades do módulo GSF, integra-se os grafos GSF por meio da fusão dos *boxes* controladores de mesma funcionalidade. A fusão dos *boxes* controladores está representada na figura 11 para os processos A e B. Com isso, a designação do recurso mais adequado para substituir um recurso inoperante do SFM é realizada por meio de um algoritmo heurístico implementado no módulo DR.

Para a atividade de organização da fila de requisições, as requisições de transporte devem ser ordenadas por ordem de chegada e após a finalização da ordenação, copiam-se os valores da primeira requisição da fila para os atributos 1, 2, 3 e 4.

Nas atividades de atualização dos estados e de designação dos transportadores, deve-se primeiramente verificar a existência de transportadores disponíveis para o atendimento da solicitação de transporte

Figura 11 – Exemplo de fusão dos boxes controladores



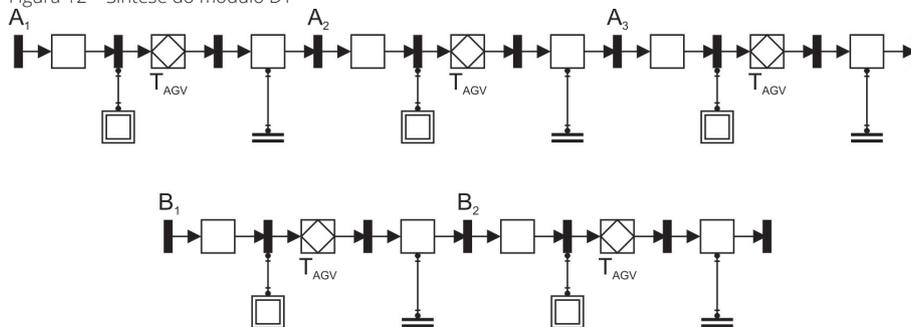
Etapa 3: Síntese do Grafo Designação de Transporte (GDT)

A síntese do módulo DT dos processos A e B ilustrada na figura 12 é baseada na metodologia PFS/E-MFG e realizada em três atividades denominadas: atividade de atualização dos estados dos transportadores, atividade de organização da fila de requisições e atividade de designação do transportador.

(atributo 7) e para a designação dos transportadores, será adotado o critério de menor caminho baseado em algoritmo heurístico (atributo 8). Após a designação do transportador, será calculado o trajeto II referente ao segundo trajeto da atividade de transporte (atributo 9).

Será enviada uma resposta ao módulo CP referente ao pedido de transporte recebido pelo módulo DT, que somente após a efetiva designação, poderá informar ao

Figura 12 – Síntese do módulo DT



Para a geração do E-MFG deve-se considerar os atributos da marca. No módulo DT a marca possui nove atributos conforme descrito na tabela 1.

módulo CP que o pedido de transporte será atendido além de enviar uma resposta referente a ordem de transporte (atributo 3, 4, 5, 8 e 9). O módulo DT informa o transportador de sua alocação e aguarda uma resposta de confirmação do transportador (atributo 7), após a confirmação do transportador, o módulo DT realiza a cópia dos dados do primeiro da fila para os atributos 1, 2, 3 e 4. O transportador deverá informar o módulo DT o término da atividade de transporte que lhe foi designado para que fique disponível para a próxima designação (atributo 7).

Tabela 1 - Atributos da marca no módulo DT

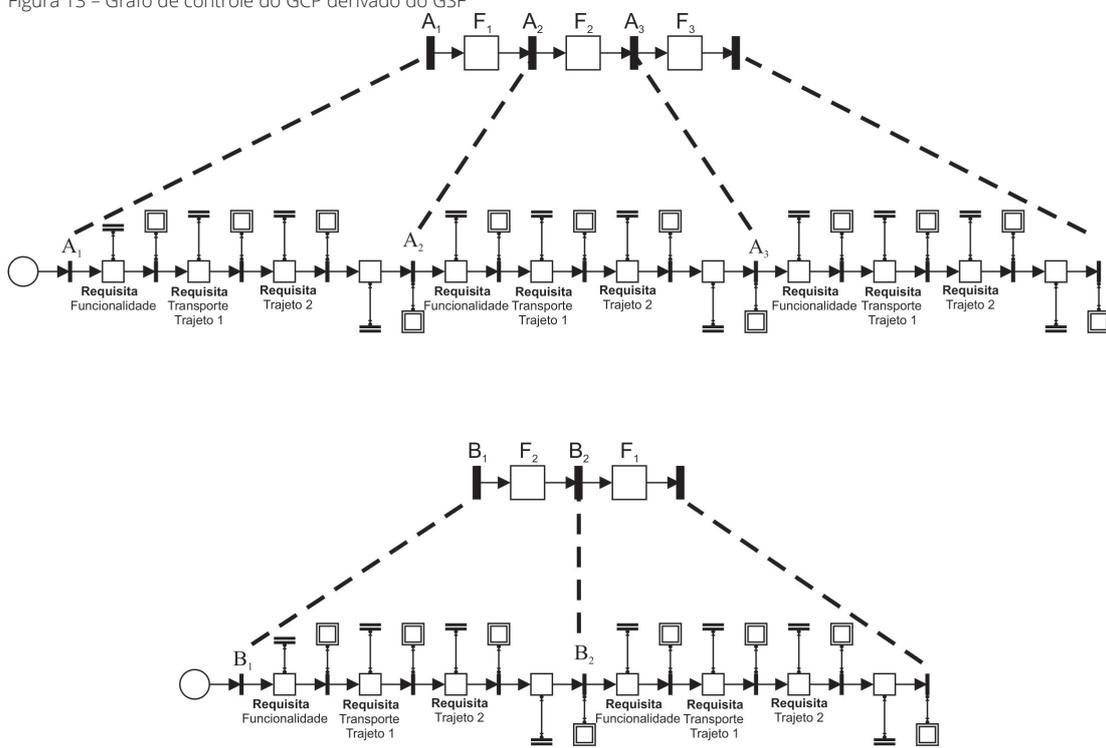
Atributo	Descrição	Valor
1	Identificação do retorno de mensagem	Inteiro
2	Identificador do processo	Inteiro
3	Recurso Origem	Inteiro
4	Recurso Destino	Inteiro
5	Identificador do transportador	Inteiro
6	Fila de requisições de transporte	Ponteiro
7	Lista de transportadores disponíveis	Ponteiro
8	Trajeto I de transporte	GAR
9	Trajeto II de transporte	GAR

Etapa 4: Síntese do Grafo Controle de Processo (GCP)

Para a síntese do grafo, deve-se considerar o grafo GSF e cada funcionalidade identificada entre

as transições T_i e T_{i+1} , conforme ilustrado na figura 13. Realiza-se um refinamento sucessivo do E-MFG gerado a partir do grafo GSF, substituindo o box "Fi" por uma sequência de boxes, com a seguinte semântica associada a cada um deles: requisita funcionalidade, requisita transporte e requisita trajeto 2.

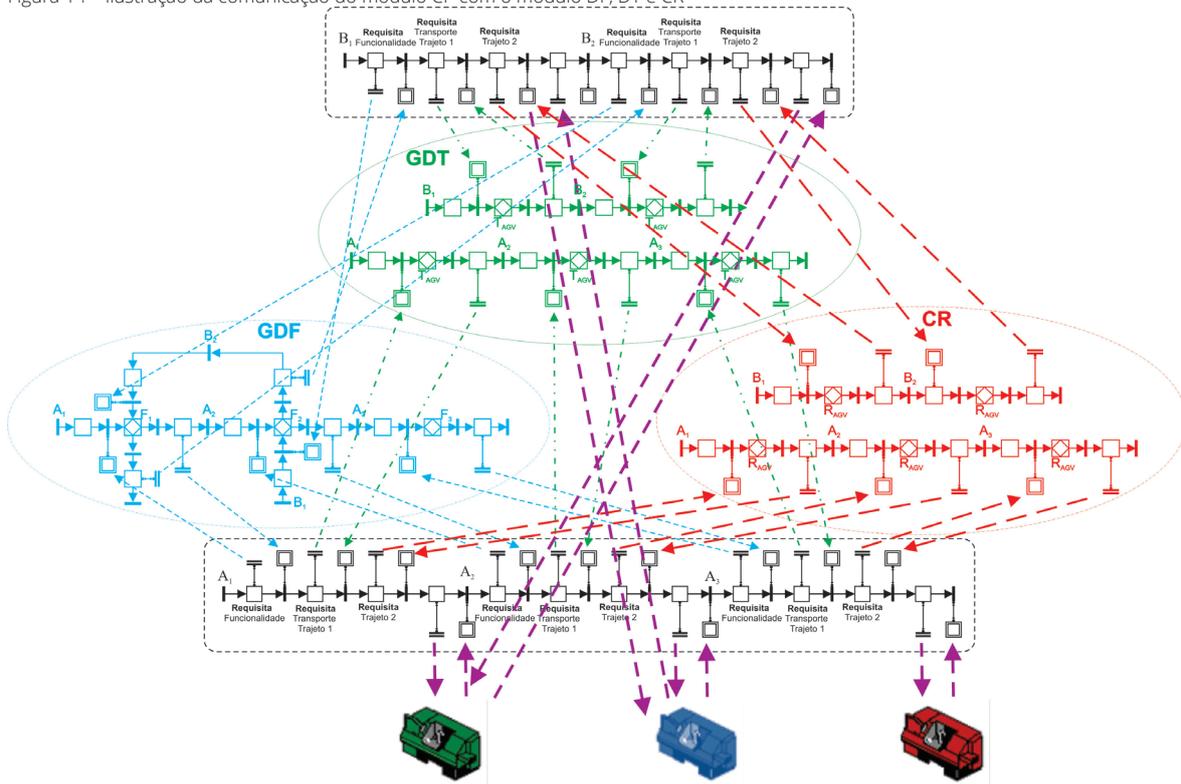
Figura 13 – Grafo de controle do GCP derivado do GSF



3.3 Comunicação entre os módulos

Após a geração dos grafos: GSF, GCP, GDF e GDT, para facilitar à compreensão da forma que é realizada a comunicação entre os módulos nos processos P_A e P_B , foi gerada a ilustração da figura 14 onde a troca de informações entre os módulos são realizadas através dos arcos de envio e dos arcos de recepção dos elementos comunicadores.

Figura 14 – Ilustração da comunicação do módulo CP com o módulo DF, DT e CR



Utilizando como exemplo a execução da atividade B_1 do processo P_B , o primeiro *box* está associado a semântica de requisição de funcionalidade que irá requisitar ao módulo GDF (por meio da transição de envio) a funcionalidade necessária para a execução da atividade B_1 . O módulo GDF irá identificar através de um algoritmo heurístico (*box* controlador) o recurso mais apropriado para o atendimento da requisição de funcionalidade e retornar a resposta para o módulo CP (por meio da transição de envio). O segundo *box* está associado a semântica de requisição de transporte e trajeto 1 que irá requisitar ao módulo GDT (por meio da transição de envio) o transportador e a rota a ser percorrida no trajeto 1 (trajeto de carregamento da peça no recurso de origem) da atividade de transporte para execução da atividade B_1 . O módulo GDT irá designar o transportador mais adequado e definir a rota a ser percorrida no trajeto 1 através de um algoritmo heurístico (*box* controlador) e retornar a resposta ao módulo CP (por meio da transição de envio). O terceiro *box* da atividade B_1 está associado a semântica de requisição do trajeto 2 que irá requisitar ao módulo CR (por meio da transição de envio), a rota a ser percorrida no trajeto 2 (trajeto de descarregamento da peça no recurso de destino) da atividade de transporte para a execução da atividade B_1 . O módulo CR irá calcular a rota a ser percorrida no trajeto 2 e retornar a resposta ao módulo CP (por meio da transição de envio). O quarto *box* irá alocar (por meio da transição de envio) o recurso no SP e aguardará o recurso finalizar a execução da atividade B_1 para prosseguir para a execução da atividade B_2 .

4 CONCLUSÕES

A arquitetura proposta mostrou como é realizada a síntese dos módulos de controle, a comunicação do módulo de controle com outros módulos, a exploração da flexibilidade funcional que possibilita que o sistema atue no comportamento dinâmico alocando o recurso de acordo com a funcionalidade solicitada, a designação do AGV e o cálculo da rota de menor caminho.

Para trabalhos futuros, o grupo de pesquisa está trabalhando em um estudo de caso, desenvolvendo um algoritmo baseado em heurísticas para designar o recurso (MFMT), encontrar o AGV mais apropriado e realizar o cálculo das rotas diante de um evento não previsto.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio para o desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

ASATO, O. L. **Regeneração de Sistemas Produtivos Mediante a Realocação Dinâmica de Recursos com Flexibilidade Funcional**. Tese de Doutorado, Engenharia de Controle e Automação Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

ASATO, O. L.; JUNQUEIRA, F.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E.; ARAUJO JUNIOR, L. O. **Control of Productive Systems with Functional Flexibility Level**. In: ETFA 16th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation Proceedings of ETFA, pp. 1-4, 2011.

BRECHER, C.; DU BOIS-REYMOND, F.; NITTINGER, J.; BREITBACH, T.; DO-KHAC, D.; FREY, M.; SCHMIDT, S. **Qualifying Multi-Technology Machine Tools for Complex Machining Processes**. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, pp. 1-14, 2016.

EIMARAGHY, W.; EIMARAGHY, H.; TOMIYAMA, T.; MONOSTORI, L. **Complexity in Engineering Design and Manufacturing**. In: CIRP Annals Manufacturing Technology, pp. 793-814, 2012.

HE, L.; LIU, Y. X.; XIE, H. L.; ZHANG, Y. **Research on Job Shop Scheduling Aiming at Instant Customerisation**. In: IEEE International Conference on Automation and Logistics, pp. 290-294, 2008.

LI, X.; GAO, L.; ZHANG, C.; SHAO, X. **A Review on Integrated Process Planning and Scheduling**. Int. J. Manufacturing Research 5(2), pp. 161-180, 2010.

MATSUSAKI, C. T. M.; SANTOS FILHO, D. J. **Modeling of Distributed Collaborative Control Systems of Production Systems**. In: ABCM Symposium Series in Mechatronics, pp. 345-352, 2006.

MIYAGI, P. E. **Controle Programável - Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos**. Editora Edgard Blücher Ltda. 1ª edição - 1996, 4ª reimpressão - 2011.

MORIWAKI, T. **Multi-Functional Machine Tool**. In: CIRP Annals Manufacturing Technology, pp. 736-749, 2008.

MURATA, T. **Petri Nets: Properties, Analysis and Applications**. Proceedings of the IEEE, vol. 77, n°4, april 1989.

NAKAMOTO, F. Y. **Projeto de Sistemas Modulares de Controle para Sistemas Produtivos**. Tese de Doutorado, Engenharia de Controle e Automação Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

NAKAMOTO, F. Y.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. **Resource Allocation Control in Flexible Manufacturing Systems Using the Deadlock Avoidance Method**. In: ABCM Series in Mechatronics, pp. 454-460, 2008.

SANTOS FILHO, D. J.; NAKAMOTO, F. Y.; JUNQUEIRA, F.; MIYAGI, P. E. **Task Control of Intelligent Transportation Vehicles in Manufacturing Systems**. Mechatronics Series 1: Intelligent Transportation Vehicles, Vol. 1, Dubai: Bentham Science Publishers, pp. 146-169, 2011.

TAKAHASHI, K.; HASEGAWA, K.; MIYAGI, P. E. **Hierarchical Programming of Sequential Control Systems by Mark Flow Graph**. In: ETFA 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Vol. 2, Barcelona, pp. 1297-1305, 1999.

YAMAZAKI, T. **Development of Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining**. In: 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), pp. 81-86, 2016.