

## **Modelagem do sistema de planejamento e controle da produção utilizando as redes de Petri para integração da manufatura**

Neves CCB\*, Asato OL\*, Nakamoto FY\*

*\*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, Brasil.*

**Resumo.** As empresas estão cada vez mais competitivas e para se manter no mercado, o desafio é atender aos novos requisitos com produtos personalizados, redução do ciclo de vida do produto e um mercado globalizado com tendências inovadoras alinhadas a Indústria 4.0. Atualmente, o Planejamento e Controle da Produção (PCP) é orientado a recursos, ou seja, o PCP exerce a sua função considerando as disponibilidades de máquinas no chão de fábrica. Entretanto, com a disponibilidade de equipamentos que executam múltiplas funcionalidades, denominados de Máquinas Ferramentas Multifuncionais (MFM), eleva-se o grau de complexidade para execução do atual paradigma de PCP. Desta forma, não se permite a utilização de todo potencial da integração dos sistemas de informação e controle com as novas tecnologias no processo de fabricação. Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar um levantamento das atuais arquiteturas de PCP e investigar os impactos para a proposição de um PCP orientado a funcionalidade. Diante de um evento não esperado, como a quebra de uma máquina, essa nova arquitetura poderá identificar as janelas de tempo e verificar a possibilidade de alocar a funcionalidades da MFM que se encontra disponível no momento, evitando uma parada no sistema de produção.

**Palavras-chave.** *Indústria 4.0; Redes de Petri; Planejamento e Controle da Produção; Controle Distribuído e Colaborativo; RAMI 4.0.*

**Abstract.** Nowadays, competition between companies have been increased and in order to keep on the market, the actual challenge is to meet new requirements such: customized products; reduced product lifecycle; and a globalized market with innovative trends aligned to Industry 4.0. Currently, Production Planning and Control (PP&C) is resource oriented, i.e., PP&C performs its function considering the availability of machines on the factory floor. However, with the availability of multifunctional equipment, named Multifunctional Machine Tools (MMT), the complexity level for the current PP&C paradigm is increased. Therefore, the full potential of integrating information and control systems with the new technologies in the manufacturing process is not allowed. Considering this, the purpose of this article is to perform a survey of current PP&C architectures and investigate the impacts for the proposition of a functionality-oriented PP&C. In the face of an unexpected event, such as a machine breakdown, this new architecture will be able to identify the time windows and check the possibility of allocating MMT functionalities that are currently available, avoiding a shutdown in the production system.

**Keywords:** *Industry 4.0; Petri Nets; Production Planning and Control; Distributed and Collaborative Control; RAMI 4.0.*

## **Introdução.**

As últimas décadas do setor industrial vêm apresentando características de incessantes mudanças devido à necessidade de adaptação ao mercado e suas novas exigências. A situação de globalização e dinamismo da atualidade exige a efetiva flexibilidade e agilidade na tomada de decisões do processo produtivo das empresas. Para isso, a integração dos níveis que estabelecem as estratégias de negócio da empresa com o sistema produtivo é fundamental (1).

Para manter a competitividade, as empresas têm se visto na posição de reverem seus modelos organizacionais de forma a operarem de forma eficiente e eficaz o suficiente para que sejam capazes de adaptar o sistema produtivo (SP) a eventuais mudanças de demanda e flexibilidade para assimilar as inovações de forma ágil (2).

A nova visão promovida pela Indústria 4.0 demanda então um sistema de controle distribuído, autônomo, inteligente e colaborativo, que pode promover um contínuo melhoramento dos processos mediante aperfeiçoamento das atividades produtivas e da tomada de decisão. A descentralização exigida para a efetiva aplicação da Indústria 4.0 cria necessidade de desenvolvimento de um novo paradigma no PCP que deve adequar suas competências às funcionalidades, e não mais aos recursos.

Neste sentido, este trabalho apresenta uma análise da possibilidade de modelagem do sistema do Planejamento e Controle da Produção (PCP) orientado a serviço e busca fazê-la utilizando redes de Petri (RdP) de alto nível (3), visto que esta ferramenta permite modelar conflito, concorrência e paralelismo de eventos. De tal modo, deve-se promover um sistema de PCP inteligente que permita a integração da manufatura de acordo com a proposta do paradigma da Indústria 4.0.

O trabalho está estruturado em cinco seções: Introdução, que contém motivação e objetivo do trabalho; Conceitos fundamentais, onde é apresentada uma revisão bibliográfica dos conceitos fundamentais utilizados para o desenvolvimento da proposta desse trabalho; Proposta, que apresenta as relações entre os conceitos detalhados; Aplicação, que apresenta como estes conceitos poderiam ser aplicados para a modelagem de um PCP inteligente; e Conclusão, que apresenta contribuições do trabalho e trabalhos futuros.

## **Conceitos fundamentais.**

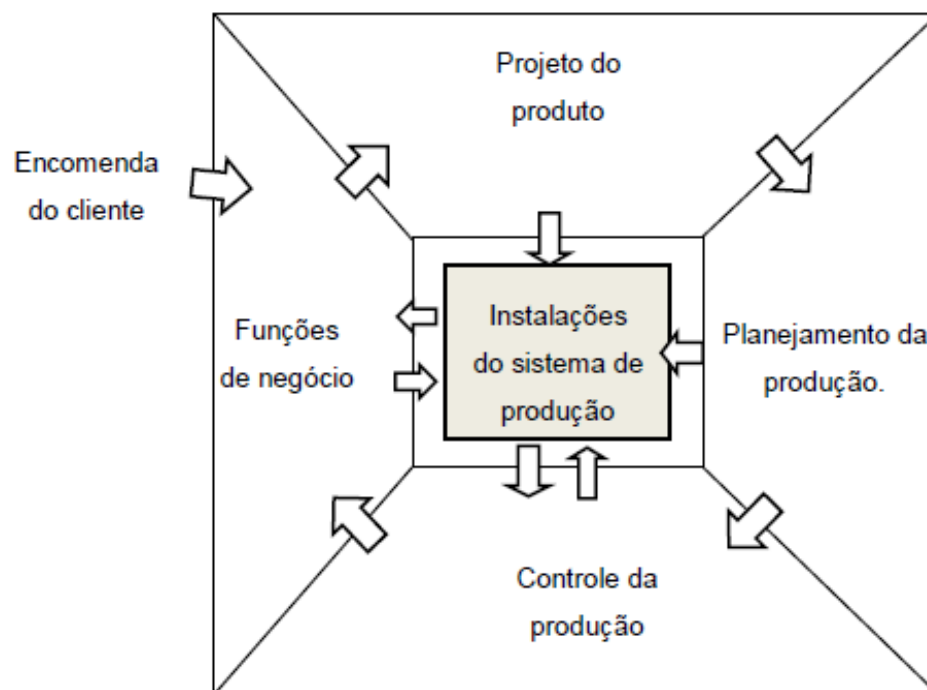
### a) Sistemas Produtivos

Um sistema produtivo (SP) é aquele que transforma, por meio de processos e/ou prestação de serviço. os insumos (entradas) em produtos (saídas). A evolução dos estados de

SPs, pertencentes à classe de Sistemas Dinâmicos a Eventos Discretos (SDED), ocorre a partir de eventos que causam uma transição instantânea de estados. Os eventos são assíncronos e podem ocorrer situações de conflito e concorrência dos mesmos (4, 5, 6).

Os Sistemas Produtivos Flexíveis (SPFs) são SPs em que executam múltiplos processos simultâneos com intenso compartilhamento de um mesmo conjunto finito de recursos. Destaca-se que os SPFs também pertencem à classe SDED. Para explorar o potencial de flexibilidade e colaboração, a cadeia de suprimentos deve permitir a adaptação das rotinas e horários com agilidade e níveis de estoques reduzidos (7).

Segundo (4), os SPs são divididos em sistemas de suporte à produção e instalações. As instalações são projetadas para operar de forma eficiente e as operações são organizadas pelos sistemas de apoio à produção, como ilustrado na figura 1.



**Figura 1.** Ciclo de processamento da informação de produção (adaptado de 4).

A flexibilidade de um SPF pode ser definida como sendo a sua habilidade de mudar ou reagir com pouca perda de tempo, esforço, custo e mantendo alto desempenho (8 *apud*. 9).

b) Planejamento e Controle da Produção

Cabe ao Planejamento e Controle da Produção (PCP) as atividades de definir o que, quanto e quando produzir, comprar e entregar, além da melhor forma de produzir (10). O PCP é responsável por receber as informações dos demais setores dentro de uma indústria, abstrair e enfim sintetizar tudo de maneira coerente. O planejar e controlar tratam tanto do próprio processo de fabricação como da utilização dos recursos necessários a esse processo, portanto o PCP integra os diferentes setores dos quais obtém informações.

Toda a documentação e informações referentes ao projeto do produto seguem para a função do planejamento da produção e, nesta fase, desenvolvem-se o planejamento do processo, o plano mestre de produção, o planejamento das necessidades materiais, o planejamento da capacidade produtiva e a programação da produção (8):

- Planejamento do processo: determinação da sequência de atividades e operações para produção de cada peça ou do lote de peças.
- Plano mestre de produção: uma lista de produtos a serem produzidos com as datas em que devem ser entregues e com as respectivas quantidades.
- Planejamento das necessidades de materiais: a matéria prima que deve ser adquirida considerando estoque necessário para atender aos recursos disponíveis.
- Planejamento da capacidade produtiva: planejamento otimizado dos recursos da empresa.
- Programação da produção (*scheduling*): programação da produção determinando o início e o término de cada ordem de produção para cumprir o plano mestre de produção. O programa de produção determina o sequenciamento das operações e distribui as operações nos diversos recursos.
- Controle da Produção: é feito o controle das operações físicas realizadas na fábrica em relação à execução do plano de produção.
- Fluxo das informações: estabelecido a partir das entidades que realizam as funções do planejamento até as entidades que realizam as funções de programação e controle de produção.

Devido à velocidade com que o SP pode sofrer eventos não programados, o PCP deve ser flexível e ter a capacidade de se moldar aos novos eventos mantendo ainda resultado satisfatório. O atual paradigma encontrado no PCP propõe uma arquitetura orientada a recursos, onde cada recurso é um componente que pode ser manipulado através de uma interface comum padrão, tornando possível o tratamento de recursos (11).

Na ocorrência de um evento não esperado dentro de um horizonte de planejamento (*scheduling*), pode-se realocar outros recursos, explorando o conceito de flexibilidade funcional, evitando um replanejamento (*rescheduling*) (8).

Partindo da automatização sofrida nas indústrias em 1970, os demais avanços tecnológicos passaram a ser incrementais, explorando principalmente a Tecnologia da Informação (TI) (12). Essas tendências tecnológicas indicam a possibilidade latente da ocorrência de uma nova revolução industrial, denominada de Indústria 4.0. Mencionado pela primeira vez em 2011, na Alemanha, é baseado nos conceitos e tecnologias que envolvem sistemas ciberfísicos, a internet das coisas e a internet de serviços, onde há a comunicação contínua, via internet, que permite a intervenção e troca de informações em máquinas (13).

A Indústria 4.0 representa um progresso em três pontos (13 *apud.* 14, 15):

- i. Digitalização da produção – sistemas de informação para gerenciamento e planejamento de produção;
- ii. Automação – sistemas para obtenção de dados das linhas de produção e máquinas em uso;
- iii. Integração de plantas produtivas numa cadeia de suprimentos compreensível – troca automática de dados.

É necessário um sistema de controle distribuído, autônomo, inteligente e colaborativo para implantação efetiva do paradigma da Indústria 4.0, ou seja, uma arquitetura orientada à serviços que permita a integração de diversos sistemas inteligentes e autônomos (16).

#### d) Arquitetura orientada a serviços

As soluções apresentadas para o gerenciamento global dos processos produtivos baseiam-se em informações do processo de fabricação com a especificação do recurso a ser utilizado de forma fixa. No caso de um SPF que envolva diferentes funcionalidades para seus recursos, implica-se a atribuição dinâmica da funcionalidade ao respectivo recurso, de acordo com o estado do SPF (8). Para que haja a descentralização do controle do SPF, o modelo de arquitetura orientada a serviços se torna uma opção. Nesse modelo, o processo pode ser visto como um conjunto de sistemas que dispõem serviços que se complementam para formar um processo produtivo. Quando solicitados, os sistemas de manufatura são alocados e dispõem seus serviços (17).

Deve haver enfoque numa solução com base nas demandas de funcionalidades para executar os processos produtivos, ou seja, uma solução com base na alocação de funcionalidades sob uma abordagem dinâmica (8).

Uma definição para arquitetura orientada a serviços pode ser encontrada em 16, onde é caracterizada como um conjunto de princípios de arquitetura para o desenvolvimento de sistemas autônomos e interoperáveis. Em uma arquitetura orientada a serviços, o foco se torna a funcionalidade dos recursos. A autonomia e a interoperabilidade encontradas são o que permitem atingir um sistema de controle distribuído, autônomo, inteligente e colaborativo que pode promover um contínuo auto-melhoramento dos processos mediante aperfeiçoamento das atividades produtivas e de tomada de decisão.

e) Norma ANSI/ISA S95

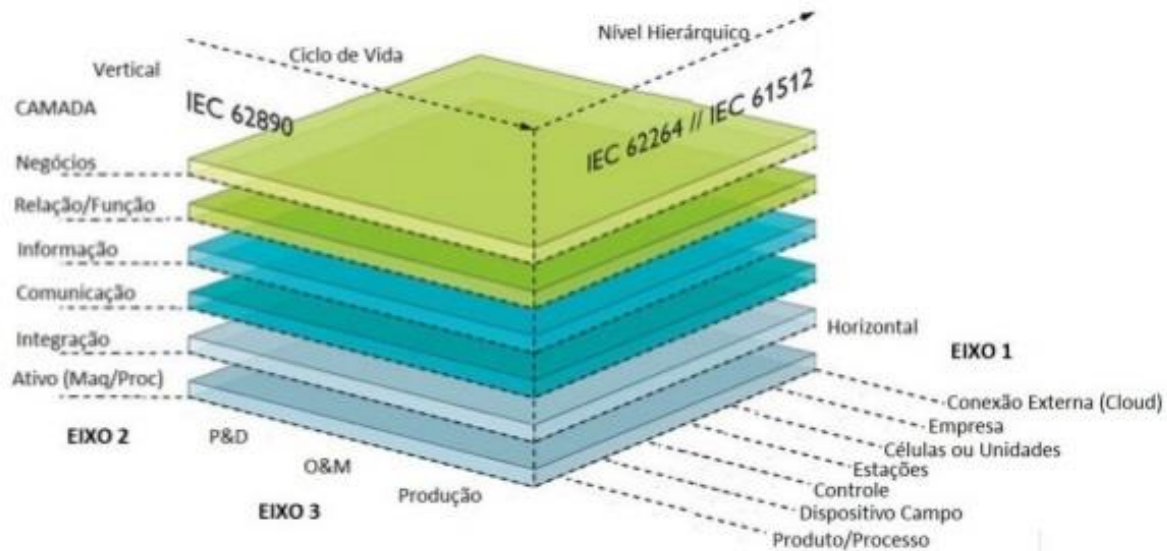
A norma ANSI/ISA S95 estabelece modelos e terminologia para definir as interfaces entre os sistemas de negócio de uma empresa e seus sistemas de controle e manufatura (18). O gerenciamento da automação industrial é fruto da modularização do sistema. A norma ANSI/ISA S95 abrange os limites de especialização de cada módulo e os dispõem em níveis, estabelecendo um modelo de atividades e fluxos de dados das informações, denominado diagrama de hierarquia funcional. Basicamente, o modelo identifica os seguintes níveis (1):

- Nível 0: Define o processo físico real;
- Nível 1: Define as atividades envolvidas na coleta de sinais e manipulação dos processos físicos, operando tipicamente dentro de janelas de tempo das grandezas de interesse em segundos ou menos;
- Nível 2: Define as atividades de monitoração e controle local dos processos físicos, operando dentro de janelas de tempo da ordem de minutos, segundos ou suas divisões. O nível 2 tipicamente trata de um equipamento dentro de um centro de trabalho, conforme a hierarquia proposta pela norma;
- Nível 3: Define as atividades que realizam a progressão dos processos para gerar os produtos finais. Inclui as atividades de manutenção de registros e coordenação dos processos. O nível 3 opera tipicamente dentro de janelas de tempo de dias, turnos, horas, minutos e segundos, sobre áreas de centros de trabalho;
- Nível 4: Define as atividades do negócio necessárias para manter o sistema de manufatura. Entre as atividades relacionadas com a manufatura estão os estabelecimentos da agenda principal da planta, determinação de níveis de inventário e garantia de que os materiais são liberados em tempo e no lugar certo para produção.

Em (7), é proposta uma metodologia para integração dos sistemas de gestão com o chão de fábrica, de forma estruturada, seguindo como base a norma ANSI/ISA S95. Utiliza-se o conceito de alocação estática dos recursos, onde o recurso está associado a determinadas atividades do processo.

f) Modelo RAMI 4.0

Do inglês *Reference Architectural Model for Industry 4.0* (Modelo de Referência para Arquitetura da Indústria 4.0), o RAMI 4.0 é um modelo para aplicações de soluções de conectividade para projetos aderentes a Indústria 4.0, permitindo um ecossistema cibernético de toda cadeia produtiva (19). É um modelo em três dimensões ou eixos (figura 2), sendo eles (19, 20):



**Figura 2.** Modelo de Referência para Arquitetura da Indústria 4.0 – RAMI 4.0 (adaptado de 19 *apud.* 20).

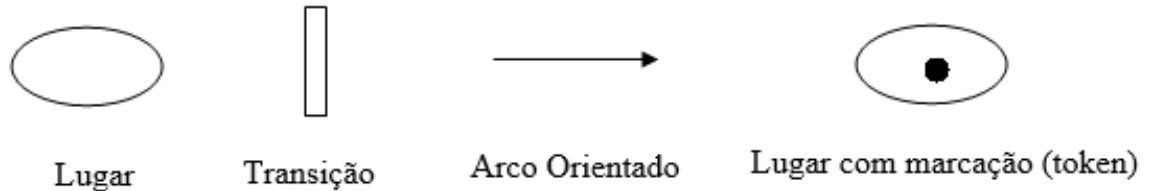
- i. Hierarquia: Define o modelo de interconexão de todos os elementos da produção, incluindo informações, pessoas e máquinas.
  - ⇒ Conexão externa (cloud);
  - ⇒ Empresa;
  - ⇒ Células ou unidades;
  - ⇒ Estações;
  - ⇒ Controle;
  - ⇒ Dispositivo de campo;
  - ⇒ Produto/processo.
  
- ii. Arquitetura: Define a verticalização das informações, suas interfaces, interpelações e uso.
  - ⇒ Negócios;
  - ⇒ Relação/Função;
  - ⇒ Informação;
  - ⇒ Comunicação;
  - ⇒ Integração;
  - ⇒ Ativo.

- iii. Ciclo de Vida: Define o ciclo de vida do produto, da pesquisa e desenvolvimento, até a sua assistência técnica.
- ⇒ Pesquisa e desenvolvimento;
  - ⇒ Operação e manutenção;
  - ⇒ Produção.

Classificando os ativos nessas camadas, é possível que eles sejam descritos e rastreados por toda sua vida útil, atribuindo hierarquias técnicas e/ou organizacionais (21).

g) Ferramentas de modelagem

A rede de Petri (RdP) é uma ferramenta de modelagem gráfica e matemática proposta por Carl Adam Petri, em 1962. É uma ferramenta vantajosa para descrição e estudo de SDEds, capaz de modelar conflito, concorrência e paralelismo de eventos (3). Uma RdP é um grafo bipartido, composto por lugares, que representam estados, e transições, que representam eventos, conectados por arcos orientados. As marcas (*tokens*), que determinam o estado da rede (figura 3).

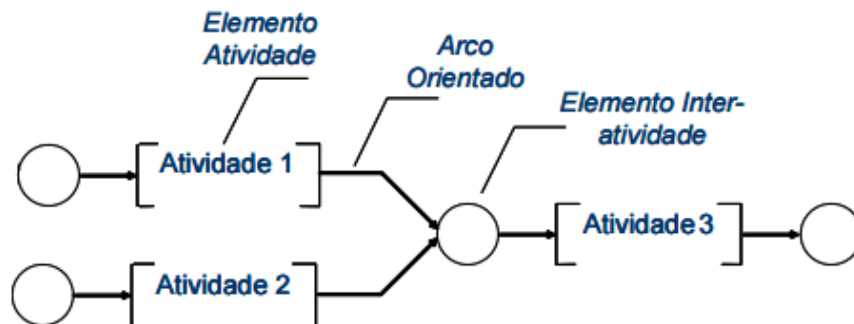


**Figura 3.** Elementos da RdP.

As RdP podem ser classificadas quanto ao seu grau de abstração, sendo de baixo nível e de alto nível, que é proposta neste trabalho. Nas redes de alto nível, as marcas incorporam alguma semântica, o que lhes confere um grande poder de abstração (22).

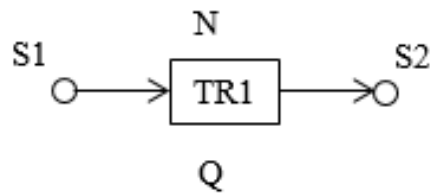
Para auxiliar na organização e entendimento da complexidade das RdP, utiliza-se o *Production Flow Schema* (PFS), que vem a ser um modelo paralelo a programação estruturada, derivado da RdP elementar. Seu objetivo é sistematizar e facilitar a modelagem explorando, através de macro eventos, uma estruturação de refinamento sucessivo e hierárquico (23, 24). É utilizada uma abordagem *top-down* e o sistema é definido então através das atividades realizadas sobre um fluxo de itens. Seu processo é decomposto entre atividades e distribuidores, que são relacionados através de arcos orientados (figura 4) (23).





**Figura 4.** Exemplo de um modelo em PFS (adaptado de 23).

Para modelar o processo de produção utilizaremos a Rede Estado-Tarefa (*State Task Network – STN*) (25). A rede é representada na forma de grafos, sendo que os nós indicam os estados (produtos em transformação) ou tarefas. A figura 5 apresenta um exemplo de STN, onde a tarefa TR1 representa a ação de processar, o estado S1 representa a entrada e, após processar, temos o estado S2, que representa a saída. A letra N indica quanto tempo leva para processar a tarefa e Q representa a quantidade física a ser processada.

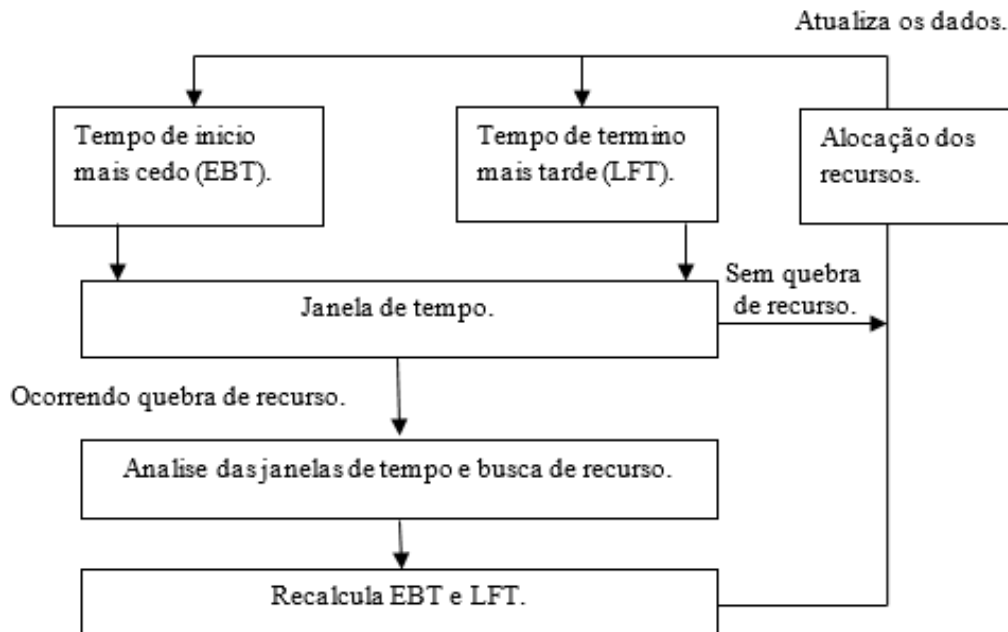


**Figura 5.** Representação da rede *State Task Network*.

### Proposta.

Os avanços tecnológicos têm aumentado o número de funcionalidades executadas em um mesmo recurso, denominados de Máquinas Ferramentas Multifuncionais (MFM). As MFM estão cada vez mais acessíveis no chão de fábrica. Tal flexibilidade funcional das MFMs fez surgir a necessidade de desenvolver um novo paradigma para o planejamento e controle da produção (PCP), que deve ser orientado a serviço, aumentando assim a flexibilidade do sistema e gerando alternativas de alocação de recursos, evitando a parada dos sistemas produtivos.

Durante a fase do planejamento da produção (*scheduling*) é possível identificar, dentro das maiores janelas de tempos, propor o uso das MFM caso seja necessário diante de uma possível quebra de máquina, conforme esquema apresentado na figura 6.



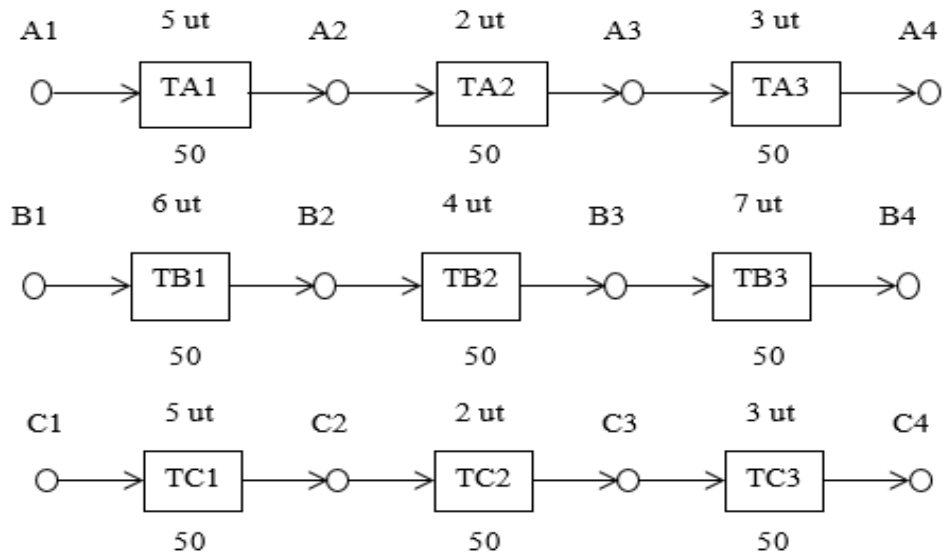
**Figura 6.** Arquitetura para análise das janelas de tempo e busca de recurso.

A geração das janelas de tempo do processamento é realizada em três passos:

- i. Determinar a quantidade e os instantes de término mais tarde (*latest finishing times* – LFT) respectivos a partir da demanda de produtos finais;
- ii. Determinar os tempos de início mais cedo (*earliest beginning times* – EBT) para todos os processos a partir do fornecimento de matérias-primas;
- iii. Propagar as restrições por meio das janelas de processamento (EBT, LFT), resultando nas janelas de processamento para realizar a programação da produção.

### Aplicação.

Para o exemplo de aplicação são considerados três processos (figura 7). A partir destes processos, são geradas suas janelas de tempo, conforme figura 8.

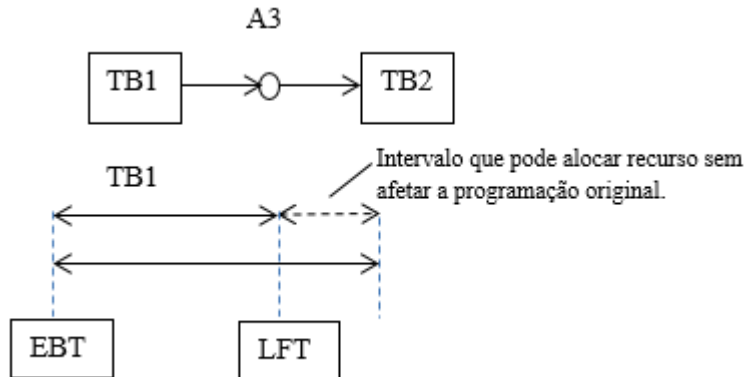


**Figura 7.** Exemplo de processos numa rede STN.



**Figura 8.** Janelas de tempo das tarefas TA, TB, TC.

Diante da quebra da máquina que executaria a tarefa TB2 (período de 9 a 13), o sistema analisa as janelas de tempo e, conforme figura 9, verifica a possibilidade de alocar o recurso (MFM) que executou a tarefa TB1. Desta forma, se evita a parada no sistema produtivo e se mantém o *scheduling* original.



**Figura 9.** Análise da janela de tempo disponível.

### Conclusão.

Utilizando um modelo de arquitetura orientado a serviço, as definições das incumbências do PCP se voltam às funcionalidades dos recursos, que são alocados quando solicitados. A promoção de um conceito de modelagem do SP onde se explora a funcionalidade dos recursos deve promover maior flexibilidade ao sistema, uma vez que permite a descentralização dos domínios de controle, a autonomia dos módulos produtivos e a colaboração entre estes. Por meio da RdP de alto nível auxiliada pelo PFS, a tarefa de se modelar esse novo paradigma descentralizado e colaborativo deve se tornar viável devido à alta capacidade de abstração e possibilidade de refinamento sucessivo do sistema.

A próxima etapa do presente trabalho de pesquisa é a aplicação da metodologia PFS/RdP para gerar as redes de alto nível, com base nas especificações do modelo RAMI 4.0. A partir da validação por simulação, será verificada a viabilidade deste modelo para a integração nos trabalhos realizados por (7) e (26).

### Agradecimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e os autores



agradecem também ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) e ao Parque Tecnológico Itaipu (PTI) pela oportunidade e apoio para desenvolvimento do presente trabalho.

### **Bibliografia.**

- (1) Nakamoto FY. Projeto de Sistemas Modulares de Controle para Sistemas Produtivos [tese]. São Paulo (SP): Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2008.
- (2) Gleghorn R. Enterprise Application Integration: a Manager's Perspective. Em: IEEE – Computer Society – IT Professional. 2005; 7:17-23.
- (3) Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. Em: IEEE. 1989; 77(4): 541-80.
- (4) Groover MP. Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing. 1<sup>st</sup> ed. Prentice-Hall; 2011.
- (5) Santos Filho DJ, Nakamoto FY, Junqueira F, Miyagi PE. Task Control of Intelligent Transportation Vehicles in Manufacturing Systems. Max Suell Dutra e Omar Lengerke, editores. Mechatronics Series 1: Intelligent Transportation Vehicles. Dubai, EAU. Bentham Science Publishers; 2011. 1:146-69
- (6) Cassandras CG e Lafortune S. Introduction to Event Discrete System. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Springer Verlag; 2007.
- (7) Guirro D.N. Requisitos para modelagem do sistema de execução da manufatura com bases na norma ANSI/ISA S95 [dissertação]. São Paulo (SP): Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2017.
- (8) Asato O.L. Regeneração de Sistemas Produtivos Mediante a Realocação Dinâmica de Recursos com Flexibilidade Funcional [tese]. São Paulo (SP): Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2015.
- (9) Matsusaki CTM, Santos Filho DJ. Modeling of distributed collaborative control systems of production systems. Em: ABCM Symp. Series in Mechatronics; 2006. 2:345-52.
- (10) Fernandes FF, Godinho FM. Planejamento e Controle da Produção – dos fundamentos ao essencial. São Paulo: Editora Atlas; 2010.
- (11) Lucchi R, Millot M, Elfers C. Resource Oriented Architecture and REST: Assessment of impact and advantages on INSPIRE. Itália. JRC Scientific and Technical Reports; 2008.
- (12) Rüßmann M, Lorenz M, Gerbert P, Waldner M, Justus J, Engel P, Harnish M. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. BCG Perspectives [Internet]. Abril de 2015 [citado em junho de 2017]. Disponível em: [https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries.aspx](https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx).

- (13) Roblek V, Meško M, Krapež A. A Complex View of Industry 4.0. SAGE Open. Abril-Junho de 2016; 1-11.
- (14) Almada-Lobo F. The Industry 4.0 revolution and the future of manufacturing execution systems (MES). Journal of Innovation Management. 2016; 3:16-21.
- (15) Schlechtendahl J, Keinert M, Kretschmer F, Lechler A, Verl A. Making existing production systems Industry 4.0-ready. Production Engineering. 2014; 9:143-8.
- (16) James F, Smit H. Service-oriented paradigms in industrial automation. Em: IEEE transactions on industrial informatics. Nova York (EUA). 2005. 1:62-70.
- (17) Peixoto JA. Desenvolvimento de Sistemas de Automação da Manufatura Usando Arquiteturas Orientadas a Serviço e Sistemas Multi-Agentes [dissertação]. Porto Alegre (RS): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre; 2012.
- (18) Dobrev M, Gocheva D, Batchkova I. An ontological approach for planning and scheduling in primary steel production. Em: IEEE Intelligent Systems - International Conference. Varna, Bulgária. 2008.
- (19) Venturelli M. RAMI 4.0 – Modelo de referência pra arquitetura da Indústria 4.0. Automação Industrial [Internet]. Junho de 2018 [citado em 28 de maio de 2018]. Disponível em: <https://www.automacaoindustrial.info/rami-4-0-modelo-de-referencia-para-arquitetura-da-industria-4-0/>.
- (20) Adolphs P, Bedenbender H, Dirzus D, Ehlich M, Epple U, Hankel M, Wollschlae. Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). VDI/VDE and ZVEI [Internet]. Abril 964196002de 2015 [citado em 10 de setembro de 2018]. Disponível em: <https://www.zvei.org/en/subjects/industry-4-0/the-reference-architectural-model-rami-40-and-the-industrie-40-component/>.
- (21) International Electrotechnical Commission. IEC PAS 63088:2017. Smart Manufacturing – Reference Architecture Model Industry 4.0 (RAMI4.0). 2017.
- (22) Marranghello N. Redes de Petri: Conceitos e Aplicações. Em: DCCE/IBILCE/UNESP. 2005.
- (23) Almeida AGS. Modelagem de sistema de controle de ar condicionado baseado em redes de Petri [dissertação]. São Paulo (SP): Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2008.
- (24) Santos Filho DJ, Silva JR, Maruyama N, Miyagi PE. Estruturação da Modelagem de Processos em Sistemas Produtivos. Em: V SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Rio Grande do Sul, Brasil. São Paulo: Sociedade Brasileira de Automática; 2001.
- (25) Kondili E, Pantelides CC, Sargent RWH. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations–i. milp formulation. Computers and Chemical Engineering; 1993. 17:211-27.
- (26) Kubo RH. Proposta de Sistema de Controle para Alocação de Recursos Multitarefa e Transporte (AGVS) Mediante Falha [dissertação]. São Paulo (SP): Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo; 2017.