



REVISTA ELETRÔNICA
CIENTÍFICA DA UERGS

Manufatura automatizada baseada em sistemas ciberfísicos: um passo para indústria 4.0

João Alvarez Peixoto

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).

E-mail: joao-peixoto@uergs.edu.br, <https://lattes.cnpq.br/3242194031865969>

André Borin Soares

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).

E-mail: andre-soares@uergs.edu.br, <http://lattes.cnpq.br/3591334903964533>

ISSN 2448-0479. Submetido em: 21 jul. 2022. Aceito: 18 set. 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.21674/2448-0479.83.188-198>

Resumo

As demandas de mercado por produtos diversificados apresentam dificuldades para a gestão de sistemas produtivos, que trabalham tradicionalmente com lotes grandes e pouca variedade no produto. Para atender a flexibilidade do processo, o planejamento e controle de produção fica constantemente alterando as ordens de produção, devido às necessidades de alteração dos recursos. A utilização de sistemas ciberfísicos possibilita a interação entre máquinas e produtos, permitindo a auto-organização do fluxo de processo. Este estudo ensaia e analisa o conceito de gestão da manufatura pelo próprio produto, em um sistema auto-organizável, por um método de modelagem em que produtos e recursos são transformados em sistemas ciberfísicos, nos quais agentes de software na camada digital promovem a interação necessária entre produtos, máquinas e transportadores. A partir de uma planta virtual de manufatura de um produto, com 16 opções de diversidade, é ensaiada a manufatura auto-organizável, sendo comparada com uma gestão centralizada em PCP. Foram avaliadas as métricas de inserção, retirada e modificação de estações de manufatura, além da possibilidade de ter informações do processo e do produto. Como resultados, obteve-se a implementação de uma planta didática de simulação de sistema de manufatura, além da comprovação da capacidade do sistema auto-organizável de autogerir as adversidades que uma manufatura de produtos diversificados apresenta, conseguindo alterar o fluxo de processos de cada produto de forma automática. Esta funcionalidade permite que cada produto tenha um fluxo distinto, gerenciado pelo próprio produto.

Palavras-chave: PCP; produção; CPS; agentes; auto-organização.

Abstract

Automated manufacturing based on cyber-physical systems: a step towards industry 4.0.

The market demands for diversified products present difficulties for the management of production systems, which traditionally work with large lots and little product variety. To meet the flexibility of the process, production planning and control are constantly changing production orders due to changing resource requirements. The use of cyber-physical systems enables the interaction between machines and products, allowing self-organization of the process flow. This study rehearses and analyzes the concept of manufacturing management by the product itself, in a self-organizing system, by a modeling method, in which products and resources are transformed into cyber-physical systems, in which software agents in the digital layer promote the necessary interaction between products, machines, and carriers. Using a virtual manufacturing plant of one product, with 16 diverse options, self-organizing manufacturing is tested and compared with centralized PCP management. The metrics for insertion, removal, and modification of manufacturing stations were evaluated, as well as the possibility of having a process and product information. As a result, the implemen-



tation of a didactic manufacturing system simulation plant was obtained. Besides proving the capacity of the self-organizing system to self-manage the adversities that the manufacture of diversified products presents, it can change the process flow of each product automatically. This functionality allows each product to have a distinct flow, managed by the product itself.

Keywords: PCP; production; CPS; agents; self-organization.

Resumen

Fabricación automatizada basada en sistemas ciberfísicos: un paso hacia la industria 4.0.

La demanda del mercado de productos diversificados plantea dificultades a la gestión de los sistemas de producción, que tradicionalmente trabajan con grandes lotes y poca variedad de productos. Para responder a la flexibilidad del proceso, la planificación y el control de la producción modifican constantemente las órdenes de producción en función de las necesidades cambiantes de los recursos. El uso de sistemas ciberfísicos posibilita la interacción entre máquinas y productos, permitiendo la autoorganización del flujo del proceso. Este estudio ensaya y analiza el concepto de gestión de la fabricación por el propio producto, en un sistema autoorganizado, mediante un método de modelización, en el que los productos y los recursos se transforman en sistemas ciberfísicos, en los que los agentes de software de la capa digital promueven la necesaria interacción entre productos, máquinas y transportadores. Partiendo de una planta de fabricación virtual de un producto, con 16 opciones de diversidad, se prueba la fabricación autoorganizada y se compara con una gestión centralizada de PCP. Se evaluaron las métricas de inserción, eliminación y modificación de las estaciones de fabricación, así como la posibilidad de disponer de información sobre el proceso y el producto. Como resultados, se obtuvo la implementación de una planta didáctica de simulación de sistemas de fabricación, además de demostrar la capacidad del sistema de autoorganización para autogestionar las adversidades en la fabricación de productos diversificados, cambiando el flujo del proceso de cada producto de forma automática. Esta funcionalidad permite que cada producto tenga un flujo distinto, gestionado por el propio producto.

Palabras clave: PCP; producción; CPS; agentes; autoorganización.

Introdução

O mercado de bens e consumo sofreu transformações com o avanço das tecnologias digitais e a busca por produtos diversificados. O acesso à informação trouxe ao consumidor maior possibilidade de escolha, seja nas funcionalidades que procura em um produto ou nos fabricantes disponíveis. Grandes marcas deixam de ser exclusivas e produtos consolidados são preteridos a outros produtos similares, com funcionalidades idênticas (KOTLER; KARTAJAYA; SETIAWAN, 2017). A produção abundante continua a ser demandada, porém, há uma tendência à produção em massa de produtos altamente personalizados (MENDES *et al.*, 2008).

Um sistema produtivo segue uma regra de fluxo de produção definida, mas deve conseguir modificar esta regra em função de ocorrências no processo. A flexibilidade nos sistemas produtivos é o fator que leva este sistema a ser capaz de se modificar, seja estruturalmente ou em sua sequência de operação, para mudar a regra do fluxo produtivo estabelecido, solucionando demandas por diversidade e corrigindo imprevistos (BEACH *et al.*, 2000).

Em um cenário de Indústria 4.0, lotes pequenos de produção e necessidade de produzir produtos diversificados são requisitos para atender a um mercado, que se vale das tecnologias digitais para formar seus desejos de produtos e escolher onde, como e quando comprar. O meio fabril também necessita evoluir para novos conceitos, pois não se pode voltar ao Planejamento e Controle de Processos (PCP) para refazer o plano a cada peculiaridade do produto, a cada inserção de um novo recurso ou a cada falta de um recurso no sistema produtivo (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2020). Surge o questionamento científico, que indaga a forma com que os sistemas produtivos de manufatura devem ser organizados, para atender a demanda de produção de bens de consumo diversificados e, por vezes, customizados.

A hipótese deste estudo, considerando o problema da pesquisa, passa por descentralizar os serviços do PCP, tornando cada produto o gestor de seu processo de fabricação, negociando serviços com cada recurso, no processo fabril. Desta forma, o PCP não é mais o responsável pela transformação dos pedidos em ordem

de produção, em que definia os recursos e a ordem como eram executados. O escalonamento e execução de cada um dos serviços fica por conta do próprio produto. E isto pode ser conseguido por sistemas automatizados de manufatura baseados em sistemas ciberfísicos (*Cyber-Physical System – CPS*).

O estudo de Qin e Lu (2021), Prenzel e Steinhorst (2021) e Seitz *et al.* (2021) apresentam abordagens para descentralização de gestão de fluxos produtivos, que utilizam sistemas multiagente em um contexto de auto-organização, como objetivo de dar conta da produção diversificada, mas não consideram o fato que o produto necessita de um transportador, que também deve se auto-organizar para atender a demanda da produção.

O objetivo deste estudo é investigar a descentralização dos serviços do PCP e transformar um ambiente de manufatura em um sistema interativo, em que o produto e os recursos interagem para alocar serviços e decidir dinamicamente o melhor fluxo de processos a ser seguido, considerando a existência de transportadores que interagem com as máquinas, na sua contribuição no processo produtivo. O que torna relevante o estudo é uma melhor comparação e compreensão de como os novos sistemas de gestão de processo produtivo, com as premissas de indústria 4.0, podem atender às necessidades de produção diversificada e até customizada.

Ao atender o objetivo proposto, o trabalho contribui com uma metodologia para descentralização de serviços de manufatura e desenvolvimento de uma planta didática simulada, utilizada para experimentar a metodologia, que dê conta das necessidades de produção de bens diversificados, necessários ao novo perfil do mercado de consumo.

Materiais e Métodos

A utilização de sistemas ciberfísicos para gestão da manufatura, requer a compreensão prévia de como ocorre o processo de fabricação centralizado no PCP e como deve ocorrer o processo de fabricação descentralizado, a partir de uma modelagem dos recursos e produtos como sistemas ciberfísicos.

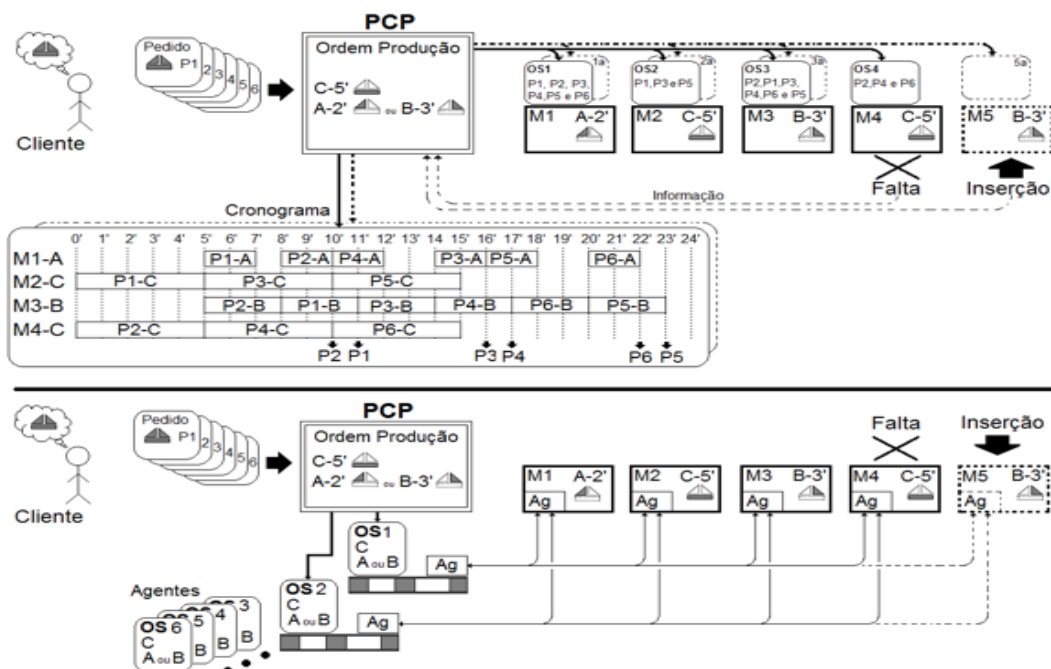
Em um fluxo regular de pedidos, de processos e condição das máquinas, o sistema produtivo opera de forma otimizada, produzindo no menor tempo possível, cabendo ao PCP realizar o escalonamento das tarefas para as máquinas, segundo pedidos similares que chegam. Se sabe o que será produzido e quais os recursos estão disponíveis. Porém, em uma condição de falta de um recurso, cabe a necessidade de informar ao PCP deste evento, para que este realize um novo planejamento e reenvie novas ordens de serviço para cada máquina, de modo a reorganizar fluxo produtivo. O mesmo ocorre com a inserção de um novo recurso, em que há necessidade de informar ao PCP, para que este faça um replanejamento do fluxo produtivo e envio de novas ordens de serviço a cada máquina, inclusive a nova que se inseriu.

Esta necessidade de tudo ter que ser programado e reprogramado pelo PCP se agrava se houver mudanças nas especificidades dos pedidos e lotes pequenos de produção, em que demandarão do PCP intervenções constantes.

Um meio de descentralizar os serviços do PCP é fazer com que cada produto seja o gestor de seu processo de fabricação, negociando serviços com cada recurso no processo fabril. Desta forma, o PCP é responsável pela transformação do pedido em ordem de produção, definindo os recursos e a ordem com que devem ser executados. Mas o escalonamento e execução de cada um dos serviços fica por conta do próprio produto.

A Figura 1 apresenta um fluxo de processo de fabricação clássico, onde os pedidos (P) que chegam ao PCP são escalonados em um fluxo de processos otimizado, na forma de cronograma de produção. Neste fluxo, o PCP envia as ordens de serviços (OS) para cada máquina (M), com os pedidos que deverão atender, na sequência definida no cronograma. E na sequência, a figura traz uma ilustração da hipótese que se apresenta para descentralizar os serviços do PCP e levar o sistema produtivo a um conceito de auto-organização.

Figura 1 - Fluxo de processos em um sistema gerenciado pelo PCP e sistema auto-organizável de manufatura



Fonte: Autores (2022).

No fluxo apresentado, os pedidos de produtos são ordenados pelo PCP em ordens de serviço, uma para cada pedido, e entregues para o “palete”, responsável em transformar a sua ordem de serviço em um produto. E isso ocorre através da interação entre o produto e os recursos, em um meio de comunicação e com protocolos próprios, com uso de Agentes (Ag), de forma que o produto toma o primeiro serviço necessário e busca um recurso que possa realizá-lo, negociando com este a sua execução. O processo ocorre a cada serviço listado pelo PCP, quando do planejamento de sua ordem de serviço. Desta forma, a falta de um recurso implica em não participar da próxima negociação. Assim como a inserção de um recurso o habilita a participar da próxima negociação que ocorrer.

Sistemas multiagentes e sua aplicação na indústria, bem como sistemas ciberfísicos, tem sido objeto de estudo a um certo tempo, considerados importantes e de prioridade para aplicação em setores produtivos críticos (LEITÃO *et al.*, 2016). Dentre os trabalhos recentes destaca-se o trabalho de Liu e Jiang (2016), em que é apresentada uma arquitetura de sistema ciberfísico para manufatura inteligente em 3 camadas: computação, *middleware* e camada física (máquinas e sensores), onde é apresentado um *middleware* geral.

Já no trabalho de Vogel-Heuser *et al.* (2014) é apresentado o conceito de Sistema de Produção Ciberfísico baseado em MAS (*Multi-agent Systems*). Neste estudo, o MAS emprega comunicação entre os agentes utilizando o padrão FIPA, em que a comunicação entre agente e equipamento é realizada no protocolo OPC. É mencionado que o sistema tem capacidade de reconfiguração, com base em raciocínio.

O uso de MAS para a implementação de PCP já foi estudado anteriormente, porém, sem grande ênfase no trabalho em conjunto com sistemas ciberfísicos. Um estudo de sistemas de planejamento e controle de produção distribuídos é apresentado em Zhang (2017). Com a realização de experimentação de laboratório como método, é possível identificar as funcionalidades que o sistema de manufatura apresenta, em um contexto de manufatura industrial.

Modelagem de recursos e produtos como sistemas ciberfísicos

Para que cada produto gere seu fluxo de produção e cada recurso participe da manufatura ofertando seus serviços, ambos devem ser implementados como sistemas ciberfísicos (*Cyber Physical Systems – CPS*), cuja a máquina ou equipamento adquire funcionalidades de interação através de um *middleware*, que permite a comunicação com outros CPS, trocando mensagens e alocando serviços (LIU; JIANG, 2016). Os transportadores também necessitam ser implementados como CPS, para poderem ser chamados pelo produto e

interagir com as máquinas e com outros transportadores, evitando colisões (MERDAN *et al.*, 2019).

O CPS é o conceito que trouxe aos elementos de um sistema de manufatura a capacidade de interagir com outros elementos, deixando de ser somente uma máquina passiva, responsiva a comandos, e anunciar seus serviços, responder a solicitações de outros CPS, a negociar e a interagir (VOGEL-HEUSER *et al.*, 2014).

Na composição de um CPS, a camada física corresponde ao controlador da máquina, seus sensores e seus atuadores, comandados segundo tarefas alocadas pela camada cibernética. A camada lógica promove a comunicação entre os equipamentos em rede, propiciando um sistema interativo de máquinas, pedidos de produtos e transportadores.

A parte lógica de um CPS é modelada como um agente de *software*, que se comunica com outros agentes através de uma rede de dados, identificado por um endereço no conjunto de protocolos TCP/IP (TCP - *Transmission Control Protocol*; IP - *Internet Protocol*), valendo-se das funcionalidades de internet das coisas (IoT – *Internet of Things*), por intermédio dos preceitos de Indústria 4.0 (XU; XU; LI, 2018).

Para que os sistemas ciberfísicos interajam, faz-se necessário interconectá-los em uma plataforma, que dá o suporte para troca de mensagens formatadas e permite a interação entre si. A plataforma utilizada neste estudo é a JADE (*Java Agent Development Framework*), um ambiente para desenvolvimento e execução de sistemas multiagente (*Multi-Agent System – MAS*), conforme as especificações FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*), totalmente codificado na linguagem JAVA (WOOLDRIDGE, 2009). É fornecido como uma biblioteca livre e distribuída sob a licença GNU Lesser General Public License (LGPL).

Do ponto de vista de programação, o sistema ciberfísico modelado como um agente na plataforma JADE é uma instância da classe *Agent*, em que os programadores ou desenvolvedores deverão escrever seus próprios programas, utilizando extensões da classe *Agent* e adicionando comportamentos específicos, segundo a necessidade e objetivo da aplicação (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007). Estes comportamentos são adicionados através de um conjunto básico de métodos, utilizando as capacidades herdadas que a classe *Agent* dispõe, tais como mecanismos básicos de interação com a plataforma de agentes (registro, configuração, gerenciamento remoto, entre outros).

Um agente pode agregar em seu programa comportamentos específicos (*behaviours*). Os comportamentos são métodos onde são descritas as ações que devem ser executadas, criados através do método *addBehaviour(new nome_classe_comportamento)*. Comportamentos são definidos como extensões da classe *Behaviour*, e nelas são definidos dois métodos principais, sendo:

- a) *void action()*: define as ações a serem executadas em um ciclo;
- b) *boolean done()*: método que, se retornar true, encerra a execução do comportamento, se retornar false, coloca novamente o comportamento na fila de execução.

Metodologia Utilizada

A proposta de transformar um ambiente de manufatura, regido por um sistema de planejamento e controle de produção (PCP), em um sistema interativo, onde o produto e os recursos interagem para alocar serviços e decidir dinamicamente o melhor fluxo de processos a ser seguido, pressupõe máquinas e equipamentos que já possuem seus devidos controladores, recebendo sinais de sensoriamento e atuando sobre o seu processo de manufatura, a partir de ordens de produção.

Desta forma, a metodologia para estruturar um sistema de manufatura para comportar-se como auto-organizável, deve seguir as seguintes fases:

- a) Fase 1 - identificar a forma com que comandos são enviados aos controladores dos recursos;
- b) Fase 2 - implementar os agentes do tipo máquina, transporte e produto;
- c) Fase 3 - implementar a interação entre os agentes e os controladores;
- d) Fase 4 - implementar a comunicação dos agentes entre si, na plataforma JADE;
- e) Fase 5 - implementar a postagem e busca de serviços, na plataforma JADE;
- f) Fase 6 - estruturar o protocolo de contratação de serviços entre os agentes.

Nas fases 1 e 2, cada máquina, transportador ou produto representa um sistema ciberfísico, composto de sua parte física, que realiza a manufatura através de seus atuadores, sensores e controlador, e da parte digital composta pelo agente, que interage com os demais elementos do sistema pela plataforma multiagente. Na fase 3, a forma com que o agente comanda o controlador da parte física do CPS pode ser a utilizada na tese de

Peixoto (2016), onde o agente emite comando e pedido de informação para o controlador, e este responde com sua situação e resposta.

Nas fases 4, 5 e 6, a interação entre os agentes se dá por protocolos para troca de mensagens. Nessas etapas são utilizados o protocolo FIPA *Contract Net* aliado com o protocolo FIPA *Request* (SALAZAR *et al.*, 2019). Isto divide a negociação em duas etapas: uma é a alocação do serviço, outra é a confirmação e execução do serviço. Isto é importante para o agente denominado produto, afinal, ele precisa alocar um serviço com uma máquina, mas para o serviço ocorrer é necessário um serviço de transporte, para que a peça chegue até a máquina.

Na execução da metodologia, este estudo valeu-se de uma planta de manufatura virtual simulada, em que um produto pode ter características diferentes, dependendo do desejo do cliente. Como o objetivo está na relação com que máquinas, transportadores e produtos interagem, as variáveis mais específicas do processo produtivo foram ignoradas, como o caso de: equipamento entrar em manutenção; tempo de ajuste das máquinas; formação de estoque; entre outros. Com isto se espera uma análise mais qualitativa, que diz respeito às funcionalidades que este arranjo pode oferecer.

Nesta planta de manufatura simulada, o produto toma a primeira tarefa a ser executada, em sua lista de processos, e faz uma busca por máquinas que executam sua manufatura. Uma vez encontrada a máquina, se aloca o serviço de manufatura, para manter sua reserva. Na sequência, a peça busca um transportador que possa levá-la da sua posição atual até a máquina que fará o serviço, alocando e requisitando o serviço de transporte. Após o transporte, a peça volta a interagir com a máquina, que lhe estava reservada, para requisitar que o serviço de manufatura ocorra.

Terminada esta manufatura, a peça toma o próximo item de sua lista de processos a serem realizados e executa novamente a sequência. Isto faz com que os recursos sejam chamados à interação apenas quando necessário, a cada etapa do processo de manufatura da peça. Desta forma, um recurso pode entrar, sair ou se deslocar no sistema, que os demais recursos nele contidos entenderão, sem a necessidade de reprogramar fluxo de processo ou reprogramar máquinas.

Para ensaiar o método é proposta e implementada uma planta didática, com objetivo de montar um protótipo de veículo, composto de chassi, rodas, cabine e carroceria. Cada uma destas partes do veículo pode ser de cor azul ou verde, sendo a composição destas partes diferenciadas por cores de escolha do cliente. Os processos para fabricação desse veículo são: dispensar chassi, usinar chassi, montar rodas, montar cabine, montar carroceria e expedir o veículo. Os processos possuem uma precedência entre si, previamente definida, informada ao produto.

Resultados e Discussões

A implementação do método proposto, requer a aplicação dele em um processo de manufatura, em que ocorra variações de fluxo de processo, falta e inserção de recursos. São analisados o comportamento das funcionalidades do processo a cada problema experimentalmente injetado. Com este objetivo, se produziu um simulador na forma de planta didática, para realizar os ensaios de manufatura customizada, comparando com outros trabalhos relacionados ao tema.

Implementação da Planta Didática Simulada

A planta proposta para experimentação consiste em um leiaute fabril, com 6 colunas e 5 linhas, onde cada agente do tipo máquina pode se posicionar nas linhas da extrema-direita, extrema-esquerda, superior ou inferior. Nessa planta é realizada uma simulação de montagem de um veículo, composto de chassi, rodas, cabine e carroceria, além de um processo específico de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado). Cada elemento pode ter cores de tipo verde ou azul, permitindo que os pedidos sejam customizados, com o cliente decidindo a composição de partes, segundo suas cores, para compor o veículo desejado.

A Figura 2 apresenta a imagem da tela deste agente supervisor, constando a codificação de cores das bordas, onde verde representa um recurso disponível, azul um recurso em negociação, vermelho um recurso ocupado e amarelo um recurso reservado. Assim como o diagrama de sequência de mensagens entre agentes.

Quadro I – Comparação dos resultados do sistema produtivo com gestão pelo PCP e gestão auto-organizável.

Métricas	Gestão pelo PCP	Gestão auto-organizável
Inserção de novas estações de manufatura.	O PCP necessita reprogramar as ordens de serviço para cada máquina, considerando a nova estação.	Cada busca de serviços pelo produto considera as estações que estão no sistema, logo, não há necessidade de replanejar.
Retirada de estações de manufatura.	O PCP necessita reprogramar as ordens de serviço para cada máquina, considerando a saída da estação.	Cada busca de serviços pelo produto considera as estações que estão no sistema, logo, não há necessidade de replanejar.
Mudança de posição de uma estação de manufatura.	O novo caminho para os transportadores deverá ser reprogramado pelo PCP.	Quando a peça negocia com a estação, recebe as coordenadas de posição, que será passada para o transportador, de forma automática.
Necessidade de gestão da manufatura.	O PCP deverá estar sempre de prontidão para intervenção a cada evento indesejado que ocorra na manufatura.	A auto-organização dá conta dos eventos indesejados, cabendo a gestão monitorar a operação, sem necessidade de intervenção.
Obtenção de informações sobre o produto em manufatura.	O PCP deve analisar seu planejamento para ter a informação de situação do produto na manufatura.	O produto já traz as informações pertinentes ao seu estado de manufatura, pois é ele que faz sua gestão.
Obtenção de informações sobre o processo de manufatura.	O PCP envia comandos para as estações, na forma de ordem de produção, não obtendo informações da máquina.	Como o produto interage com a máquina, por ser um CPS, pode colher informações sobre tempo de produção, insumos demandados, custo de produção, entre outros.

As duas primeiras métricas destacam-se, onde estações foram retiradas e inseridas no sistema de manufatura piloto, em que não foi necessário consultar o PCP para emitir novas ordens de produção a cada estação. Uma vez que a peça negocia um serviço por vez, na sequência inicialmente determinada em seu fluxo de processos, a inserção da estação a faz candidata a participar da negociação. E o fato da estação ser retirada, a peça não a encontra para negociar serviço, logo, sua ausência é ignorada. Em ambos casos, o fluxo de processo se mantém, sem necessidade de fazer um novo planejamento e controle de produção.

Estes serviços anunciados e negociados, são descobertos através de dois agentes importantes que residem na plataforma JADE: o AMS (*Agent Management System*) e o DF (*Directory Facilitator*). O AMS supervisiona o acesso e uso da plataforma, de forma que cada agente executado será automaticamente registrado pelo AMS, que fornece esta informação aos demais agentes inseridos na plataforma. Já o DF funciona como um painel de postagem de serviços, que permite que cada agente da plataforma anuncie suas habilidades, permitindo que outros agentes realizem busca neste painel por uma funcionalidade desejada, recebendo como resposta o nome (identidade) dos agentes que anunciaram ter capacidade de realizar.

A auto-organização observada nos resultados permite que a planta de manufatura se disponha a serviços, de forma que o produto possa modificar seu fluxo de processo, sem necessidade de mudar ou reprogramar o sistema de manufatura. Este fator dá ao processo uma maior flexibilidade para atender a produção de bens com alto teor de diversidade e aspectos customizados. Isto se percebe nos resultados obtidos na tabela apresentada.

Caso não houvesse a auto-organização, para cada novo requisito de manufatura do produto, implicaria em mudar e reprogramar as máquinas que compõe a planta produtiva, agregando custo e maior tempo para

execução do produto. Fato também observado como resultado é a gestão dos problemas de falta ou inserção de recursos de manufatura, onde no sistema auto-organizado não requer a reprogramação de máquinas e fluxo produtivo, sendo este sistema mais tolerante a um recurso entrar ou sair da manufatura, sem prejuízo à produção.

A planta de manufatura simulada foi testada em uma rede *wireless* de 54 Mbit/s, com máquinas executando o sistema Windows 8.1. O algoritmo utilizado na negociação tem tempo de execução muito curto, sendo o tempo de comunicação através da rede o principal responsável pelo desempenho.

O tempo necessário para a negociação entre os agentes é insignificante frente ao tempo de execução de cada etapa do processo de fabricação, sem adicionar uma sobrecarga significativa ao tempo de produção. O limite superior do tempo de negociação está diretamente relacionado ao tempo de *timeout* configurado para recebimento das propostas de atendimento do serviço solicitado, reduzido se houver pronta resposta dos recursos ao pedido, além de baixo uso da rede. Este tempo pode aumentar com a quantidade de produtos e recursos na mesma rede, devido ao compartilhamento do meio de comunicação.

Comparação com Trabalhos relacionados

Este estudo traz como contribuição uma implementação e análise de uma planta didática simulada, implementada na forma de um CPS, baseado em MAS compatível com o padrão FIPA, visando aumentar a flexibilidade do sistema frente a demandas diversas de produtos, com o constante gerenciamento do escalonamento da produção, através da negociação entre produtos e recursos, reduzindo a carga de trabalho do PCP. O sistema desenvolvido tem também como componente um sistema supervisorio aderente ao MAS, sendo utilizada uma plataforma de código aberto (JADE) e componentes comerciais na sua implementação.

Os trabalhos de Liu e Jiang (2016), Vogel-Heuser *et al.* (2014), Zhang (2017), Qin e Lu (2021), Prenzel e Steinhorst (2021) e Seitz *et al.* (2021) abordam a descentralização e auto-organização de sistemas produtivos, a partir de CPS, mas não abordam toda a preocupação do PCP, que diz respeito aos transportadores que fazem parte do sistema produtivo, interferindo no mesmo. Este estudo almeja uma gestão do PCP de forma auto-organizável, considerando o transportador como parte integrante do processo produtivo.

Considerações Finais

Ao implementar os recursos como CPS, as máquinas, transportadores e produtos deixam de ser elementos passivos no sistema de manufatura e começam a interagir, propondo e requisitando serviços.

Os recursos sendo CPS e seus agentes incorporados, trouxeram a necessidade de utilizar uma plataforma multiagente, para garantir que a forma digital do CPS possa habitar e interagir com outros CPS. Há diversas plataformas de sistemas multiagente no mercado, porém, poucos estudos de sua aplicação em ambientes fabris. Talvez seja aqui um grande nicho para trabalhos futuros, a fim de garantir ambiente para que os agentes habitem e que as informações por eles trocadas sejam seguras e confiáveis.

Esta é uma necessidade que vai ao encontro das premissas de indústria 4.0, pois se há um desejo de que a manufatura atenda a diversidade de produção e lotes pequenos sendo demandado, então há necessidade de interação entre os elementos da manufatura. E um ambiente seguro e íntegro para que estas interações ocorram é aquele que dá o suporte tecnológico para que a indústria 4.0 ocorra.

Ao desonerar o PCP, o sistema de gestão por auto-organização assume as mudanças de fluxo que se fizerem necessárias, caso a sugestão inicial do PCP não possa mais ser seguida. O PCP deixa de ser o elemento central de gestão do fluxo produtivo e passa ser um agente consultor de como deve ser o fluxo, dadas circunstâncias específicas do meio fabril a que se encontra. Fato importante neste estudo, referente aos estudos já realizados, foi a consideração dos transportadores como parte do processo produtivo, com necessidade de atuar com auto-organização, interagindo com o produto e com as máquinas.

Um elemento que surgiu na pesquisa para dar melhor visibilidade no processo ensaiado foi o agente supervisorio, se mostrando muito eficaz e abrindo um novo horizonte para implementação de sistemas supervisorios de processos. O agente supervisorio não necessita acessar as variáveis internas de um programa no controlador da máquina, para apresentar gráfica e numericamente a situação desta. Ele faz isto através da interação com o agente intitulado como máquina, implementado como CPS, onde a máquina é que responde

às informações solicitadas. Não há acesso indevido ao controlador, garantindo segurança e confiabilidade de informações.

Agradecimentos

Agradecemos a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, que propiciou o espaço e incentivo à pesquisa em nível acadêmico, com aplicação no mercado de produção de bens e consumo.

Referências

BEACH, Roger; MÜHLEMANN, Alan Paul; PRICE, David H.R.; PATERSON, Andrew; SHARP, John A. Review of manufacturing flexibility. **European Journal of Operational Research**, v. 122, n. 1, p. 41–57, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00062-4). Acesso em 4 de mar. 2022.

BELLIFEMINE, Fábio Luigi; CAIRE, Giovanni; GREENWOOD, Dominic. **Developing multi-agent systems with JADE**. Chichester: John Wiley & Son, 2007. ISBN: 978-0-470-05747-6.

HERMANN, Mario; PENTEK, Tobias; OTTO, Boris. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review**. 2020. Disponível em: http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf. Acesso em: 3 de mai. 2022.

KOTLER, Philip; KARTAJAYA, Hermawan; SETIAWAN, Iwan. **Marketing 4.0: do tradicional ao digital**. Rio de Janeiro: Sextante, 2017. ISBN: 978-85-431-0533-8.

LEITÃO, Paulo; KARNOUSKOS, Stamatis; RIBEIRO, Luis; LEE, Jay; STRASSER, Thomas; COLOMBO, Armando W. Smart Agents in Industrial Cyber–Physical Systems. 2016. **Proceedings of the IEEE**, v.104, n.5, p.1086-1101. Mar. 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7437398>. Acesso em: 3 de mar. 2022.

LIU, Chao; JIANG, Pingyu. A Cyber-physical System Architecture in Shop Floor for Intelligent Manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 56, p. 372–377, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.059>. Acesso em: 7 de fev. 2022.

MENDES, José Marco; LEITÃO, Paulo; COLOMBO, Armando Walter; RESTIVO, Francisco José. **Service-oriented control architecture for reconfigurable production systems**. 2008. 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Anais...IEEE, 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4618201/>. Acesso em: 18 de abr. 2022.

MERDAN, Munir; HOEBERT, Timon; LIST, Erhard; LEPUSCHITZ, Wilfried. Knowledge-based cyber-physical systems for assembly automation. **Production & Manufacturing Research**, v. 7, n. 1, p. 223–254, 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21693277.2019.1618746>. Acesso em: 23 de fev. 2022.

QIN, Zhaojun; LU, Yuqian. Multi-Agent-Based Self-Organizing Manufacturing Network Towards Mass Personalization. **Asme 2021 16Th International Manufacturing Science And Engineering Conference: Manufacturing Engineering Division**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1-7, 2021. American Society of Mechanical Engineers. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1115/msec2021-63990>. Acesso em: 12 de mar. 2022.

PEIXOTO, João Alvarez. **Sistema minimamente invasivo baseado em agentes aplicado em controladores lógicos programáveis**. 2016. 225f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/156495>. Acesso em 9 de fev. 2022.

PRENZEL, Laurin; STEINHORST, Sebastian. Decentralized Autonomous Architecture for Resilient Cyber-Physical Production Systems. **2021 Design, Automation & Test In Europe Conference & Exhibition (Date)**, [S.L.], p. 1300-1303, 2021. IEEE. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.23919/date51398.2021.9473954>. Acesso em: 1 de mai. 2022.

SALAZAR, Luis Alberto Cruz; RYASHENTSEVA, Daria; LÜDER, Arndt; VOGEL-HEUSER, Birgit. Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern—comparison of selected approaches mapping four agent patterns. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 9, p. 4005–4034, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-03800-4>. Acesso em: 10 de mai. 2022.

SEITZ, Matthias; GEHLHOFF, Felix; SALAZAR, Luis Alberto Cruz; FAY, Alexander; VOGEL-HEUSER, Birgit. Automation platform independent multi-agent system for robust networks of production resources in industry 4.0. **Journal Of Intelligent Manufacturing**, [S.L.], v. 32, n. 7, p. 2023-2041, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-021-01759-2>. Acesso em: 23 de jan. 2022.

VOGEL-HEUSER, Birgit; DIEDRICH, Christian; PANTFÖRDER, Dorothea; GÖHNER, Peter. Coupling heterogeneous production systems by a multi-agent based cyber-physical production system. **Proceedings - 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2014**, p. 713–719, 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6945601>. Acesso em: 13 de fev. 2022.

WOOLDRIDGE, Michael. **An Introduction to MultiAgent Systems**. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. ISBN: 978-0-470-51946-2.

XU, Li. Da; XU, Eric L.; LI, Ling. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>. Acesso em: 27 de fev. 2022.

ZHANG, Jie. **Multi-Agent-Based Production Planning and Control**. Wiley. 2017. ISBN: 978-1-118-89006-6.