

UMA ARQUITETURA PARA OPERAÇÃO INTELIGENTE DE SISTEMAS DE MANUFATURA COM HABILIDADES ADAPTATIVAS

Jhaidan Ribeiro Cruz

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM), Universidade Federal da Bahia (UFBA) – Av. Milton Santos s/n, Ondina, CEP: 40170-110, Salvador, Bahia, Brasil.
jhaidancruz@ufba.br

Herman Augusto Lepikson

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM) / SENAI CIMATEC – Av. Orlando Gomes, nº 1845, Piatã, CEP: 41650-010, Salvador, Bahia, Brasil.
Herman.Lepikson@fieb.org.br

Resumo: A indústria atualmente passa por um amplo processo de transformação, reconhecido pelo nome de Indústria 4.0 (I4.0). Este processo impulsiona as organizações a estabelecerem sistemas de manufatura 4.0 (habilitados por tecnologias e conceitos da I4.0) para atenderem às demandas emergentes de mercado e manterem-se competitivas. Por outro lado, os sistemas tradicionais de manufatura (anteriores à I4.0) são limitados quanto a atenderem essas demandas. Qualquer sistema de manufatura necessita de atividades de gestão e controle (G&C), como acompanhamento do desempenho de processos, tomadas de decisão ou melhoria contínua dos processos, para entregar produtos de maneira eficiente, conforme as expectativas do cliente. Nos sistemas tradicionais, as atividades de G&C despendem elevadas quantidades de recursos, incompatível com o esperado pela I4.0. Os sistemas de manufatura 4.0 devem ser habilitados para formas mais eficientes de G&C, a partir da capacidade de adaptarem previamente seus processos, por exemplo. É necessário então estabelecer G&C que implemente tais habilidades preditivas e adaptativas aos sistemas de manufatura 4.0. O presente trabalho tem como objetivo propor uma arquitetura, viabilizada por tecnologias habilitadoras e conceitos da I4.0, com foco em Análise de Dados, Inteligência Artificial, Integração de Sistemas, Internet das Coisas e Arquitetura Orientada a Serviços (SOA – Service-Oriented Architecture), para proporcionar G&C dotados de capacidades preditivas e adaptativas. Para isso, uma revisão da literatura identifica trabalhos com propostas na mesma direção da objetivada pelo presente trabalho ou que recomendam soluções pertinentes. A partir destes, é proposto então um modelo que: abrange tecnologias da I4.0; se desdobra numa SOA, baseada em Sistemas Multiagentes e sistemas de gestão das operações de manufatura; descreve componentes, interações, conceitos e particularidades de implementação de tal arquitetura. Conclui-se que o modelo proposto possui características que o faz ser distribuído, descentralizado e heterárquico, além de ser capaz de disponibilizar as habilidades propostas por meio da SOA apresentada.

Palavras-chave: Adaptabilidade; Gestão e Controle; Gerenciamento das Operações de Manufatura; Sistemas Multiagentes; Sistemas Inteligentes de Manufatura

1. INTRODUÇÃO

A indústria atualmente passa pelo mais profundo e abrangente processo de transformação da sua história, reconhecido pelo nome de Indústria 4.0 (I4.0). Este processo impulsiona as organizações a estabelecerem novas estratégias de manufatura. Os sistemas de produção atuais ainda despendem elevadas quantidades de recursos em suas operações, principalmente humanos e de tempo. São também centralizados, rígidos e hierárquicos, enquanto a I4.0 objetiva sistemas de produção integrados, inteligentes e distribuídos, isto é, controlados por vários componentes conectados – com determinada harmonia e capacidade cognitiva – e complementares, para destacar novos paradigmas, como a flexibilidade, que permite rápida disponibilidade de produtos e serviços personalizados ao cliente.

As “operações de manufatura”, no escopo do presente artigo, tratam de processos envolvidos na transformação de matéria-prima em produto tangível, baseado nas definições de Stevenson (2021) e Lu *et al.* (2020). Nesses processos estão incluídas as etapas relacionadas ao chão de fábrica, seus métodos de fabricação, transformação físicas ou químicas e procedimentos suplementares. Este artigo é delimitado a processos diretamente relacionados a tal produção, especificamente processos de manufatura discreta e em batelada.

“Manufatura 4.0” é aqui definida como uma manufatura apoiada por tecnologias habilitadoras da I4.0 que possibilitam o alcance de habilidades preditivas e adaptativas, flexibilidade e ágil disponibilidade de produtos personalizados. Tal delimitação se deve ao fato da ausência de uma definição objetiva e genérica, e de termos consolidados na literatura, para tal manufatura (Kusiak, 2018; Lu *et al.*, 2020). Wang *et al.* (2021) elucida as diferenças entre os termos “Smart Manufacturing” e “Intelligent Manufacturing”. Os termos “inteligência” e “inteligente” são aqui utilizados para se referir

ao atributo específico de capacidade cognitiva, baseado na Inteligência Artificial (IA) orientada por dados devidamente historiados e sintetizados.

Denomina-se aqui “sistema de manufatura 4.0” como a conjuntura organizada dos diversos elementos atuantes nas operações da manufatura 4.0, e “sistemas tradicionais de manufatura” como o conjunto dos das operações de manufatura que atuam sob paradigmas anteriores à I4.0. Estas definições são coerentes com os entendimentos de autores que também tratam do tema, como Phuyal *et al.* (2020), Buckhorst *et al.* (2022) ou Morgan *et al.* (2021). Nos paradigmas de primeira e segunda revoluções industriais, as operações de manufatura são baseadas em atividades manuais padronizadas e repetitivas. No caso da terceira revolução industrial, as operações de manufatura são apoiadas pela automação, mas geralmente não favorecem uma integração adequada do sistema. O conceito de “sistema de manufatura inteligente” substitui a lógica dos sistemas de manufatura legados por apresentar maior capacidade de lidar com a flexibilidade para personalização do produto e com as variações repentinas nas operações de manufatura, como hoje é gradualmente demandado.

“Gestão das Operações”, definida como a gestão de processos dos sistemas de manufatura, envolve atividades de melhoria contínua, gerenciamento de tecnologias, tomada de decisão relacionada às operações, gestão da qualidade (produtos e Processos), bem como gestão do fluxo de dados, informações e produtos. (Stevenson, 2021; Rungtusanatham *et al.*, 2003).

O conceito de “controle” é aqui definido em dois níveis, semelhante à abordagem de Arm *et al.* (2021). O primeiro nível, baseado no Planejamento e Controle da Produção (PCP) como abordado por Bonney (2000) e Usuga Cadavid *et al.* (2020), trata do controle da produção, que visa o monitoramento das operações de manufatura, bem como a atuação do sistema conforme o determinado. O segundo nível foca no controle de sistemas distribuídos, descentralizados e heterárquicos de manufatura, como segue (Buckhorst *et al.*, 2022; Morgan *et al.*, 2021):

- a) **sistema distribuído**: controlado e operado por várias unidades individuais, porém complementares, e livres para comunicação entre si. Pode apresentar características de modularidade (unidades autônomas autogerenciáveis) e de escalabilidade (capacidade de evoluir, a partir da adição de componentes, em volume e abrangência);
- b) **sistema descentralizado**: controlado e operado por subsistemas ou unidades sem a necessidade de estarem subordinados a apenas uma unidade, antagonicamente aos sistemas centralizados;
- c) **estrutura heterárquica**: organização dos componentes do sistema na qual estes têm liberdade de controle e de comunicação entre si e não estão sujeitos a componentes subordinantes, antagonicamente a estruturas hierárquicas.

Gestão e Controle (G&C) é o termo utilizado no escopo da presente pesquisa visando unificar os diversos conceitos no que diz respeito ao papel de cada um na manufatura 4.0.

Os sistemas de manufatura 4.0 podem possuir “habilidades adaptativas”, termo aqui definido – baseado nos conceitos de “adaptabilidade” apresentado por Morgan *et al.* (2021), Jaskó *et al.* (2020) e Schuh *et al.* (2017) – como as capacidades do sistema em tomar decisões, com níveis de autonomia, eficiência, velocidade e abrangência determinados pelas operações. Enquanto que a adaptabilidade visa a totalidade do sistema e condições ótimas, as habilidades adaptativas podem ser estabelecidas em menor escopo adequado às operações.

Depreende-se que os sistemas tradicionais de manufatura a G&C seguem padrões incompatíveis com a I4.0 e sua evolução, o que pode ser observado pela diferença temporal entre a disponibilidade de informações, sua interpretação e a consequente tomada de decisão, além de serem processos repetitivos e manuais. Já os sistemas de manufatura 4.0 podem ser habilitados para melhores formas de G&C, como a capacidade do sistema em compreender-se, prever eventos e antecipar ações de melhoria, ou correção, para adaptarem seus processos. Dessa forma, expectativas da I4.0, como sustentabilidade e menores impactos negativos e custos podem ser atendidos.

A partir dessas informações, o problema abordado no artigo é norteado pela questão: como estabelecer um sistema de G&C para manufatura que assegure as habilidades adaptativas requeridas pelos modelos de negócio emergentes?

O artigo investiga a possibilidade de conceitos, oportunidades e tecnologias habilitadoras da I4.0 – como a disponibilidade de dados em grandes volumes (*big data*), a capacidade e a inteligência computacional para extração de conhecimento desses dados (Análise de Dados e IA), com apoio da ampla conectividade e comunicação (Integração de Sistemas e Interoperabilidade) permitidos pela emergência da Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) – viabilizarem uma Arquitetura Orientada a Serviços (SOA – *Service-Oriented Architecture*), para disponibilizar atividades de G&C de processos integrados, distribuídos e adaptáveis para sistemas de manufatura.

O objetivo deste artigo é, então, propor uma arquitetura para G&C integrados de sistemas de manufatura com características distribuídas e com habilidades preditivas e adaptativas. Para isso, pretende-se: (i) apresentar um modelo geral de SOA que permita a disponibilidade das habilidades propostas; (ii) determinar características, padrões e critérios de relacionamento entre componentes e conceitos do modelo; (iii) determinar um conceito para análise inteligente e distribuída pelo sistema, baseada em dados.

O restante do artigo é organizado como a seguir. A seção 2 apresenta trabalhos que propuseram direções ou apresentaram soluções de G&C para manufatura 4.0. A seção 3 apresenta o modelo aqui proposto, além de conceitos e tecnologias que o compõe. A seção 4 conclui o artigo com considerações parciais e perspectivas futuras.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Alguns autores realizaram trabalhos de revisão da literatura que analisam o contexto de tecnologias, conceitos e oportunidades e apontam direções de pesquisa para G&C em sistemas de manufatura 4.0. É o caso de Ding *et al.* (2020) que buscaram identificar o estado atual da IA na manufatura. Para eles, tecnologias de IA, como o Aprendizado de Máquina (ML – *Machine Learning*) e Aprendizado Profundo, tiveram um desenvolvimento considerável nas últimas décadas e são tendências inevitáveis. Estas possibilitam, segundo os autores, novos modos de fabricação que possuem características inteligentes, como autopercepção, autopredição e autoadaptação. Outro caso é o de Bueno *et al.* (2020), que investigaram os recursos que a I4.0 pode oferecer ao PCP, além das implicações de desempenho nos sistemas de manufatura a partir dessa relação. Eles apontam diversas tecnologias – por exemplo Análise de *big data*, IA, IoT, Sistemas Ciberfísicos (CPS – *Cyber Physical Systems*) etc. – como novos recursos oferecidos pela I4.0 para controle da produção.

Usuga Cadavid *et al.* (2020) exploraram a aplicação do ML no PCP na era da I4.0. Os autores concluem que o ML é adequado para geração de conhecimento a partir de dados de PCP e que os modelos de ML para o PCP efetivamente atribuem capacidades adaptativas e preditivas aos sistemas de manufatura, diante de sua natureza estocástica. Morgan *et al.* (2021) investigaram de que forma os sistemas de manufatura devem ser projetados para habilitar recursos e capacidades ágeis, com menor custo e maior rendimento e para ser intuitivamente operável. Como resposta, os autores recomendam a adoção de algoritmos adaptativos e inteligentes de controle em tempo real, além da implementação de arquiteturas que permitam o controle distribuído e descentralizado.

Baseado nas definições de Jaskó *et al.* (2020), Shojaeinasab *et al.* (2022) e Morgan *et al.* (2021), o Sistema de Execução da Manufatura (MES – *Manufacturing Execution System*) é um sistema de gerenciamento da produção que reúne funcionalidades de gestão das operações de manufatura e de controle da produção. Os sistemas de Gerenciamento das Operações de Manufatura (MOM – *Manufacturing Operations Management*) geralmente são mencionados como equivalentes ou iguais ao MES. Entretanto, para o presente trabalho, em concordância com Filipov e Vasilev (2016), o MOM possui maior abrangência que o MES ao contemplar funcionalidades como gestão da manutenção, da qualidade e do sistema logístico, enquanto que o MES se restringe à manufatura em chão de fábrica, priorizando a programação e monitoramento da produção. Jaskó *et al.* (2020) apresentam uma análise dos requisitos da I4.0 para o desenvolvimento de MES enfatizando que, a capacidade preditiva de novas soluções de MES deve contemplar funcionalidades de simulação e otimização aptas a prever eventos, o que indica também a relação dos MES com Gêmeos Digitais (DT – *Digital Twin*). Além disso, a adaptabilidade dos sistemas da próxima geração de MES depende da habilidade de suportar tomada de decisões, direcionadas a vários objetivos, em tempo real. Dentre os papéis do MES no contexto da I4.0, ainda segundo os autores, destacam-se: (i) o monitoramento, coordenação, supervisão e programação da manufatura; (ii) a gestão dos dados relacionados aos processos de manufatura; (iii) a implementação e a oferta de análises estatísticas complexas e algoritmos de otimização e IA. Para tendências futuras de pesquisa, os autores evidenciam o potencial da SOA e dos sistemas baseados em agentes.

Lu *et al.* (2020) apresentam uma revisão crítica de padrões que podem habilitar os processos de produção, bem como a automação nos sistemas de manufatura, ao contexto da I4.0. Os autores abordam um conceito simplificado de disponibilidade de ativos físicos como serviços na manufatura, que são conectados à internet na forma de CPS de produção, por meio de padrões de comunicação como MTConnect ou OPC UA. Para eles, um MES distribuído coordena, monitora e controla a utilização desse ativo em uma interface padronizada, orientada à serviços. O modelo aqui proposto é baseado no uso de tecnologias como ML, CPS, Análise de Dados, IoT, MES, DT, SOA e orientação a agentes. Além disso, o modelo é também construído a partir de propostas semelhantes presentes na literatura.

O trabalho de Kruger *et al.* (2011) foi um dos primeiros a propor uma arquitetura orientada a agentes e um modelo de setorização das atividades de G&C, semelhante às funcionalidades MES. Os autores classificaram seus agentes por níveis departamentais e descrevem sua integração. A arquitetura é modular e visa maximizar a instanciação e integração de vários algoritmos que atuam para estabelecer trocas ideais entre vários objetivos técnicos e econômicos de manufatura. Não foi objetivo dos autores detalhar componentes físicos na arquitetura, como também integrar MES aos agentes e alcançar maiores níveis de descentralização, distribuição e heterarquia. Segundo eles, a proposta ainda pode ser evoluída no que diz respeito à Sistemas Multiagentes (MAS – *Multi-agent Systems*). O modelo proposto neste trabalho pretende contemplar esses fins.

Tang *et al.* (2017) propuseram uma arquitetura distribuída, baseada em agentes e assistida em nuvem. Segundo os autores, a camada inferior da arquitetura, a de recursos, na qual são representados os dispositivos, viabiliza a IoT industrial no sistema de manufatura, além de permitir que objetos inteligentes colaborem uns com os outros para concluir tarefas de produção sem um agendador centralizado. A camada superior, a do assistente de nuvem, coleta dados da camada de recursos e estabelece o plano de agendamento ideal global, evitando ótimos locais possíveis no agendamento distribuído, por meio da Análise de Dados. Nessa camada, os sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*), MES e de Planejamento de Recursos Empresariais cooperam entre si para maiores capacidades de: (i) serviços e gerenciamento de dados, (ii) comunicação com a planta, (ii) funcionalidades de gerenciamento como agendamento de recursos e gerenciamento de tarefas. De acordo com os autores, os recursos da camada inferior competem e cooperam de forma descentralizada com capacidade de auto-organização, além de complementarem-se para obter flexibilidade no processamento de produtos de vários tipos. Para oferecer

interoperabilidade e comunicação em tempo real a arquitetura apresenta dois métodos: OPC UA para comunicação máquina-nuvem e Serviço de Distribuição de Dados para comunicação máquina a máquina (M2M). A arquitetura de Tang *et al.* (2017) apresenta oportunidade de evoluir para maiores níveis de descentralização e heterarquia, de forma a possibilitar sistemas de manufatura a alcançar maiores estágios de maturidade da I4.0. O modelo proposto a seguir pretende atender essa oportunidade com uma arquitetura heterárquica e orientada a serviços, além de utilizar elementos apresentados, como MAS, MES e M2M.

Wan *et al.* (2020) abordam dispositivos, interações e serviços inteligentes para propor uma arquitetura orientada por IA para manufatura personalizada. Dispositivos inteligentes (robôs, transportadores e outras plataformas básicas controladas) compõem a camada física da arquitetura, a qual deve atender a requisitos de tempo real. Para isso os autores indicam a implementação de servidores de computação em borda e algoritmos de ML em dispositivos de baixa potência. De acordo com os autores, a camada de IA contém algoritmos executados em diferentes plataformas, como servidores de borda ou nuvem. O componente da arquitetura denominado Serviços de Manufatura Inteligente inclui visualização de dados, manutenção do sistema, previsões e análise de mercado. Para alcançar controle flexível e rápido sobre dispositivos de manufatura e, conseqüentemente, a rápida reestruturação e reutilização para pequenos lotes de produtos personalizados, os autores também propõem o paradigma MAS. A conexão da camada de dispositivos às camadas de IA e de serviços é papel de uma interação inteligente entre dispositivos, elementos e protocolos de rede e comunicação. Apesar de ser genérica, abrangente e convergente com o que a comunidade científica e industrial tem indicado, esta proposta pode evoluir para um modelo mais focado na aplicação imediata, com maior capacidade de “conecte e produza”, que deve incluir, além de especificações de componentes, um modelo descritivo de implementação. O modelo proposto adiante pretende preencher tal oportunidade.

Buckhorst, *et al.* (2022) propuseram uma arquitetura baseada nas vantagens inerentes do paradigma Montagem Móvel Sem Linha (MMSL), que é um modelo organizacional, para sistemas de montagem, que oferece flexibilidade, reconfigurabilidade e adaptabilidade. A arquitetura proposta visa controle descentralizado e gestão das operações, baseado em Sistemas Holônicos de Manufatura e MAS, específico para MMSL. Os autores afirmam que tal arquitetura permite obter o grau desejado de flexibilidade nas tarefas de MES. Na interface de comunicação da arquitetura proposta, as entidades que fazem parte de uma mesma rede fabril podem trocar mensagens, oferecer ou solicitar serviços por meio de tecnologias de comunicação como OPC UA, MQTT, REST ou outras em SOA. O modelo proposto no presente artigo se apoia em parte desse conceito, incorporando MAS e tecnologias de comunicação em SOA, e a escala para implementação em sistemas de manufatura discreta e em batelada.

Shojaeinasab *et al.* (2022), além de realizarem uma revisão sistemática acerca de MES inteligentes, propõem um modelo conceitual para realização de tarefas de MES com capacidade de previsão e adaptabilidade. Para tomar decisões de controle em tempo real, o MES requer o recebimento de atualizações de estado de todos os dispositivos conectados no chão de fábrica, além de enviar atualizações e instruções a esses dispositivos para o gerenciamento da produção. Para isso enfatizam que a comunicação M2M entre dispositivos, *softwares* e bancos de dados como componente chave. OPC UA é o protocolo de comunicação industrial padronizado mais amplamente adotado atualmente e apresenta rapidez e segurança para exercer esse papel. Eles destacam também a importância de dispositivos de borda e de IoT nos sistemas de manufatura inteligentemente orquestrados por MES, os quais permitem que aplicativos de IA processem dados onde são produzidos. O modelo proposto a seguir é coerente com esta abordagem ao utilizar o conceito de MAS para estabelecer agentes, como partes digitais e inteligentes de dispositivos físicos, para comunicarem e cooperarem com o objetivo de tomar decisões de G&C da manufatura, baseado em dados e informações.

3. MODELO PROPOSTO

O modelo aqui proposto tem como objetivo proporcionar e compatibilizar G&C em sistemas de manufatura 4.0. O foco é em sistemas que operam sob processos de manufatura discretos ou em batelada, que possuem complexidades inerentes à variedade e a personalização de produtos em manufatura distribuída. O escopo do modelo de G&C foca nas operações de produção, contudo, pode ser escalado para manutenção, qualidade, logística, cadeia de suprimentos, entre outros campos relacionados à manufatura.

O modelo define a estrutura e as regras básicas de interação entre dispositivos físicos (DF) utilizados na manufatura, respectivas representações digitais destes dispositivos e atividades de G&C; estas últimas enquanto funcionalidades de sistemas de gerenciamento das operações de manufatura. Tais estrutura e regras visam a atuação dos elementos do sistema de forma descentralizada, distribuída, heterárquica e orientada a serviços. Além disso, o modelo também trata da atribuição de inteligência ao sistema de manufatura, para que este alcance habilidades preditivas e adaptativas, a partir de conhecimento originado em dados históricos.

A Figura 1 apresenta a arquitetura principal, a qual é orientada a serviços (SOA) e proporciona uma visão geral e genérica do modelo. Esta é composta por dois sistemas: o de Dispositivos Inteligentes de Manufatura (DIM) e o MES. O sistema de DIM é composto por entidades que atuam nos processos de manufatura como máquinas, operadores, equipamentos, produtos, robôs etc. Tais dispositivos inteligentes são formados por uma parte física, os DF, e suas respectivas representações digitais, os agentes.

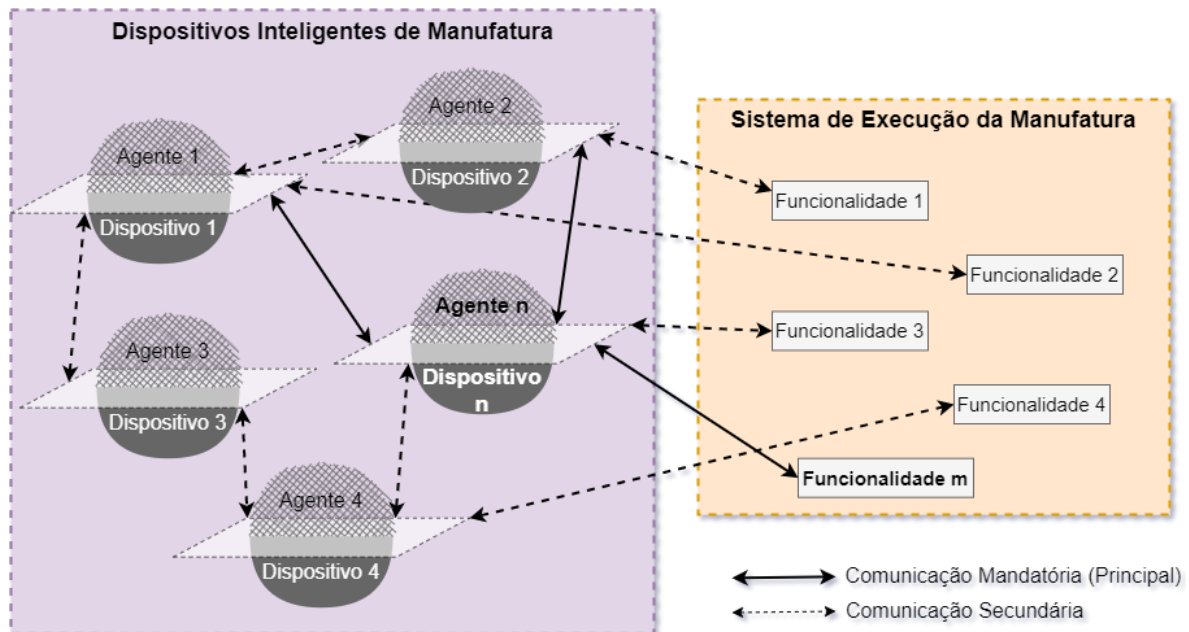


Figura 1. Arquitetura principal do modelo (Próprios autores)

O modelo propõe comunicação entre os DIM e as funcionalidades MES, de forma que os primeiros, que podem ser inteligentes, solicitam serviços além de enviarem e receberem dados e informações ao MES. Há comunicação também entre os próprios DIM, o que possibilita cooperação entre os mesmos em sua operação nos sistemas de manufatura. As setas de comunicação mandatória indicam que é imprescindível que, na operação dos sistemas sob o modelo proposto, haja comunicação de DIM entre si e com funcionalidades MES. Já as setas de comunicação secundárias indicam, em ambos os sentidos – leitura (recebimento) e escrita (envio) de dados –, que os DIM se comunicam entre si ou com as funcionalidades MES, de acordo com a conveniência e a pertinência específicas de cada implementação.

Na arquitetura dos DIM, apresentada na Fig. 2 a) e b), há duas camadas: a do MAS e a de DF. Esta arquitetura demonstra a composição dos DIM em suas partes digital e física, o que inclui a comunicação entre estas partes, entre os componentes na mesma camada e de cada componente com as funcionalidades MES. Tal composição pode também ser considerada como DT quando há interação em tempo real. A representação das comunicações é análoga à descrita anteriormente para a arquitetura principal.

Os DF, na parte inferior da Fig. 2 a) e b), representam componentes que fazem parte fisicamente de processos de manufatura como atuadores, sensores, controladores, equipamentos, ferramentas, robôs, produtos etc. Cada dispositivo físico, ou conjunto destes dispositivos, se comunica com seu respectivo agente, ou conjunto destes agentes. Conforme o padrão de comunicação, mandatória e secundária, deve existir comunicação entre alguns DF. No caso do exemplo genérico na Fig. 2 b), os dispositivos de 1 a n se comunicam e fazem parte de um conjunto (Dispositivo n) que possui seu respectivo agente. Em outros casos, um só dispositivo físico pode ter seu respectivo agente. Um conjunto contendo um sensor, um atuador e um controlador, por exemplo, formam um módulo de manufatura que pode ter um único agente correspondente. De outro modo, um único atuador, de um tipo específico, pode ter seu agente correspondente.

Os componentes da camada MAS se tratam de agentes computacionais dotados de inteligência, por meio de técnicas e algoritmos de ML, estatística e otimização matemática. Baseados em dados e informações estes agentes utilizam seus atributos para realizar inferências, previsões e adaptações em seus respectivos DF de acordo com as necessidades de G&C na dinamicidade dos processos de manufatura. Também conforme o padrão de comunicação mandatória e secundária, deve haver comunicação entre alguns agentes, para que sejam possibilitadas coordenação e cooperação entre estes, a fim de serem tomadas as melhores decisões possíveis de G&C pelos agentes, o que o caracteriza como um MAS. No caso do exemplo genérico da Fig. 2 b), os agentes n.1 a n.m se comunicam e fazem parte de um conjunto de agentes (Agente n), que possui seu respectivo dispositivo físico. Em outras situações, um único agente pode ter seu respectivo dispositivo físico. Dois agentes podem ter diferentes papéis em um conjunto que representa a parte digital de uma máquina, por exemplo. De outra forma, um único agente pode representar a parte digital de uma máquina específica.

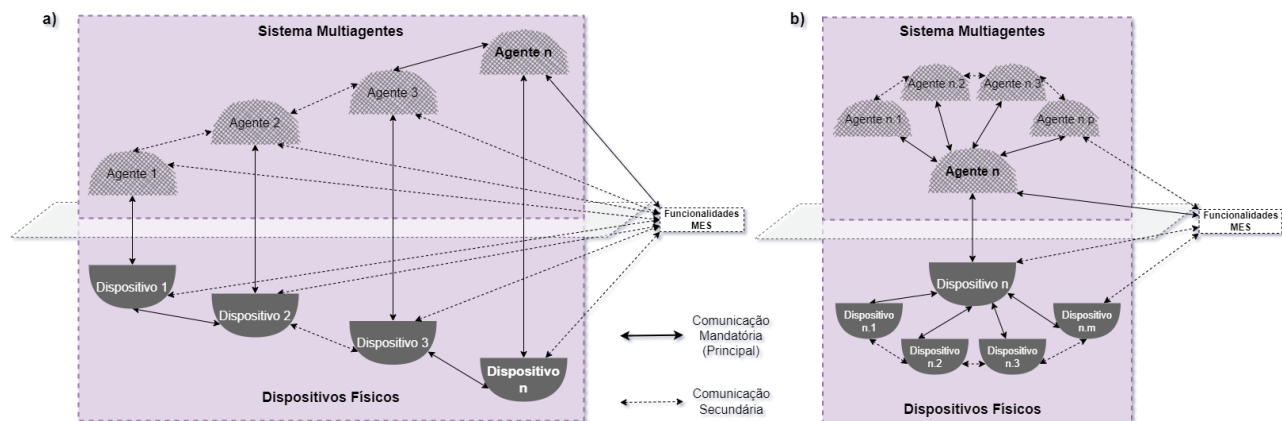


Figura 2. Arquitetura dos dispositivos inteligentes de manufatura (Próprios autores)

Os agentes são modelados, desenvolvidos e operam em um ambiente computacional, por meio de linguagens de programação e *softwares* apropriados como Simulink/Matlab, RapidMiner, Python ou Java. Este ambiente computacional pode ser uma rede local, um único computador, ou uma implementação em nuvem.

Determinados tipos de DF, podem ter naturalmente certa inteligência, de forma que estes já possuem uma parte digital para si. Nestes casos, os agentes complementaríamos as capacidades já existentes como também adequariam os dispositivos aos padrões do modelo proposto. Um exemplo comum são robôs, os quais podem possuir determinada capacidade adaptativa e autonomia. Outro exemplo são os dispositivos de borda, que têm determinadas capacidades preditivas, adaptativas e de processamento em tempo real. São estas habilidades que fazem com que a computação na borda tenha papel essencial como tecnologia habilitadora da I 4.0. Sendo assim, cada vez mais os sistemas de manufatura 4.0 tendem a conter dispositivos de borda e o modelo proposto se adequa a tal fato.

Operadores humanos que atuam nos processos de manufatura são indispensavelmente abrangidos pelo modelo proposto. Eles também devem ser representados digitalmente por seus respectivos agentes.

O MES proposto implementa as seguintes principais funcionalidades, com base no modelo MESA (McClellan e Weaver, 2011; Jaskó *et al.* 2020):

- aquisição e gerenciamento de dados: coleta, armazenamento, consultas, fornecimento e troca de dados da manufatura;
- acompanhamento e rastreamento da produção: localização, identificação de estado atual, histórico e demais informações intrínsecas de produtos e recursos de manufatura;
- alocação e estado de recursos: planejamento ideal da produção a partir da disponibilidade de recursos;
- programação detalhada da produção: reunião das informações necessárias para agendamentos que garantam a usabilidade ideal de recursos e dispositivos;
- gerenciamento de processos: determinação e direcionamento de processos específicos, ou da quantidade ideal de processos, necessários para o produto, de acordo com determinado pedido;
- análise de desempenho: monitoramento do estado atual de produção e avaliação de sua eficiência por meio de interfaces gráficas;
- despacho de unidades de produção: determinação do fluxo ideal de produtos e das velocidades de operação das estações de manufatura para controle de ritmo da produção, de acordo com o ritmo de mercado, e redução de desperdícios;
- historiamento de processos: registro de variáveis de manufatura com seu respectivo instante de coleta (tempo);
- Análise de Dados e IA: aplicação de modelos estatísticos e de ML para previsibilidade de eventos e geração de informações e conhecimento, a partir de dados de manufatura.

Para cada caso de implementação, podem ser necessárias diferentes funcionalidades, inclusive diferentes das indicadas. Para o caso de aplicações com maior abrangência, nos quais o MES se tornaria um sistema MOM, funcionalidades como gestão da qualidade ou gestão da manutenção poderiam fazer parte. Contudo, destacam-se como essenciais as funcionalidades de “Análise de Dados e IA” e “historiamento de processos”. Enquanto a primeira contribui com a atribuição de habilidades preditivas e adaptativas ao sistema de manufatura, a segunda possibilita a existência do tipo de dados (historiados) mais pertinentes para extração de conhecimento que baseia a realização de inferências, previsões e adaptações, no contexto da G&C da manufatura.

Outros sistemas diferentes do tradicional MES podem fazer parte do MES proposto no presente modelo, de acordo com a funcionalidade que possui. Como exemplos, os sistemas SCADA, que tem como um de seus papéis coletar dados, e sistemas de gerenciamento de banco de dados, que armazenam e permitem consulta de dados, comporiam funcionalidades relacionadas a aquisição e gerenciamento de dados.

3.1. Classes de Agentes

Os DIM são divididos em classes por semelhança de características e de papel no sistema de manufatura. As partes físicas, naturalmente, já possuem diversas classificações estabelecidas a partir de suas características e funções, como é o caso de máquinas, por exemplo, que são classificados por sua função de realizar trabalho em processos de manufatura. Estas ainda podem ter outros níveis de classificações, a partir de aspectos como conversão de energia (motores) ou transformação direta de materiais por meio da movimentação de ferramentas (em máquinas ferramenta). Com isso, é necessário então estabelecer também classificações para os agentes, as quais não necessariamente deverão ser as mesmas dos DF, já que são representações digitais. Além disso, a necessidade de classificação se dá também pelo fato de que os agentes serão modelados e, logo, demandam padrões para tal.

O presente modelo propõe a utilização do diagrama de classes em Linguagem de Modelagem Unificada (UML – *Unified Modeling Language*), um método que pode ser usado para estabelecer classes de agentes e modelar um MAS. Na Figura 3 é apresentado um diagrama UML proposto como base para implementar classificações específicas de acordo com cada caso de uso, as quais podem ter mais níveis de classes, como também outras classes diferentes das sugeridas. No diagrama, cada bloco, que corresponde cada classe de agente, comporta o nome (retângulo superior), os atributos (retângulo central) e os métodos (retângulo inferior) de cada classe. Os atributos dizem respeito a propriedades que determinadas classes de agentes possuem intrinsecamente, enquanto que os métodos se tratam de funções e ações.

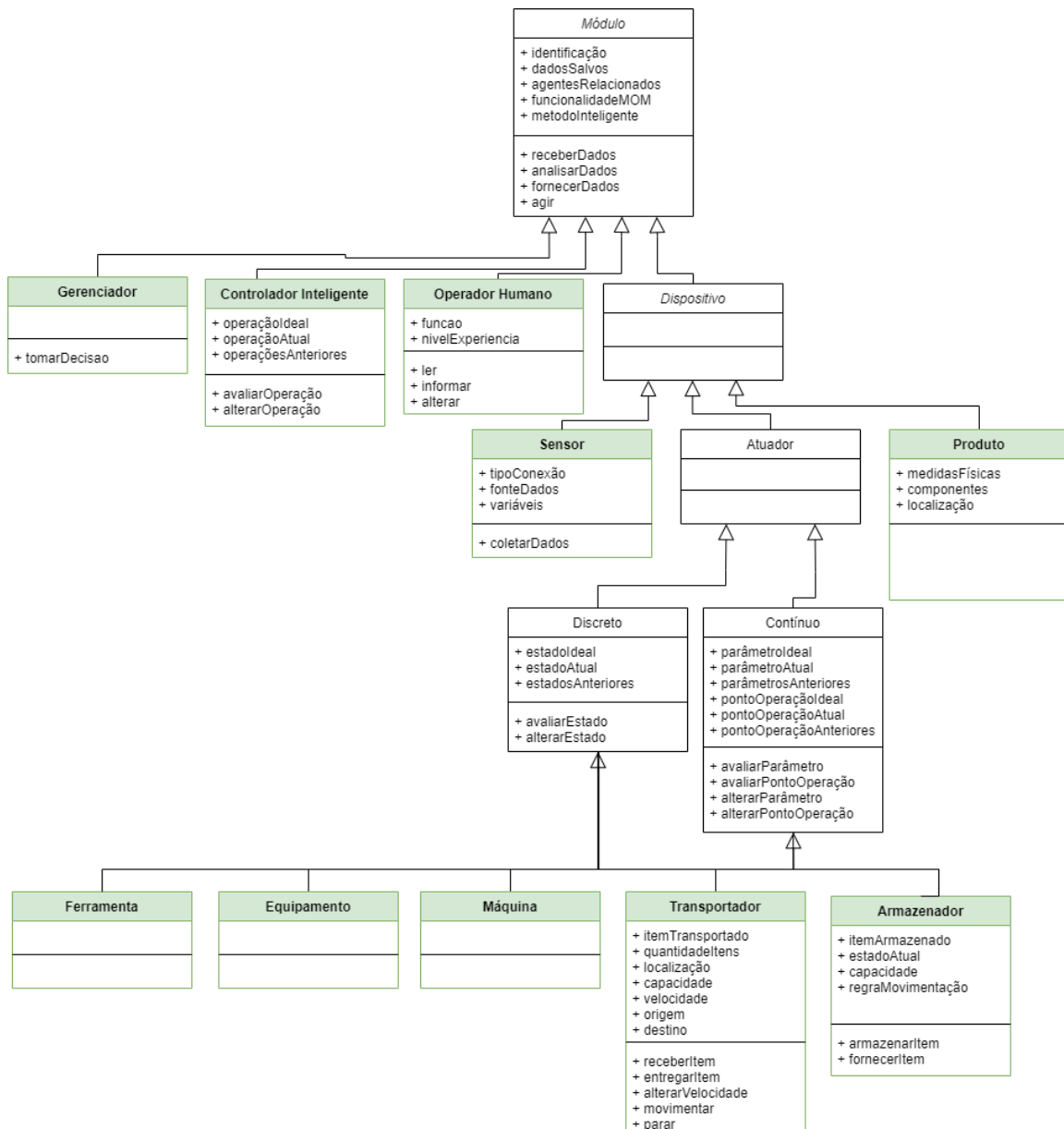


Figura 3. Classes de agentes (Próprios autores)

A principal classe na Fig. 3 é a denominada Módulo. As demais subclasses herdam seus atributos e métodos, isto é, agentes dessas subclasses que venham ser instanciados podem possuí-los. A classe Sensor, que é uma subclasse da Dispositivo, tem o papel de apenas coletar dados e fornecer para outros agentes. A classe Produto, que também é uma subclasse da Dispositivo, tem o papel de processar e fornecer informações relacionadas ao produto físico. A classe Atuador representa dispositivos que atuam na manufatura e podem ser contínuos ou discretos, de acordo com o tipo de variável que lidam (contínuas ou discretas). Tal diferenciação baseia a divisão das classes Contínuo e Discreto, herdeiras da Atuador. Sendo assim as classes Ferramenta, Equipamento, Máquina, Transportador e Armazenador, que representam dispositivos, como esteiras transportadoras, bombas, motores, tornos mecânicos etc., podem ser herdeiras das classes Contínuo ou Discreto. A classe Armazenador tem o papel de representar dispositivos de armazenamento de produtos ou materiais. Semelhantemente, a classe Transportador representa dispositivos de transporte de produtos ou materiais. A classe Operador Humano representa seres humanos que atuam no processo de manufatura. Esta tem o papel de processar informações a partir de Interfaces Homem-Máquina além de informações sobre as atividades destes próprios operadores. A classe Controlador Inteligente representa os dispositivos que já possuem determinada inteligência e tem o papel de adequar tais DF ao MAS. A classe Gerenciador pode fazer parte da representação digital de qualquer tipo de dispositivo físico e tem o papel de tomar decisões a partir de diferentes informações provenientes de diferentes agentes.

3.2. Comunicação

A comunicação M2M é um paradigma essencial ao modelo, a qual torna possível a comunicação direta entre qualquer componente do sistema. Contudo, para cada caso de instanciação, a depender do seu nível de maturidade, é necessário que sejam determinadas regras para estabelecer um funcionamento efetivo do modelo e evitar conflitos na comunicação e integração entre sistemas. Para os casos nos quais o nível de maturidade é mais elevado, com sistemas e componentes originalmente capazes de serem descentralizados, distribuídos e heterárquicos, o MAS é condicionado para ter maiores capacidades de cooperação e coordenação, de forma que os agentes são autônomos o suficiente para evitar multiplicidades de comandos enviados aos DF. Em outras palavras, os agentes são capazes de perceber se os DF devem atuar a partir de suas inferências ou a partir de comandos do MES. Já para casos de aplicação nos quais o nível de maturidade é menos elevado, com componentes e sistemas legados, sob arquiteturas centralizadas e hierarquizadas, o modelo proposto é capaz de atribuir habilidades adaptativas, porém deve existir algum critério na comunicação. O presente modelo sugere que, para estes casos, os DF sejam sujeitos a comando apenas do MAS, enquanto que o MES se comunicaria diretamente com os DF somente para leitura de dados. Como é apresentado na Fig. 2, entre um agente genérico e funcionalidades MES, a comunicação é mandatória tanto para escrita quanto para leitura. Já entre um dispositivo físico genérico e funcionalidades MES, a comunicação é secundária e deve ser implementada apenas se o caso de uso necessitar.

Os protocolos de comunicação a serem aplicados também são fundamentais no modelo proposto, pelo fato de poder influenciar na capacidade do sistema em ser descentralizado, distribuído e heterárquico. É recomendado o padrão OPC UA para todas as comunicações da arquitetura proposta, pois possui maior capacidade de interoperabilidade em relação a demais protocolos. É possível a implementação de outros protocolos, como MTConnect ou MQTT, como também outros mais legados, como Modbus, OPC Classic ou EtherNet/IP. Contudo, estes podem limitar a interoperabilidade entre os dispositivos e, conseqüentemente requerer elementos centralizadores, como *Gateways* ou API. Este fato não necessariamente impede o modelo proposto de operar, mas o limita. Para alguns casos (a depender da natureza do dispositivo ou do MES) são aplicáveis outros protocolos que operam sob a solução *Web Services* (como, por exemplo, REST), sem comprometer os objetivos do modelo proposto, por esta ser orientada a serviços.

4. CONCLUSÃO

Este artigo buscou, de acordo com oportunidades, conceitos, tecnologias e direcionamentos presentes na literatura, propor uma arquitetura de sistemas de manufatura 4.0 que possibilite adequada G&C sobre estes e os atribua habilidades adaptativas, possibilitadas pelas habilidades preditivas com base em dados. O modelo proposto, com suas características que o faz ser distribuído, descentralizado e heterárquico, permite a disponibilidade das habilidades propostas por meio da SOA apresentada, como também descreve as relações e escopos de suas tecnologias, conceitos e componentes, além de apresentar um conceito para ações preditivas e adaptativas pelo sistema, baseado em conhecimento obtido em dados. Sendo assim, o trabalho alcança seu objetivo e o modelo proposto corresponde aos interesses da literatura, bem como está contribuindo para evolução do estado da arte.

Este modelo proposto está sendo implementado em uma planta piloto opera um processo de fabricação e tratamento pós-fabricação de tampas e bases de cilindros pneumáticos. As etapas do processo envolvidas são transporte (representada por esteira transportadora), manipulação e posicionamento por meio de braços robóticos, armazenamento em pulmão de processo (*buffer*), inspeção por meio de câmera, furação, limpeza com jato de ar comprimido, e montagem por meio de prensa. A comunicação dos sistemas da planta é via OPC UA, sensores de Identificação por Radiofrequência, Controladores Lógicos Programáveis e sistema SCADA integrado ao MES – de diferentes fabricantes para demonstração das capacidades de interoperabilidade e integração de sistemas do modelo proposto. A modelagem do MAS e atributos

dos respectivos agentes é em linguagem Python visando a que o sistema da planta piloto manufatura seja capaz de realizar inferências, previsões e adaptações, relacionadas às atividades de G&C, baseadas em dados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao SENAI CIMATEC.

6. REFERÊNCIAS

- Arm, J., Benesl, T., Marcon, P., Bradac, Z., Schröder, T., Belyaev, A., Werner, T., Braun, V., Kamensky, P., Zezulka, F., Diedrich, C. e Dohnal, P., 2021. Automated design and integration of asset administration shells in components of industry 4.0. *Sensors*, Vol. 21, n. 6, p. 2004.
- Bonney, M., 2000. Reflections on production planning and control (PPC). *Gestão & produção*, Vol. 7, p. 181-207.
- Buckhorst, A. F., Grahn, L., e Schmitt, R. H., 2022. Decentralized Holonic Control System Model for Line-less Mobile Assembly Systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 75, p. 102301.
- Bueno, A., Godinho Filho, M., Frank, A. G., 2020. Smart production planning and control in the Industry 4.0 context: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 149, p. 106774.
- Ding, H., Gao, R. X., Isaksson, A. J., Landers, R. G., Parisini, T. e Yuan, Y., 2020. State of AI-based monitoring in smart manufacturing and introduction to focused section. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 25, n. 5, p. 2143-2154.
- Filipov, V. e Vasilev, P., 2016. Manufacturing operations management—the smart backbone of Industry 4.0. *Industry 4.0*, Vol. 1, n. 1, p. 19-24.
- Jaskó, S., Skrop, A., Holczinger, T., Chován, T. e Abonyi, J., 2020. Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard-and ontology-based methodologies and tools. *Computers in industry*, Vol. 123, p. 103300.
- Kruger, G. H., Shih, A. J., Hattingh, D. G., van Niekerk, T. I., 2011. Intelligent machine agent architecture for adaptive control optimization of manufacturing processes. *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 25, n. 4, p. 783-796.
- Kusiak, A., 2018. Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, Vol. 56, n. 1-2, p. 508-517.
- Lu, Y., Xu, X. e Wang, L., 2020. Smart manufacturing process and system automation—a critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 56, p. 312-325.
- McClellan, M., Weaver, D., 2011. *MESA Model Evolution: white paper #39*. Manufacturing Enterprise Solutions Association. Chandler: MESA.
- Morgan, J., Halton, M., Qiao, Y. e Breslin, J. G., 2021. Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 59, p. 481-506.
- Phuyal, S., Bista, D. e Bista, R., 2020. Challenges, opportunities and future directions of smart manufacturing: a state of art review. *Sustainable Futures*, Vol. 2, p. 100023.
- Rungtusanatham, M. J., Choi, T. Y., Hollingworth, D. G. e Wu, Z., Forza, C., 2003. Survey research in operations management: historical analyses. *Journal of Operations management*, Vol. 21, n. 4, p. 475-488.
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M. e Wahlster, W. (Eds.), 2017. *Industrie 4.0 maturity index: managing the digital transformation of companies*. Herbert Utz Verlag GmbH.
- Shojaeinasab, A., Charter, T., Jalayer, M., Khadivi, M., Ogunfowora, O., Raiyani, N. e Najjaran, H., 2022. Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 62, p. 503-522.
- Stevenson, W. J., 2021. *Operations management*. McGraw-Hill/Irwin, New York, 14ª edição.
- Tang, H., Li, D., Wang, S. e Dong, Z., 2017. CASOA: an architecture for agent-based manufacturing system in the context of industry 4.0. *IEEE Access*, Vol. v. 6, p. 12746-12754.
- Usuga Cadavid, J. P., Lamouri, S., Grabot, B., Pellerin, R. e Fortin, A., 2020. Machine learning applied in production planning and control: a state-of-the-art in the era of industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 31, n. 6, p. 1531-1558.
- Wang, B., Tao, F., Fang, X., Liu, C., Liu, Y. e Freiheit, T., 2021. Smart manufacturing and intelligent manufacturing: A comparative review. *Engineering*, Vol. 7, n. 6, p. 738-757.
- Wan, J., Li, X., Dai, H. N., Kusiak, A., Martínez-García, M. e Li, D., 2020. Artificial-intelligence-driven customized manufacturing factory: key technologies, applications, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 109, n. 4, p. 377-398.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

AN ARCHITECTURE FOR INTELLIGENT OPERATION OF MANUFACTURING SYSTEMS WITH ADAPTIVE SKILLS

Jhaidan Ribeiro Cruz

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM), Universidade Federal da Bahia (UFBA) – Av. Milton Santos s/n, Ondina, CEP: 40170-110, Salvador, Bahia, Brazil.
jhaidancruz@ufba.br

Herman Augusto Lepikson

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM) / SENAI CIMATEC – Av. Orlando Gomes, nº 1845, Piatã, CEP: 41650-010, Salvador, Bahia, Brazil.
Herman.Lepikson@fieb.org.br

Abstract. *The industry is currently undergoing a broad transformation process, recognized by the name of Industry 4.0 (I4.0). This process drives organizations to establish manufacturing 4.0 systems (enabled by I4.0 technologies and concepts) to meet emerging market demands and remain competitive. On the other hand, traditional manufacturing systems (prior to I4.0) are limited in meeting these demands. Any manufacturing system needs management and control (G&C) activities, such as monitoring process performance, decision making or continuous process improvement, to deliver products efficiently, according to customer expectations. In traditional systems, G&C activities spend high amounts of resources, incompatible with what is expected by I4.0. Manufacturing 4.0 systems must be enabled for more efficient forms of G&C, from the ability to pre-adapt their processes, for example. It is then necessary to establish G&C that implements such predictive and adaptive abilities to manufacturing 4.0 systems. The present work aims to propose an architecture, made possible by enabling technologies and concepts of I4.0, focusing on Data Analysis, Artificial Intelligence, Systems Integration, Internet of Things and Service-Oriented Architecture (SOA), to provide G&C with predictive and adaptive capabilities. For this, a literature review identifies works with proposals in the same direction as the one objectified by the present work or that recommend relevant solutions. Based on these, a model is proposed that: covers I4.0 technologies; unfolds into an SOA, based on Multi-Agent Systems and manufacturing operations management systems; describes components, interactions, concepts and implementation particularities of such architecture. It is concluded that the proposed model has characteristics that make it distributed, decentralized and heterarchical, in addition to being able to provide the proposed skills through the SOA presented.*

Keywords: Adaptability; Management and Control; Manufacturing Operations Management; Multi-agent Systems; Intelligent Manufacturing Systems

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.