

Controle de Sistemas de Manufatura Distribuídos no contexto da Indústria 4.0.

Jackson T. Veiga. Marcosiris A. O. Pessoa.
Fabrício Junqueira. Paulo E. Miyagi. Diolino J. dos Santos Filho.

*Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos,
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP
Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508-530, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil*

Abstract: The constant changes and market uncertainties discussed in the context of Industry 4.0 require more flexible and modular production control systems allowing rapid change in the decentralized production chain. However, traditional control systems (legacies) become rigid, conceived through specific hierarchical architectures, which no longer respond efficiently when compared to what can be accomplished in the face of the I4.0-based paradigm. In addition, for companies to be able to respond promptly to these changes, distributed production systems must be integrated using different technologies. To integrate these heterogeneous environments, bringing real manufacturing systems closer to the product manufacturing plan, new architectural models are introduced in the industry enabled by the growing technological advances in Information and Communication Technology (ICT), Internet of Things (IoT) and architectures service oriented (SOA), which through intelligent Control methodologies such as Multi-Agent Systems (MAS) enable the physical cyber production Systems (CPPS). This interoperability approach has been discussed in Industry 4.0 through the representation of its assets (AAS) that describes a new standardization capable of contributing to the global migration of different industrial systems. In this context, this work presents a proposal for the development of new control solutions based on I4.0 for legacy manufacturing systems. To this end, this work proposes the communication and integration of legacy manufacturing systems using these new concepts, the proposal being applied in a real case study.

Resumo: As mudanças constantes e as incertezas do mercado discutidas no contexto da Indústria 4.0 exigem sistemas de controle produtivos mais flexíveis e modulares permitindo mudança rápida na cadeia produtiva descentralizada. Entretanto, os sistemas de controle tradicionais (legados) tornam-se rígidos, concebidos por meio de arquiteturas hierárquicas específicas, que não respondem mais de forma eficiente quando comparado ao que pode ser realizado diante do paradigma baseado em I4.0. Além disso, para que empresas possam responder prontamente a essas mudanças, os sistemas produtivos distribuídos devem estar integrados utilizando diferentes tecnologias. Para integrar esses ambientes heterogêneos, aproximando os sistemas de fabricação real ao plano de fabricação de produtos, novos modelos de arquiteturas são introduzidos na indústria habilitados pelo crescente avanço tecnológico de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), Internet das Coisas (IoT) e arquiteturas orientada a serviços (SOA), as quais através de metodologias de Controle inteligente como Sistemas Multi-Agentes (MAS) habilitam os Sistemas de produção cyber físicos (CPPS). Essa abordagem de interoperabilidade vêm sendo discutida na Indústria 4.0 através da representação de seus ativos (AAS) que descreve uma nova padronização capaz de contribuir para a migração global de diferentes sistemas industriais. Neste contexto, este trabalho apresenta uma proposta para o desenvolvimento de novas soluções de controle baseadas em I4.0 para sistemas legados de manufatura. Para tal, este trabalho propõe a comunicação e integração de sistemas legados de manufatura com o uso destes novos conceitos, sendo a proposta aplicada em um estudo de caso real.

Keywords: Industry 4.0; Internet of Things (IoT); Service Oriented Architecture (SOA); Multi-Agent Systems (MAS); Cyber Physical Production Systems (CPPS); Asset Administration Shell (AAS); Intelligent Control Systems.

Palavras-chaves: Indústria 4.0; Internet das Coisas (IoT); Arquitetura orientada a Serviços (SOA); Sistemas Multi-Agentes (MAS); Sistemas de Produção Cyber Físicos (CPPS); shell de administração dos ativos (AAS) ; Sistemas de Controle Inteligente.

1. INTRODUÇÃO

Uma das características presentes na quarta revolução industrial refere-se às rápidas mudanças nas operações de produção, as quais ocorrem de maneira descentralizada e resultam em sistemas de produção autônomos, flexíveis e adaptáveis (denominados aqui de sistemas inteligentes de manufatura).

Por sua vez, existem os sistemas de controle de manufatura tradicionais (denominados aqui de sistemas legados) concebidos de forma específica para atender uma determinada demanda, resultando em arquiteturas de sistemas de produção dedicados, ou seja, atendendo a realização de determinados processos produtivos específicos e podendo ser considerados atualmente como casos de uso específicos (Mindas et al. 2016).

Ratificando essa hipótese, ainda existe uma grande resistência por parte de profissionais e organizações envolvidas no projeto de sistemas de controle desses sistemas de manufatura em adotar novos paradigmas e, por este motivo, são predominantes arquiteturas de controle distribuídas e hierárquicas (denominadas aqui de arquiteturas clássicas), em que os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e as linguagens de programação baseadas na norma IEC-61131-3 ainda são predominantes nesta área (Foehr et al. 2017).

Com o objetivo de migrar os sistemas de manufatura legados para sistemas inteligentes, a literatura apresenta abordagens amparadas pela Quarta Revolução Industrial (I4.0) que faz uso de tecnologias habilitadoras como: robôs autônomos, integração dos sistemas envolvendo colaboração e hierarquia, recursos de simulação considerando também Realidade Aumentada e Big Data, além de ferramentas analíticas, manufatura aditiva, a nuvem, novos modelos de arquiteturas de referência para Sistemas Cyber-Físicos (CPS – *Cyber Physical Systems*), Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*), nas quais arquiteturas orientada a serviços (SOA – *Service oriented Architecture*) são discutidas com o intuito de fornecer soluções de digitalização e integração de forma a aprimorar os sistemas legados (Trunzer et al. 2018).

Em Ye et al. (2019) e Bader et al. (2020) é apresentada a arquitetura de referência para indústria RAMI 4.0 (*Reference Architecture Manufacturing Industry 4.0*) como uma descrição estruturada de requisitos fundamentais para sistemas inteligentes. Neste contexto, para implementar a interoperabilidade entre os elementos e que é inerente a esta plataforma é proposto o componente I4.0 denominada AAS (*Asset Administration Shell*), conforme Fig. 1.

A combinação de ativos e “shell” de administração forma o componente I4.0 (I4.0C). Atualmente, a indústria possui uma grande variedade de ativos e o “shell” de administração permitirá o manuseio destes ativos no contexto de sistemas cyber-físicos. O I4.0C é a combinação de objetos do mundo físico e sua representação virtual, para permitir a interação entre funcionalidades dedicadas e serviços flexíveis (Bader et al. 2020).

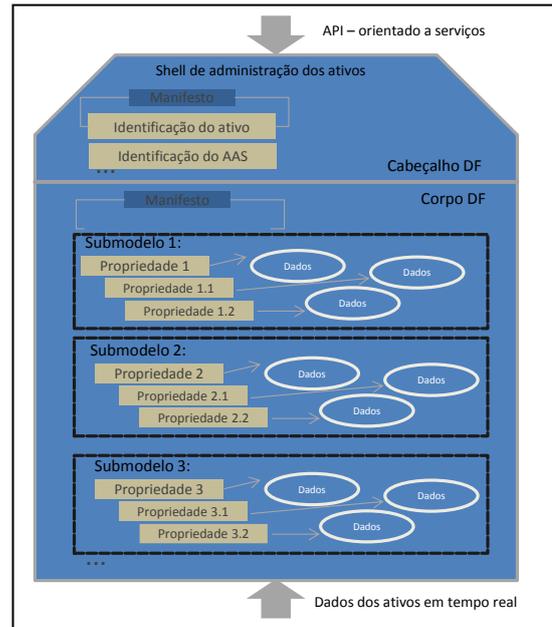


Fig. 1: AAS – Asset Administration Shell (Ye et al. 2018).

O RAMI 4.0 tem como objetivo apresentar as diretrizes para o desenvolvimento de novas aplicações industriais baseadas no conceito de I4.0. Neste contexto, propostas para padronização de informações e relacionamento entre AASs de forma metódica precisam ser contempladas, principalmente quando se trata de sistemas legados que se utilizam de arquiteturas clássicas de controle, conforme mencionado anteriormente, em que alterações disruptivas não são viáveis, sendo mais convenientes abordagens que apresentem propostas de procedimentos que permitem mudança gradual (Bader et al. 2020 e Trunzer et al. 2019).

Trunzer et al. (2019) destaca em seu trabalho uma abordagem para migração gradual de sistemas legados, comparando três projetos em andamento: PERFoRM, IMPROVE e Basys4.0. A partir destes é introduzida uma arquitetura de referência com o objetivo de amparar as arquiteturas de controle clássicas.

Cruz Salazar et al. (2019) e Foehr et al. (2017) propõem discussões que melhorem o entendimento dos engenheiros a cerca de sistemas de controle inteligentes, encontrando os critérios necessários para criação de padrões, permitindo a migração para sistemas de produção do tipo CPPS (*Cyber Physical Production Systems*). Estes são modelados com base em sistemas multi-agentes (MAS – *Multi-agent Systems*). Essa abordagem geralmente possui características “*plug and produce*”, ou seja, pode ser utilizada para melhorar a aplicação e orquestração dos sistemas legados atuais buscando contemplar aspectos do conceito I4.0C.

Por sua vez, este artigo tem como objetivo propor a integração de sistemas legados de manufatura, com suas interfaces e protocolos heterogêneos, baseado no conceito de I4.0, I4.0C e RAMI 4.0. Para isto será proposta uma arquitetura AAS capaz de suportar novos protocolos e interfaces para padronização de comunicação como, por exemplo, UML e OPC-UA, que habilitarão a aplicação de

serviços de controle inteligente através de arquiteturas MAS. De forma específica este trabalho foca a padronização de sistemas legados e, como estudo de caso, apresenta-se um sistema produtivo constituído por estações MPS (Modular Production System) que equipam o Laboratório de Sistemas de Automação (LSA - Mecatrônica) da EPUSP, além de estações Virtuais, em que estas podem simular processos produtivos descentralizados. O objetivo será aplicar os conceitos e arquiteturas estudadas para padronização e interoperabilidade destes sistemas.

Este artigo está organizado em cinco seções. A primeira seção apresenta a contextualização, principais conceitos, a motivação e o objetivo do trabalho. A seção dois apresenta a revisão de arquiteturas para sistemas inteligentes de manufatura, incluindo arquiteturas SOA, I4.0C e aplicações de Sistemas de Controle. Na seção três a arquitetura de implementação é proposta, sendo uma representação aderente ao RAMI 4.0, levando em consideração a estrutura básica de um AAS. Na seção quatro é apresentado um estudo de caso inserindo os conceitos abordados para aplicação da arquitetura proposta e fluxo de comunicação dos ativos. Por fim, na seção cinco são feitas as considerações e conclusões deste trabalho e discussões sobre trabalhos futuros a cerca de implementação de sistemas inteligentes de manufatura.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Essa seção apresenta uma comparação das principais arquiteturas discutidas, que são voltadas para automação, uma visão ampla das arquiteturas que ditam as diretrizes para I4.0. Também são relatados trabalhos que aproximam estes sistemas com intuito de propor novos controles de sistemas inteligentes da manufatura.

2.1 Arquiteturas e tecnologias emergentes para sistemas de automação:

Em Foehr et al. (2017), são apresentadas comparações entre diferentes arquiteturas de sistemas de automação e seus principais requisitos para desenvolvimento de sistemas de controle distribuídos. Neste contexto, estas arquiteturas são avaliadas quanto à inserção de conceitos como Sistemas Multi-Agentes (MAS), arquitetura orientada a serviços (SOA), entre outras, conforme disposto na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação de arquiteturas e tecnologias para sistemas de automação.

Projetos de Pesquisa \ Tecnologias	GRACE	IDEAS	PRIME	I-RAMP3	SOCRADES	IMC-AESOP	Self-Learning	FLEXA	Selsus	CassaMobile	ARUM
Sistemas Multi-Agente	●	●	●		○	○					●
SOA/ Serviços Webc					●	●	●	●	○	●	●
Nuvem					○	●					
Plug-and-Play		●	●	●	●	●				●	
Auto-Capacidades*	●	●	●	○	○	○	●		●	●	

Legenda: ● Atendido ○ Parcialmente atendido

Observou-se na Tabela 1 que as arquiteturas SOCRADES e IMC-AESOP apresentam melhor desempenho com relação às tecnologias discutidas, sendo estas arquiteturas modeladas em camadas orientadas a serviços SOA. Desta forma, torna-se possível utilizar gateways e mediadores para integração de dispositivos legados.

Esses projetos mostram uma transformação da arquitetura centralizada em um sistema de controle distribuído por meio de diferentes tecnologias. Foehr et al. (2017), apresenta caminhos para uma futura arquitetura de referência que faça a integração e garanta uma transição suave de diferentes tecnologias. Para isso são demonstrados possíveis métodos para integração dos sistemas de automação atual em uma proposta baseada em serviços. Entretanto, estudos que apresentem detalhamento de como deve ser sistematizada essa migração precisam ser explorados, principalmente no que diz respeito à modelagem da comunicação e integração destes sistemas.

Arquiteturas que consideram sistemas multi-agentes são ideais para o desenvolvimento de soluções em que é exigida maior autonomia e cooperação dos componentes, nesse sentido, Da Silva et al. (2014) apresenta um método para modelagem de sistemas flexíveis reconfiguráveis de manufatura com base nos conceitos de sistemas de controle holônicos (HCS – Holonic Manufacturing Systems) para integração de modelos heterogêneos. Os HCS se unem a uma rede inteligente distribuída de componentes (MAS) para reconfiguração automática de seus elementos. Observa-se, portanto, que Sistemas holônicos podem ser utilizados como fundamentação teórica para implementação de MAS, uma vez que o trabalho de Da Silva et al. (2014) estabelece uma ontologia para tomada de decisão e orquestração de sistemas existentes de manufatura. Arquiteturas como PROSA e ADACOR consideradas de domínio específico serviram como base para descrição de um sistema de reconfiguração tolerante a falhas e foi aplicada rede de petri (PN) para modelagem e simulação do sistema.

Entretanto, uma vez que o foco deste trabalho é I4.0, os trabalhos citados nessa subseção, não contemplam uma metodologia padrão para aplicações de sistemas legados baseados nesta abordagem de uma forma explícita em que seja possível observar a aderência ao RAMI 4.0 como diretriz para o desenvolvimento das soluções que foram estudadas.

2.2. Arquiteturas para aplicação no contexto I4.0:

Ye et al. (2019) apresenta o modelo de arquitetura RAMI 4.0 como uma descrição de referência dos requisitos fundamentais que podem estar presentes em sistemas industriais, e para que a consolidação deste modelo referencial de arquitetura possa ser aplicado por meio do uso de I4.0C. Portanto, um conjunto de componentes I4.0 podem determinar casos específicos de aplicação de novos CPPS no contexto I4.0.

O I4.0C deve ser único, identificável e apropriado, capaz de contemplar requisitos de comunicação. Geralmente um I4.0C pode ser um módulo, um dispositivo ou mesmo um sistema inteiro (Bader et al. 2020).

A Fig. 2 mostra a estrutura básica de um I4.0C com seu respectivo AAS que é composto pelo ativo físico e “Shell” de administração do ativo, que representa as funcionalidades associadas a este ativo, sejam elas físicas ou virtuais.

Um AAS representa exatamente o Ativo físico, possuindo um ID único e propriedades que descrevem seu comportamento, relacionamento e funcionalidades. As abordagens baseadas neste conceito podem constituir novas propostas para obtenção de modelos e arquiteturas diferentes capazes de introduzirem novos paradigmas no ambiente industrial. É neste contexto que torna-se mais evidente a necessidade de soluções baseadas em uma abordagem gradual para adequação dos sistemas de manufatura legados (Bader et al. 2020).



Fig. 2: Componente I4.0C – Shell de Administração do Ativo (Bader et al. 2020).

Na proposta de Ya et al. (2019), foca-se na modelagem de exemplos de AAS em um caso de uso específico da indústria. Essa abordagem leva em consideração a relação de componentes I4.0C, com uso de um modelo de informação específico como, por exemplo, a linguagem de modelagem unificada (UML). Essa estrutura descreve um sistema de acordo com classes, atributos e operações, bem como o relacionamento entre objetos. A proposta menciona brevemente sobre como comunicar e trocar dados entre I4.0C e ativos reais, utilizando OPC-UA. Um diagrama de sequência entre ativos é proposto e três classes de AAS são modeladas, porém não são mencionados detalhes de como foi feita a padronização e integração com os sistemas herdados.

Trunzer et al. (2018) trata o desafio para integração destes subsistemas heterogêneos e reforça a necessidade de existência de metodologias que possam considerar o compartilhamento de serviços de arquiteturas atuais de automação. Para isso o artigo concentra-se em apresentar

uma arquitetura genérica que cubra a lacuna entre arquitetura de referência - por exemplo, o RAMI 4.0 - e arquiteturas específicas como o PERFoRM que aborda sistemas reconfiguráveis. No trabalho são comparados os requisitos de três projetos para I4.0, e elaborada uma arquitetura genérica a partir destes. A comunicação de sistemas tem um característica importante para transferência de dados em diferentes camadas, em que *gateways* são utilizados para integração de dispositivos legados, entretanto para isso, são necessários a criação de modelos semânticos específicos que comportem a transição destas arquiteturas. Abaixo um resumo da comparação entre arquiteturas emergentes para sistemas de manufatura unindo os requisitos de três projetos:

- PERFoRM: visa aumentar a flexibilidade e reconfigurabilidade de sistemas de fabricação. Seu principal objetivo é transformar os sistemas de automação existentes, em que seus elementos ativos são dispostos hierarquicamente, para os diferentes níveis na cadeia produtiva.

- IMPROVE: tem por finalidade desenvolver um sistema de apoio a decisão para tarefas como detecção de anomalia, diagnóstico e otimização em sistemas de produção inteligentes. Isto é realizado através da concepção de uma fábrica virtual que serve como base para o desenvolvimento e validação do modelo.

- BaSys4.0: este projeto desenvolve uma plataforma (middleware) virtual e gêmeos digitais modularizados usados para abstração dos processos para otimização e tomada de decisão.

2.3. Controle de sistemas de manufatura:

Dias et al. (2017), apresenta em seu trabalho um protótipo industrial baseado na arquitetura PERFoRM para tratar reconfiguração em um sistema de produção de motores. Essa proposta respeita os requisitos de reconfiguração, e tem flexibilidade suficiente para interagir com as arquiteturas específicas da indústria. O artigo aplica (MAS) como habilitador para configuração e reconfiguração, além de modularidade. A reconfiguração baseada em agentes é encapsulada na arquitetura PERFoRM, focando na reorganização lógica das células de produção. Essa abordagem fornece os recursos adequados para o desenvolvimento de soluções baseadas em sistemas de controle reconfiguráveis para sistemas dinâmicos que permitem reconfiguração “*on-the-fly*” em um MPS com vários processos modulares diferentes. Nesse trabalho cada agente é responsável por negociar a reorganização de seu dispositivo físico real e para integração dos agentes às partes físicas, usam-se adaptadores de comunicação unificada como, por exemplo OPC-UA. Os agentes utilizam dados históricos para realizar a reconfiguração e compartilhamento de informações por meio de mensagens entre si seguindo FIPA-ACL (Foundation for Intelligent Physical Agents). Os dados manipulados para reconfiguração foram parametrizados com

AML, usando PERFoRMML (Foundation for Intelligent Physical Agents).

Ye et al. (2018a), leva em consideração a arquitetura de referência RAMI 4.0 condensada em quatro camadas: Real (equipamentos de campo) e Digital contendo Comunicação, Informação e Empresa para aplicação experimental de um sistema de manufatura. O trabalho detalha os componentes de softwares e protocolos utilizados e foca a camada de comunicação para integração de sistemas por meio de AutomationML (AML) e OPC-UA.

Ye et al. (2018b), implementa um sistema de controle da produção integrando AML e OPC-UA. Neste trabalho sintetiza-se a arquitetura RAMI 4.0 em três camadas: camada de campo, camada de comunicação e camada empresa. O foco está na demonstração de desempenho do sistema experimental, mas não demonstra detalhes de aplicação do AAS.

A Fig. 3 apresenta uma instanciação do RAMI 4.0 com aplicação de ferramentas para integração e troca de dados entre AAS. Neste modelo o protocolo OPC-UA é proposto para padronização dos diferentes protocolos industriais, em que o acesso a sistemas de fabricação em um nível superior e acesso às informações dos dados de administração da produção em tempo real é possível através de AAS (Bader, et al.2020).

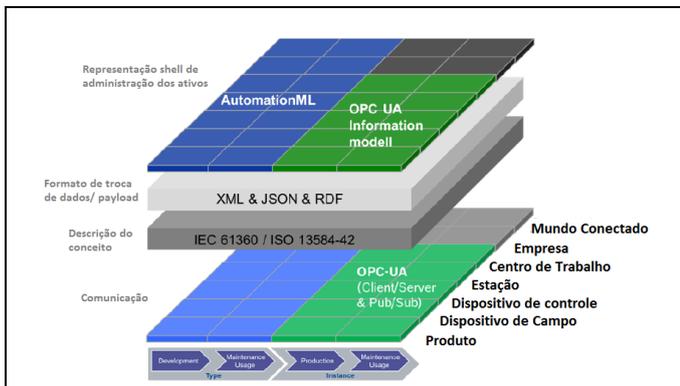


Fig. 3: Representação da forma de troca de dados para AAS (Bader et al. 2020).

Em Ye et al. (2019) é sugerido o AML para compartilhamento de informações de tipo e instância sobre os ativos em que se prepara e se transfere essas informações para as camadas operacionais (consultar OPC-UA e o mapeamento correspondente).

O formato de troca de dados dessas informações para fins de comunicação técnica é proposto por meio da utilização do protocolo XML (Extensible Markup Language) ou JSON (JavaScript Object) (Ye et al. 2019, Bader et al. 2020).

O mapeamento dessas informações para permitir o uso completo das vantagens e tecnologias semânticas pode ser feito com RDF (Resource Description Framework) (Bader et al. 2020).

De acordo com o levantamento bibliográfico realizado, poucos são os trabalhos que detalham casos de uso específicos com utilização de arquiteturas genéricas e de referência com uma proposta de integração voltada para o contexto de sistemas legados na indústria. Tentativas de validação do modelo de referência RAMI 4.0 tendo em vista o AAS como habilitador dessa transição são apresentadas em diferentes casos (Ye, et al. 2018, Ye, et al. 2019, Bader, et al. 2020). Ainda assim estes trabalhos estão em etapas embrionárias onde esforços precisam ser realizados para detalhamento dessas aplicações. Espera-se que pesquisas futuras possam fornecer mais resultados de aplicação para RAMI 4.0 e AAS (Bader, et al. 2020).

3. ARQUITETURA PROPOSTA

O presente trabalho utiliza como base a estrutura básica para composição de AAS, conforme descrito na seção 2.2 (Fig.2). Neste contexto, para cada ativo presente no sistema real serão desenvolvidos os AAS considerando os “shell” associados ao sistema de fabricação para implementação da proposta, sendo estes: (i) AAS-*Aplicações Web*; (ii) AAS-*Gateway*; (iii) AAS-*Raspberry pi*; (iv) AAS-*Produto*; e os (v) AAS-*WS*.

Essa será a estrutura de rede AAS incluindo os ativos e os caminhos de troca de dados definidos para implementação da proposta aplicada a casos reais de sistemas legados para o desenvolvimento de novas soluções de controle desses sistemas baseadas em I4.0.

A proposta baseia-se em três níveis (Fig 4):

- O ativo (PC) será responsável por suportar as regras do sistema (MAS) para orquestração dos AAS alocado no Eclipse BaseX baseado em Java.
- O ativo (Gat.ioT) é empregado para conectar os protocolos de campo heterogêneos via OPC-UA e conectar todos os ativos à aplicação AAS-*Web*. No (Gat.ioT) fica alocado o servidor OPC-UA que contém o modelo AML.
- Os demais ativos compõem o sistema real com sistemas de controle locais (legados) da indústria. Estes possuem serviços OPC-DA em que se faz necessário à utilização de um wrapper, como por exemplo, o OPC-UA wrapper da Matrikon-OPC. A comunicação das WS com o Gateway é realizada via protocolo EthernetTCP/IP. Estes ativos são digitalizados através do AAS dos ativos existentes no sistema real. Para atender requisitos de reconfigurabilidade foi adicionado ao sistema o ativo Produto. A comunicação dos AAS-*Produto* e AAS-*Raspberry* é estabelecida por meio do uso de RFIDs ativos e a *Raspberry* fica responsável por fornecer o serviço OPC-UA e também armazenar as listas de plano de trabalho atualizada da aplicação para os Produtos.

Portanto, a Fig. 4 mostra a arquitetura de implantação proposta, referenciada na arquitetura RAMI 4.0 com implementação de softwares para sistemas de controle (legados) da Indústria, integrados com novos sistemas de informação que habilitarão arquiteturas (MAS) na

orquestração de novos modelos de controle com integração entre sistemas. Nesta nova arquitetura em que o sistema foi separado em três níveis é importante destacar detalhes sobre a dinâmica do modelo proposto:

- O nível Windows PC permite usar EclipsebaseX que pode ser utilizado para definição das regras de controle utilizando as arquiteturas MAS discutidas no item 2.1. Essas regras são então transferidas via OPC-UA aos AAS correspondentes, modelados em AML, que descreve as regras atualizadas em seus ativos correspondentes que participam do loop de controle. Os parâmetros são então escritos via OPC-UA. Para que o sistema existente execute as ações, quando necessário, os ativos retornam informações atualizadas para que o sistema redefina as regras (Pessoa et al. 2018 e Ye et al. 2018).
- A implementação de AAS realizada com base em AML e OPC-UA. Na literatura encontram-se vários métodos técnicos que podem ser usados para realizar modelos de AAS (Bader et al. 2020; Ye et al. 2019; Ye et al. 2018). Sendo assim, pode-se utilizar AML para representar e implementar o modelo de informações UML para cada ativo. O AML contém um módulo apropriado para instanciar objetos individuais, podendo ser ativos físicos ou virtuais como elementos internos (IEs). Nesse contexto, o AutoML pode ser usado para implementar os submodelos (Ye et al. 2018).
- A comunicação e troca desses dados entre os Ativos devem ser estabelecidas e normalizadas. Para isso, criou-se uma interface compatível com I4.0, usando OPC-UA, que entende-se como um mecanismo máquina-máquina (M2M), independente de plataforma, que pode fornecer interfaces para troca de dados entre dispositivos e sistemas industriais. O OPC-UA apresenta um padrão cliente-servidor que pode ser usado como uma interface de comunicação dos AAS (Ye et al. 2018).

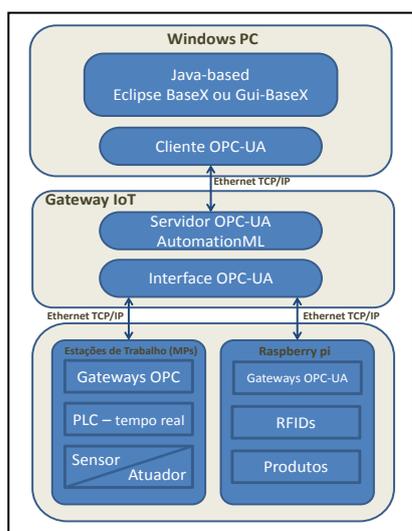


Fig. 4. Diagrama proposta do sistema (Baseada em Ye et al. 2018b).

4. ESTUDO DE CASO

O MPS do LSA-Mecatrônica composto por estações de trabalho (WS – Work Station) será utilizado para aplicação dos conceitos discutidos neste trabalho com foco na comunicação e integração dos ativos (Fig.5-a). Este sistema tem como objetivo produzir peças a partir de variações de subprodutos (Fig. 5-b): i (corpo do cilindro), ii (pistão), iii (mola) e iv (tampa).

O sistema é distribuído a partir de controles dedicados em cada uma das WS com sua AAS pode ser encontrada pelo sistema de controle superior. Este estabelece as funcionalidades necessárias de acordo com as receitas de produção. As estações de trabalho (WS) disponíveis neste experimento são: distribuição (D-WS), teste (Te-WS), manuseio (H-WS) no laboratório USP e montagem (A-WS) e Robô (R-WS) concebidas em simulador virtual (Fig.5.a).

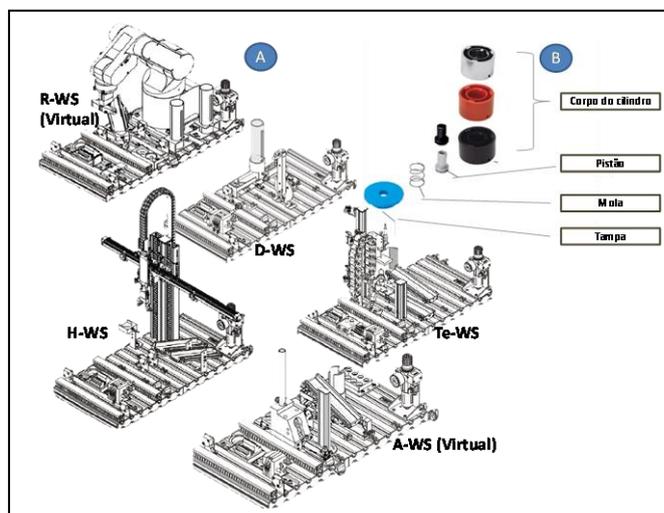


Fig. 5. a) Estações WS b) Sub-produtos (o Autor).

A estrutura de rede AAS incluindo os ativos e os caminhos de troca de dados definidos para implementação da proposta aplicada para o MPS em estudo está ilustrado na Figura 6.

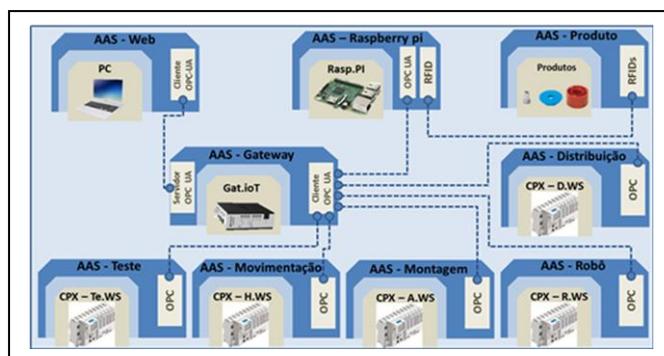


Fig. 6: Rede de comunicação do sistema I4.0 (Ye et al. 2018).

Neste caso de uso de fabricação, a interação dos AAS é mostrada como um diagrama de sequência na Fig. 7. Este diagrama expressa o fluxo dinâmico de informações através

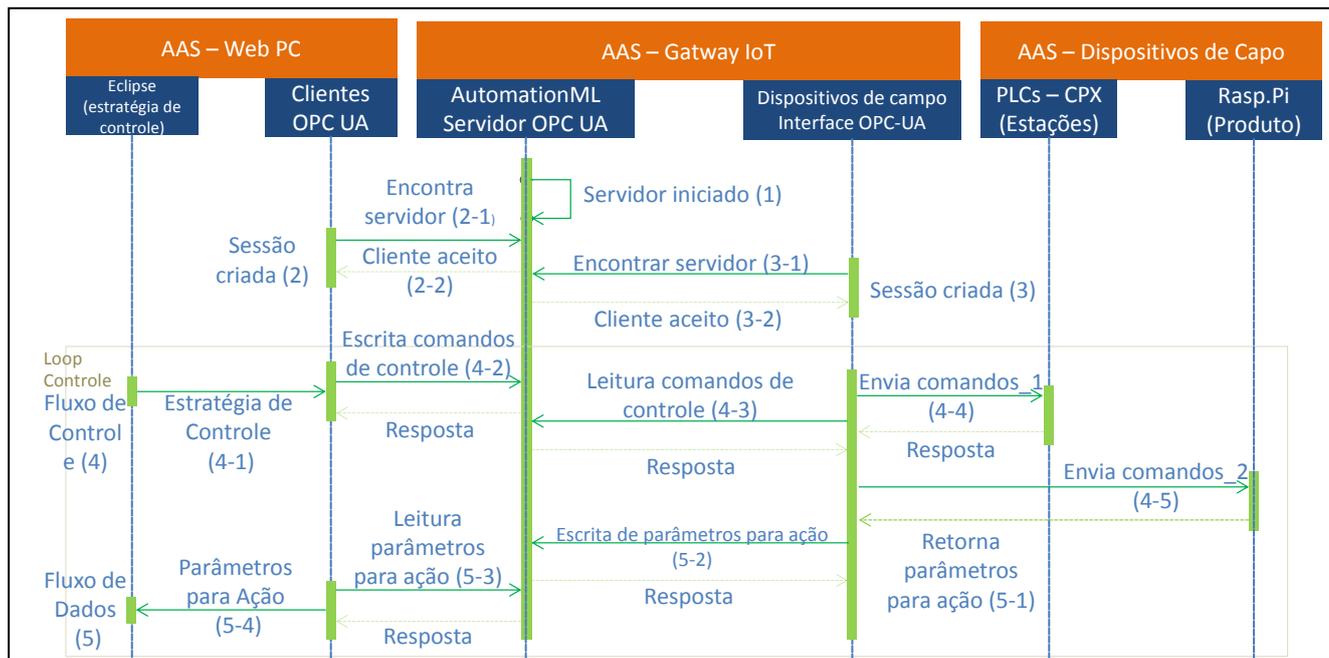


Fig. 7. Diagrama de sequência de comunicação (Baseada em Ye et al. 2018b).

da rede digitalizada de AASs. Primeiro, o servidor OPC UA relacionado ao AML precisa ser inicializado, para que as sessões OPC-UA possam ser instanciadas para diferentes clientes. O Fluxo de Controle é gerado pelo AAS - Web PC e são passados então para os AAS dos dispositivos de campo. Aqui, as tarefas de produção são executadas de acordo com a estratégia de controle. Os parâmetros de *feedback* são eventualmente carregados de volta no banco de dados do AAS - Web. Assim o sistema de manufatura opera em um loop constante.

O sistema de controle com AAS é adicionado para garantir requisitos de configurabilidade do sistema real, de forma a melhorar a eficiência do sistema em aspectos de melhor usabilidade dos recursos físicos em campo, onde foi adicionado o AAS-Produto como um agente do sistema inteligente estabelecido com MAS. Conforme visto em Trunzer et al. (2019) o controle tradicional operará conforme sua programação local em caso de falta de comunicação no sistema de administração dos ativos.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma proposta para o desenvolvimento de novas soluções de controle baseadas em I4.0 para sistemas legados de manufatura. Neste contexto, foi elaborada uma arquitetura em três níveis que permite a comunicação e integração entre ativos por meio do uso de componentes I4.0.

Tendo como foco os sistemas legados de controle, este trabalho teve como objetivo fornecer uma proposta de migração das arquiteturas atuais da Indústria e, para isso foram apresentadas tecnologias relacionadas a I4.0 como

OPC-UA e AML que habilitam a aproximação de diferentes componentes, interconectando estes sistemas de forma horizontal e vertical, adicionando equipamentos de campo e produtos na tomada de decisão de regras que venham a ser modeladas em níveis superiores de informação.

Observa-se nos trabalhos bibliográficos em relação ao trabalho proposto que estes possuem aspectos focados, mas que não contemplam o RAMI 4.0 para tratar sistemas legados, garantido a mesma flexibilidade de integração. A proposta deste trabalho, resolve essa lacuna, com uso de arquitetura de referência e modelagem de AAS encapsulando modelos de arquitetura para tal.

Os diferentes padrões de comunicação existentes na indústria tais como, Ethernet TCP/IP, RFID e OPC-DA, foram padronizados por meio do protocolo OPC-UA que permite a integração desses ativos. Por fim um diagrama de sequência de execução demonstra como a integração entre camadas e troca de informação entre ativos pode ser implementada de forma efetiva, baseado na arquitetura proposta.

Em trabalhos futuros espera-se detalhar as regras de controle no nível superior de informação deste sistema com uso de MAS e arquiteturas holônicas, por exemplo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos as agências de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal no Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) ao Programa de Educação Tutorial (PET-MEC) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico (CNPQ).

REFERÊNCIAS

- Bader, S., Barnstedt, E., Bedenbender, H., Billman, M., Boss, B., Braunmandl, A. et al., 2020, "Details of the Asset Administration Shell Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 2.0.1)". German Electrical and Electronics Manufacturers Association, Frankfurt am Main, Germany,
- Cruz, S., Luis, A., Ryashentseva, D., Lüder, A., & Vogel-Heuser, B. (2019). Cyber-Physical Production Systems architecture based on multi-agent's design pattern--comparison of selected approaches mapping four agent patterns. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 170(170), 30.
- da Silva, R. M., Junqueira, F., dos Santos Filho, D. J., & Miyagi, P. E. (2014, July). A method to design a manufacturing control system considering flexible reconfiguration. In *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 82-87). IEEE.
- Dias, J., Vallhagen, J., Barbosa, J., & Leitão, P. (2017, July). Agent-based reconfiguration in a micro-flow production cell. In *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 1123-1128). IEEE.
- Foehr, M., Vollmar, J., Calà, A., Leitão, P., Karnouskos, S., & Colombo, A. W. (2017). Engineering of next generation cyber-physical automation system architectures. In *Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems* (pp. 185-206). Springer, Cham.
- Pessoa, M. A., Pisching, M. A., Yao, L., Junqueira, F., Miyagi, P. E., & Benatallah, B. (2018, October). Industry 4.0, how to integrate legacy devices: a cloud IoT approach. In *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 2902-2907). IEEE.
- Trunzer, E., Calà, A., Leitão, P., Gepp, M., Kinghorst, J., Lüder, A., ... & Vogel-Heuser, B. (2019). System architectures for industrie 4.0 applications. *Production Engineering*, 13(3-4), 247-257.
- Trunzer, E., Kirchen, I., Folmer, J., Koltun, G., & Vogel-Heuser, B. (2017, March). A flexible architecture for data mining from heterogeneous data sources in automated production systems. In *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1106-1111). IEEE.
- Ye, X., & Hong, S. H. (2018a, September). An AutomationML/OPC UA-based Industry 4.0 solution for a manufacturing system. In *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFa)* (Vol. 1, pp. 543-550). IEEE.
- Ye, X., & Hong, S. H. (2019). Toward Industry 4.0 Components: Insights Into and Implementation of Asset Administration Shells. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 13(1), 13-25.
- Ye, X., Park, T. Y., Hong, S. H., Ding, Y., & Xu, A. (2018b, April). Implementation of a production-control system using integrated automation ML and OPC UA. In *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT* (pp. 1-6). IEEE.