

Agente Inteligente Embarcado baseado em Sistemas Ciberfísicos no contexto da Indústria 4.0

Braian Konzgen Maciel¹, Mario Ricardo Nascimento Marques Junior¹,
Gabriel Machado Balota¹, Eder Mateus Nunes Gonçalves¹

¹Centro de Ciências Computacionais - C3 – Universidade Federal do Rio Grande (FURG)
Brasil, Rio Grande do Sul, Rio Grande
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros – Rio Grande – RS – Brasil

Abstract. *Industry 4.0 or advanced manufacturing is promoting a new Industrial Revolution by expanding the application of computing and communication technologies. Cyber Physical Systems can be considered the main component for the development of this new revolution. A CPS constitution requires a combination of several methodologies and technologies, many of which are emerging. In this context, the theory of intelligent agents and multi agent systems can bring several benefits such as decentralization of control, modularity, adaptation to the environment, etc. This article aims to present an architecture for intelligent agents, a network in the CPS 5C architecture, to compose a cyberphysical system in the industrial environment.*

Resumo. *A Indústria 4.0 está promovendo uma nova Revolução Industrial através da aplicação de tecnologias computacionais e de comunicação. Sistemas Ciberfísicos (CPS) podem ser considerados como componente chave para o desenvolvimento desta nova revolução. A constituição do CPS requer a combinação de diversas metodologias e tecnologias, muitas delas emergentes. Neste contexto, a teoria de agentes inteligentes e sistemas multiagentes podem trazer diversos benefícios como descentralização do controle, modularidade, etc. Este artigo tem como objetivo propor uma arquitetura para agentes inteligentes embarcados, baseado na arquitetura CPS 5C, para compor um CPS no ambiente industrial.*

1. Introdução

A evolução do ambiente industrial é fundamental para o suprimento das demandas humanas. E no momento em que surgem novas necessidades e desafios, inovações tecnológicas precisam emergir para suprir tais exigências. Ao longo da história o cenário industrial passou por três grandes transformações: a 1ª Revolução Industrial teve como característica a mecanização da produção, com a invenção da máquina a vapor. A introdução da eletricidade e criação de linhas de montagem, caracterizaram a 2ª Revolução Industrial, viabilizando a produção em massa idealizada por Henry Ford. A 3ª Revolução Industrial introduziu elementos de eletrônica, tecnologia da informação e automação nesse cenário. Elementos como o Controlador Lógico Programáveis (CLP) e da Tecnologia da Informação (TI) aplicadas ao chão de fábrica [Rodrigues et al. 2016].

De acordo com [Kagermann et al. 2013], a introdução do programa alemão denominado *Industrie 4.0* deu início ao desafio que se apresenta como a de 4ª Revolução

Industrial, em que máquinas e componentes inteligentes podem comunicar-se de maneira autônoma. Assim, as decisões no chão de fábrica podem ser tomadas pelas próprias máquinas, a partir de informações fornecidas em tempo real. Outra característica importante, que pode ser destacada da Indústria 4.0, é a integração de diversas tecnologias relacionadas ao sistema, com foco na sua representação cibernética. A Figura 1 demonstra essa evolução do sistema industrial com suas principais características.



Figura 1. Evolução da indústria. Fonte: Adaptado de [Posada et al. 2015]

Para [Zhou et al. 2015], a Indústria 4.0 é uma visão para o futuro pois atualmente enfrenta muitas dificuldades e desafios, incluindo desafios científicos, desafios tecnológicos, desafios econômicos, problemas sociais e questões políticas. Como exemplo de desafios científicos e tecnológicos pode-se citar o desenvolvimento de dispositivos inteligentes, a construção do ambiente de rede, a grande análise e processamento de dados e a manufatura digital.

Dentro deste novo mundo que está sendo idealizado, alguns conceitos ganham grande destaque e influenciam diretamente para o desenvolvimento da 4ª Revolução Industrial. Sistemas Ciberfísicos (*Cyber Physical Systems* - CPS) [Jazdi 2014] e Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) [Shrouf et al. 2014] são alguns dos conceitos que vem contribuindo para que tecnologias já conhecidas e emergentes sejam aplicadas a manufatura industrial.

A constituição do CPS pode envolver o uso de várias tecnologias, como sistemas multiagentes (*Multi Agent Systems* - MAS), Arquiteturas Orientadas a Serviços (*Service-Oriented Architecture* - SoA), Computação em Nuvem (*Cloud Computing*), *Big Data*, *Machine-to-Machine* (M2M) e a Computação Visual (CV).

A integração entre diversas tecnologias visa contribuir para o CPS enfrentar desafios identificados nos princípios da Indústria 4.0. Sistemas multiagentes por exemplo, podem contribuir com flexibilidade, robustez, adaptação, configuração e controle distribuído para estes sistemas.

A capacidade de comunicação e transferência de dados entre diferentes dispositivos (sensores e atuadores) dentro de um ambiente industrial surge como um dos problemas a ser resolvido para a nova infraestrutura de indústria. Diversos padrões tem surgido para garantir que equipamentos de diferentes fontes realizem a coleta e transmissão de

dados de forma eficiente e segura.

Outro ponto que tem um grande destaque neste cenário é a descentralização do controle e incremento de complexidade para a realização de todas as operações. Dessa forma a necessidade de se desenvolver o comportamento autônomo do sistema através de abordagens como os sistemas multiagentes.

Este artigo tem como objetivo propor uma arquitetura para desenvolvimento de agentes inteligentes embarcados baseados em Sistemas Ciberfísicos. É tomada por referência a arquitetura 5C proposta por Lee[Lee et al. 2015] para composição de Sistemas Ciberfísicos. O design do agente inteligente é baseado nas características desta arquitetura e na teoria de sistemas multiagentes, com o intuito de viabilizar a construção de ambientes inteligentes compatíveis com o CPS.

Visto que a arquitetura 5C apresenta uma forma genérica para implementação de CPS em ambientes industriais, a proposta apresentada neste artigo possui maior detalhamento da implementação para uma aplicação específica.

2. Fundamentação

Esta seção apresenta alguns conceitos de técnicas, bem como tecnologias que estão ganhando destaque com o desenvolvimento da próxima revolução industrial.

2.1. Princípios da Indústria 4.0

A Indústria 4.0 está fundamentada sobre seis princípios básicos [Hermann et al. 2016]:

- Capacidade de operação em tempo real: consiste na aquisição e tratamento de dados de forma instantânea, permitindo a tomada de decisões dentro das restrições de tempo do ambiente;
- Virtualização: propõe a existência de uma cópia virtual das fábricas inteligentes, permitindo a rastreabilidade e monitoramento remoto de todos os processos por meio dos inúmeros sensores espalhados ao longo da planta;
- Descentralização: a tomada de decisões poderá ser feita pelo sistema ciberfísico de acordo com as necessidades da produção em tempo real. Além disso, as máquinas não apenas receberão comandos, mas poderão fornecer informações sobre seu ciclo de trabalho;
- Orientação a serviços: Utilização de arquiteturas de software orientadas a serviços aliado ao conceito de *Internet of Services*.
- Modularidade: Produção de acordo com a demanda, acoplamento e desacoplamento de módulos na produção, oferecendo flexibilidade para alterar as tarefas das máquinas facilmente.
- Interoperabilidade: Capacidade de máquinas, dispositivos, sensores e humanos de se conectar e comunicar através da Internet das Coisas e da Internet.

Para [Barbosa et al. 2016], o CPS e o IoT surgem como pontos fundamentais para a realização da 4ª Revolução Industrial. E utilizam-se de tecnologias conhecidas e emergentes como agentes inteligentes, sistemas multiagentes, arquiteturas orientada a serviço, big data, computação em nuvem entre outras, para o ingresso de seus sistemas nesta nova idealização de indústria.

2.1.1. Internet das Coisas e Serviços

A IoT, é uma infraestrutura de rede global, dinâmica e auto-gerenciada, onde coisas físicas e virtuais possuem identidades, atributos físicos e personalidades virtuais. Essa infraestrutura é capaz de integrar vários dispositivos equipados com sensoriamento, identificação, processamento e comunicação em rede [Da Xu et al. 2014].

2.1.2. Sistema Ciberfísico

O CPS é responsável por conectar o mundo virtual com a realidade física, que integra capacidades de computação, comunicação e armazenamento, podendo operar em tempo real de forma confiável, segura, estável e eficiente.

No contexto da Indústria 4.0 os agentes inteligentes e sistemas multiagentes compartilham um terreno comum com o CPS. Eles viabilizam o CPS a alcançar gerenciamento de complexidade, descentralização, inteligência, modularidade, flexibilidade, robustez e capacidade de resposta em tempo real [Leitao et al. 2016].

2.1.3. Arquitetura CPS 5C

Entre as arquiteturas CPS, a arquitetura denominada 5C proposta por [Lee et al. 2015] tem grande destaque na literatura. Ela serve como um guia para desenvolvimento e implementação do CPS para aplicações industriais. Esta arquitetura está dividida em cinco níveis. Na figura 2 é possível visualizar estes níveis bem como suas respectivas funções.



Figura 2. Arquitetura CPS 5C. Fonte: Adaptado de [Lee et al. 2015]

2.1.4. MTConnect

A capacidade de conexão entre diferentes dispositivos surge com um dos principais desafios da Indústria 4.0. Diversos padrões e protocolos estão sendo desenvolvidos nos últimos anos, e o Instituto MTConnect[MTConnect] propôs uma solução para este problema.

O padrão MTConnect baseia-se em tecnologias padrão da Internet como HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*) e XML (*Extensible Markup Language*). Um sistema que implementa o protocolo MTConnect tem cinco componentes fundamentais: Dispositivo, Adaptador, Agente, Rede e Aplicação/Cliente conforme Figura 3. Os componentes mais importantes são Agente e Adaptador.

O Dispositivo pode ser qualquer tipo de ferramenta, processo, planta, máquina, controlador ou equipamento. O Adaptador, é responsável por realizar a “tradução” entre o formato proprietário do equipamento para o padrão MTConnect.

O Agente é o núcleo da aquisição de dados do MTConnect. Ele coleta dados através do Adaptador e os escreve em um documento XML. Seu trabalho principal é analisar os dados do equipamento e fornecer uma interface para a rede, então os aplicativos externos podem obter os dados de que precisam. Também possui um *buffer* para armazenamento temporário dos dados

A Rede é responsável por garantir a conectividade entre as fontes de dados (dispositivos) e consumidores de dados (aplicações/clientes), geralmente é uma rede Ethernet. Os clientes são softwares que se conectam ao agente a fim de requisitar informações com algum propósito.

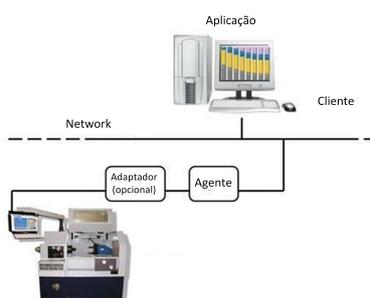


Figura 3. Arquitetura de um sistema MTConnect.Fonte:[MTConnect]

No contexto da Indústria 4.0 o MTConnect surge como solucionador para conexão entre dispositivos físicos de um CPS, atuando no mais baixo nível consegue garantir a aquisição de dados independente do formato ou protocolo de comunicação.

3. Trabalhos Relacionados

Nesta seção, são apresentados trabalhos que fazem utilização do paradigma de sistema multiagente, bem como tecnologias consideradas emergentes voltado para aplicações industriais para concepção de Sistemas Ciberfísicos.

3.1. Projeto GRACE

No projeto GRACE [Leitão et al. 2012] a arquitetura SMA-CPS desenvolvida, visualizada na Figura 4, foi aplicada em uma indústria de fabricação de máquinas de lavar. O seu principal objetivo, foi melhorar a produtividade e a qualidade dos produtos através da integração do controle do processo com a qualidade. Para isso foi implementado um sistema multiagente, no qual foi responsável pelos procedimentos dinâmicos de auto-adaptação, *loops* de controle e mecanismos de auto-otimização.

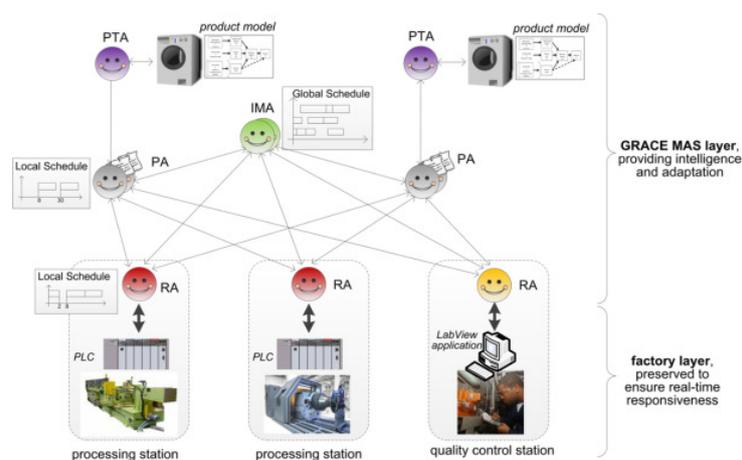


Figura 4. Sistema multiagente para integração de qualidade e controle de processos proposto em [Leitão et al. 2012].

Basicamente 4 tipos de Agentes foram projetados, *Product Type Agents (PTA)*, *Product Agents (PA)*, *Resource Agents (RA)*, *Independent Meta Agents (IMA)*[Leitão et al. 2016]:

- PTA: representa os diferentes produtos que podem ser produzidos na planta;
- PA: representa a produção de instâncias de produto sendo produzidos ao longo da linha de produção;
- RA: representa os recursos da linha de produção, estações de processamento, estações de controle de qualidade e operadores;
- IMA: Os agentes coletam os dados do chão de fábrica de forma distribuída e realizam análise de dados em tempo real para ajustar dinamicamente as variáveis de produção, ou seja, os parâmetros de processamento, de operação e de inspeção.

Como funcionalidades destes agentes, pode-se destacar a adaptação contínua das estações de processamento e inspeção, a seleção de testes funcionais, a geração de avisos de qualidade e a parametrização do controlador. Os PA interagem continuamente com os RA ao longo da linha de produção para obter *feedback* relacionando à qualidade das operações realizadas (processamento e inspeção) sobre as máquinas de lavar. Outra função dos PA, é aplicar um algoritmo para adaptar o plano de ensaios a realizar na máquina de lavar de acordo com seu históricos de produção.

Toda solução de agente foi projetada utilizando a plataforma JADE, e distribuída em 8 computadores dispostos ao longo do chão de fábrica, sendo conectados por uma rede Ethernet, utilizando o protocolo TCP/IP para comunicação. Para o controle de baixo nível foram utilizados CLP's e os programas executados de acordo com a norma IEC 61131-3, onde tem como principal função garantir a resposta em tempo real.

Os autores ainda comentam que a integração de tecnologia SMA com dispositivos físicos como CLP, permitem construir componentes ciberfísicos, para integração de processos e controle de qualidade. Os resultados obtidos mostraram um conjunto de benefícios como: aumento de eficiência produtiva, otimização dos parâmetros do processo, bem como melhoria de qualidade do produto [Leitão et al. 2016].

3.2. Projeto GOODMAN

De acordo com os resultados alcançados em outros projetos de pesquisa europeus desenvolvidos nos últimos anos, como GRACE [Leitão et al. 2012], IDEAS [IDEAS] e *Self-Learning* [Self-Learning], foi lançado em 2017 o projeto GOODMAN [GOODMAN].

O SMA-CPS projetado é baseado na arquitetura GRACE, visualizado na Figura 4, e o sistema orientado a agentes inteligentes é utilizado para garantir defeito zero em vários estágios de fabricação. Esse projeto tem como objetivo desenvolver e implementar tecnologias que serão aplicadas em uma linha de produção, a fim de evitar a geração e propagação de defeitos. Também visa desenvolver uma estratégia de produção que garanta alta qualidade de produtos melhorando a eficiência de produção de todo o sistema.

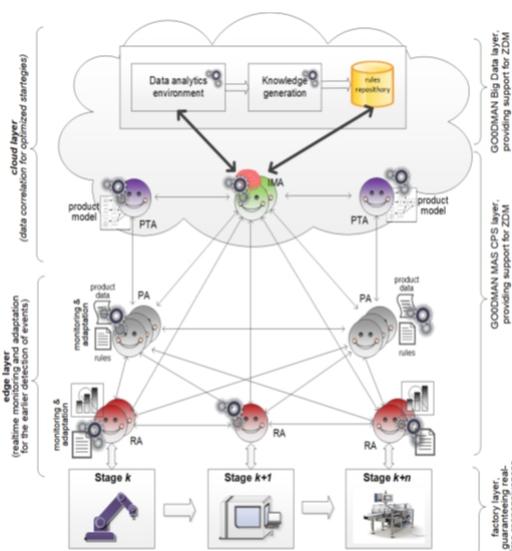


Figura 5. CPS baseado em agentes utilizado no projeto GOODMAN. Fonte: [GOODMAN]

A Figura 5 compreende uma sociedade de agentes inteligentes distribuídos, autônomos e cooperativos que representam os componentes de produção dispostos ao longo do sistema de fabricação em vários estágios. Em alguns casos, esses agentes têm associação direta com um recurso físico, por exemplo, um robô de soldagem ou uma estação de controle de qualidade, mas em outros casos representam entidades lógicas, como análise de dados e ferramentas de auto-aprendizagem. Até os produtos que estão sendo produzidos ao longo da linha terão um agente inteligente associado, que transforma um produto passivo em um produto inteligente. Com a associação de cada estágio e recurso, dispostos ao longo do ambiente de fabricação, a um agente inteligente é formado então um sistema multi-agente, que coleta, armazena e processa dados de forma distribuída.

Esses agentes inteligentes são enriquecidos com algoritmos de análise de dados, executando parcialmente algoritmos mais simples em agentes de nível inferior ou invocando serviços analíticos de dados no nível da nuvem.

3.3. Arquitetura CPPS para integração de sistemas de produção heterogêneos

Em [Vogel-Heuser et al. 2014] é apresentada uma arquitetura para implementar componentes de CPPS (*Cyber Physical Production System*) baseado na tecnologia de MAS e

apoiada por modelos de conhecimento e ontologias. A arquitetura visa resolver o problema de um cenário de produção em que iogurte personalizado em massa é encomendado por um cliente e produzido por diferentes instalações de produção distribuídas.

A arquitetura proposta de CPPS foi desenvolvida com base no padrão existente da Foundation for Physical Agents (FIPA) e em abordagens de outros trabalhos. Dentro do composto de CPPS, cada sistema de produção é encapsulado por um CPPS que é representado por um Agente de Planta que propaga as capacidades da planta particular e agenda localmente as ordens de entrada. Para controlar a planta de acordo com o esquema de produção, este Agente de Planta pode ser uma entidade de software do próprio software de automação do sistema de produção (ver 6, Sistema de Produção B), ou implementado em hardware adicional (ver 6, Sistema de Produção A) para encapsular a planta de produção e fornecer sua interface para o CPPS. Estas opções permitem a implementação dos Agentes de Plantas em diferentes linguagens de programação e em diferentes plataformas heterogêneas.

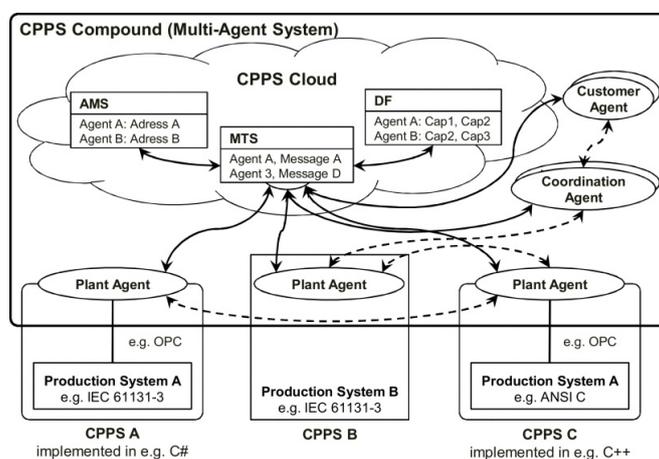


Figura 6. Arquitetura do CPPS proposto em [Vogel-Heuser et al. 2014].

A comunicação e a interoperabilidade entre os diferentes agentes e as entidades organizacionais da CPPS é realizada por uma linguagem comum que se baseia na Linguagem de Comunicação de Agentes (ACL), que também é padronizada pelo FIPA. A plataforma de agente desenvolvida e implementada suporta a especificação de um vocabulário específico de domínio e protocolos de comunicação como um primeiro passo para a implementação de uma ontologia.

Para avaliar a implementação da abordagem, foram introduzidas manualmente diferentes ordens no sistema utilizando o cliente web fornecido e observou-se manualmente a reação e comportamento dos diferentes sistemas de produção de laboratório. Verificou-se que o Agente decompõe corretamente as ordens dos clientes e despacha as ordens de produção para os diferentes CPPS onde são executadas.

4. Proposta

Nesta seção apresentamos uma arquitetura para a construção de agentes inteligentes embarcados baseados nos conceitos e premissas do CPS e Indústria 4.0. A aplicação de sistemas ciberfísicos no contexto de manufatura tem se mostrado muito promissora, mas carece de arquiteturas, metodologias e estratégias para a sua concepção.

A estratégia adotada nessa proposta é baseada na teoria de agentes e sistemas multiagentes, que visa a construção de um ambiente formado por diversos agentes inteligentes, dotados de um comportamento autônomo. O agente inteligente embarcado deve ser capaz de perceber e interagir com o meio físico através de sensores e atuadores, assim como interagir com agentes virtuais através da rede. Ele também pode apresentar elementos de controle, através de algoritmos como o PID (*Proporcional Integral Derivativo*) e inteligência artificial, promovendo o controle distribuído e a descentralização.

4.1. Arquitetura de Software do Agente

A arquitetura de software proposta para o desenvolvimento do agente, está organizada em cinco módulos: configuração, inteligência, cibernético, conversão e comunicação.

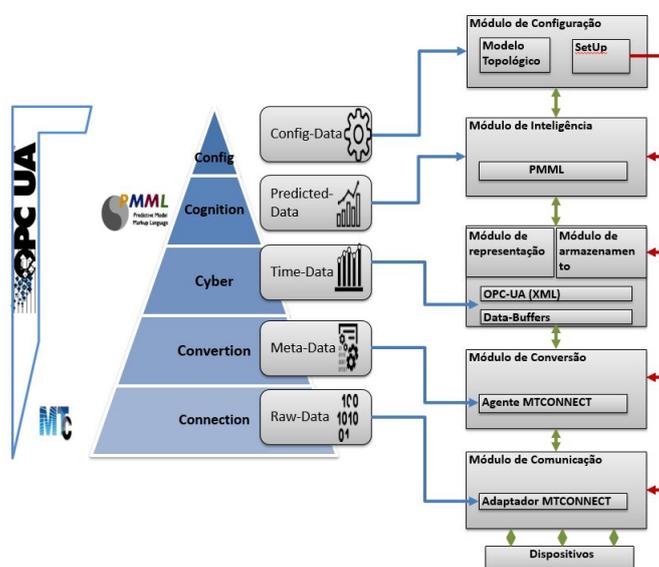


Figura 7. Arquitetura de Software em 5 módulos.

A Figura 7 apresenta a disposição, bem como funcionalidades dos módulos da arquitetura de software do agente.

- Módulo de Inteligência: responsável pelo mapeamento e rastreamento de padrões, comportamentos e o controle de qualidade dos dados. Utiliza algoritmos avançados para apontar falhas e promove o comportamento preditivo e cognitivo do sistema. Deste módulo emergem funções básicas de sistemas de manufatura, como controle, monitoramento, planejamento e escalonamento.
- Módulo Cibernético: responsável pela gerência das informações do sistema de modo a representá-los em escala temporal por meio de inferências e previsões. Ele é formado por um *buffer*, que registra os dados do agente e por um adaptador de dados para bases de dados externas que habilita a aquisição de dados.
- Módulo de Conversão: responsável pela conversão dos dados coletados no módulo de comunicação em informação para o sistema, atribuindo semântica e algum tipo de tratamento para a garantia do provimento contínuo desta informação.
- Módulo de Comunicação: responsável por adaptar os diferentes protocolos de redes industriais para o padrão adotado no sistema e viabilizar a interoperabilidade por meio desse padrão. O módulo também disponibiliza o modelo com a descrição topológica do equipamento para os demais agentes por meio da rede.

4.2. Aplicação

Para desenvolvimento e implementação da arquitetura proposta, será utilizado como estudo de caso uma planta industrial didática do modelo PD3 Series da Smar. Essa planta contém diversas malhas de controle para automação de processos industriais e utiliza os mesmos instrumentos de campo que são desenvolvidos para aplicações em larga escala.

Os agentes serão conectados fisicamente na planta junto aos sensores e atuadores, conforme Figura 8. Para implementação dos agentes, serão utilizados computadores de um único módulo, ou *Single Board Computers* (SBC) como *Raspberry Pi* e *Odroid*. São dispositivos que apresentam os requisitos entendidos como necessários para este tipo de aplicação, como dimensionamento reduzido e alta capacidade de memória e processamento. Estes agentes embarcados são responsáveis por coletar as informações do ambiente bem como atuar sobre o mesmo.

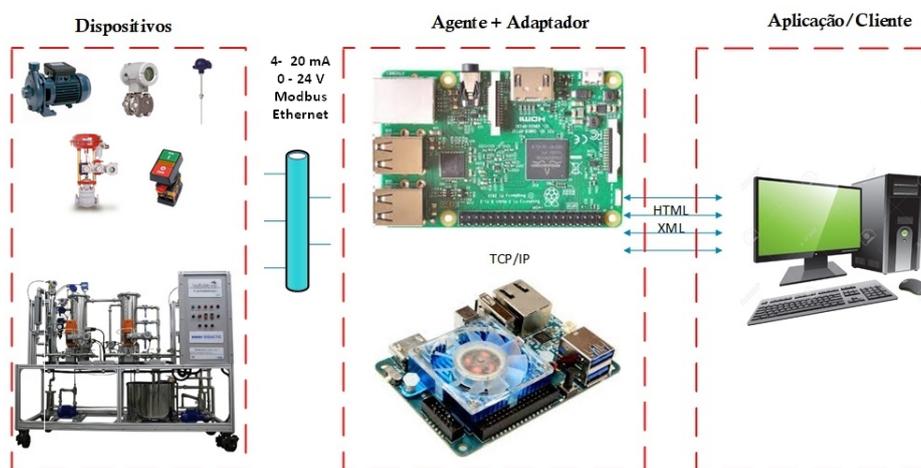


Figura 8. Arquitetura de hardware da aplicação.

Os módulos de software do agente serão implementados utilizando linguagens de programação como *C++*, *NodeJS* ou *Python*. As interfaces do módulo de configuração do agente serão baseadas em tecnologias web, visando a simplificação das operações de calibração e configuração pela rede. O protocolo padrão do módulo de comunicação será o MTConnect, e adaptadores de protocolos deverão ser implementados para a comunicação dos sensores e atuadores.

O modelo topológico será descrito através de XML (*eXtended Markup Language*), obedecendo o padrão MTConnect que estabelece um vocabulário e um conjunto de definições para a representação virtual dos componentes integrados ao agente.

5. Discussão e considerações finais

De acordo com os trabalhos relacionados, pode se perceber, que uma grande capacidade de processamento era necessária para implementação da arquitetura desenvolvida. Em GRACE por exemplo, todo sistema era gerenciado por 8 computadores dispostos ao longo da linha de produção. A grande vantagem que pode ser elencada, analisado estes trabalhos relacionados, onde há a necessidade de potentes computadores para a implementação,

é a capacidade da arquitetura proposta nesse artigo ser implementada em dispositivos embarcados como Single Boards Computers.

Nota-se também que as arquiteturas apresentadas utilizam computadores conectados a CLPs ou outros dispositivos de controle industrial. Os agentes são executados em computadores e são responsáveis por mandar as ordens de controle para esses dispositivos que por sua vez realizam o controle propriamente dito. A arquitetura apresentada neste artigo propõe que um ou mais sensores e atuadores sejam conectados a cada dispositivo. Também prevê que na planta industrial sejam instalados vários desses dispositivos contendo um agente inteligente embarcado que será responsável pelo controle de um processo ou por parte dele.

O uso de paradigmas computacionais como *Fog* e *Cloud Computing*, assim como apresentado nos trabalhos relacionados, também é considerado na implementação da arquitetura proposta neste artigo. A virtualização, por exemplo, em determinados casos exige muito poder de processamento do dispositivo sendo necessário a implementação em nuvem, assim facilitando o acesso para os demais agentes realizar a virtualização completa do sistema.

Visto isso, entre as vantagens esperadas dessa abordagem baseada em agentes inteligentes, pode-se enumerar a padronização da comunicação, a promoção do controle distribuído, a autoconfiguração, a visibilidade e transparência dos dados assim como a interoperabilidade entre agentes e aplicações.

Referências

- Barbosa, J., Leitão, P., Trentesaux, D., Colombo, A. W., and Karnouskos, S. (2016). Cross benefits from cyber-physical systems and intelligent products for future smart industries. In *Industrial Informatics (INDIN), 2016 IEEE 14th International Conference on*, pages 504–509. IEEE.
- Da Xu, L., He, W., and Li, S. (2014). Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 10(4):2233–2243.
- GOODMAN. Agent Oriented Zero Defect Multi-Stage Manufacturing. <http://gooldman-project.eu/>. Acessado 2 de Fevereiro, 2018.
- Hermann, M., Pentek, T., and Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *System Sciences (HICSS), 2016 49th Hawaii International Conference on*, pages 3928–3937. IEEE.
- IDEAS. Instantly Deployable Evolvable Assembly Systems. <http://www.ideas-project.eu>. Acessado 2 de Fevereiro, 2018.
- Jazdi, N. (2014). Cyber physical systems in the context of industry 4.0. In *Automation, Quality and Testing, Robotics, 2014 IEEE International Conference on*, pages 1–4. IEEE.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., and Wahlster, W. (2013). *Recommendations for Implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 working group*. Forschungsunion.

- Lee, J., Bagheri, B., and Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3:18–23.
- Leitão, P., Colombo, A. W., and Karnouskos, S. (2016). Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges. *Computers in Industry*, 81:11–25.
- Leitao, P., Karnouskos, S., Ribeiro, L., Lee, J., Strasser, T., and Colombo, A. W. (2016). Smart agents in industrial cyber-physical systems. *Proceedings of the IEEE*, 104(5):1086–1101.
- Leitão, P., Rodrigues, N., Turrin, C., Pagani, A., and Petrali, P. (2012). Grace ontology integrating process and quality control. In *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pages 4348–4353. IEEE.
- MTConnect. MTConnect Institute. <http://www.mtconnect.org>. Acessado 13 de Agosto, 2017.
- Posada, J., Toro, C., Barandiaran, I., Oyarzun, D., Stricker, D., de Amicis, R., Pinto, E. B., Eisert, P., Döllner, J., and Vallarino, I. (2015). Visual computing as a key enabling technology for industrie 4.0 and industrial internet. *IEEE computer graphics and applications*, 35(2):26–40.
- Rodrigues, L. F., de Jesus, R. A., and Schützer, K. (2016). Industrie 4.0: Uma revisão da literatura. *Revista de Ciência & Tecnologia*, 19(38):33–45.
- Self-Learning. Reliable Self-Learning Production Systems Based on Context Aware Services. <http://www.selflearning.eu>. Acessado 2 de Fevereiro, 2018.
- Shrouf, F., Ordieres, J., and Miragliotta, G. (2014). Smart factories in industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the internet of things paradigm. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2014 IEEE International Conference on*, pages 697–701. IEEE.
- Vogel-Heuser, B., Diedrich, C., Pantförder, D., and Göhner, P. (2014). Coupling heterogeneous production systems by a multi-agent based cyber-physical production system. In *Industrial Informatics (INDIN), 2014 12th IEEE International Conference on*, pages 713–719. IEEE.
- Zhou, K., Liu, T., and Zhou, L. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2015 12th International Conference on*, pages 2147–2152. IEEE.