



# ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



02 a 04  
de dezembro 2020

## INDÚSTRIA 4.0: CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS AOS SISTEMAS FÍSICO-CIBERNÉTICOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA MANUFATURA INTELIGENTE

Ivan Correr

Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP

Rafael Oliveira de Paschoal

Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP

Alexandre Tadeu Simon

Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP

**Resumo:** A produção industrial é fomentada pela concorrência internacional e à rápida necessidade de adaptação dos sistemas produtivos, e diante das rápidas mudanças que ocorrem no mercado, cada vez mais as empresas buscam maneiras de implementar sistemas de produção que respondam rapidamente às alterações necessárias. O cenário disruptivo da quarta revolução industrial transforma a maneira com que as fábricas são gerenciadas, através do controle descentralizado baseada em sistemas físico-cibernéticos, estas são menos propensas a interrupções e capazes de fabricar seus produtos com maior eficiência através do controle, monitoramento e otimização dos processos. Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho foi, através de uma revisão sistemática de artigos publicados na área de pesquisa, identificar as características necessárias à um CPS, permitindo assim uma melhor compreensão de suas aplicações e implementação da manufatura inteligente.

**Palavras-chave:** Sistemas Físico-Cibernéticos, Manufatura Inteligente, Indústria 4.0.

### Industry 4.0: Required Characteristics for a Cyber-Physical System for Implementing Smart Manufacturing

**Abstract:** Industrial manufacturing is driven by its international competition and the need to rapidly adapt its production systems, and given to the constant changes in the market, more and more companies are looking for alternatives to implement a new production systems that respond quickly to these changes. The disruptive scenario of the fourth industrial revolution transforms the way factories are managed, through decentralized control based on cyber-physical systems, they become less propitious to interruptions and able to manufacture their products more efficiently by the autonomous control, monitoring and optimization of processes. Therefore, the main objective of this research is to identify the required characteristics for a CPS through a systematic review of published articles, thus allowing a better understanding of its applications and the implementation of an intelligent manufacturing system.

**Keywords:** Cyber-Physical Systems, Smart Manufacturing, Industry 4.0.

## **1. Introdução**

A primeira revolução industrial, iniciada no final do século XVIII, marcou a transformação das técnicas de manufatura manuais para processos de produção mecanizados. Estas mudanças impactaram não só a economia, com o aumento da produtividade, mas remodelaram a vida cotidiana das pessoas. Desde esse momento, a indústria tem passado por transfigurações tanto nos seus sistemas de produção, quanto de gestão (SANTOS et al., 2018).

A evolução dessas mudanças tecnológicas se encerra, na atualidade, com a chamada quarta revolução industrial como forte integração de tecnologias de informação e comunicação para conectar o mundo físico ao virtual. Tal revolução é apontada como resultado de esforços da Comissão Europeia, com o objetivo de retomar a competitividade das empresas locais, especialmente em aspectos referentes à qualidade e custos de produção (KAGERMANN et al., 2013).

Segundo Kagermann et al. (2013), os conceitos da Indústria 4.0 promoveram às empresas uma maior versatilidade nos processos de manufatura através de análises em tempo de real de grandes quantidades de informações, melhorando as tomadas de decisões estratégicas e operacionais, permitindo assim verificações preliminares dos processos e otimizações das cadeias produtivas. É neste cenário que se destacam os Sistemas Físico-Cibernéticos (CPS), que consistem na integração de tecnologias de processamento, informação e comunicação, bem como as tecnologias de planejamento e controle inteligentes (RAJKUMAR, 2010).

Assim como a internet, os sistemas físicos-cibernéticos mudam a maneira como o ser humano interage e controla o ambiente físico, possibilitando a integração em rede das tecnologias que constituem os mundos virtual e físico através dos objetos inteligentes (MACDOUGALL, 2014; HE e JIN, 2016). Dentro dos sistemas de manufatura, os CPS constituem as máquinas que compõe as fabricas inteligentes, equipamentos capazes de transmitir e receber informações de maneira autônoma, gerando ações e controlando-se independentemente (KAGERMANN et al., 2013).

Segundo Monostori et al. (2016), os campos de aplicação dos sistemas físico-cibernéticos são quase infinitos, podendo resultar em sistemas de produção inteligentes, casas inteligentes e até mesmo cidades inteligentes, contribuindo também para a qualidade de vida humana. Para que isso se torne possível, novas estruturas de trabalhos e modelos de negócios precisam ser estudados, uma vez que o CPS ainda está em seu estágio inicial de desenvolvimento e não possui uma estrutura unificada ou arquitetura geral que permite sua implementação em diferentes equipamentos e aplicativos (HE e JIN, 2016).

De acordo com Geisber e Broy (2012), dentro dos limites de uma fábrica, vários subsistemas físicos ou informacionais estão envolvidos durante a produção e gerenciamento, devendo estes possuírem habilidades específicas a serem desempenhadas para que as interações sejam possíveis. Sendo assim, de modo a compreender as competências necessárias para que um equipamento possa ser implementado dentro de um contexto de manufatura inteligente, este trabalho tem como principal objetivo, desenvolver um estudo sobre as principais características que um CPS deve possuir.

## **2. Referencial Teórico**

### **2.1. Indústria 4.0**

A Indústria 4.0 está baseada nos conceitos de fabricação avançada, ou também chamados de fabricação inteligente, sistemas flexíveis capazes de ajustarem automaticamente os processos de produção para vários tipos de produtos, condições e mudanças exigidas

(WANG et al., 2016). Neste contexto, tecnologias como os Sistemas Físico-Cibernéticos (CPS), Internet das Coisas (*IoT*) e Computação em Nuvem (*Cloud Computing*), visam conectar máquinas, serviços e pessoas em tempo real, possibilitando a troca e gestão de informações e permitindo que processos de produção e negócios sejam combinados (SANTOS et al., 2018; STOCK et al., 2018).

Com as tecnologias da então chamada Indústria 4.0, é possível criar integrações à nível estratégico, possibilitando uma intercomunicação digital de ponta a ponta em toda a cadeia de valor do processo. (WANG et al., 2015). De acordo com Kagermann et al. (2013), as essas integrações representam a intercomunicação entre os diferentes níveis hierárquicos e de produção, consistindo na colaboração e troca de recursos e informações em tempo real entre pessoas e empresas. Isso permite aumentar a qualidade, produtividade e flexibilidade, ajudando a obter produtos personalizados em larga escala e de maneira sustentável, com melhor utilização e aproveitamento dos recursos (STOCK et al., 2018; DALENOGARE et al., 2018).

A quarta revolução industrial representa uma disrupção dos processos produtivos centralizados para os descentralizados, confiando na automação baseada em sistemas físico-cibernéticos, em que sensores enviam dados diretamente para a nuvem e atividades como monitoramento, controle e otimização passam a ser realizadas automaticamente com a coleta em tempo real dos dados necessários (KUMAR et al., 2019).

Segundo Wang et al. (2015), as tecnologias em ascensão como Internet das Coisas (*IoT*), *Big Data*, Computação em Nuvem, assim como tecnologias de inteligências artificial (*AI*), são fatores viabilizam a implementação da Indústria 4.0. Para o autor, estas tecnologias são a base da Indústria 4.0 e devem ser aplicadas em todos os aspectos da indústria, visando lidar com necessidades e desafios globais.

De acordo com Rojko (2017), as máquinas na Indústria 4.0 constituem os chamados CPS, sistema físicos integrados às tecnologias de ICT. Estes são sistemas autônomos que podem tomar suas próprias decisões com base em algoritmos e captura de dados em tempo real, resultados de análises e até mesmo registros de comportamentos anteriores. Com a utilização do CPS para processamento de informações, as empresas têm mais suporte para os processos de tomada de decisão e têm uma adaptação mais rápida para vários tipos de eventos, como falhas na linha de produção (SCHUH et al., 2017).

## **2.2. Sistemas Físicos-Cibernéticos (CPS)**

Com os recentes desenvolvimentos que resultaram em uma maior disponibilidade e acessibilidade de sensores, sistemas de aquisição de dados e redes de computadores, a crescente competitividade do mercado força com as indústrias invistam na implementação de metodologias de alta tecnologia em seus processos (LEE et al., 2015).

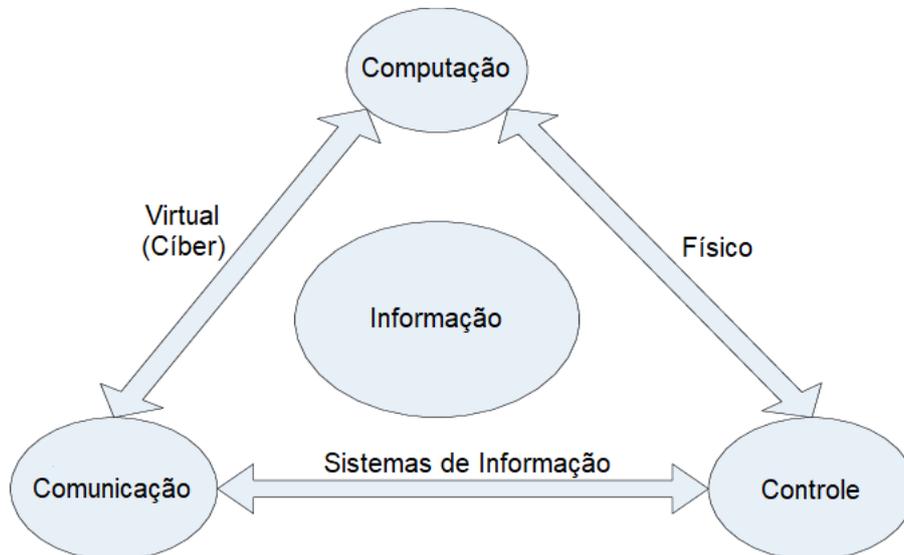
O desenvolvimento de sistemas de manufatura era um feito inusitado sem as redes de computadores. Os sistemas embarcados ajudaram na implementação de soluções inteligentes de automação e sistemas de serviços de produtos, ao mesmo tempo que as tecnologias de internet e computação em nuvem suportaram a interoperabilidade da fabricação (MONOSTORI et al., 2016).

Com o desenvolvimento da nova geração das tecnologias de informação e comunicação, os modos de produção têm mudado de produção em massa para a individualização em massa, e o sistema de produção correspondente avançou de automatizado para autônomo (DING et al., 2019). A parte principal do processo é a conversão de digital para físico em um sistema de fabricação reconfigurável (ROJKO, 2017).

Uma das vertentes mais significativas no desenvolvimento das ciências da computação e das tecnologias de informação e comunicação é representada pelos Sistemas Físico-

Cibernéticos (CPS), sistemas computacionais colaborativos que estão em profundo vínculo com o mundo físico e seus processos em andamento, fornecendo e utilizando, ao mesmo tempo, serviços de acesso e processamento de dados disponíveis na internet (MONOSTORI, 2014). A figura 1 apresenta uma estrutura básica de como estes sistemas operam dentro de uma arquitetura em rede.

Figura 1 – Arquitetura 3C para um CPS



Fonte: Adaptado de Wan et al. (2011)

Como pode ser observado, o CPS trata-se da interseção, não a união, do físico e do virtual, combinando modelos e métodos de engenharia mecânica, ambiental, civil, elétrica, biomédica, química, aeronáutica e industrial, com os modelos e métodos da ciência da computação (LEE, 2015). Através das avançadas tecnologias de microsistemas, um CPS pode ser colocado em um único microchip, incluindo vários sensores e um microprocessador de dados, ou até mesmo pode ser construído na forma de uma máquina ferramenta inteira, que por sua vez pode fazer parte de um CPS ainda maior, como uma fábrica (BARTODZIEJ, 2017).

### 2.2.1. Características dos sistemas físico-cibernéticos

Com o aumento da demanda por novos produtos e novo paradigma tecnológico, as empresas de manufatura precisam buscar melhorar suas capacidades de resposta e reconfiguração para melhorar a agilidade e responsividade de seus sistemas de produção. Deste modo, poderão reagir às mudanças rápidas das necessidades de seus clientes e ao mesmo tempo garantir a qualidade de seus produtos e serviços e, como alternativa para enfrentar estes desafios, surgem os CPS (ZHANG et al., 2017; LINS et al., 2020).

Os Sistemas Físico-Cibernéticos estão possibilitando as tecnologias que integram os mundos virtual e físico a criarem um mundo genuinamente constituído em rede, no qual objetos inteligentes se comunicam e interagem entre si (MACDOUGALL, 2014).

Atualmente, grande parte dos estudos e desenvolvimentos voltados para os CPS se concentram principalmente nos campos de engenharia, visando integrar algoritmos de otimização a fim de alcançar menores tempos de respostas dos equipamentos às variações do mercado. Essa integração é um comportamento inteligente de coleta e processamentos de dados pelo CPS que permite o autocontrole de determinadas tarefas, não apenas dando suporte de decisão ao planejador de produção, mas controlando-se de maneira autônoma (MONOSTORI et al., 2016; TANG et al., 2018).

De acordo com Hu et al. (2012), os componentes físicos do CPS detectam o ambiente físico, coletam dados e executam as decisões tomadas pelos componentes computacionais, os quais analisam e processam os dados anteriormente coletados, assim tomando as decisões. Nas cadeias de produção, o CPS constitui-se de máquinas inteligentes, sistemas de armazenamento e instalações de produção capazes de trocas informações de forma autônoma, desencadeando ações e controlando-se independentemente (KAGERMANN et al., 2013).

Assim como a internet muda a maneira como os seres humanos interagem entre si, o CPS muda a forma como o ser humano interage e controla o ambiente físico (HE e JIN, 2016). Nestes sistemas, o gerenciamento das informações precisa trabalhar de maneira escalável, realizar a troca de dados sem interferir na disponibilidade dos processos e proporcionar interoperabilidade entre sistemas e dispositivos. Auto-controle, autoconhecimento, auto-organização, auto-manutenção e auto-reconfiguração são alguns dos atributos utilizados para descrever as capacidades dos componentes e sistemas das fábricas do futuro (TUPTUK e HAILES, 2018).

### **3. Metodologia do desenvolvimento da pesquisa**

O desenvolvimento e condução de projetos de pesquisa do requerem do pesquisador esforços no sentido de se obter dados que comprovem ou não suas premissas de análise, além de um considerável dispêndio de tempo e energia no que diz respeito às ferramentas de pesquisas e como as mesmas devem ser estruturadas. Uma das questões mais críticas nas áreas de Engenharia de Produção e Gestão de Operações refere-se à abordagem metodológica utilizada no desenvolvimento de trabalhos de pesquisa. A condução da pesquisa é uma tarefa complexa e exige uma estrutura e um planejamento adequados (MIGUEL, 2018).

Sendo assim, a metodologia principal adotada para o desenvolvimento deste estudo qualitativo foi uma revisão sistemática da literatura, utilizando como principal fonte de consulta artigos científicos publicados em periódicos online. Desta maneira, buscou-se reunir os principais autores e artigos referentes às competências de um CPS, visando elencar as principais características que possuem.

Segundo Gil (2002), o principal proveito da realização de uma pesquisa bibliográfica encontra-se no fato de oportunizar ao investigador uma abrangência de um conjunto de ideias muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente. Essa vantagem torna-se particularmente importante quando o problema de pesquisa requer dados muito dispersos pelo espaço.

De modo a coletar dados referentes às características dos sistemas físico-cibernéticos e atingir o objetivo da presente pesquisa, foi realizado um levantamento de artigos concernentes ao assunto publicados em periódicos online. Para isso, utilizou-se a base de dados *Scopus*, na qual foram pesquisados artigos considerando título, resumo e palavras-chave, seguindo os seguintes critérios:

- Termos de pesquisa: “*cyber-physical systems*” e “*manufacturing*”;
- Área de pesquisa: engenharia;
- Tipo de documento: artigo;
- Idioma: inglês;
- Palavras-chave: “*cyber-physical systems*”, “*cyber-physical production systems*”, “*industry 4.0*”.

Ao todo, foram encontrados 378 artigos. Destes, realizando um segundo filtro de palavras-chave apenas para os que continham “*cyber-physical systems*” ou “*cyber-physical production systems*”, foram identificados 240 artigos. Como terceiro filtro, dos artigos identificados com estas palavras-chave, foram lidos ainda seus respectivos resumos para

compreensão do conteúdo a ser apresentado pelos autores, sendo apenas considerados os artigos em que eram abordadas as características e desenvolvimentos de sistemas físico-cibernéticos, totalizando ao final 62 artigos a serem analisados. Cada um dos 62 artigos foi cautelosamente lido e analisado, a fim de observar e encontrar o maior número possível de descrições e detalhes com relação às características que um sistema físico-cibernético possui e quais funções desempenha dentro de um sistema de manufatura inteligente.

#### 4. Resultados e discussões

Como apresentado, os sistemas físico-cibernéticos permitem que os sistemas de produção estejam ligados entre si para troca de dados de maneira fácil e rápida. Este feito requer um alto nível de integração, conectividade e colaboração entre os diferentes processos de uma empresa, o que, por sua vez, requer a implementação de tecnologias que permitem a criação de padrões inteligentes como IoT e CPS. Estas, por sua vez, transformam a maneira como as empresas trabalham, gerando alto níveis de comunicação e gerenciamento de dados, caracterizando assim a quarta revolução industrial (FATORACHIAN e KAZEMI, 2018; LEE et al., 2019).

Os CPS consistem em objetos inteligente capazes de cooperar, organizar-se e tomar decisões de maneira autônoma através de sensores incorporados que coletam dados e monitoram os processos físicos e sistema em rede, disponibilizando as informações de maneira global para que outros aplicativos possam interagir diretamente com eventos do mundo físico. Essa alta integração e cooperação entre humanos e máquinas estabelece um novo ecossistema para que os níveis organizacionais, gerenciais e técnicos de uma empresa sejam perfeitamente combinados (PENAS et al., 2017; ZHONG et al., 2017).

No quadro 1, são apresentas as principais características identificadas e apresentadas nos artigos estratificados da presente pesquisa, e, ordenadas de acordo com o número de citações.

<b>Características</b>	<b>Número de citações</b>
Conectividade/Comunicação	60
Auto-capacidades/Autônomo	57
Controle em tempo real	55
Interoperabilidade	55
Responsividade	52
Previsibilidade/Capacidade analítica	51
Inteligência/Capacidade cognitiva	50
Adaptabilidade/Flexibilidade	47
Eficiência	34
Resiliência/Confiabilidade	31
Segurança/Privacidade	24
Rápido processamento	21
Robustez	19
Disponibilidade	15
Acesso remoto	15
Transparência	8

**Fonte: Autores**

A crescente conectividade, ou seja, a capacidade de configurar e usar conexões com outros elementos do sistema, abre caminho para vários tipos de integração, oferecendo

oportunidades para estender novos tipos de serviços a produtos já existentes no mercado (MONOSTORI et al., 2016).

De acordo com Lee et al. (2015), o CPS fundamenta-se em dois componentes funcionais: a conectividade avançada, que garante a aquisição de dados em tempo real do mundo físico para o mundo virtual, e a gestão inteligente de dados, uma capacidade analítica que constrói o espaço cibernético.

Para Wang et al. (2015), a maioria dos CPS já se constituem de sistemas de computação distribuídos, implicando em um controle descentralizado que permite sua integração com serviços e funções semelhantes dentro de um mesmo nível de abstração e, conseqüentemente, provisionar serviços de fabricação sob demanda.

Para Peres et al. (2018), ainda há uma notória necessidade de combinar fluxos de dados em tempo real do chão de fábrica com dados históricos ao longo de toda a cadeia de produção, o que permitirá a adaptação dos algoritmos de análise e monitoramento de modo a gerar dados preditivos que podem ser definidos como prováveis estados futuros de um processo.

Ainda, segundo Zhong et al. (2017), as informações transmitidas em rede precisam ser interpretadas de modo consistente dentro dos processos para que os componentes que operam em cada um dos estágios das linhas de produção e montagem possam cooperar perfeitamente uns com os outros, ditando o melhor ritmo de produção.

Conforme apresentado por Zhang et al. (2017), o modelo de auto-organização orientado por tarefas é capaz de fornecer um plano inicial de produção, porém ainda é difícil para as fábricas responder e lidar com as ocorrências devido à falta de feedback em tempo real dos equipamentos. Com isso, faz-se necessário também a inclusão de um modelo auto-adaptativo que permite descobrir, identificar, e eliminar ou diminuir ativamente as interferências causadas.

Para Mittal et al. (2017), a responsividade pode ser considerada como a capacidade de um sistema produtivo em fornecer rapidamente os produtos desejados aos clientes através de tecnologias que integram um controle inteligente. Como os sistemas de produção físico-cibernéticos coletam dados sobre a fábrica, suas capacidades computacionais permitem também o processamento dessas informações a fim de produzir uma visão integrada das ações a serem executadas.

De acordo com Liu et al. (2017) a previsibilidade pode ser definida como a capacidade do CPS de prever o comportamento do sistema, detectando falhas e eventos inesperados e identificando as possíveis causas. Desta maneira, os equipamentos podem alocar os recursos de acordo com tarefas concorrentes e em qualquer momento, garantindo que as tarefas continuem a ser cumpridas.

Como os recursos de fabricação são integrados e automatizados cada vez mais além dos processos convencionais de produção, novas vulnerabilidades surgiram nos sistemas. Para Tuptuk e Hailes (2018), a segurança deve ser um processo contínuo que se inicia antes da fase de projeto e deve permear ao longo de todas as etapas de implementação de um sistema físico-cibernético. Segundo os autores, a flexibilidade para adicionar ou remover subsistemas faz com que surjam novas ameaças, o que exige uma revisão no quesito segurança do projeto de toda a planta.

Os sistemas físico-cibernéticos contêm diferentes tipos de dispositivos que podem ser conectados à rede para aquisição rápida de dados. Contudo, de acordo com Fatorachian e Kazemi (2018), para que todas as máquinas sejam capazes de se conectar e trocar informações entre si, é necessário que possuam uma elevada capacidade de

processamento de modo com que as informações sejam transmitidas de maneira eficiente, segura, confiável e em tempo real.

Ainda, segundo Cheng et al. (2018), considerando todos as interatividades dos processos interoperáveis, é necessário que exista transparência no compartilhamento de informações para que as previsões dos sistemas sejam realistas o suficiente a fim de tomar ações concretas.

Dentro de um cenário de personalização em massa, a resiliência é um fator de extrema importância para que o equipamento seja capaz de manter o seu nível de desempenho sob diferentes condições e com alta confiabilidade, o que, segundo Mittal et al. (2017), permitirá a flexibilidade das linhas de fabricação.

Conforme apresentado por Lee et al. (2017), nos sistemas de produção preditivos, os equipamentos inteligentes são equipados com auto-consciência para prever e reconfigurar a fábrica em cada de eventos defeituosos, incorporando dados que refletem o histórico da máquina e apoiam as operações. Para Serpanos (2018), a utilização das tecnologias em rede para transferir dados proporciona oportunidades de combinar processos de maneira distribuída, coletando dados remotamente para análise, otimização e gerenciamento de processos.

Por último, segundo Liu et al. (2017), para que o equipamento seja capaz de superar erros na rede, é necessário o estabelecimento de um sistema robusto capaz de lidar com incertezas e responder de forma flexíveis a eventualidades em massa, pois, com os recursos de fabricação integrados cada vez mais além dos processos convencionais de produção, novas vulnerabilidades surgiram nos sistemas. Com isso, outro fator importante é a segurança e privacidade dos usuários e equipamentos, pois, para Wang et al. (2015), a segurança dos sistemas de manufatura inteligente é uma questão que, caso não desenvolvida efetivamente, poderá barrar grandes avanços na implementação do CPS nas indústrias.

## **5. Considerações finais**

Visando explorar as características e aplicações dos sistemas físico-cibernéticos, o presente estudo apresenta uma contribuição na área de pesquisa da quarta revolução industrial, uma vez que oferece uma ampla visão de aplicações para a tecnologia em um campo que é extensamente estudado.

Através da metodologia adotada, foi possível identificar e definir diferentes características pertinentes aos sistemas físico-cibernéticos, assim como suas relações e importância de aplicação na indústria de modo a tornar a manufatura inteligente uma realidade.

Observou-se também que se trata de um tema que possui um amplo estudo teórico, em que diferentes autores apresentam conceitos relacionados às necessidades e características pertinentes aos sistemas de produção para que possam ser considerados como um CPS.

No entanto, devido às dificuldades em determinar uma arquitetura genérica para sua implementação, existe ainda a necessidade da realização de estudos práticos, o que abre portas para pesquisas futuras sobre a conversão de equipamentos já utilizados na indústria em sistemas físico-cibernéticos.

## **Referências**

BARTODZIEJ, C. **The Concept Industry 4.0: An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics**. Springer Gabler, Berlim, 2017.

- CHENG et al. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, p. 1209-1221, 2018.
- DALENOGARE et al. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, p. 383-394, 2018.
- DING et al. Defining a Digital Twin-based Cyber-Physical Production System for autonomous manufacturing in smart shop floors. **International Journal of Production Research**, p. 1-20, 2019.
- FATORACHIAN, H.; KAZEMI, H. A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalization framework. **Production Planning & Control**, v. 29, p.633-644, 2018.
- GEISBERGER, M.; BROY, E. **Cyber-Physical Systems: Driving force for innovation in mobility, health, energy and production**. Acatech POSITION PAPER, Springer Verlag, Berlin, 2011.
- GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.
- HE, Kaifei; JIN, Man. **Cyber-Physical System for maintenance in industry 4.0**. Jonkoping, 64 p., 2016. Dissertação (Programa de Mestrado em Sistemas de Produção) – Jonkoping University.
- HU et al. Review of Cyber-Physical System Architecture. **IEEE 15th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops**, p. 25-30, 2012.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTE, W.; HELBIG, J. **Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0**. ACATECH: National Academy of Science and Engineering, Munique, 2013.
- KUMAR et al. Ontologies for Industry 4.0. **The Knowledge Engineering Review**, v. 34, n. 17, p. 1-14, 2019.
- LEE, E. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models. **Sensors**, v. 15, p. 4837-4869, 2015.
- LEE, J.; AZAMFAR, M.; SINGH, J. A blockchain enabled Cyber-Physical System architecture for Industry 4.0 manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 20, p. 34-39, 2019.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.
- LEE, J.; JIN, C.; BAGHERI, B. Cyber physical systems for predictive production systems. **Production Engineering**, v. 11, p. 155-165, 2017.
- LINS, R.; ARAUJO, P.; CORAZZIM, M. In-process machine vision monitoring of tool wear for Cyber-Physical Production Systems. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 61, 101859, 2020.

- LIU et al. Review on Cyber-physical Systems. **IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica**, v. 4, n. 1, p. 27-40, 2017.
- MACDOUGALL, W. **Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future Germany**. Trade and Invest, Berlin, 2014.
- MIGUEL, P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- MITTAL et al. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 233, n. 5, p. 1342-1361, 2017.
- MONOSTORI et al. Cyber-physical systems in manufacturing. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 65, p. 621-641, 2016.
- MONOSTORI, L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 9-13, 2014.
- PENAS et al. Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems. **Computers in Industry**, v. 86, p. 52-69, 2017.
- RAJKUMAR, R. A Cyber-Physical Future. Institute of Electrical and Electronics Engineers, **Proceedings of the IEEE 100 (Special Centennial Issue)**, p. 1309-1312, 2012.
- ROJKO, A. Industry 4.0 Concept: Background and Overview. **Journal of Interactive Mobile Technologies**, v. 11, n. 5, p. 77-90, 2017.
- SANTOS et al. Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.
- SCHUH et al. **Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies**. Acatech STUDY, Munique, 2017.
- SERPANOS, D. The Cyber-Physical Systems Revolution. **Computer**, v. 51, n. 3, p. 70-73, 2018.
- STOCK et al. Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 118, p. 254-267, 2018.
- TANG et al. Using autonomous intelligence to build a smart shop floor. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, p. 1597-1606, 2018.
- TUPTUK, N.; HAILES, S. Security of smart manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 47, p. 93-106, 2018.
- WAN et al. Investigation on Composition Mechanisms for Cyber Physical Systems. **International Journal of Design, Analysis and Tools for Circuits and Systems**, v. 2, n. 1, p. 30-40, 2011.

WANG et al. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2015.

WANG et al. Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. **Computer Networks**, v. 101, p. 158-168, 2016.

ZHANG et al. Agent and Cyber-Physical System Based Self-Organizing and Self-Adaptive Intelligent Shopfloor. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 13, n. 2, p. 737-747, 2017.

ZHONG et al. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. **Engineering**, v. 3, p. 616-630, 2017.