

Avaliação de modelo de maturidade RAMI de Indústria 4.0: Estudo de caso de um sistema de alocação de recursos

Rafael S Mendonca* Marcelo A. Oliveira* Florindo A. C. Ayres Jr* Renan L. P. Medeiros* Vicente F. Lucena Jr.*

***Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, AM (e-mails: mendoncarms@ufam.edu.br, marcelooliveira@ufam.edu.br, florindoayres@ufam.edu.br, renanlandau@ufam.edu.br, vicente@ufam.edu.br)

Abstract: The concept of Industry 4.0 is being widely implemented in all phases of industry and brings the proposal of possible solutions for more complex applications such as data flow, modelling, simulation of physical systems, safety, and security. Among the technologies related to Industry 4.0, we have the digital twin that is based on the physical models generated and synchronized by the execution of the process life cycle. Thus, the main goal of Digital Twin is to provide information about the physical system to build its representation on a virtual twin. We also have the maturity analysis proposed by RAMI to evaluate in which context of Industry 4.0 the system is.

Resumo: O conceito da indústria 4.0 vem sendo amplamente implementado em todas as fases da indústria e traz a proposta de possíveis soluções para aplicações mais complexas tais como fluxo de dados, modelação, simulação de sistemas físicos, segurança e proteção. Dentre as tecnologias relacionadas a indústria 4.0 temos o gêmeo digital que se baseia nos modelos físicos gerados e sincronizados pela execução do ciclo de vida do processo. Assim, o principal objetivo da Digital Twin (Gêmeo Digital) é fornecer a informação sobre o sistema físico para construir a sua representação sobre um gêmeo virtual. Temos também a análise de maturidade proposta por RAMI para avaliar em que contexto da indústria 4.0 o sistema se encontra.

Keywords: industry 4.0, digital twin, RAMI model, Architecture.

Palavras-chaves: Indústria 4.0; Digital Twin; Modelo RAMI; Arquitetura.

1. INTRODUÇÃO

O Digital twin (DT) integra diversas informações do sistema físico para construção do virtual com dados das variáveis do processo ao longo de seu ciclo de vida do processo ou do produto. Um DT pode existir ao longo das fases de planejamento, concepção e implementação proporcionando a análise de resultados relacionados as simulações, funcionamento do sistema, monitoramento e podem ser avaliadas antes do produto final ser fabricado, facilitando a monitorização em tempo real e a avaliação da qualidade e robustez do processo (Delfino 2019).

O DT de um sistema físico pode simular os ciclos de vida do sistema e refletir a ação sincronizada do gêmeo físico no virtual e vice-versa, tendo assim uma integração dos mundos virtual e físico (Haag 2018). Assim, o ciclo de vida do produto é um conjunto de instruções que acontecem no mundo físico e que são representados no virtual e contém informações sobre funcionamento e componentes do sistema (Naves et. al 2016). Dessa forma o DT pode reproduzir o estado do sistema e atualizar os dados em tempo real proporcionando que os modelos virtuais possam melhorar continuamente através dessas atualizações a partir de ativos físicos.

Considerando as diversas aplicações utilizando o DT, temos um cenário promissor para uma maior investigação sobre a

arquitetura do DT, aplicações e conceitos relacionados à indústria 4.0, atualizações de sistemas antigos, sistemas inteligentes, dentre outros. Neste contexto, nossa proposta visa a investigação sobre DT e suas principais características, arquitetura e com definições de perspectiva e apresenta os principais desafios e tendências entre eles e a possibilidade de atualização de um sistema legado utilizando a técnica de *Retrofitting*.

Neste trabalho são mostrados alguns conceitos vinculados a indústria 4.0 e suas tecnologias. E os conceitos de cada etapa para a construção da arquitetura e da análise do estudo de caso na seção 2, conceitos de DT na seção 3, a metodologia de funcionamento da arquitetura na seção 4, descrição do estudo de caso na seção 5, e os resultados obtidos na seção 5, além de uma breve conclusão do trabalho.

2. CONCEITOS BÁSICOS

As revoluções industriais tem algumas características que são relevantes para o contexto teórico do trabalho e a seguir são sumarizadas e resumidas (Tien 2012): na 1º revolução o principal fator foi a capacidade de produção que aumentou através de construção e utilização de máquinas movidas a água e vapor; na 2º revolução a principal característica é a produção e distribuição em grande massa de cargas e de trabalho, ou seja, produção em massa e produção em linha de montagem e também a maior utilização da energia elétrica.

Na 3ª revolução o fator mais importante é a automatização parcial e tecnologias de informação, a aplicação de manufatura modular e/ou flexível (Cabrera 2019). Por fim, na 4ª revolução temos a fábrica inteligente, interconectada via rede, com capacidade de comunicação e customização proporcionada pela utilização de tecnologias tais como sistemas ciber físicos (CPS) (Jazdi 2016) - dispositivos inteligentes e a Internet das Coisas (IoT) cloud computing (CC) – suportar a comunicação entre o ambiente industrial com outras tecnologias (Venegas 2018), Big data - informações geradas por sensores, atuadores e interações no ciclo de vida do processo (Pham 2020) e por fim o DT onde a ideia básica é criar uma representação digital de um sistema ou elemento físico (Kaiblinger 2022).

Dentre as tecnologias vinculadas a indústria 4.0 temos o Sistema Ciber Físico - CPS que se refere a um sistema que integra tecnologias modernas de computação e comunicação e conceitos de componentes cibernéticos e físicos através de sensores, atuadores, redes de comunicação, e outras tecnologias. Assim, pode ser descrito como um conjunto de sistemas físicos ligados a uma rede que têm um nível superior de integração entre produtos e processos, onde os elementos da cadeia de produção têm a características "inteligente" como pré-requisito (Schluse 2018).

3. DIGITAL TWIN

Os ciclos de vida do sistema físico refletem-se no DT através da obtenção de dados do sistema, que por sua vez reproduz o funcionamento do modelo com informações referente aos seus dados, funções, e capacidades de comunicação no espaço digital (Schluse 2018). Normalmente, se ocorrerem alterações no sistema físico, os modelos são automaticamente atualizados para reproduzir o mesmo evento.

A manufatura atual une, utilizando aplicação de DT, as representações do mundo virtual e físico através de tecnologias como CPS e da IoT (Hung 2022 e Möller 2016) que são conceitos comuns dentro da Indústria 4.0 e que propõem a fábrica inteligente da próxima geração para alcançar uma alta adaptabilidade, mudanças rápidas no design, tecnologia de informação digital, e um processo mais flexível. De acordo com Talkhestani (2019), as definições DT contêm três partes na literatura: modelos e dados, interconexão e simulação.

Assim, DT refere-se a uma réplica digital dos ativos físicos (gêmeo físico), neste caso, que segue o ciclo de vida para monitorizar, controlar, ou otimizar os processos. Além disso, um gêmeo digital inteligente consiste num gêmeo digital com todas as características relevantes e algoritmos adicionais para implementar soluções de inteligência artificial inseridas como parte do processo (Talkhestani 2019).

A simulação DT pode reduzir condições imprevistas e indesejáveis causadas por diversos fatores, tais como erro de comunicação, falha de rede, falsas interações, e outros. Esta capacidade é explicada pelo fato de o DT captar e processar a informação atual sobre o sistema em funcionamento podendo prever essas condições (Grievies 2017). O DT pode processar dados para implementar tarefas de diagnóstico, otimização e

previsão. Contudo, é um desafio realizar a previsão com precisão sistemas estruturalmente complexos, porque é necessário um fluxo de dados considerável para fornecer uma representação de dados adequada.

Uma das abordagens de DT é a com foco em sistemas ciber físico, são desenvolvidos modelos virtuais no ciberespaço para espelhar as variáveis e os comportamentos dos seu correspondente objeto físico no mundo real (Steinmetz 2018). Assim, é possível registrar a informação do estado do elemento físico do sistema e garantir que este é seguro e funciona eficientemente, resultando num funcionamento inteligente dos dispositivos físicos.

O DT suporta diversas características tais como o processo de tomada de decisão, configuração, reconfiguração, planejamento, comissionamento, e monitorização das condições no decorrer do processo. Portanto podemos utilizar o DT como um sistema de gestão em tempo real monitorando o estado do processo e inferindo sobre o comportamento deste ao logo do ciclo de vida do processo.

4. ARQUITETURA PROPOSTA

Na abordagem em que o DT oferece serviços ao CPS a fim de controlar e supervisionar as variáveis do sistema e seu ciclo de vida do processo. Dessa forma, de acordo com a literatura, em (Papazoglou et al 2019), o modelo conceitual mais proeminente centrado na Indústria 4.0 (I4.0) é o modelo de referência para a indústria 4.0 (*The architectural reference model for industry 4.0 - RAMI 4.0*), proposto pela iniciativa Plattform Industrie 4.0 do governo federal alemão é baseado nos princípios e requisitos da indústria 4.0.

O modelo RAMI 4.0 é um modelo de arquitetura de referência focado nos sistemas da I4.0 e tem sua base no modelo SGAM (Smart Grid Architecture Model) para cumprir os requerimentos da I4.0 ou seja, a integração vertical e horizontal, integração de engenharia e ciclo de vida do produto (Adolph 2016). Assim, o modelo integra diferentes perspectivas e fornece uma maneira simples de ver as tecnologias relacionadas a I4.0. As normas e regulações do modelo estão listadas na Tabela 1:

Tabela 1. Normas e regulamentação

IEC 63088	Produção Inteligente – Modelo e Arquitetura de Referência para Indústria 4.0
IEC 62890	Gerenciamento do Ciclo de Vida para Produtos e Sistemas
IEC 62264	Integração de Sistemas de Produção na Empresa (MES/MOM)
IEC 61512	Controle de Batelada – Processos Produtivos em Lote

O modelo RAMI é dividido em 3 eixos ou níveis principais: hierarquia, arquitetura e ciclo de vida. A hierarquia define a interconexão de todos os elementos da produção, incluindo dados, usuário e equipamentos. Representam as diversas funcionalidades dentro das fábricas I4.0: flexível, interoperável e distribuída e interação em todos os níveis hierárquicos.

A arquitetura define a verticalização das informações, suas interfaces, interpelações e uso. Temos assim a descrição de seis camadas verticais que se referem ao fluxo de dados do processo produtivo industrial: camada de negócios; camada de Funções; camada de informação; camada de comunicação; camada de integração e camada de ativos (Binder 2021).

O ciclo de vida compreende todo o ciclo de processo do produto, do planejamento e desenvolvimento, até a sua comissionamento. Este nível baseia-se na IEC 62890 e sempre leva em consideração a segurança em todas as etapas do processo de produção do ciclo de vida dos produtos. Os principais requisitos para aplicação do modelo de RAMI são: padronização da linguagem para troca de informações e do protocolo global de comunicação e por fim o *Plug and Play* (Kannan 2017).

Com base no modelo de RAMI foi desenvolvida uma proposta de arquitetura mostrada na Fig. 1 que engloba as características e as principais níveis de abstração e aplicações de forma que funciona de maneira semelhante ao modelo RAMI. O modelo apresentado está dividido em camadas: camada de ativos, camada de integração, camada de comunicação e informação, camada de serviços e camada de gestão.

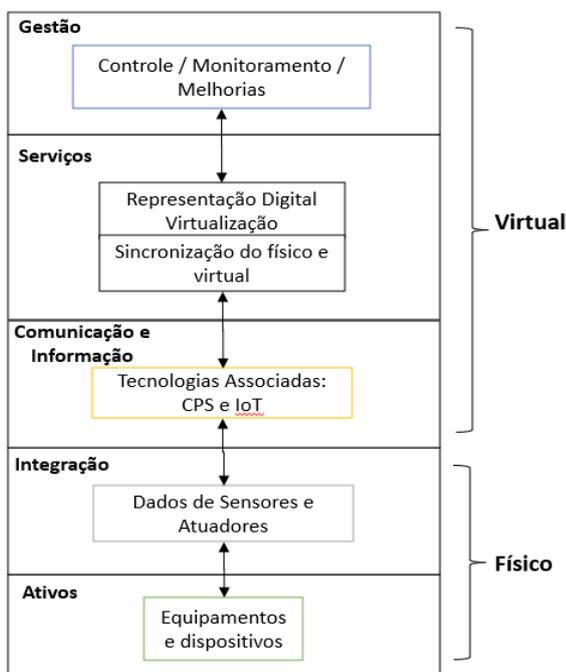


Fig. 1 Proposta de arquitetura

Ativos: os elementos físicos são controlados, e todos os dados sobre o processo são adquiridos e compilados na camada de dados.

Integração: é responsável pela aquisição de informações acerca do sistema físico. Nessa camada os sensores e dispositivos são capazes de coletar informações e enviar para a camada de comunicação. Essa camada assegura a integração entre camadas e faz a ponte entre as camadas físicas e virtuais. Nesta camada, tecnologias de rede como a Internet das coisas interligam processos e sistemas.

Serviços: após a comunicação entre a camada de integração e a camada de serviço inicia-se o processo de sincronização dos dados presentes na camada e os dados da camada física, permitindo o desenvolvimento de DT. O fluxo de dados entre os componentes físicos e as suas representações digitais é contínuo em ambas as direções, formando assim a proposta do DT.

Gestão: é responsável pelo monitoramento e/ou controle do processo e tem como principal meta reduções de custos, redução da degradação do sistema e melhoria de produção fora o gerenciamento do sistema e apresentação ao usuário algumas características do sistema.

Dessa forma utilizaremos uma análise inicial mais simples para avaliar a maturidade da indústria 4.0 com base no modelo de RAMI observando os parâmetros relacionados à Fabrica inteligente presente na Tabela 2 e produtos inteligentes presente na Tabela 3 que foram adaptados do livro de Lichtblau (2015).

Tabela 2. Níveis e Características - Fábrica Inteligente

Nível	Características – Fábrica Inteligente
5	A infraestrutura de equipamentos já satisfaz as funcionalidades futuras Suporte abrangente ao sistema de TI dos processos
4	A infraestrutura atual do equipamento atende aos requisitos ou é atualizável Suporte abrangente de TI de processos
3	Funcionalidades futuras (parcialmente) satisfeitas ou totalmente atualizáveis Sistemas de TI suportam processos e são ligados através de interfaces
2	Funcionalidades futuras (parcialmente) satisfeitas ou atualizáveis até certo ponto Algumas áreas da empresa apoiadas por sistemas de TI e sistemas integrados
1	A infraestrutura atual do equipamento satisfaz alguns dos requisitos futuros Processo empresarial principal suportado pelo sistema de TI
0	Não há requisitos atendidos

Tabela 3. Níveis e Características - Produtos Inteligentes

Nível	Características – Produtos Inteligentes
5	Os produtos apresentam funcionalidades adicionais abrangentes Uso abrangente de dados coletados para várias funções
4	Os produtos apresentam funcionalidades adicionais em diferentes áreas Uso direcionado de dados coletados para determinadas funções
3	Os produtos têm várias funcionalidades adicionais interconectadas Alguns dos dados coletados usados para análise
2	Produtos têm primeiros sinais de funcionalidades adicionais Dados coletados, mas não analisados/utilizados
1	Produtos têm primeiros sinais de funcionalidades adicionais
0	Não há requisitos atendidos

A análise simplificada e a avaliação dos critérios serão descritas detalhadamente na seção de resultados. No entanto, o ideal seria fazer uma análise completa para poder mensurar e categorizar em que nível de maturidade da indústria 4.0 a fábrica se encontra. Dessa forma, levando em consideração as limitações, realizamos a análise dos dois tópicos acima citados podemos ter uma noção inicial mais básica de que nível as características de produto e fábrica inteligentes se encontram.

5. ESTUDO DE CASO

O sistema adotado neste trabalho é uma representação típica de processo de alocação de recursos que é comum na indústria e está presente em várias linhas de produção do ambiente fabril. Este processo engloba vários sensores e atuadores tais como sensores de presença e indutivos, transportadores, motores, RFID, e um servidor web. Este sistema é composto pelos seguintes módulos e pode ser representado com seu posicionamento indicado na Fig. 2:

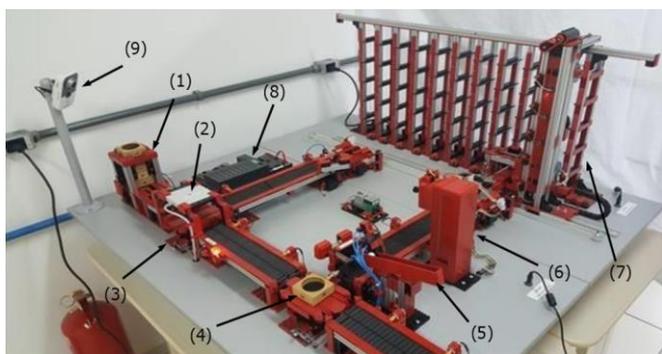


Fig. 1 Planta de alocação de recursos: (1) Alimentador; (2) Sensor RFID; (3) Esteira giratória 1; (4) Esteira giratória 2; (5) Sub processo 1 – alocação de recurso; (6) Sub processo 2 – Tampador de caixas; (7) Estoque; (8) CLP e (9) Câmera.

O processo inicia em (1) e apresenta um suprimento limitado de caixas (o módulo funciona com 6 caixas) que estão em estado de espera na etapa inicial do processo. De forma contínua a caixa é inserida no transportador para realizar a identificação (2) através de um sensor de cor ou RFID. Em seguida, as caixas podem ser enviadas para armazenamento ou clientes, dependendo da ordem de produção executada. O processo é cíclico e é denominado processo por lote (batelada) pois necessita de inserção de novas caixas para iniciar o ciclo novamente.

No passo seguinte, no módulo de registro (2), são implementadas duas opções para identificar cada caixa: um sensor de cor ou um sensor RFID. O objetivo é ler informação na caixa (Identificação e propriedades) e armazenar a variável no banco de dados e torná-la disponível no processo.

A utilização da web Server é feita para monitorar o estado do sistema (se está funcionando ou não) e as variáveis são monitoradas via software onde é possível a visualização passo a passo de cada uma das etapas do processo, bem como os caminhos para o estoque e para os clientes.

Na fase de implantação da identificação das caixas podemos utilizar pelo menos duas abordagens que são identificação através do RFID ou através da identificação por cores. Essa implementação não influencia o funcionamento do Web Server e do banco de dados, pois estes veem apenas as variáveis que são armazenadas e como seguirão para o processo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As representações do DT que podem prever eventos não modelados e emergentes. Quando surge um comportamento não modelado ou imprevisível no processo de produção o sistema pode medir esta informação e tentar resolvê-la através de eventos (regras e intervenções) tais como a previsão e detecção de anomalias no sistema, condições de contorno e/ou funcionamento de uma parte do processo (Mendonca et al. 2022).

O primeiro eixo analisado foi o de fábrica inteligente cuja principal característica é que o sistema de produção funciona sem intervenção humana, ou seja, automática e tem diversos sensores inteligentes inseridos no contexto de internet das coisas e sistemas ciber físicos proporcionando assim a integração entre os sensores e atuadores, sistema físico e virtual. Os critérios utilizados são listados a seguir e apresentados na Tabela 4: (1) modelagem digital; (2) estrutura de equipamentos e (3) tecnologias da indústria 4.0.

Tabela 4. Análise de critério fábrica inteligente

Critérios	Fábrica Inteligente		
	Análise	Nível	Média
(1)	O sistema tem suporte para visão computacional, e apesar de precisa de uma série de atualizações no contexto da i4.0 é possível adquirir dados dos sensores para o modelo virtual; nota-se pouca comunicação entre sensores, porém tem-se uma interface que dá suporte ao monitoramento destes.	3	3
(2)	O sistema está preparado para receber uma futura atualização da estrutura física de forma a otimizar a aquisição de dados e o funcionamento mecânico do sistema. A estrutura M2M e equipamentos são atualizáveis	3	
(3)	O sistema conta com um gerenciamento central, uma interface com todas as informações do sistema. Identifica-se que é possível a atualização de sensores e atuadores, bem como um web server para melhor se adaptar ao contexto de i4.0.	3	

Inicialmente, após as devidas adequações e testes foram mensuradas informações relevantes para poder responder: qual o nível de maturidade da Indústria 4.0 no estudo de caso apresentado? Assim, em conjunto com o funcionamento da planta física, foram analisados os resultados obtidos e em

cima disso foi feita a avaliação da maturidade do estudo de caso lembrando que são limitadas aos dois eixos de fábrica inteligente e produto inteligente.

Após a análise é possível identificar que o estudo de caso está classificado em uma categoria intermediária que já passou pelos passos iniciais e está em um contexto a frente de muitas outras aplicações e já está utilizando tecnologias da indústria 4.0 no seu ambiente.

As definições, abordagens e caracterização de diferentes tecnologias no contexto do DT estão tornando-se cada vez mais generalizadas principalmente por causa da I4.0. Assim, podemos vislumbrar possibilidades relacionadas ao grau de complexidade e fidelidade da representação dos modelos propostos facilitado pela análise de maturidade apresentada.

O segundo eixo analisado foi o de produtos inteligentes cuja principal característica é um produto unificado de aplicação de produção automática e flexível. Os produtos físicos são equipados com uma tag RFID para identificar o produto e posteriormente coletar dados sobre seu próprio status e proporcionando dentre outros fatores um controle melhor de produtos em estoque facilitando a comunicação entre clientes e fabricantes, por exemplo. Os critérios utilizados são listados a seguir e apresentados na Tabela 5: (1) funcionalidades do produto e (2) dados que podem ser analisados.

Tabela 5. Análise de critério produtos Inteligentes

Critérios	Fábrica Inteligente		
	Análise	Nível	Média
(1)	O estudo de caso não possui ferramentas implementadas para diagnóstico de falhas, predição e descrição de problemas de processo e operacionais. Contudo os produtos são identificados e cada um deles tem um ID específico no sistema proporcionando a possibilidade de atualização futura.	1	2
(2)	Os dados são coletados no ponto inicial e alimentam o sistema com a identificação do tipo de produto podendo customizar futuramente o processo uma vez que sejam implementadas formas de monitorar esse produto no decorrer do processo	2	

Na análise de produtos inteligentes podemos identificar que apesar das limitações do estudo de caso ele consegue se enquadrar nos passos iniciais de classificação do modelo de maturidade pois proporciona que futuramente sejam atualizados os sensores de forma a melhor utilizar os dados coletados. Atualmente é utilizado uma tag RFID para identificar o produto, porém temos apenas 1 leitor no início deixando uma lacuna que pode ser preenchida quando

inserido outro leitor para redundância e geração de dados como produtos produzidos, defeituosos, produtos que foram para o estoque e produto que foram para o cliente.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo de avaliação de maturidade da Indústria 4.0 é simples e permite mensurar as características para identificar em que contexto a empresa ou na situação deste trabalho o estudo de caso de forma a definir capacidades atuais e requisitos futuros, fornecendo informações relevantes para o caminho até a indústria 4.0.

A solução ou previsão de alguns problemas não previstos inicialmente no modelo do sistema representam uma situação promissora porque numa mudança num evento ou situação indesejável normalmente não descrita no modelo é possível no modelo de arquitetura proposto, na camada de serviços e gestão tentar resolve-lo combinando conceitos de IA, aprendizagem de máquinas e redes DT com o objetivo de adaptar o sistema à nova situação.

Para trabalhos futuros sugere-se que seja feita uma análise detalhada acerca do modelo de maturidade para assim definir e planejar as etapas seguintes que correspondem a atualização do sistema em questão e adequação deste a um contexto integrado a tecnologias da indústria 4.0.

O modelo de avaliação de maturidade da Indústria 4.0 é simples e permite mensurar as características para identificar em que contexto a empresa ou na situação deste trabalho o estudo de caso de forma a definir capacidades atuais e requisitos futuros, fornecendo informações relevantes para o caminho até a indústria 4.0.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa, realizada no âmbito do Projeto Samsung-UFAM de Educação e Investigação (SUPER), nos termos do artigo 48 do Decreto nº 6.008/2006(SUFRAMA), foi financiada pela *Samsung Electronics of Amazonia Ltda.*, nos termos da Lei Federal nº 8.387/1991, através do acordo 001/2020, assinado com a Universidade Federal do Amazonas e a FAEPI, Brasil.

REFERÊNCIAS

- Delfino, L.R.; Garcia, A.S.; de Moura, R.L. Industrial Internet of Things: Digital Twins. In Proceedings of the 2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Aveiro, Portugal, 10–14 November 2019; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 2021; pp. 1–3.*
- Haag, S.; Anderl, R. Digital twin—Proof of concept. Manuf. Lett. 2018, 15, 64–66.*
- Naves, E.L.M.; Bastos, T.F.; Bourhis, G.; Silva, Y.M.L.R.; Silva, V.J.; Lucena, V.F. Virtual and augmented reality environment for remote training of wheelchairs users: Social, mobile, and wearable technologies applied to*

- rehabilitation. In *Proceedings of the 2016 IEEE 18th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), Munich, Germany, 14–16 September 2016; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 2016.*
- Schluse, M.; Priggemeyer, M.; Atorf, L.; Rossmann, J. *Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. IEEE Trans. Ind. Inform.* 2018, 14, 1722–1731.
- Talkhestani, B.A.; Jung, T.; Lindemann, B.; Sahlab, N.; Jazdi, N.; Schloegl, W.; Weyrich, M. *An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System. Automatisierungstechnik* 2019, 67, 762–782.
- Grieves, M.; Vickers, J. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems; Kahlen, F.J., Flumerfelt, S., Alves, A., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2017; pp. 85–113.*
- Steinmetz, C.; Rettberg, A.; Ribeiro, F.G.C.; Schroeder, G.; Pereira, C.E. *Internet of Things Ontology for Digital Twin in Cyber Physical Systems. In Proceedings of the 2018 VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC), Salvador, Brazil, 5–8 November 2018; pp. 154–159.*
- Hung, M.-H.; Lin, Y.-C.; Hsiao, H.-C.; Chen, C.-C.; Lai, K.-C.; Hsieh, Y.-M.; Tieng, H.; Tsai, T.-H.; Huang, H.-C.; Yang, H.-C.; et al. *A Novel Implementation Framework of Digital Twins for Intelligent Manufacturing Based on Container Technology and Cloud Manufacturing Services. IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2022, 1–17.
- Möller, D.P.F. *Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems—Concepts Design Methods and Applications; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016.*
- Mendonca, R. S.; Lins, S. O.; Bessa, I.V.; Ayres Jr, F.A.C.;; Medeiros, R.L.P.; Lucena Jr, V.F., "Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges." *Processes* 2022, 10, 744.
- J. M. Tien, "Towards the next industrial revolution," 2012 4th IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics, 2012.
- M. Peña-Cabrera, V. Lomas and G. Lefranc, "Fourth industrial revolution and its impact on society," 2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2019.
- Jazdi, N. *Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. In Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, Stuttgart, Germany, 22–24 May 2014; pp. 1–4.*
- Ch, G.D.S.; Venegas, C.; Baca, M.; Rodriguez, I.; Marrone, L. *Open Middleware proposal for IoT focused on Industry 4.0. In Proceedings of the 2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA), Barranquilla, Colombia, 1–3 November 2018.*
- Pham, Quoc-Viet et al. "Artificial Intelligence (AI) and Big Data for Coronavirus (COVID-19) Pandemic: A Survey on the State-of-the-Arts." *IEEE Access: practical innovations, open solutions* vol. 8 130820-130839. 15 Jul. 2020.
- Kaiblinger, A.; Woschank, M. *State of the Art and Future Directions of Digital Twins for Production Logistics: A Systematic Literature Review. Appl. Sci.* 2022
- M. P. Papazoglou and A. S. Andreou. *Smart connected digital factories: Unleashing the power of industry 4.0. In Proceedings of the International Conference on Cloud Computing and Services Science (CLOSER'18). Communications in Computer and Information Science, Vol. 1073. 77–101, 2019.*
- L. Adolph, "German Standardization Roadmap Industry 4.0", *DIN/DKE Roadmap*, pp. 1-77, 2016.
- C. Binder, A. Calà, J. Vollmar, C. Neureiter and A. Lüder, "Automated Model Transformation in modeling Digital Twins of Industrial Internet-of-Things Applications utilizing AutomationML," 2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2021.
- S. M. Kannan et al., "Towards Industry 4.0: Gap Analysis between Current Automotive MES and Industry Standards Using Model-Based Requirement Engineering," 2017 IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW), 2017.
- Lichtblau K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E. & Schröter, M. *Industrie 4.0-Readiness Online Self-Check for Businesses, (2015).*