

Um Panorama Comparativo de Arquiteturas de *Digital Twin* no Contexto de Internet das Coisas

Renato Alves de Oliveira¹, Atslands Rego da Rocha², Carina Teixeira de Oliveira¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

²Universidade Federal do Ceará (UFC)

Abstract. *The growth of the Internet of Things (IoT) at a global level has attracted more and more attention to studies related to the topic. In the context of IoT, a topic that has gained great relevance in the marketing and academic fields is the Digital Twin (DT). Among the main open questions in this topic, there is the lack of a generic and unified architectural pattern, which encompasses the essential needs of a DT project. This article presents a comparative overview of modern DT architectures in the context of IoT. The results presented point to guidelines capable of helping designers and researchers in the planning of DT architectures in IoT scenarios.*

Resumo. *O crescimento da Internet das Coisas (Internet of Things - IoT) a nível global vem atraindo cada vez mais atenção para estudos relacionados ao tema. No contexto de IoT, um tema que vem ganhando grande relevância nos âmbitos mercadológico e acadêmico é o Gêmeo Digital (Digital Twin - DT). Dentre as principais questões em aberto neste tema, destaca-se a inexistência de um padrão arquitetural genérico e unificado, que englobe as necessidades essenciais de um projeto de DT. Este artigo apresenta um panorama comparativo de arquiteturas modernas de DT no contexto de IoT. Os resultados apresentados apontam diretrizes capazes de ajudar projetistas e pesquisadores no planejamento de arquiteturas de DT em cenários IoT.*

1. Introdução

A área de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) vem ganhando grande destaque a nível global nos últimos anos. Essa realidade pode ser observada sob três perspectivas: i) O crescimento global da quantidade de dispositivos IoT, que aumentou de 1.1 bilhão em 2011 para 13.8 bilhões em 2021 [IoT-Analytics 2020]; ii) O aumento de investimento financeiro, que foi de US\$ 646 bilhões em 2018, e para 2027 tem previsão de US\$ 2 trilhões [Multiple 2022]; iii) O aumento no volume de dados gerados pela IoT, que em 2019 era de 13.6 ZB, com previsão de aumento para 79.4 ZB em 2025 [Statista 2020].

No contexto de IoT, um tema com grande relevância é o *Digital Twin* (DT), facilitador no processo de troca de informações entre ambientes virtuais e físicos. O termo remete a uma Entidade Virtual (EV) como uma cópia exata de uma Entidade Física (EF) [Qi et al. 2021]. Tomando como exemplo um satélite (EF) e uma central de controle que possua uma EV desse satélite, os dados com origem no ambiente físico e destino para o virtual têm o intuito de atualizar o estado da EV, mantendo-a pariforme com a EF. De tal forma, é possível detectar, por exemplo, se há algum defeito com o satélite, e se são necessárias medidas corretivas ou preventivas. Já os dados com origem no ambiente virtual

com destino ao físico têm objetivo de executar ações na EF, como acionar algum software de reparo automático ou protocolo de segurança, mudar a direção da antena, etc. Dado o exposto, um dos objetivos do DT é a facilitação de atividades de monitoramento e controle automático de dispositivos IoT [Vuković et al. 2021], mesmo que haja milhares de quilômetros entre a EF e o local no qual sua contraparte virtual (a EV) esteja armazenada.

O DT vem ganhando grande destaque na indústria e academia. O programa espacial Apollo/NASA foi o primeiro a usar o conceito através da construção de uma EV de um veículo espacial [Liu et al. 2021]. Com isso a NASA pôde, na Terra, espelhar, simular e prever através da EV as condições da EF no espaço. No mais, o consórcio *China Association for Science and Intelligent Manufacturing* considera o DT como um dos 10 principais avanços científicos e tecnológicos em manufatura inteligente [He and Bai 2021]. A Gartner, uma empresa de consultoria e pesquisa de TI, destaca o DT com uma das dez principais tendências de tecnologia estratégica [Gartner 2019]. E a Cisco, uma multinacional da área de TI, definiu o DT como um dos pilares da Indústria 4.0 [Cisco 2019].

Apesar da relevância do DT para o mundo atual, ainda não há uma padronização arquitetural de DT, nem no que diz respeito a quantidade, tipo e funcionamento de camadas e componentes arquiteturais, nem à nomenclatura dos mesmos [Lu et al. 2020, Fuller et al. 2020]. O uso de diferentes nomenclaturas para camadas/componentes dificulta a capacidade de identificar semelhanças nas estruturas e contribui para retardar o entendimento pleno do tema por parte de novos pesquisadores e profissionais afeitos à temática [Nwogu et al. 2022]. Especificamente, o principal enfoque dos trabalhos científicos de DT atuais é em equipamentos de alto valor do ramo industrial e manufatureiro [Liu et al. 2021]. Já as pesquisas com enfoque generalista, que visam compreender a essência das arquiteturas de DT independente da área de aplicação, são mais escassas.

Diante dessa problemática, este artigo apresenta um panorama comparativo entre diversas arquiteturas modernas de DT no contexto de IoT. Além disso, o trabalho apresenta: i) uma Arquitetura Conceitual a partir da comparação das diversas Camadas e Componentes Arquiteturais (CCAs) identificados na literatura revisada; ii) discute as características das CCAs pertencentes à Arquitetura Conceitual; iii) indica os termos sinônimos encontrados na literatura para as CCAs da proposta; e iv) propõe uma taxonomia que, para cada CCA, reúne a carga semântica de todos os termos sinônimos encontrados. Os resultados e discussões apresentados ao longo do trabalho apontam diretrizes capazes de ajudar projetistas e pesquisadores de redes no planejamento de arquiteturas de DT em cenários de Internet das Coisas.

2. Metodologia

A metodologia adotada para implementação da proposta foi dividida em 5 etapas. Na **Etapa 1** foi aplicada a *string* de busca (“*iot*” OR “*internet of things*”) AND (“*digital twin*” OR “*digital twins*”) nos portais científicos ACM Digital Library, IEEE Xplore, Science Direct e Springer Link. Foram considerados artigos publicados a partir de 2017. Ao final dessa etapa, foram obtidos 1.677 trabalhos. Na **Etapa 2** foi realizada a remoção de duplicatas e a análise dos títulos, resultando em 418 artigos. Como forma de diminuir a quantidade de trabalhos da etapa anterior, a **Etapa 3** filtrou os trabalhos com 30 ou mais citações, resultando em 60 artigos.

Na **Etapa 4** foi feito um novo filtro nos trabalhos, tendo sido selecionados 28

trabalhos dos tipos *surveys*, revisões sistemáticas, revisões de literatura ou afins por abordarem a temática de arquitetura de DT. Optou-se por selecionar apenas *surveys* e afins com intuito de se apropriar dos diferentes termos equivalentes a “arquitetura de DT”. A partir dos estudos dos *surveys* foi detectado com maior assertividade e brevidade, por exemplo, que termos como modelos, blocos funcionais, componentes, e sistemas, podem significar “arquitetura” em alguns trabalhos. Nesta etapa, os 28 artigos foram lidos integralmente para identificação de trabalhos com propostas de arquitetura para DT. O final da etapa resultou em 12 artigos. Esses 12 artigos são arquiteturas citadas ou propostas nestes 28 trabalhos.

A Tabela 1 apresenta a referência e o número de citações dos artigos. O trabalho com maior número de citações é [Grieves 2015] (949 citações), cujo autor é considerado o precursor do DT. O trabalho com menor número de citações (56) é [Longo et al. 2019]. A **Etapa 5** foi a criação de um panorama comparativo das 12 arquiteturas selecionadas, o qual detalha as CCAs da Arquitetura Conceitual proposta. Destaca-se que para cada CCA proposta foi necessário que um mesmo tipo de camada/componente estivesse presente em três ou mais arquiteturas distintas, o que denota que tal tipo (mesmo que o nome mude conforme a arquitetura) é genérico/elementar às arquiteturas modernas de DT. Sendo assim, também são discutidas as características essenciais que identificam cada CCA, bem como algumas particularidades atreladas aos diferentes artigos revisados.

Tabela 1. Artigos participantes do panorama comparativo.

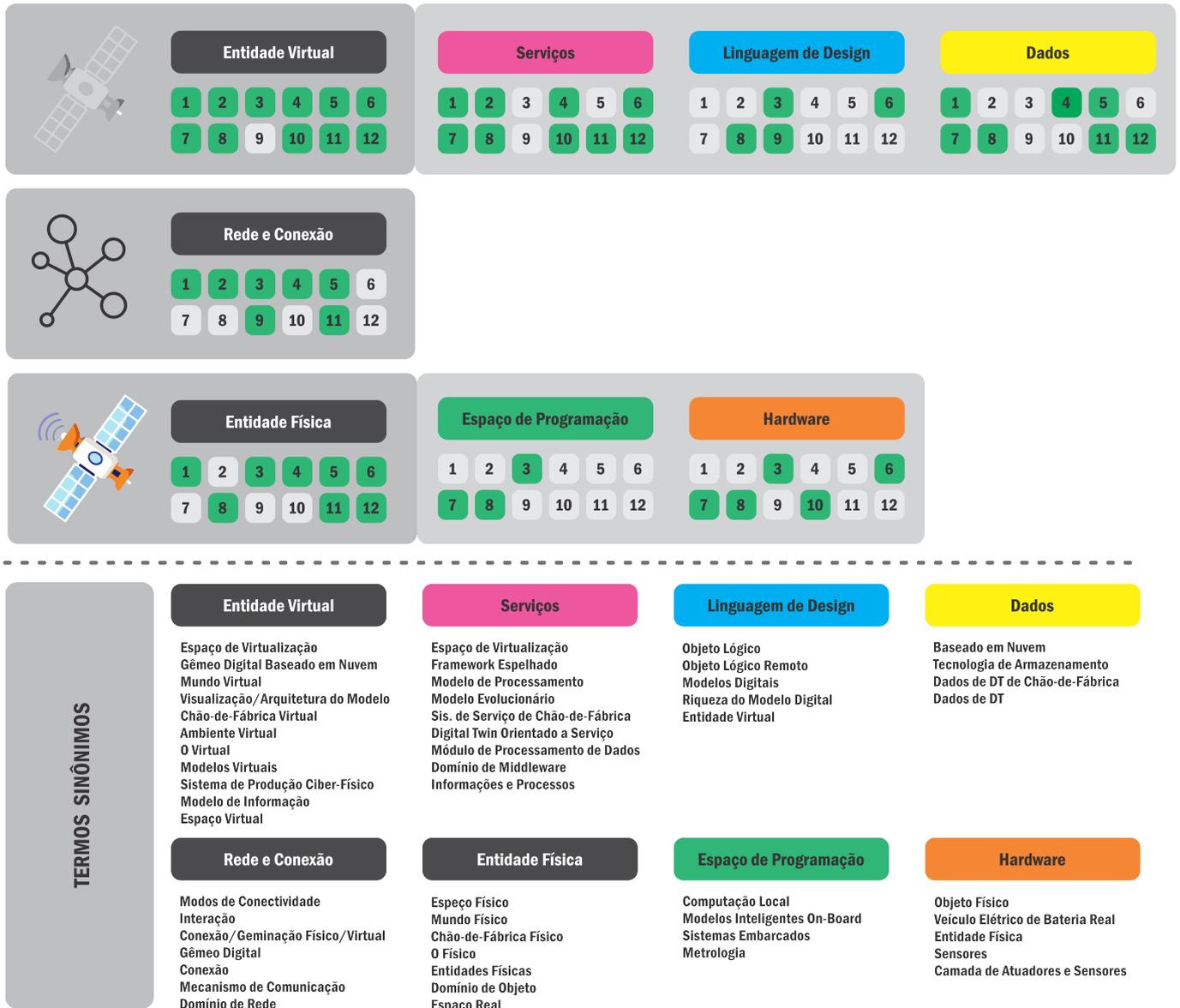
ID	Artigo/Ano	Nº de Citações
1	[Qi et al. 2021]	263
2	[Lu et al. 2020]	458
3	[Jones et al. 2020]	327
4	[Fuller et al. 2020]	310
5	[Boje et al. 2020]	209
6	[Minerva et al. 2020]	92
7	[Wu et al. 2020]	66
8	[Tao et al. 2019]	360
9	[Stark et al. 2019]	133
10	[Longo et al. 2019]	56
11	[Tao and Zhang 2017]	569
12	[Grieves 2015]	949

3. Panorama Comparativo de Arquiteturas de DT

Esta seção apresenta o panorama comparativo das arquiteturas de DT resultantes da metodologia detalhada na Seção 2. Para ilustrar a proposta, foi elaborada a Figura 1, dividida em dois blocos.

O primeiro bloco apresenta a Arquitetura Conceitual proposta, juntamente a suas CCAs. Para nomear cada CCA foi proposta uma taxonomia que visa captar e expressar a *essência comum* de seus sinônimos, os quais pertenciam a arquiteturas com *escopos de aplicações diferentes*. Como resultado da taxonomia, tem-se: (i) Camada Entidade Virtual, com os componentes Serviços, Linguagem de Design e Dados;

Figura 1. Panorama Comparativo de Arquiteturas de Digital Twin.



(ii) Camada Rede e Conexão; e (iii) Camada Entidade Física, composta pelos componentes Espaço de Programação e Hardware.

Abaixo de cada CCA da Figura 1 é possível notar números destacados em verde ou branco, que fazem referência aos IDs dos artigos revisados (conforme a Tabela 1). Na camada Entidade Virtual, por exemplo, o número 1 está verde, indicando que a arquitetura do trabalho com ID 1 de [Qi et al. 2021] possui uma CCA equivalente. Já no componente Linguagem de Design o número 1 está branco, indicando que o trabalho com ID 1 não possui uma CCA equivalente. Tomando como exemplo o trabalho com ID 7, nota-se que ele não possui equivalência com a Entidade Física, já que não apresentou uma CCA que represente uma EF de forma completa. Porém, no trabalho foi identificada uma equivalência com seus dois componentes: Espaço de

Programação e Hardware.

O segundo bloco da Figura 1 mostra os Termos Sinônimos de cada CCA. Por exemplo, Os sinônimos de *Serviços* são os nomes de camadas/componentes encontrados na literatura que possuem as mesmas características essenciais da CCA em questão. A seguir são apresentadas as características, funcionalidades e peculiaridades das CCAs pertencentes à Arquitetura Conceitual proposta.

3.1. Entidade Física

A Entidade Física foi representada nos artigos de formas diferentes. Alguns autores apresentaram a visão de um espaço físico - como uma sala, galpão ou compartimento de modo geral - onde estariam armazenados objetos, máquinas, veículos, equipamentos, materiais e componentes eletrônicos, especialmente aqueles relacionados a ambientes fabris, manufatureiros e linhas de produção [Minerva et al. 2020] [Tao and Zhang 2017].

A Entidade Física também pode ser interpretada como um ser humano, seja um paciente hospitalizado, alguém praticando atividades físicas, ou um funcionário trabalhando em uma fábrica [Tao and Zhang 2017]. Além disso, há a visão de Entidade Física como um ser vivo qualquer (humano, animal ou planta) [Jones et al. 2020]. O ponto em comum nessas visões é de que o ser vivo em questão necessita, por algum motivo, de monitoramento constante. Pode-se citar o exemplo de um paciente doente que necessita de acompanhamento 24h para averiguar seu estado de saúde, coletando dados como pressão arterial, temperatura corporal, nível de hidratação, dentre outros.

Alguns autores também defendem que a Entidade Física pode ser um sistema computacional ou quaisquer recursos de software passíveis de monitoramento [Qi et al. 2021] [Longo et al. 2019]. Para compreender esse conceito, pode-se imaginar o software de um braço robótico utilizado na linha de produção de automóveis. Esse software precisa ser monitorado constantemente para averiguar, por exemplo, o tempo de trabalho do braço, o nível de precisão com que ele está atuando, o desgaste do equipamento, se há necessidade de alguma manutenção etc.

Outra visão de Entidade Física diz respeito a uma entidade de hardware atrelada a um software, na qual o hardware teria habilidades como sentido, capaz de observar o mundo físico em tempo real por meio de sensores; e atuação, capaz de alterar/ativar/desativar componentes físicos com base em decisões/estímulos virtuais. O software teria o papel de monitoramento, capaz de rastrear, informar e emitir avisos sobre alterações físicas relevantes [Boje et al. 2020] [Qi et al. 2021] [Fuller et al. 2020]. De modo geral, pode-se afirmar que a Entidade Física possui uma parte mecânica e uma lógica. À parte mecânica foi dado o nome de Hardware, e à lógica, Espaço de Programação, conforme ilustrado na Figura 1. Ambas são descritas a seguir.

3.1.1. Espaço de Programação

O componente Espaço de Programação está relacionado à parcela de software programável que interage com o Hardware da Entidade Física através de atividades de controle, monitoramento, troca de dados e gestão de informações de modo geral.

Partindo do pressuposto que um dos papéis do Espaço de Programação

é a gestão do *Hardware*, imagine um cenário com um automóvel inteligente movido à bateria. Nesse panorama, o Espaço de Programação é responsável por medir dados históricos da bateria, como o estado de carregamento, tempo para descarga, vida útil restante etc. Além disso, ele pode implementar métricas para definir o limite máximo de temperatura da bateria, visando a maximização da saúde e vida útil [Wu et al. 2020].

O Espaço de Programação também tem um papel de intermediação da comunicação, uma vez que tem que gerenciar os dados que são enviados do *Hardware* para a camada Rede e Conexão, e aqueles que transitam no sentido contrário. Um exemplo desses dados são as informações contextuais, tanto do estado do *Hardware* em si, quanto os dados ambientais coletados através de sensores [Jones et al. 2020].

3.1.2. Hardware

Esse componente compreende todos os componentes físicos atrelados à EF, e diz respeito, exclusivamente, à parte mecânica/física. Fazendo um paralelo com um *smartphone*, o *Hardware* engloba componentes como memória, tela, placa de Wi-Fi, enquanto o Espaço de Programação é composto pelo Sistema Operacional e os Firmwares.

Um exemplo proveniente da literatura revisada é um veículo automotivo movido à bateria [Wu et al. 2020], o qual possui componentes, como rodas, capô, engrenagens, direção, freio, tanque de gasolina, motor, bateria etc. Ele também possui sensores capazes de medir voltagem, corrente e temperatura da bateria. Entretanto, cada sensor só pode medir e armazenar esses dados através da intervenção de um software [Wu et al. 2020].

Em geral, os sensores que fazem parte do *Hardware* são responsáveis por coletar atributos básicos, estado em tempo real, parâmetros de processo, andamento do processamento, registros de manutenção, dados de operação de produtos, bem como dados de demandas, de comportamento e de transações de usuários. As possibilidades são amplas e mudam de acordo com o contexto. Outro componente importante são os atuadores, acionados/controlados automaticamente ou manualmente via internet/software para realizar algum tipo de ação no mundo físico [Longo et al. 2019] [Tao et al. 2019].

3.2. Rede e Conexão

Por via de regra, esta camada corresponde à infraestrutura de comunicação como um todo, compreendendo tecnologias de rede, protocolos de troca de mensagens, arquiteturas de comunicação, servidores e afins. O principal objetivo é a interconexão entre EF e EV [Grieves 2015], conforme ilustrado na Figura 1.

Alguns autores citaram exemplos dos modos de conectividade possíveis. Para [Stark et al. 2019] a conexão pode ser (i) automática, sem necessidade de intervenção humana; (ii) direcionada pelo contexto; (iii) bi-direcional, quando a Entidade Física e a Entidade Virtual atuam simultaneamente como publicadoras e consumidoras de dados; e (iv) uni-direcional, quando apenas uma das entidades publica dados.

O entendimento geral é de que essa camada é utilizada de modo bi-direcional e em tempo real, e possui tecnologia sem fio, seja Wi-Fi, Bluetooth etc [Tao et al. 2019] [Tao and Zhang 2017] [Lu et al. 2020]. Além disso, a escolha das tecnologias de comunicação utilizadas nessa camada devem variar conforme o contexto. Essa variação

busca garantir que os dados coletados sejam comunicados sem erros e em tempo hábil entre as entidades pertencentes à arquitetura, permitindo atividades como simulação, operação e análise avançadas [Qi et al. 2021] [Fuller et al. 2020].

3.3. Entidade Virtual

A camada Entidade Virtual engloba os componentes que descrevem de maneira genérica atividades de geminação (criação de um clone virtual a partir de uma Entidade Física) e gestão de dados e serviços extraídos desse processo de geminação.

Pode-se detectar três aspectos principais da Entidade Virtual. O primeiro é referente aos Serviços que podem ser obtidos através da aplicação de algoritmos [Longo et al. 2019] e mecanismos de inteligência nos dados. Os serviços podem ir desde a avaliação do estado de saúde de um equipamento, até projeções à longo prazo do consumo de energia elétrica de uma cidade, por exemplo. O segundo refere-se a uma Linguagem de Design (LD), que reside em sistemas de computação em rede (computadores e servidores) e sistemas de armazenamento (discos rígidos) [Grieves 2015]. A LD descreve um clone digital perfeito [Wu et al. 2020] de uma Entidade Física (que pode ser um produto, equipamento, cidade, ou até um ser vivo). O terceiro aspecto engloba os Dados extraídos a partir da interação entre LD e Entidade Física.

3.3.1. Serviços

Esse componente engloba os mais diversos tipos de serviços que o DT pode oferecer, desde básicos, como monitoramento de sensores, até mais complexos, como otimização e atualização inteligente baseada em técnicas de Inteligência Artificial [Cimino et al. 2019].

Um exemplo de serviço é utilizar o processamento de dados para analisar informações e aplicar processos de tomada de decisão, enviando mensagens de controle à Entidade Física [Tao et al. 2019]. Imagine um cenário de uma horta inteligente onde a Entidade Física possui sensores de umidade do solo e temperatura. Essa Entidade Física monitora diariamente a horta e envia informações contextuais à camada Entidade Virtual, a qual decide o momento certo de realizar uma irrigação.

Os serviços geralmente são disponibilizados de duas formas: i) através de aplicativos que interagem com usuários finais, no caso de usuários humanos; e ii) serviços que são consumidos diretamente por APIs, sem interação humana direta. Alguns serviços consumidos por humanos são o gerenciamento de simulação [Minerva et al. 2020] (onde o usuário visualiza em tempo real um clone virtual da EF); e a visualização do histórico de métricas de saúde da Entidade Física [Wu et al. 2020], ou daquilo que a Entidade Física está gerenciando (no exemplo da horta, a Entidade Física seria os sensores, enquanto aquilo que está sendo gerenciado são as plantas).

Outras aplicações envolvem a utilização de Inteligência Artificial, aprendizado de máquina e controle híbrido inteligente, gestão de consistência da EV, agregação e gerenciamento de dados, objetos e recursos [Minerva et al. 2020] [Lu et al. 2020]. Ainda outras, seriam a previsão de tempo restante de bateria e otimização orientada a dados, atualização e manutenção remota, sistema de pré-aviso, gerenciamento de energia, carregamento inteligente, estimativa de estado, diagnóstico de bateria, balanceamento celular, aplicação de modelo/algoritmo, processamento e coleta de dados [Wu et al. 2020] [Qi et al. 2021].

3.3.2. Linguagem de Design

Majoritariamente, esse componente visa descrever todos os aspectos possíveis de uma *EF* através de diferentes modelos. Alguns desses modelos são: i) geométrico, referente ao comprimento, área e volume; ii) cinemático, referente à mecânica e aos movimentos; iii) estrutural, descrevendo os tipos de materiais, a resistência, as bases de sustentação; iv) de regras, descrevendo os comportamentos definidos por regras via software; v) de processo ou comportamental, que descreve os processos de produção; vi) evolucionário, que contém o histórico dos dados coletados da *Entidade Física*, e todas as alterações realizadas em seus modelos [Tao et al. 2019] [Stark et al. 2019] [Lu et al. 2020].

A LD também é utilizada para o permitir o gerenciamento da *Entidade Virtual*, isso porque tanto a criação da estrutura da *Entidade Virtual*, quanto a atualização dessa estrutura ao longo do tempo dependem dos modelos aplicados através da Linguagem de Design [Minerva et al. 2020] [Jones et al. 2020]. Importante destacar que, em regra, a Linguagem de Design deve ser atualizada conforme ocorrem alterações de alguma natureza na *Entidade Física*.

A LD também é usada para: i) aplicar modelos de simulação de engenharia de vários domínios de aplicação; ii) prever o comportamento físico com base em simulações e sensores digitais; iii) aplicar métodos de otimização e recomendar alocação inteligente de recursos; iv) delegar agentes de Inteligência Artificial capazes de gerenciar a *Entidade Física* com base em dados digitais, seguindo comportamentos, protocolos e objetivos bem definidos; v) gerar mensagens de controle que são enviadas à *Entidade Física*, vi) bem como permitir a visualização e modelagem de arquitetura da *Entidade Virtual* [Jones et al. 2020] [Boje et al. 2020] [Fuller et al. 2020].

3.3.3. Dados

O componente *Dados* representa o sítio físico e lógico onde ficam armazenadas todas as informações relativas ao comportamento da *Entidade Física* e ao contexto no qual ela está inserida. De modo geral, os *Dados* possuem escala multi-temporal, multi-dimensional, multi-fonte e são heterogêneos, incluindo dados de atributos estáticos (como os modelos presentes da Linguagem de Design) e dados de condições dinâmicas (como os dados do estado atual da *Entidade Física*) [Qi et al. 2021].

Os *Dados* também podem ser resultado da fusão de informações da *Entidade Física* com estatísticas de rede e os demais componentes da arquitetura, fornecendo informações abrangentes e consistentes, além de alimentar métodos de modelagem, otimização e previsão [Tao and Zhang 2017]. Também devem possuir capacidades como compartilhamento entre dispositivos de IoT usando uma sintaxe unificada, além de serem estruturados o suficiente a ponto de armazenar conhecimento, como fatos sobre o sistema, regras de suporte e capacidades de raciocínio [Boje et al. 2020] [Fuller et al. 2020].

4. Conclusões

Este artigo apresentou 5 contribuições principais: i) um panorama comparativo entre arquiteturas modernas de DT; ii) uma Arquitetura Conceitual a partir da comparação das Camadas e Componentes Arquiteturais (CCAs) da literatura revisada; iii) a discussão das

características das CCAs pertencentes à Arquitetura Conceitual; iv) os termos sinônimos encontrados na literatura para as CCAs da proposta; e v) uma taxonomia que, para cada CCA, reúne a carga semântica de todos os termos sinônimos encontrados.

Enquanto a taxonomia proposta traz uma contribuição acadêmica no sentido linguístico/semântico - uma vez que resume a carga semântica de um conjunto de diferentes componentes com nomes distintos; a Arquitetura Conceitual possui uma contribuição técnico/científica - apresentando de forma ampla e concisa as diferentes características e abordagens existentes em um mesmo tipo de CCA de DT.

Uma vez que os resultados obtidos possuem a essência e os princípios funcionais de arquiteturas distintas, é possível notar a possibilidade do desenvolvimento de uma arquitetura unificada e global, que atenda às necessidades básicas e essenciais das arquiteturas de DT já existentes. Dado o exposto, é possível apontar como contribuição principal deste artigo a elucidação de um arcabouço teórico que contribui com o entendimento do tema DT por parte de novos pesquisadores e, em especial, com novas pesquisas que visem propor um modelo global e unificado de *Digital Twin*.

Como trabalhos futuros pretende-se aplicar a Arquitetura Conceitual proposta a um estudo de caso (dentro de um contexto específico, como agricultura, por exemplo), com intuito de realizar sua validação. Também pretende-se realizar experimentos, comparando a aplicação de diferentes tecnologias (como MQTT e CoAP) à arquitetura proposta, e analisando como cada tecnologia se comporta na arquitetura e contexto em questão.

Referências

- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., and Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114:103179.
- Cimino, C., Negri, E., and Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, 113:103130.
- Cisco (2019). Industry 4.0: How cisco is enabling the future of manufacturing. Disponível em: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/industries/manufacturing/white-paper-c11-742529.pdf, Último acesso em: 04/2022.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., and Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8:108952–108971.
- Gartner (2019). Gartner top 10 strategic technology trends for 2019. Disponível em: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/>, Último acesso em: 04/2022.
- Grieves, M. (2015). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication.
- He, B. and Bai, K. (2021). Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review. *Advances in Manufacturing*, pages 1–21.
- IoT-Analytics (2020). Cellular iot lpwa connectivity market tracker 2010-2025. Disponível em: <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/>, Último acesso em: 04/2022.

- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., and Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29:36–52.
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., and Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58:346–361. Digital Twin towards Smart Manufacturing and Industry 4.0.
- Longo, F., Nicoletti, L., and Padovano, A. (2019). Ubiquitous knowledge empowers the smart factory: The impacts of a service-oriented digital twin on enterprises performance. *Annual Reviews in Control*, 47:221–236.
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I.-K., Huang, H., and Xu, X. (2020). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61:101837.
- Minerva, R., Lee, G. M., and Crespi, N. (2020). Digital twin in the iot context: A survey on technical features, scenarios, and architectural models. *Proceedings of the IEEE*, 108(10):1785–1824.
- Multiple, A. (2022). Capture more iot market share in 2022. Disponível em: <https://research.aimultiple.com/iot-future/>, Último acesso em: 04/2022.
- Nwogu, C., Lugaresi, G., Anagnostou, A., Matta, A., and Taylor, S. J. (2022). Towards a requirement-driven digital twin architecture. *Procedia CIRP*, 107:758–763. Leading manufacturing systems transformation – Proceedings of the 55th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2022.
- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., and Nee, A. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58:3–21. Digital Twin towards Smart Manufacturing and Industry 4.0.
- Stark, R., Fresemann, C., and Lindow, K. (2019). Development and operation of digital twins for technical systems and services. *CIRP Annals*, 68(1):129–132.
- Statista (2020). Data volume of iot connected devices worldwide 2019 and 2025. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1017863/worldwide-iot-connected-devices-data-size/>, Último acesso em: 04/2022.
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., and Nee, A. (2019). Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5:653–661.
- Tao, F. and Zhang, M. (2017). Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 5:20418–20427.
- Vuković, M., Mazzei, D., Chessa, S., and Fantoni, G. (2021). Digital twins in industrial iot: a survey of the state of the art and of relevant standards. In *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pages 1–6.
- Wu, B., Widanage, W. D., Yang, S., and Liu, X. (2020). Battery digital twins: Perspectives on the fusion of models, data and artificial intelligence for smart battery management systems. *Energy and AI*, 1:100016.