



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
CECAU - Colegiado do Curso de
Engenharia de Controle e Automação



João Vitor Oliveira Souza

**Simulações e Gêmeos Digitais na Indústria 4.0:
Desafios e Benefícios para o Setor Automobilístico**

Monografia de Graduação

Ouro Preto, 2024

João Vitor Oliveira Souza

Simulações e Gêmeos Digitais na Indústria 4.0: Desafios e Benefícios para o Setor Automobilístico

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Luciana Gomes Castanheira

Ouro Preto

2024



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Vitor Oliveira Souza

Simulações e Gêmeos Digitais na Indústria 4.0: Desafios e Benefícios para o Setor Automobilístico

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovada em 10 de outubro de 2024.

Membros da banca

Dra. Luciana Gomes Castanheira - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Adrielle de Carvalho Santana - Convidada - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Convidado - Universidade Federal de Ouro Preto

Luciana Gomes Castanheira, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/10/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Luciana Gomes Castanheira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/10/2024, às 21:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0793198** e o código CRC **01992957**.

Agradecimentos

Este trabalho é dedicado principalmente à minha mãe, Juceli. Pois mesmo com todas as adversidades da vida ela foi capaz de me fornecer tudo para que eu pudesse me graduar longe de casa. Agradeço a Deus, por me conceder tamanha resiliência e força para enfrentar os problemas ao longo de toda a minha vida. Quero agradecer à minha esposa, Cibele, por ser um apoio essencial em todo o processo da minha monografia e por escolher todos os dias trilhar um caminho ao meu lado, obrigado. Agradeço a República Firma, por me fornecer um ambiente transformador e um lar seguro longe de casa por todos esses anos que se passaram. Não poderia deixar de mencionar a minha profunda gratidão à Universidade Federal de Ouro Preto e aos seus dedicados docentes, pela valiosa experiência e ensinamentos transmitidos adiante, mas também por desempenhar um papel essencial em meu desenvolvimento pessoal, uma contribuição pela qual serei eternamente grato. Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer a Efi por acreditarem em mim e me concederem o meu primeiro e tão esperado "sim" em minha carreira profissional, muito obrigado e contem comigo!

*A simulação não substitui a
realidade, mas é a melhor
maneira de nos prepararmos
para ela.*

— João Vitor

Resumo

A Quarta Revolução Industrial, conhecida como Indústria 4.0, trouxe consigo uma série de inovações tecnológicas que estão transformando os processos produtivos em diversas indústrias. Entre essas tecnologias emergentes, destacam-se as simulações computacionais e os gêmeos digitais, ferramentas que possibilitam a criação de réplicas virtuais de sistemas físicos, proporcionando um monitoramento em tempo real e a otimização dos processos industriais. Este trabalho tem como objetivo explorar o impacto dessas tecnologias no setor automobilístico, focando especialmente nas aplicações de gêmeos digitais. A pesquisa revisa a literatura disponível sobre os principais desafios e benefícios da implementação dos gêmeos digitais no setor em questão. Dentre os desafios, destacam-se a integração com sistemas legados, os altos custos de adoção, e a resistência à mudança organizacional, que pode dificultar a implementação dessas novas tecnologias. No entanto, os benefícios potenciais, como a redução de custos operacionais e a personalização de produtos, tanto no processo de venda quanto no pós venda, demonstram a relevância dessas tecnologias para a transformação digital da indústria. Além disso, o estudo sugere que pesquisas futuras se concentrem em soluções que tornem essa tecnologia mais acessível às pequenas e médias empresas, ampliando sua adoção e impacto no setor.

Palavras-chaves: Gêmeos Digitais. Indústria 4.0. Simulações Computacionais. Indústria Automobilística. Benefícios. Desafios.

Abstract

The Fourth Industrial Revolution, known as Industry 4.0, has brought with it a series of technological innovations that are transforming production processes across various industries. Among these emerging technologies, computational simulations and digital twins stand out as tools that enable the creation of virtual replicas of physical systems, providing real-time monitoring and optimization of industrial processes. This study aims to explore the impact of these technologies in the automotive sector, focusing particularly on the applications of digital twins. The research reviews the available literature presenting the main challenges and benefits of implementing digital twins in this sector. Among the challenges, the integration with legacy systems, high adoption costs, and organizational resistance to change, which may hinder the implementation of these new technologies, are highlighted. However, the potential benefits, such as reduced operational costs and product customization, both during the sales process and post-sales, demonstrate the relevance of these technologies for the digital transformation of the industry. Furthermore, the study suggests that future research should focus on solutions that make this technology more accessible to small and medium-sized enterprises, expanding its adoption and impact within the sector.

Key-words: Digital Twins. Industry 4.0. Computational Simulations. Automotive Industry. Benefits. Challenges.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Tecnologias da Indústria Moderna	11
Figura 2 – Máquina a vapor	15
Figura 3 – Linha do tempo das Revoluções Industriais	16
Figura 4 – Simulador de Aerodinâmica	20
Figura 5 – Modelador em etapa de definição do método a ser utilizado	23
Figura 6 – Representação do fluxo de dados entre o Espaço Real e o Espaço Virtual em um Gêmeo Digital	25
Figura 7 – Tipos de Gêmeos Digitais com base no nível de integração	26
Figura 8 – Gêmeo Digital Fábrica de Carros da BMW	28

Lista de abreviaturas e siglas

TI	Tecnologia da Informação
RI	Revolução Industrial
IoT	Internet das Coisas
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
RA	Realidade Aumentada
SBA	Simulações Baseadas em Agentes
SED	Simulações de Eventos Discretos
GD	Gêmeos Digitais
EV	Espaços Virtuais

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativas e Relevância	12
1.2	Objetivos	12
1.3	Metodologia	13
1.4	Estrutura	14
2	MÁQUINAS E PROGRESSO	15
2.1	Os Primeiros Grandes Saltos Tecnológicos	15
2.2	Indústria 4.0	17
2.2.1	Big Data	17
2.2.2	Segurança Cibernética	18
2.2.3	Internet das Coisas (IoT)	18
2.2.4	Manufatura Aditiva	18
2.2.5	Computação em Nuvem	18
2.2.6	Realidade Aumentada (RA)	18
2.2.7	Robôs Autônomos	19
2.2.8	Integração de Sistemas	19
2.2.9	Simulação	19
3	MODELANDO, SIMULANDO E EVOLUINDO	21
3.1	Modelagem ou Simulação?	21
3.2	Relevância Histórica	21
3.3	Métodos de Simulação	22
3.4	Gêmeos Digitais	25
3.4.1	Níveis de Integração	26
3.4.2	Principais Tecnologias Possibilitadoras	27
4	APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA	29
5	CONCLUSÃO	32
	Referências	33

1 Introdução

O cenário atual da Indústria 4.0 é caracterizado pela alta integração de sistemas tradicionais com avançadas tecnologias de comunicação via internet, o que está provocando uma transformação profunda nas fábricas e entidades de manufatura (THAMES; SCHAEFER, 2017). Algumas dessas diversas tecnologias emergentes estão sendo implementadas nas indústrias, algumas delas são: *Big Data*, Realidade Aumentada, Robôs Autônomos, uso de Simulações entre outras. Para Thames e Schaefer (2017), essas tecnologias são exemplares de uma gama mais ampla de inovações que estão moldando a indústria moderna, contribuindo para a otimização e eficiência dos processos de manufatura. Elas se mostram parte integrante da transformação, em direção a um ambiente industrial mais conectado e automatizado, conforme demonstra a Figura 1.

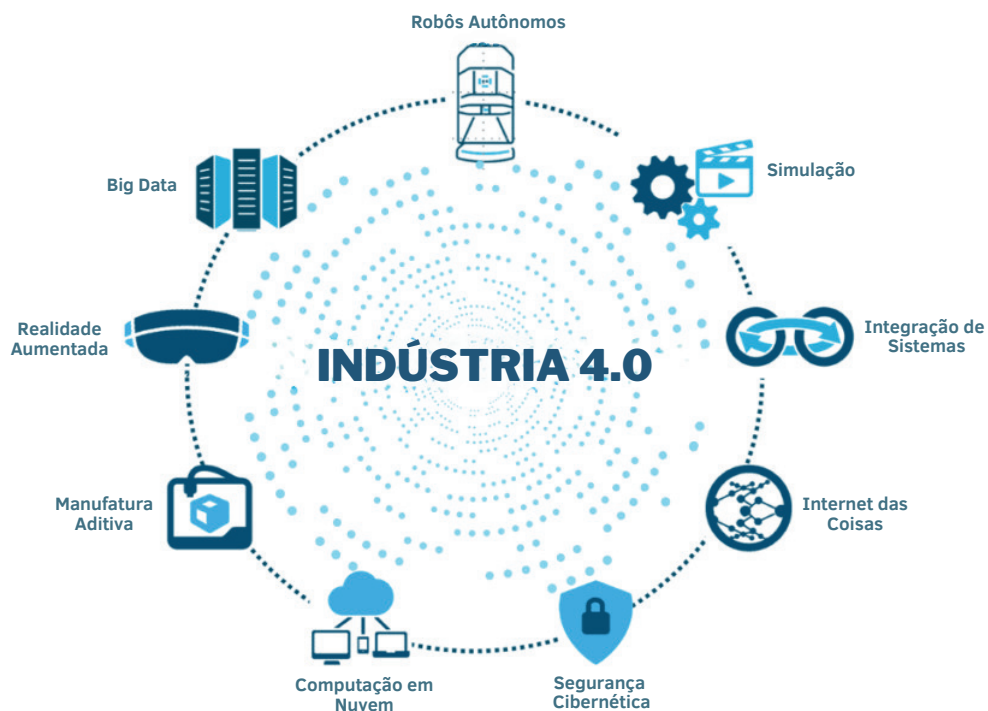


Figura 1 – Principais tecnologias da indústria moderna. Fonte adaptado de: [Meloeny \(2022\)](#)

Nesse contexto, as simulações computacionais emergem como uma tecnologia promissora para a Indústria 4.0. Elas permitem a realização de modelagens e testes de cenários produtivos complexos e interconectados, essenciais para a otimização operacional e prevenção de falhas (THAMES; SCHAEFER, 2017). Segundo Veikos (2014), as simulações são fundamentais para a condução de experimentos em ambientes virtuais, fornecendo

informações precisas sobre o funcionamento de sistemas complexos e desempenhando um papel vital no avanço da inovação e da tecnologia.

Dessa forma, à medida que as simulações se integram à indústria, surgem questionamentos sobre o impacto real dessa tecnologia e suas vertentes. A compreensão de como as vantagens teóricas se transformam em melhorias práticas torna-se essencial, diante dos desafios associados à implementação de tais tecnologias avançadas.

Quais são os principais ganhos e desafios apresentados pelas simulações computacionais na esfera da indústria 4.0? Em que medida o impacto teórico dessa tecnologia se concretiza em melhorias tangíveis nas indústrias modernas? Essas questões orientam a busca por respostas, visando uma compreensão abrangente do papel que essa ferramenta desempenha durante a transição para a indústria 4.0, destacando também os desafios associados a esse processo de transformação.

1.1 Justificativas e Relevância

A busca incessante por otimização de recursos e melhoria contínua dos processos produtivos tem sido algo cada vez mais crítico para as organizações. Diante dessa situação, as simulações se apresentam como uma ferramenta essencial e estratégica que oferece uma série de benefícios significativos.

Embora casos de sucesso no uso de simulações nas indústrias sejam evidentes, a disseminação dessas práticas e o incentivo à adoção generalizada ainda representam desafios a serem superados conforme demonstrado no trabalho de [Schrank \(2010\)](#). Portanto, torna-se relevante a exploração da relevância dessa tecnologia, com o intuito de promover uma compreensão sólida de como essas ferramentas podem impactar positivamente as indústrias modernas e contribuir para o desenvolvimento das indústrias.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é analisar o uso e o impacto das simulações e dos Gêmeos Digitais na Indústria 4.0, abordando desde conceitos fundamentais até implicações práticas, com ênfase nos benefícios alcançados e nos desafios enfrentados pela manufatura automobilística ao adotar essa tecnologia.

Em relação aos objetivos específicos, este estudo busca:

- Apresentar o contexto da Revolução Industrial e conceituar a Indústria 4.0, demonstrando suas principais características e tecnologias emergentes;
- Esclarecer os elementos fundamentais que caracterizam as simulações computacionais,

destacando as principais metodologias de simulação e sua relevância no cenário industrial atual;

- Definir gêmeos digitais e explicar como essa tecnologia complementa os métodos de simulação;
- Apresentar exemplos práticos de aplicações de gêmeos digitais no setor automobilístico, destacando casos emblemáticos;
- Examinar os principais benefícios advindos da implementação de gêmeos digitais nesse setor;
- Identificar e analisar os desafios e obstáculos enfrentados ao se empregar essa tecnologia nas indústrias do setor automobilístico;
- Analisar os ganhos proporcionados frente aos obstáculos enfrentados pelos gêmeos digitais durante sua implementação, buscando um entendimento equilibrado dos impactos positivos e das dificuldades inerentes a essa integração.

1.3 Metodologia

Este estudo adota uma abordagem metodológica de pesquisa exploratória de natureza básica, com o objetivo de investigar e elucidar os impactos mais significativos do uso de simulações, com foco nos gêmeos digitais, para a indústria contemporânea. Por meio desta abordagem, busca-se obter uma visão inicial abrangente sobre o tema, o que facilitará a descoberta de novas perspectivas e a compreensão detalhada de como essa tecnologia se manifesta e impacta o setor industrial. Para alcançar esse objetivo, optou-se por realizar uma revisão narrativa da literatura.

Este tipo de revisão de literatura foi escolhida devido à natureza emergente do tema, que ainda conta com poucos estudos consolidados. Essa abordagem permite uma análise flexível e abrangente, que é essencial para captar uma visão inicial do estado da arte e identificar lacunas e novas perspectivas.

A coleta de dados é centralizada em plataformas reconhecidas, como Google Acadêmico e Semantic Scholar. Além disso, sites complementares são utilizados para apresentação de casos de uso dessa tecnologia nas indústrias. Os estudos selecionados incluem artigos, livros, teses e dissertações encontradas nessas bases de dados.

Além disso, os trabalhos foram selecionados de forma a capturar uma variedade de perspectivas e experiências, sem restrições rígidas em relação a critérios específicos de inclusão. A busca por informações e estudos relevantes foi conduzida de maneira flexível, utilizando uma combinação de métodos de pesquisa, incluindo revisões de literatura e estudos de caso pertinentes.

Considerando a natureza exploratória da pesquisa, a apresentação dos resultados é conduzida de maneira qualitativa, com análise e descrição detalhada das informações provenientes das fontes secundárias.

Esta metodologia de análise oferece uma base sólida para a discussão e interpretação dos resultados obtidos, enriquecendo a compreensão da dinâmica e dos impactos das simulações computacionais e dos gêmeos digitais na indústria moderna.

1.4 Estrutura

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução - Apresenta o cenário atual da Indústria 4.0, as justificativas para o estudo, os objetivos da pesquisa e a metodologia adotada.
- Capítulo 2: Máquinas e Progresso - Discute os principais avanços tecnológicos desde a Primeira Revolução Industrial até a Indústria 4.0.
- Capítulo 3: Modelando, Simulando e Evoluindo - Apresenta, primeiramente, as diferenças entre modelagem e simulação, seguido de uma exploração dos métodos de simulação utilizados na indústria e suas conexões com os Gêmeos Digitais. Além disso, conceitua os Gêmeos Digitais e discute seus principais pilares.
- Capítulo 4: Resultados - Este capítulo apresenta uma análise qualitativa dos benefícios e dificuldades na implantação de gêmeos digitais na indústria automobilística, aborda seus casos de uso e discute seus benefícios e dificuldades enfrentadas em sua implementação.
- Capítulo 5: Considerações Finais - Resume as principais conclusões do estudo e sugere direções para pesquisas futuras.

2 Máquinas e Progresso

2.1 Os Primeiros Grandes Saltos Tecnológicos

A Primeira Revolução Industrial (RI) teve início no final do século XVIII na Grã-Bretanha, sendo um marco significativo na história da humanidade, com uma ampla transformação estrutural na sociedade e na economia mundial (LIMA; OLIVEIRA NETO, 2017). Essa fase testemunhou a transição da manufatura artesanal e manual para a manufatura mecanizada, sendo um dos principais marcos dessa época. Em 1769, James Watt revolucionou a produção ao inventar a máquina a vapor, desencadeando uma série de inovações tecnológicas que modernizaram os processos de produção em fábricas têxteis, minas e usinas (GOEKING, 2010).

A transição para a mecanização, simbolizada pela máquina de James na Figura 2, foi um passo crucial, marcando uma mudança fundamental na forma como os processos de produção eram realizados, impulsionando significativamente a eficiência e a capacidade produtiva daquela época. Essa transformação foi fundamental para estabelecer as bases da Revolução Industrial, desempenhando um papel crucial na evolução dos sistemas produtivos (GOEKING, 2010).

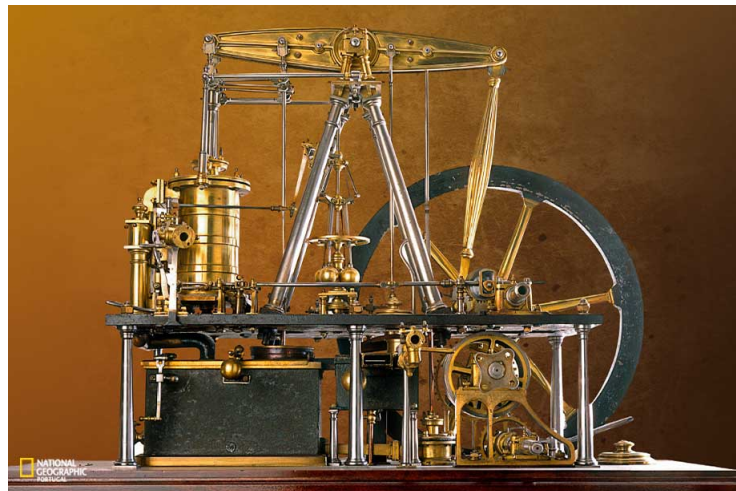


Figura 2 – Máquina a vapor desenvolvida por James Watt em 1769, responsável por impulsionar a Revolução Industrial - Fonte: JAMES... (s.d.)

Tempos depois, uma nova era despontou com transformações significativas nos sistemas produtivos, marcando assim o início da Segunda Revolução Industrial (MOKYR; STROTZ, 2000). Diferente da primeira, o autor relata que essa fase trouxe avanços em energia, materiais, química e medicina, impulsionando a eficácia da pesquisa e desenvolvimento. Este período também viu uma expansão das inovações para uma gama mais ampla

de atividades e produtos, melhorando substancialmente os padrões de vida e o poder aquisitivo das classes média e trabalhadora. Em contrapartida, a divisão do trabalho nas indústrias foi amplamente incentivada, e a produção em massa recebeu um significativo impulso (MOKYR; STROTZ, 2000). Esses avanços prepararam o terreno para o que seria posteriormente denominado “Fordismo“, que viria a ser um sistema de produção em massa aprimorado por Henry Ford, caracterizado pela eficiente linha de montagem e a distribuição de salários que permitissem que os trabalhadores adquirissem os produtos eles mesmos fabricavam (RESEARCH, 2020).

Posteriormente a essa era, Coutinho (1992) destaca a chegada da terceira revolução industrial, também conhecida como Revolução Digital, como um marco de transformações significativas no final do século XX. Impulsionadas pelo avanço da eletrônica, informática e telecomunicações, esta era é caracterizada pela transição de sistemas mecânicos e analógicos para tecnologias digitais, desencadeando mudanças sem precedentes na maneira como a sociedade vive, trabalha e se comunica. Simultaneamente, a digitalização e a conectividade tornaram-se fundamentais, estabelecendo uma rede global que facilita o compartilhamento instantâneo de informações e o trabalho em colaboração além das fronteiras. Para o autor, este progresso não apenas democratizou o acesso à informação, mas também abriu caminho para inovações em diversos setores, transformando o cenário econômico e social de forma radical.

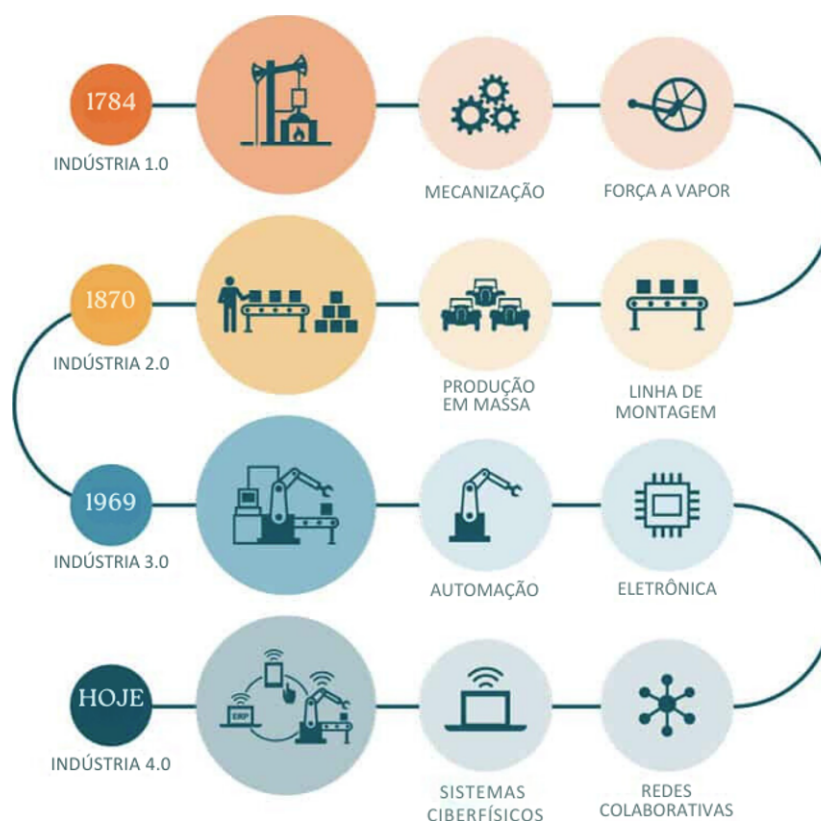


Figura 3 – Linha do tempo das Revoluções Industriais - Fonte adaptado de [Convert a Mais \(2024\)](#)

A fusão entre tecnologias de ponta e a integração com a internet está mais uma vez reconfigurando o cenário produtivo, o que sugere uma nova Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0 (BAUER et al., 2014). Este novo paradigma representa uma continuidade nas transformações industriais, promovendo uma abordagem ainda mais conectada e avançada para a produção. Conforme ilustrado na Figura 3, observa-se uma linha temporal que demonstra a evolução desde a primeira até a quarta Revolução Industrial, destacando como cada etapa trouxe avanços significativos, culminando na era da Indústria 4.0.

2.2 Indústria 4.0

A expressão Indústria 4.0 teve sua origem em 2011 durante a Feira de Hannover, na Alemanha, como parte de uma iniciativa para promover a informatização da manufatura (SEBRAE, 2022). Os estudos de Pfeiffer (2017) contribuem para esse diálogo, enfatizando que o conceito de Indústria 4.0 abarca avanços tecnológicos significativos, visando a criação de ambientes produtivos que sejam inteligentes, dinâmicos e fortemente conectados. Segundo o autor, esta orientação é definida pela integração de tecnologias emergentes, que não só transformam os paradigmas da manufatura mas também fomentam a interconexão e a inteligência nos processos produtivos.

No final do século XX, à medida que a tecnologia progredia, os sistemas industriais passaram por uma evolução significativa. Conforme é destacado em Albertin et al. (2017), inicialmente esses sistemas eram automatizados, porém operavam de forma isolada. No entanto, conforme avançaram, transformaram-se em sistemas automatizados e mais integrados, resultando em uma mudança notável que trouxe consigo uma série de vantagens. Além disso, Albertin et al. (2017) ainda enfatizam que esse cenário só foi possibilitado pelo surgimento e difusão de algumas tecnologias importantes. Na sequência, os autores seguem com uma breve conceituação de cada uma dessas tecnologias, detalhando suas características e impactos no contexto discutido. Essas tecnologias incluem:

2.2.1 Big Data

Tecnologia que se refere à capacidade de gerenciar e analisar grandes volumes de dados provenientes de diversas fontes, com o objetivo de otimizar processos produtivos e reduzir o consumo energético. Na Indústria 4.0, essa tecnologia é fundamental para a tomada de decisões ágeis e baseadas em dados em tempo real, permitindo uma análise rápida e eficiente que suporta a gestão de informações em ambientes industriais inteligentes.

2.2.2 Segurança Cibernética

As ameaças cibernéticas são uma preocupação crescente, capazes de comprometer dados críticos e paralisar operações essenciais, o que pode provocar sérias consequências financeiras e operacionais. Diante desse cenário, a importância de comunicações seguras e confiáveis, juntamente com sistemas avançados de identificação e controle de acesso para usuários e máquinas, é fundamental.

2.2.3 Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT) diz respeito à convergência de objetos do cotidiano com a conectividade da internet, transformando-os em dispositivos inteligentes capazes de coletar, enviar e receber dados. Essa interconexão não só facilita a interação entre dispositivos e humanos, mas também desempenha um papel crucial na propulsão da quarta revolução industrial, abrindo novas possibilidades em setores como manufatura, saúde e urbanismo.

2.2.4 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva é uma técnica avançada que converte modelos CAD 3D em objetos físicos por meio da aplicação sucessiva de materiais camada por camada. Este método inovador permite a customização extensiva de produtos, otimiza o tempo de desenvolvimento e introdução no mercado, além de possibilitar o uso de uma ampla gama de materiais, desde plásticos até metais. Empresas de diversos setores estão adotando esta tecnologia para criar desde componentes industriais até alimentos sintetizados, revolucionando a produção tradicional.

2.2.5 Computação em Nuvem

A computação em nuvem envolve o fornecimento de serviços e recursos de armazenamento através de servidores remotos, baseando-se em alta escalabilidade e usabilidade. Esta tecnologia promove uma ampliação na disponibilidade e precisão dos dados, além de facilitar o compartilhamento de informações entre diversas localidades, o que resulta em significativa redução de custos e melhoria na capacidade de adaptação a mudanças rápidas.

2.2.6 Realidade Aumentada (RA)

Realidade Aumentada (RA) é uma tecnologia que integra objetos virtuais ao mundo real, permitindo que os usuários vejam o ambiente ao seu redor com elementos digitais sobrepostos. Diferente da Realidade Virtual, que imerge completamente o usuário em um

ambiente sintético, a RA enriquece a percepção do mundo real com informações digitais adicionais. Essa tecnologia está se tornando fundamental na Indústria 4.0, melhorando a interação entre humanos e máquinas e aumentando a eficiência em processos como manutenção, treinamento e gestão de produção.

2.2.7 Robôs Autônomos

Robôs autônomos na Indústria 4.0 são máquinas inteligentes e colaborativas (Cobots) que realizam tarefas complexas de forma independente, sem necessidade de controle humano direto. Eles são projetados para serem mais flexíveis e cooperativos do que as gerações anteriores, adaptando-se a diferentes ambientes e necessidades de produção. Esses robôs estão transformando a automação industrial, tornando-a mais acessível e eficaz, e são fundamentais na integração entre ambientes físicos e digitais de fabricação.

2.2.8 Integração de Sistemas

A integração de sistemas na Indústria 4.0 visa a unificação de diferentes tecnologias de informação dentro e entre organizações, promovendo uma cadeia de valor automatizada e coesa. Isso inclui a integração horizontal de processos de negócios e a integração vertical de hierarquias de produção, melhorando a agilidade e a eficiência. Essa abordagem impulsiona a criação de ambientes de produção altamente flexíveis e adaptáveis, aumentando a competitividade e a capacidade de inovação das empresas.

2.2.9 Simulação

As simulações na Indústria 4.0 representam uma técnica crucial que replica operações de sistemas reais no tempo, criando modelos virtuais para realização de análises e inferências. Essa prática permite aprimorar a qualidade e eficiência do desenvolvimento de produtos, usando dados para simular cenários e processos em ambientes virtuais, incluindo interações entre máquinas, produtos e humanos (ALBERTIN *et al.*, 2017).

Além de permitir a visualização e o aperfeiçoamento de processos industriais, as simulações na Indústria 4.0 também encontram aplicação em áreas altamente avançadas, como a exploração espacial. Na Figura 4, tem-se um exemplo dessa aplicação: uma simulação de aerodinâmica para uma nave espacial da empresa SpaceX.

Esse simulador desenvolve um ambiente virtual detalhado, permitindo a testagem de diversos cenários de voo sem a necessidade de construir protótipos físicos em cada etapa. Ele reproduz as condições aerodinâmicas enfrentadas pela nave durante o lançamento e a reentrada, possibilitando ajustes precisos e aprimoramentos no design. Com essa tecnologia, é possível não apenas reduzir custos e tempo de desenvolvimento, mas também aumentar a segurança e a eficiência de suas missões.

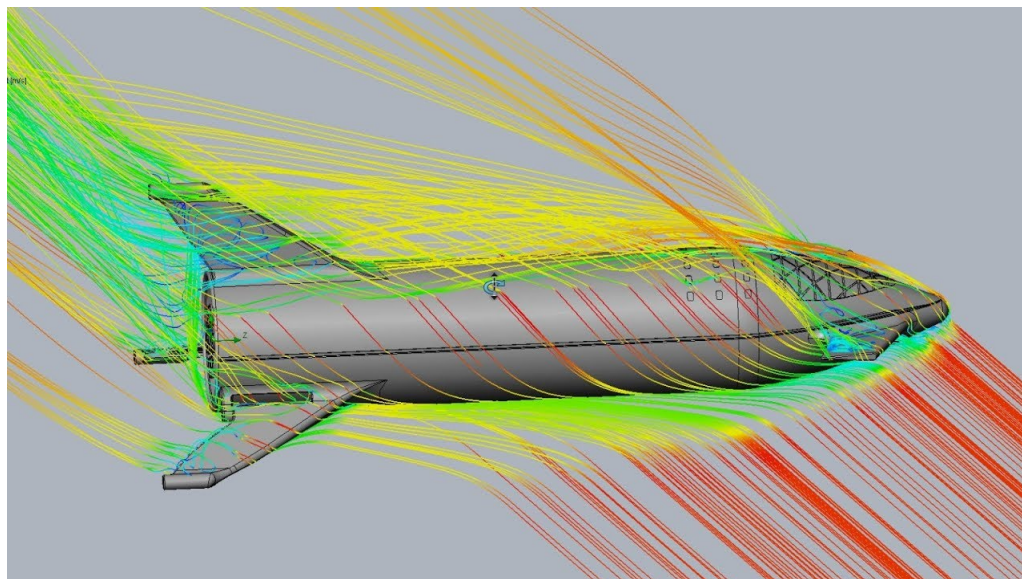


Figura 4 – Simulador de Aerodinâmica Não Oficial para a Nave Espacial BFR-2018 da SpaceX - Fonte: [Danzer \(2018\)](#)

A importância das simulações, bem como suas aplicações práticas na Indústria 4.0, será explorada em profundidade na próxima seção. Serão discutidos os diferentes tipos de modelagem e o conceito de gêmeos digitais, fornecendo um entendimento mais aprofundado dessa ferramenta transformadora e, nesse contexto, destacando os objetivos específicos da pesquisa.

3 Modelando, Simulando e Evoluindo

3.1 Modelagem ou Simulação?

Ao explorar os conceitos de modelagem e simulação, frequentemente há uma sobreposição que confunde os limites entre esses dois domínios. Esta confusão, por vezes, propicia um terreno fértil para debates acadêmicos, impulsionando a necessidade de uma definição mais precisa e distinção clara entre a construção de modelos conceituais e sua utilização em ambientes de simulação. Esse diálogo contínuo não apenas enriquece o campo de estudo, mas também estimula a evolução das práticas e metodologias envolvidas.

Em meados da década de 90, [Maria \(1997\)](#) discute as principais características e diferenças acerca desses conceitos. A autora define modelagem como o processo de produzir um modelo que representa a essência de um sistema de interesse. Um modelo, segundo a autora, deve ser similar, porém mais simples que o sistema que ele representa. Por um lado, um modelo deve refletir fielmente o sistema real, capturando suas características essenciais, mas por outro lado, é crucial evitar que se torne excessivamente complexo, a ponto de tornar sua compreensão e operação impraticáveis ([MARIA, 1997](#)). Dessa maneira, entende-se que para se construir bons modelos e conseqüentemente, boas simulações, é necessário haver equilíbrio entre duas variáveis: realismo e simplicidade.

À medida que o conceito de modelagem é apresentado por [Maria \(1997\)](#), fica a dúvida quanto o conceito de simulação. Enquanto a modelagem simplifica a representação da estrutura e do comportamento dos sistemas, a simulação complementa esse processo, permitindo a exploração virtual da evolução desses modelos ao longo do tempo e sob diferentes condições ([MARIA, 1997](#); [SHANNON, 1992](#); [GLOBAL, 2024](#)). Dessa maneira, pode-se entender que a simulação pode ser representada por um processo dinâmico que aprofunda as fundações estabelecidas pela modelagem, tornando possível a análise de como os modelos se comportam em diferentes cenários no domínio do tempo.

3.2 Relevância Histórica

Enquanto as simulações abrangem uma variedade de usos, é fundamental reconhecer que sua importância histórica antecede a Quarta Revolução Industrial. Antes mesmo da chegada desta nova era, essas ferramentas já desempenhavam um papel vital no cenário empresarial e industrial ([XU et al., 2016](#)). Na década de 1970, a indústria de petróleo adotou pioneiramente a simulação de Monte Carlo para avaliar reservatórios, ilustrando o uso de modelos estatísticos complexos na melhoria da tomada de decisões empresariais

e estabelecendo um marco para o uso de simulações no contexto industrial (KOK; KAYA; AKIN, 2006).

Com o rápido avanço da tecnologia da computação, esses processos se expandiram, resultando no desenvolvimento de *softwares* com diversas tecnologias que unem diferentes áreas de conhecimento. Além disso, Xu et al. (2016) ainda ressalta que o avanço na otimização das simulações, juntamente com o crescimento exponencial do poder de processamento dos computadores, tem permitido melhorias diretas em projetos e gestão operacional de sistemas.

Atualmente, a modelagem de simulação em contextos computacionais não é apenas uma prática amplamente reconhecida, mas também um campo em constante evolução nas ciências e engenharias (XU et al., 2016; RODIČ, 2017). Nesse contexto, Rodič (2017) destaca o papel vital dessa abordagem na redução de custos, na agilização dos ciclos de desenvolvimento, no aprimoramento da qualidade dos produtos e na otimização da gestão do conhecimento, sobretudo em situações em que o sistema real é inacessível, muito caro ou perigoso para realizar avaliações e mudanças práticas, conforme descrito em Global (2024).

3.3 Métodos de Simulação

Para alcançar resultados eficazes, Rodič (2017) ainda salienta a importância da fase inicial de planejamento, que fundamenta o processo de análise e oferece aos gestores e equipes a oportunidade de aprofundar seu entendimento sobre os sistemas analisados. Nesse contexto, é crucial selecionar uma abordagem de simulação alinhada com as necessidades específicas do projeto, visto que essa escolha pode otimizar significativamente o processo de análise.

Cada metodologia de simulação apresenta suas próprias ferramentas e técnicas de modelagem, exigindo dos profissionais um entendimento profundo tanto do sistema em estudo quanto das características específicas da metodologia escolhida (BORSHCHEV, 2024). Essa afirmação está em comum acordo com os estudos de Rodič (2017), pois destaca que a escolha da metodologia deve ser baseada no sistema a ser modelado e nos objetivos a serem alcançados. No entanto, é importante ressaltar que essa escolha também pode ser influenciada pelo histórico ou conjunto de ferramentas disponíveis do modelador, conforme ilustra a Figura 5.

Entre as abordagens de simulação mais relevantes, destacam-se a simulação de Monte Carlo, Simulação de Sistemas Contínuos, Simulação de Eventos Discretos (SED) e a Simulação Baseada em Agentes (SBA). Essas técnicas se diferenciam significativamente em termos de metodologia e aplicabilidade, adaptando-se a distintas necessidades e contextos. Conforme discutido por Borshchev (2024), cada uma dessas técnicas é especialmente

indicada para diferentes cenários, sendo amplamente empregada em variados setores da indústria.

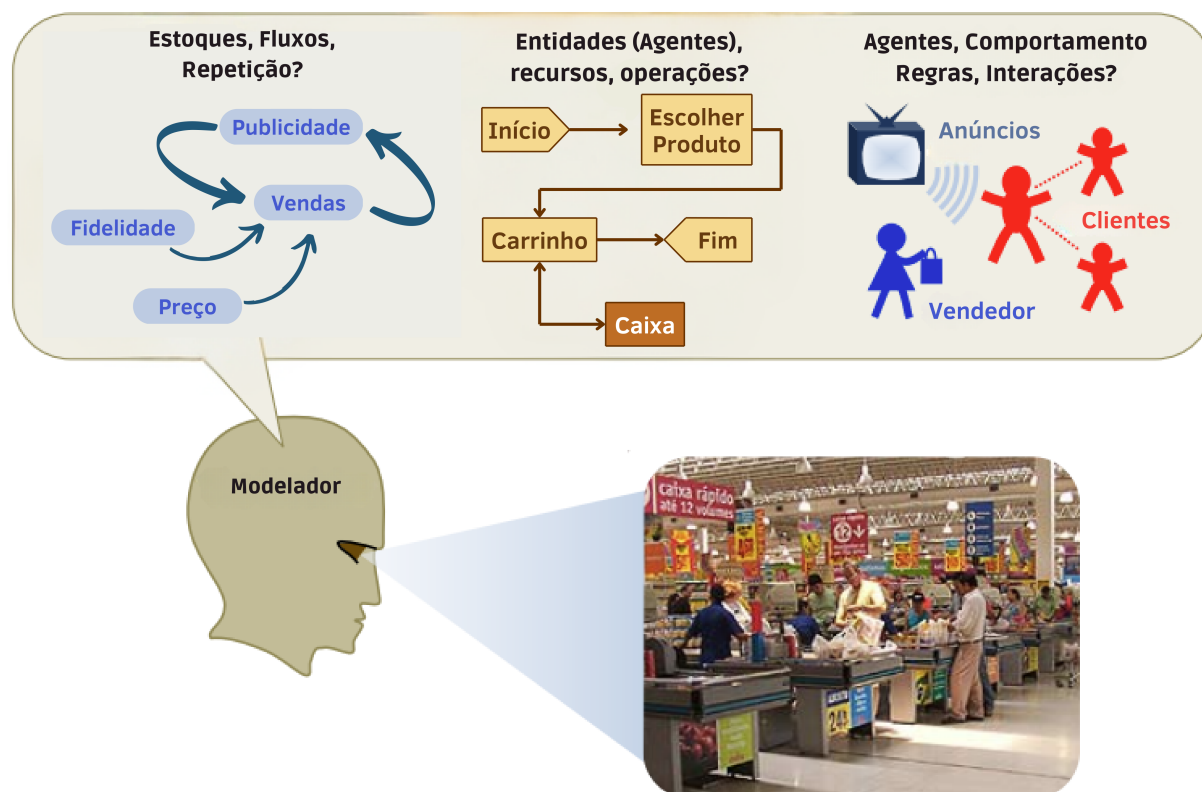


Figura 5 – Modelador observando o processo de caixa no supermercado na fase de definição do método a ser utilizado para realizar uma simulação deste processo - Fonte adaptado de [Borshchev \(2024\)](#)

A simulação de Monte Carlo é um método matemático que utiliza amostras aleatórias e a teoria das probabilidades para prever diferentes desfechos de situações incertas. Ao repetir simulações com dados aleatórios várias vezes, ela gera uma distribuição de resultados possíveis, proporcionando uma compreensão abrangente dos possíveis cenários. Esse método é amplamente aplicado em campos como finanças, gerenciamento de projetos e na estimativa de eventos incertos, ajudando a tomar decisões informadas em condições de incerteza ([IBM, 2024](#)).

Enquanto a simulação de Monte Carlo lida com a incerteza por meio de amostras aleatórias, a simulação de sistemas contínuos se distingue por sua abordagem de modelagem de sistemas onde as variáveis mudam de forma contínua ao longo do tempo. Este tipo de simulação é frequentemente utilizado em processos contínuos de fluxo, como na análise do fluxo de fluidos ou na distribuição de calor, permitindo uma representação precisa de fenômenos físicos que tendem a evoluir de maneira constante e ininterrupta ([PARAGON, 2024](#)).

Na simulação de eventos discretos, um sistema é modelado como uma série de eventos que ocorrem ao longo do tempo. Cada evento representa uma mudança de estado

no sistema, como o início ou término de uma tarefa, a chegada de um novo item em uma linha de produção, ou a conclusão de uma etapa de processamento. Tem sido amplamente utilizada em cenários industriais, especialmente para modelar processos bem definidos e sequenciais. Conforme descrito por [Paragon \(2024\)](#), a SED é uma ferramenta poderosa para ambientes industriais tradicionais, sendo eficaz na análise e otimização de processos de manufatura e logística.

A simulação baseada em agentes (SBA) enfoca o comportamento individual de entidades em um sistema, sendo útil para modelar fenômenos complexos onde as entidades se comportam de maneira autônoma e adaptativa. Devido a essa característica, [Bonabeau \(2002\)](#) e [Barros \(2011\)](#) afirmam que essas simulações são mais adequadas para sistemas dinâmicos e complexos, onde as interações e decisões individuais dos agentes podem levar a novos resultados. Exemplos de aplicação incluem a construção de grandes ecossistemas, onde a dinâmica emergente das interações entre agentes proporciona uma compreensão profunda do sistema como um todo.

Na indústria automobilística, a utilização de SBA tem ganhado destaque devido à sua capacidade de replicar comportamentos e interações detalhadas de cada componente do sistema de manufatura. Segundo [Macal e North \(2010\)](#), essa metodologia permite a simulação de sistemas complexos com precisão, considerando as características individuais e as relações dinâmicas entre os agentes. Em uma linha de produção, os agentes podem ser modelados para representar máquinas, robôs e trabalhadores, cada um desempenhando tarefas específicas e interagindo conforme regras predefinidas. Além disso, em cenários de modificações nos componentes do sistema, como a introdução de novos robôs, a SBA pode ser considerada como uma ferramenta potencial para avaliar os impactos no processo produtivo.

Complementando essa abordagem, os Gêmeos Digitais surgem como uma tecnologia emergente que amplia ainda mais as capacidades da SBA, criando uma ponte entre o mundo físico e o digital. De acordo com [Rodič \(2017\)](#), os Gêmeos Digitais oferecem uma plataforma dinâmica que, quando combinada com a SBA, proporciona uma avaliação mais precisa e detalhada dos processos produtivos. Essa integração permite uma visão em tempo real das operações industriais, otimizando a tomada de decisões e a eficiência operacional. Assim, a combinação dessas tecnologias potencializa suas capacidades, resultando em um sistema robusto e adaptável, perfeito para lidar com as complexidades da Indústria 4.0 ([TAO et al., 2019](#)). Além disso, essa abordagem facilita a modelagem detalhada de comportamentos individuais e interações entre agentes, criando um alicerce sólido para a integração de outras tecnologias emergentes, consolidando-se como uma tendência central na Indústria 4.0.

3.4 Gêmeos Digitais

Segundo o estudo de estado da arte conduzido por [Tao et al. \(2019\)](#), os GDs são representações virtuais de um objeto ou sistema físico, atualizadas com dados reais provenientes de sensores e outras fontes, permitindo uma visão em tempo real do estado e comportamento do objeto ou sistema físico. A Figura 6 ilustra esse conceito, destacando a conexão entre o mundo físico e sua réplica digital, bem como o fluxo de dados que alimenta a atualização do Gêmeo Digital.

Além de possibilitar essa atualização em tempo real, o Gêmeo Digital também permite a criação de múltiplas instâncias de Espaços Virtuais (EV), que também estão representadas na Figura 6. Essas instâncias correspondem a diferentes cenários ou variações do sistema físico, proporcionando um ambiente controlado para simulações e análises. Assim, é possível testar comportamentos em situações diversas, como mudanças nas condições de operação, novos *designs* ou otimizações, sem impactar o objeto físico real ([TAO et al., 2019](#)).

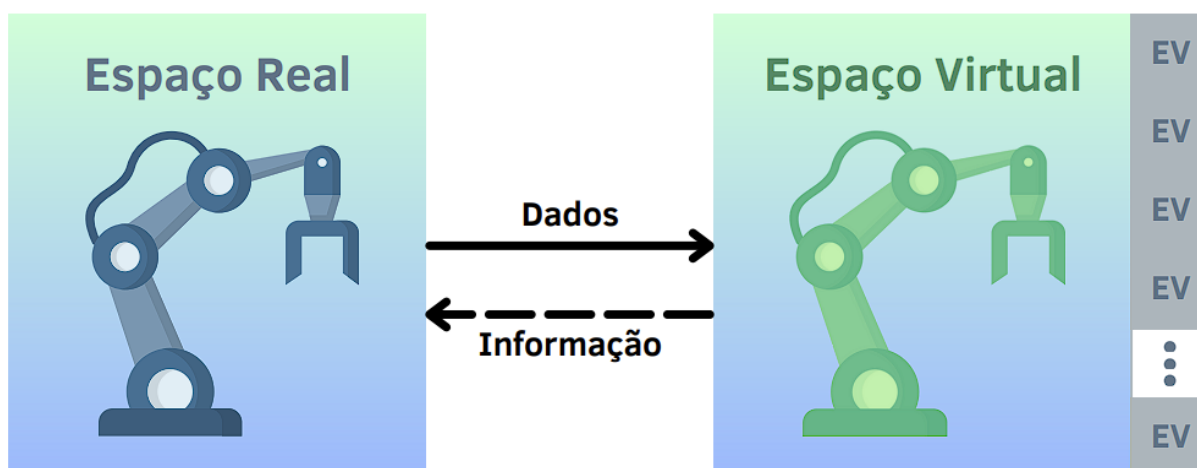


Figura 6 – Representação do fluxo de dados entre o Espaço Real e o Espaço Virtual em um Gêmeo Digital, com múltiplas instâncias de Espaços Virtuais (EV) para diferentes estados e simulações do sistema.

O modelo de alta fidelidade resultante desse processo é um conceito emprestado dos programas espaciais, inicialmente trabalhado por [Shafto et al. \(2010\)](#). Nas missões espaciais, quaisquer mudanças podem ser fatais, portanto todas as modificações de um veículo ou sonda em uma missão são testadas em um modelo de simulação de alta fidelidade para garantir que a mudança produza o efeito desejado ([RODIČ, 2017](#)).

O conceito de um Gêmeo Digital, envolve também acumular conhecimento ao longo do ciclo de vida do produto. Ou seja, todas as informações geradas em cada etapa do desenvolvimento do produto são armazenadas e disponibilizadas para as etapas seguintes. Para [Rodič \(2017\)](#), a gestão do conhecimento obtido por essas informações é crucial no desenvolvimento de novos produtos, e conseqüentemente, o desenvolvimento das empresas.

Embora o conceito de gêmeos digitais tenha sua origem na indústria espacial, é evidente que, em um mundo globalizado, essa ideia se difundiu amplamente para outras áreas. Atualmente, os gêmeos digitais vêm se tornando uma tecnologia crucial na indústria automobilística, permitindo a criação de réplicas virtuais precisas de veículos, componentes e processos de produção (ŞİMŞEK, 2024).

Essa disseminação da tecnologia, especialmente no setor automobilístico, não se limita apenas à criação de réplicas virtuais, mas envolve um nível cada vez maior de integração entre o físico e o digital. Para compreender o impacto real dessa transformação, é fundamental analisar os diferentes níveis de integração dos Gêmeos Digitais, que determinam o grau de interação e automação entre o mundo físico e sua contraparte virtual.

3.4.1 Níveis de Integração

Conforme conceituado por Kritzinger et al. (2018), essa tecnologia pode ser classificada em três níveis principais de integração, dependendo do grau de interconectividade entre os dados do objeto físico e sua representação virtual: Modelo Digital, Sombra Digital e Gêmeo Digital. Cada um desses níveis apresenta diferentes capacidades de monitoramento, controle e automação, sendo crucial compreender essas distinções para maximizar os benefícios oferecidos pela tecnologia.

A Figura 7 ilustra de forma clara os três níveis de integração, destacando os diferentes fluxos de dados, desde o manual no Modelo Digital até o fluxo totalmente automatizado no Gêmeo Digital.

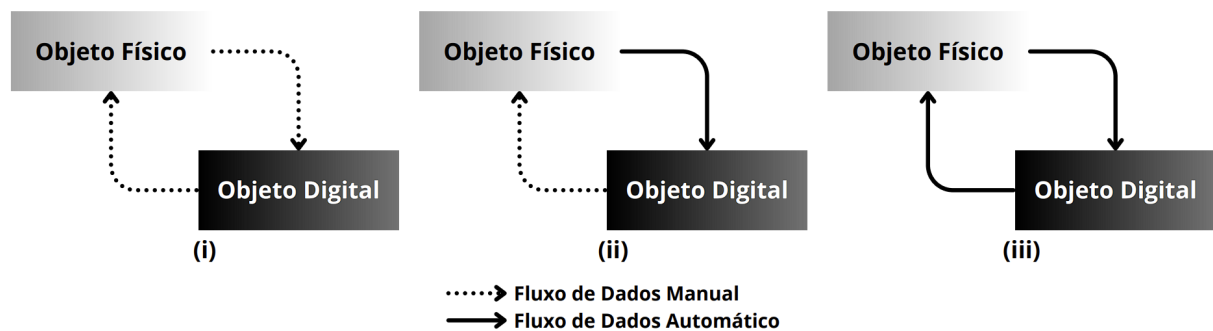


Figura 7 – Tipos de Gêmeos Digitais com base no nível de integração. (i) Modelo Digital; (ii) Sombra Digital; (iii) Gêmeo Digital.

O primeiro nível é o mais básico, e refere-se a uma representação virtual estática do objeto físico, denominado Modelo Digital. Aqui, as alterações no sistema físico não são automaticamente refletidas no modelo digital, exigindo atualizações manuais. Assim, o fluxo de dados é limitado, o que restringe a capacidade de simular e acompanhar o sistema em tempo real. Embora seja útil para algumas aplicações de planejamento e *design*, a falta de automatização limita sua eficácia em cenários de alta complexidade e dinâmica.

O próximo nível é a Sombra Digital, onde o fluxo de dados é unilateral. Isso significa que as informações são transmitidas automaticamente do sistema físico para o modelo digital, permitindo uma visualização mais precisa do *status* atual do sistema. Contudo, essa transferência de informações é unidirecional, e qualquer ajuste ou alteração feita no ambiente digital ainda requer intervenções manuais para ser aplicada no sistema físico. Apesar desse avanço, a Sombra Digital ainda não explora plenamente o potencial da automação em tempo real.

No nível mais avançado de integração, o Gêmeo Digital apresenta um fluxo de dados completamente bidirecional e automatizado. Isso significa que qualquer alteração feita no sistema físico é refletida imediatamente no modelo digital, e vice-versa. Com essa integração, o Gêmeo Digital não apenas monitora o desempenho e o estado do sistema em tempo real, como também pode prever falhas, otimizar processos e sugerir melhorias com base em dados contínuos. Este nível de interatividade e controle permite uma gestão muito mais eficiente e dinâmica do sistema físico, tornando o Gêmeo Digital uma ferramenta essencial na Indústria 4.0.

Compreender as diferentes camadas de integração é essencial para identificar como as indústrias podem utilizar os Gêmeos Digitais para atender às suas necessidades específicas. No entanto, a verdadeira força dessa tecnologia se revela quando é aplicada de forma prática, enfrentando os desafios e aproveitando as oportunidades do mundo real. Na indústria automobilística, os Gêmeos Digitais já demonstram seu poder transformador, não apenas otimizando processos, mas também antecipando problemas e criando novas possibilidades.

3.4.2 Principais Tecnologias Possibilitadoras

Para a implementação eficaz de Gêmeos Digitais, é essencial compreender as tecnologias e ferramentas que possibilitam essa inovação. Esses elementos formam a base para a criação de réplicas digitais precisas de objetos, processos e sistemas físicos, permitindo uma conexão contínua entre o mundo real e o virtual.

Entre os principais componentes, destacam-se os sensores inteligentes e a Internet das Coisas (IoT), fundamentais para essa integração. Sensores inteligentes capturam dados em tempo real sobre as condições operacionais e o estado dos ativos físicos, fornecendo informações críticas para a modelagem digital. Ao mesmo tempo, a IoT facilita a transmissão contínua desses dados para o ambiente digital, criando uma réplica virtual dinâmica e precisa que reflete o comportamento do sistema físico (JAVOID; HALEEM; SUMAN, 2023).

A transmissão de dados em alta velocidade, proporcionada pelo 5G, é outro componente essencial para o sucesso dos Gêmeos Digitais. Essa tecnologia oferece latência ultrabaixa e maior largura de banda, possibilitando a transmissão rápida e eficiente de

grandes volumes de dados em tempo real, o que é crucial para manter as réplicas digitais atualizadas e alinhadas com o estado dos sistemas físicos (NGUYEN et al., 2021).

A computação em nuvem é também um elemento crucial para a implementação dos Gêmeos Digitais, fornecendo a infraestrutura necessária para o armazenamento e processamento de grandes volumes de dados gerados pelos sensores e dispositivos IoT. O uso da nuvem permite que as empresas mantenham réplicas digitais de seus ativos de maneira acessível e escalável, facilitando a atualização contínua das simulações e o monitoramento em tempo real (JAVAID; HALEEM; SUMAN, 2023).

Finalmente, a implementação eficaz dos Gêmeos Digitais requer o uso de softwares de simulação e modelagem computacional. Ferramentas como Ansys Twin Builder, MATLAB/Simulink, Siemens Tecnomatix, NVIDIA Omniverse e COMSOL Multiphysics são amplamente utilizadas para criar representações digitais precisas de objetos físicos, replicando com fidelidade os comportamentos e processos reais, conforme discutido por Mohammed, Haber e Martinez Lastra (2022). Um exemplo notável é a utilização do NVIDIA Omniverse na criação do Digital Twin da Fábrica da BMW, que está ilustrado na Figura 8, destacando a capacidade de simular operações complexas em ambientes industriais com alto nível de realismo.

No próximo capítulo, serão exploradas as aplicações concretas dessa tecnologia no setor automobilístico, analisando os impactos na fabricação de automóveis. Serão apresentados exemplos práticos que destacam as contribuições dos Gêmeos Digitais, além de suas vantagens e os desafios enfrentados durante a implementação.



Figura 8 – Gêmeo Digital Fábrica de Carros da BMW, em Debrecen na Hungria - Fonte: Martin (2022)

4 Aplicações na Indústria Automobilística

O presente trabalho teve como objetivo realizar um estudo amplo acerca do tema Gêmeo Digital, explorando suas principais características, funcionamento e suas aplicações nos pilares da Indústria 4.0. A escolha da indústria automobilística como foco dos resultados decorre de seu papel central na adoção de tecnologias emergentes e seu impacto significativo na transformação digital. Neste capítulo, apresentam-se os resultados da pesquisa bibliográfica em relação aos objetivos traçados e comparam-se os resultados com os trabalhos já publicados.

Após uma análise detalhada da literatura, constatou-se que os Gêmeos Digitais trazem grandes benefícios para a indústria automobilística, especialmente no que diz respeito à eficiência operacional. Esses benefícios incluem a redução de custos, a otimização dos processos produtivos e o aprimoramento da qualidade dos produtos, acelerando o ciclo de inovação dentro das empresas.

Grandes empresas automotivas já têm adotado o uso dos Gêmeos Digitais em alguma escala. Entre essas empresas, algumas têm se destacado pela aplicação inovadora dessa tecnologia em diferentes estágios do processo produtivo. A Tesla, por exemplo, está desenvolvendo um Gêmeo Digital para cada carro que fabrica. Usando os dados dos veículos individuais, a empresa garante que cada um de seus carros esteja funcionando conforme o esperado. Com esses dados, a Tesla também atualiza o *software* de cada carro individualmente e depois faz o *upload* para corrigir vários problemas de manutenção, como compensar uma porta que trepida ajustando parâmetros de hidráulica do carro (INDUSTRYWEEK, 2020; SAS INSIGHTS, 2020).

Outra empresa automotiva que está usando GDs é a Volkswagen. Diferente da Tesla, a Volkswagen usou GDs para integrar uma nova estação de trabalho robótica em uma de suas plantas de manufatura. Eles criaram um modelo 3D altamente detalhado da planta, que incluía braços robóticos, lógica de sensores e componentes de segurança, e depois simularam processos e procedimentos antes de adicionar a linha de produção. O procedimento foi um sucesso e fez com que a empresa economizasse cerca de três semanas de tempo e 40 metros quadrados de espaço de produção (ŠKODA STORYBOARD, 2021).

Enquanto os exemplos anteriores focam em implementações industriais de Gêmeos Digitais por grandes empresas como Tesla e Volkswagen, o uso dessa tecnologia também tem sido explorado em estudos mais acadêmicos e experimentais. Um exemplo relevante é o estudo de Rajesh et al. (2019), que demonstra o papel do Gêmeo Digital na manutenção preditiva, tomando como caso uma pastilha de freio. Nesse estudo, os pesquisadores coletaram e compararam dados em tempo real de uma pastilha de freio física com os dados

do Gêmeo Digital simulado. A similaridade dos dados de ambas as fontes sugere que a manutenção preditiva das pastilhas de freio é possível, utilizando esse modelo e coletando dados por um período maior.

Outro campo no setor automotivo onde os Gêmeos Digitais estão ganhando espaço é o de veículos autônomos. Cada veículo autônomo é submetido à validação em termos de segurança e algoritmos de movimento em ambientes digitais, que podem ser comerciais ou de código aberto. Como cada veículo é desenvolvido de maneira única, os fabricantes estão buscando replicar digitalmente todos os aspectos dos veículos, como os sistemas de propulsão elétrica, que são comuns em diferentes marcas e modelos. Com o suporte de um banco de testes de direção física, o veículo simulado pode “navegar” em um ambiente virtual com base em dados do mundo real, e a resposta da máquina é enviada de volta para ajustar o comportamento do veículo físico, tornando-o tão eficiente como se estivesse instalado no automóvel (RASSÖLKIN; RJABTŠIKOV; VAIMANN; KALLASTE; KUTS; PARTYSHEV, 2020; RASSÖLKIN; RJABTŠIKOV; VAIMANN; KALLASTE; KUTS; DEMIDOVA, 2020).

Um estudo realizado por [Tata Consultancy Services \(2020\)](#) destaca que o Gêmeo Digital, além de monitorar e realizar a manutenção preditiva dos veículos, pode também potencializar as vendas ao oferecer uma experiência de compra imersiva e personalizada, integrando as preferências do cliente por meio de uma visão 360° do veículo, combinada com a realidade aumentada. Em complemento a isso, [Watts \(2018\)](#) demonstra que a captura e análise de dados operacionais e comportamentais dos veículos permite que os fabricantes ajustem os modelos às necessidades reais dos consumidores, ampliando a personalização e a satisfação no pós-venda. Dessa forma, as duas frentes se complementam, criando um ciclo contínuo de valor ao cliente.

As aplicações dos Gêmeos Digitais na indústria automobilística são amplas e abrangem desde a fase de concepção e desenvolvimento até o descarte final dos veículos. Assim, os Gêmeos Digitais na indústria automotiva podem ser benéficos tanto para os fabricantes, ao otimizar seus processos de produção, quanto para os revendedores de automóveis, que podem oferecer uma experiência de compra inovadora para os clientes. A personalização dos veículos, por exemplo, permite que o cliente configure o carro de acordo com suas preferências, tornando a experiência de compra mais atraente e sob medida. Essa flexibilidade e interatividade agregam valor não apenas para o consumidor comum, mas também para os competidores, que buscam veículos de alto desempenho ajustados às suas necessidades específicas. No entanto, apesar desses resultados promissores, a adoção dos Gêmeos Digitais enfrenta desafios consideráveis.

Entre os principais desafios está a integração de sistemas legados com as novas tecnologias digitais. Os GDs exigem a coleta de dados de diversas fontes, como sensores inteligentes e modelos digitais. Isso torna a integração um processo tecnicamente desafiador. Além disso, a troca de dados precisa ser feita de maneira eficiente e segura para garantir a

interoperabilidade entre os sistemas. Segundo relatórios recentes, esses tem sido alguns dos principais entraves para empresas automotivas que buscam adotar essas tecnologias ([TATA CONSULTANCY SERVICES, 2020](#); [TOOBLER, 2024](#)).

Outro fator importante que limita a adoção desse sistema é o alto custo inicial associado à implementação dessas tecnologias. Empresas de grande porte, como as principais montadoras globais, têm recursos financeiros para investir em infraestrutura e tecnologia de ponta. No entanto, pequenas e médias empresas enfrentam barreiras significativas, uma vez que os custos elevados de modernização e aquisição de ferramentas avançadas de modelagem digital podem ser importantes impeditivos ([RESEARCH; MARKETS, 2023](#)). Esse problema é agravado pelo fato de que, sem uma infraestrutura robusta, o retorno sobre o investimento em Gêmeos Digitais pode demorar a ser percebido.

Além disso, há a questão da resistência interna à mudança organizacional. A implementação de Gêmeos Digitais exige uma transformação substancial dos processos de trabalho e, muitas vezes, uma reestruturação da cultura corporativa. A resistência a essas mudanças pode ocorrer tanto em nível operacional quanto estratégico. Sem um esforço coordenado para capacitar os colaboradores e promover uma mentalidade voltada para a inovação, as empresas podem enfrentar dificuldades significativas para integrar efetivamente essas tecnologias em seus processos diários ([WELLS, 2019](#); [TOOBLER, 2024](#)).

5 Conclusão

Ao longo deste estudo, investigou-se o papel das simulações e gêmeos digitais no contexto da Indústria 4.0, com ênfase no setor automobilístico. Em particular, os gêmeos digitais destacam-se por sua capacidade de integrar o mundo físico ao digital, proporcionando uma otimização sem precedentes dos processos industriais.

Entre as simulações utilizadas, a Simulação Baseada em Agentes (SBA) se mostra especialmente relevante, não por ser emergente, mas por sua forte interação com os gêmeos digitais. A SBA complementa os gêmeos digitais ao permitir a modelagem detalhada de comportamentos autônomos em sistemas complexos, criando uma sinergia poderosa para a otimização de processos na indústria automotiva.

Apesar dos benefícios significativos que os gêmeos digitais oferecem, como a redução de custos e a personalização de produtos, a sua plena implementação ainda enfrenta barreiras tecnológicas e culturais que precisam ser superadas. Somente ao ultrapassar esses obstáculos, a indústria poderá explorar todo o potencial dessa tecnologia, ampliando ainda mais seus impactos positivos e consolidando os gêmeos digitais como uma ferramenta essencial na transformação digital automotiva.

Os resultados deste trabalho demonstram que, enquanto grandes empresas já aproveitam essas inovações, desafios como a integração de sistemas legados, a resistência à mudança organizacional e os custos de implementação ainda impedem a adoção mais ampla. No entanto, com o avanço das soluções tecnológicas e a adaptação organizacional, a expectativa é de que essa tecnologia continue a evoluir e trazer resultados cada vez mais expressivos.

Dessa forma, todos os objetivos deste estudo foram plenamente alcançados, ao investigar de maneira aprofundada os benefícios e desafios dos gêmeos digitais no setor automobilístico, ressaltando sua importância para a modernização e otimização dos processos industriais. Este trabalho oferece uma contribuição crítica ao destacar tanto as oportunidades quanto os obstáculos que envolvem o uso dessa tecnologia. Nesse sentido, há espaço para futuras pesquisas que busquem ampliar o acesso a essas inovações, especialmente para pequenas e médias empresas. Além disso, estudos podem explorar formas de integrar os gêmeos digitais a sistemas legados, promovendo uma adoção mais ampla e eficaz, consolidando-os como um pilar da transformação digital no setor.

Referências

- ALBERTIN, Marcos Ronaldo et al. Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/60805/1/2017_eve_mralbertin.pdf.
- BARROS. *Simulações Baseadas em Agentes*. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_tn_sto_140_888_18230.pdf. Acesso em: 4 out. 2011.
- BAUER, Wilhelm et al. Industrie 4.0–Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. *Berlin/Stuttgart*, 2014. Disponível em: https://web.archive.org/web/20220309151957id_/https://www.beck-elibrary.de/10.15358/0935-0381-2015-8-9-515.pdf.
- BONABEAU, Eric. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the national academy of sciences*, National Acad Sciences, v. 99, suppl_3, p. 7280–7287, 2002. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.082080899>.
- BORSHCHEV, Grigoryev. *The Big Book of Simulation Modeling*. Disponível em: <https://www.anylogic.com/upload/books/new-big-book/2-three-methods-in-simulation-modeling.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2024.
- CONVERT A MAIS. *Marketing B2B para Indústria 4.0*. 2024. Acesso em: 23 jun. 2024. Disponível em: <https://convertamais.com.br/inbound/marketing-b2b-para-industria-4-0/>.
- COUTINHO, Luciano. A terceira revolução industrial e tecnológica. As grandes tendências das mudanças. *Economia e sociedade*, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Economia, v. 1, n. 1, p. 69, 1992. Disponível em: <https://www.eco.unicamp.br/images/arquivos/artigos/398/coutinho.pdf>.
- DANZER, Julian. *Space-X Updated BFR 2018 Detailed Aerodynamics Simulation - SolidWorks Flow Simulation*. 2018. Accessed: 2024-06-23. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=1Hqpmu6LT2k&ab_channel=JulianDanzer.
- GLOBAL, TWI. *What is Simulation? What does it mean? (Definition and Examples)*. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-simulation#WhatDoesitMean>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- GOEKING, Weruska. Da máquina a vapor aos softwares de automação. *Portal O setor elétrico, Santa Cecília, SP*, 2010. Disponível em: https://www.voltimum.com.br/sites/www.voltimum.com.br/files/memoria_maio_10.pdf.
- IBM. *O que é Simulação de Monte Carlo?* Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/topics/monte-carlo-simulation>. Acesso em: 19 fev. 2024.

- INDUSTRYWEEK. How Digital Twins Are Raising the Stakes on Product Development. *IndustryWeek*, 2020. Accessed: 2024-09-06. Disponível em: <https://www.industryweek.com/technology-and-iiot/article/21130033/how-digital-twins-are-raising-the-stakes-on-product-development>.
- JAMES Watt e o caminho para a Revolução Industrial. https://www.nationalgeographic.pt/historia/james-watt-e-o-caminho-para-a-revolucao-industrial_3002. Acessado em: 2024-01-17.
- JAVOID, Mohd; HALEEM, Abid; SUMAN, Rajiv. Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review. *Cognitive Robotics*, v. 3, p. 71–92, 2023. ISSN 2667-2413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667241323000137>.
- KOK, Mustafa Versan; KAYA, Egemen; AKIN, Serhat. Monte Carlo Simulation of Oil Fields. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, v. 1, p. 207–211, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Serhat-Akin/publication/232844303_Monte_Carlo_Simulation_of_Oil_Fields/links/0deec5268eaf52f660000000/Monte-Carlo-Simulation-of-Oil-Fields.pdf.
- KRITZINGER, Werner et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018. ISSN 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021>.
- LIMA, Elaine Carvalho de; OLIVEIRA NETO, Calisto Rocha de. Revolução Industrial: considerações sobre o pioneirismo industrial inglês. *Revista Espaço Acadêmico*, v. 17, n. 194, p. 102–113, 2017. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/EspacoAcademico/article/view/32912/19746>.
- MACAL, Charles M; NORTH, Michael J. Tutorial on agent-based modeling and simulation. *Journal of Simulation*, Taylor & Francis, v. 4, n. 3, p. 151–162, 2010.
- MARIA, Anu. Introduction to modeling and simulation. In: PROCEEDINGS of the 29th conference on Winter simulation. 1997. P. 7–13. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/268437.268440>.
- MARTIN, Scott. *O que é um Digital Twin?* 2022. Acessado em: 16 out. 2024. Disponível em: <https://blog.nvidia.com.br/blog/o-que-e-um-digital-twin/>.
- MELOENY, Sam. *What is Industry 4.0?* 2022. Disponível em: <https://www.calsoft.com/what-is-industry-4-0/>.
- MOHAMMED, Wael M; HABER, Rodolfo E; MARTINEZ LASTRA, Jose L. Ontology-driven guidelines for architecting digital twins in factory automation applications. *Machines*, MDPI, v. 10, n. 10, p. 861, 2022.

- MOKYR, Joel; STROTZ, Robert H. The Second Industrial Revolution , 1870-1914. In. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16047909>.
- NGUYEN, Huan X et al. Digital twin for 5G and beyond. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 59, n. 2, p. 10–15, 2021.
- PARAGON. *Diferenças entre os tipos de Simulação*. Disponível em: <https://paragon.com.br/diferencas-entre-os-tipos-de-simulacao/>. Acesso em: 14 fev. 2024.
- PFEIFFER, Sabine. The vision of “Industrie 4.0” in the making—a case of future told, tamed, and traded. *Nanoethics*, Springer, v. 11, n. 1, p. 107–121, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11569-016-0280-3>.
- RAJESH, PK et al. Digital twin of an automotive brake pad for predictive maintenance. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 165, p. 18–24, 2019.
- RASSÖLKIN, Anton; RJABTŠIKOV, Viktor; VAIMANN, Toomas; KALLASTE, Ants; KUTS, Vladimir; DEMIDOVA, Galina L. Digital Twin Data Handling for Propulsion Drive System of Autonomous Electric Vehicle: Case Study. In: 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). 2020. P. 1–5. DOI: [10.1109/RTUCON51174.2020.9316471](https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316471).
- RASSÖLKIN, Anton; RJABTŠIKOV, Viktor; VAIMANN, Toomas; KALLASTE, Ants; KUTS, Vladimir; PARTYSHEV, Andriy. Digital Twin of an Electrical Motor Based on Empirical Performance Model. In: 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). 2020. P. 1–4. DOI: [10.1109/ICEPDS47235.2020.9249366](https://doi.org/10.1109/ICEPDS47235.2020.9249366).
- RESEARCH, Capital. *Fordismo: o que é, como funciona e principais características*. Disponível em: <https://capitalresearch.com.br/blog/fordismo/#:~:text=0%20Fordismo%20foi%20o%20s%C3%ADmbolo,por%20exemplo%2C%20a%20ind%C3%BAstria%20t%C3%AAsxil..> Acesso em: 12 mar. 2020.
- RESEARCH; MARKETS. *Digital Twin in Automotive Market - Global Industry Size, Share, Trends, Opportunity, and Forecast, 2018-2028*. 2023. Accessed: 2024-09-08. Disponível em: <https://www.researchandmarkets.com/report/automotive-digital-twin#product--description>.
- RODIČ, Blaž. Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm. *Organizacija*, v. 50, n. 3, p. 193–207, 2017. Disponível em: <https://intapi.sciendo.com/pdf/10.1515/orga-2017-0017>.
- SAS INSIGHTS. Modern Manufacturing’s Triple Play: Digital Twins, Analytics and IoT. *SAS Insights*, 2020. Accessed: 2024-09-06. Disponível em: https://www.sas.com/pt_pt/insights/articles/big-data/modern-manufacturing-s-triple-play-digital-twins-analytics-iot.html.

SCHRANK, Marc. Simulation as a Key Enabler to Address Challenges in the Automotive Industry. In: DASSAULT SYSTÈMES. GRAZER Symposium Virtuelles Fahrzeug. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236731069_Simulation_as_a_Key_Enabler_to_Address_Challenges_in_the_Automotive_Industry.

SEBRAE. *Quando surgiu a Indústria 4.0?* Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/quando-surgiu-a-industria-40,4542c009cbce3810VgnVCM10000d701210aRCRD#:~:text=0%20termo%20Ind%C3%BAstria%204.0%20foi,estudo%20sobre%20a%20Ind%C3%BAstria%204.0..> Acesso em: 18 out. 2022.

SHAFTO, Mike et al. *Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap*. Mai. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap.

SHANNON, Robert E. Introduction to simulation. In: PROCEEDINGS of the 24th conference on Winter simulation. 1992. P. 65–73. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/167293.167302>.

ŞİMŞEK, Hazal. *Top 5 Use Cases of Digital Twin in Automotive Industry in '23*. 2024. A digital twin in the automotive industry is a virtual replica of an entire car, including software, mechanics, electrics, and physical behavior. Disponível em: <https://research.aimultiple.com/digital-twin-automotive/>.

ŠKODA STORYBOARD. Industry 4.0: ŠKODA AUTO Vrchlabí Plant Has Made Use of Digital Twin. *ŠKODA Storyboard*, 2021. Accessed: 2024-09-06. Disponível em: <https://www.skoda-storyboard.com/en/press-releases/industry-4-0-skoda-auto-vrchlabi-plant-has-made-use-of-digital-twin/>.

TAO, Fei et al. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 4, p. 2405–2415, 2019. DOI: [10.1109/TII.2018.2873186](https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186).

TATA CONSULTANCY SERVICES. *Digital Twin in the Automotive Industry: Driving Physical-Digital Convergence*. 2020. Accessed: 2024-09-06. Disponível em: <https://www.tcs.com/content/dam/global-tcs/en/pdfs/insights/whitepapers/industry-4-0-and-digital-twin.pdf>.

THAMES, Lane; SCHAEFER, Dirk. Industry 4.0: An Overview of Key Benefits, Technologies, and Challenges. In: mai. 2017. ISBN 978-3319506593. DOI: [10.1007/978-3-319-50660-9_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-50660-9_1). Disponível em: <https://tinyurl.com/2528ey2f>.

TOOBLER. *The Role of Digital Twin in the Automotive Industry in 2024*. 2024. Accessed: 2024-09-08. Disponível em: <https://www.toobler.com/blog/digital-twin-automotive-industry>.

VEIKOS, Nicholas M. The Importance of Engineering Simulation for Innovation. *Digital Engineering 24/7*, 2014. Disponível em: <https://www.digitalengineering247.com/article/importance-engineering-simulation-innovation/>.

WATTS, Ben. Digital Twins in the Automotive Industry. *CHALLENGE Knowledge Hub*, 2018. Accessed: 2024-09-06. Disponível em: <https://www.challenge.org/knowledgeitems/digital-twins-in-the-automotive-industry/>.

WELLS, Peter. Challenges in the Digital Transformation of the Automotive Industry. *ATZ worldwide*, Springer, 2019. Accessed: 2024-09-08. DOI: [10.1007/s38311-019-0074-7](https://doi.org/10.1007/s38311-019-0074-7). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s38311-019-0074-7>.

XU, Jie et al. Simulation optimization in the era of Industrial 4.0 and the Industrial Internet. *Journal of Simulation*, Taylor & Francis, v. 10, n. 4, p. 310–320, 2016. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1057/s41273-016-0037-6>.