


SIMULAÇÃO HÍBRIDA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0: UM ESTUDO DE ESCOPO

HYBRID SIMULATION IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0: A SCOPING STUDY

SIMULACIÓN HÍBRIDA EN EL CONTEXTO DE LA INDUSTRIA 4.0: UN ESTUDIO DE ALCANCE

 <https://doi.org/10.56238/arev8n4-018>

Data de submissão: 10/03/2026

Data de publicação: 10/04/2026

Ana Larissa da Silva Monteiro

Bacharelado em Engenharia de Produção
Instituição: Universidade Federal de Catalão (UFCAT)
E-mail: larissa.silva@discente.ufcat.edu.br
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0057889174299896>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9563-5975>

Stella Jacyszyn Bachega

Doutorado em Engenharia de Produção
Instituição: Universidade Federal de Catalão (UFCAT)
E-mail: stella@ufcat.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6057931770645811>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7533-5361>

Dalton Matsuo Tavares

Doutorado em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Federal de Catalão (UFCAT)
E-mail: dalton_tavares@ufcat.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2307520004470578>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8531-5578>

RESUMO

As técnicas de simulação podem ser utilizadas de forma integrada em aplicações complexas e no contexto da Indústria 4.0. Dentre essas técnicas, destacam-se a simulação de eventos discretos, a modelagem e simulação baseada em agentes e a dinâmica de sistemas. Esta pesquisa tem como objetivo geral identificar, por meio de um estudo de escopo, os vínculos, aplicações, características e tendências da simulação híbrida no contexto da Indústria 4.0. Para tanto, a metodologia fundamenta-se na perspectiva hipotético-dedutiva, com abordagem de pesquisa qualitativa e com a utilização do procedimento de estudo de escopo (*scoping study*). A pesquisa envolveu a análise de vinte e seis estudos que abordaram diferentes áreas, como manufatura, cadeias de suprimentos, sistemas energéticos e áreas urbanas, com foco na implementação de modelos híbridos que combinam metodologias de simulação discretas, contínuas e baseadas em agentes. Os principais resultados revelam que a simulação híbrida é uma ferramenta versátil e eficaz para o monitoramento, controle e otimização de sistemas complexos, promovendo maior precisão e agilidade na tomada de decisão. Destaca-se, ainda, que essa técnica facilita a criação de gêmeos digitais (*digital twins*), importantes para a gestão inteligente de recursos e processos na Indústria 4.0. As conclusões indicam que a

integração de diferentes modelos de simulação pode constituir uma estratégia central para apoiar a inovação tecnológica, promover a sustentabilidade industrial e fortalecer a competitividade das empresas na era digital, oferecendo soluções adaptáveis às demandas de um ambiente cada vez mais dinâmico e complexo.

Palavras-chave: Simulação Híbrida. Simulação de Eventos Discretos. Simulação Baseada em Agentes. Dinâmica de Sistemas. Indústria 4.0.

ABSTRACT

Simulation techniques can be integrated to address complex applications within the context of Industry 4.0. Among these techniques are discrete event simulation, agent-based modeling and simulation, and system dynamics. This research aims to identify, through a scoping study, the links, applications, characteristics, and trends of hybrid simulation in the context of Industry 4.0. To this end, the methodology is grounded in the hypothetical-deductive perspective, adopting a qualitative research approach and employing the scoping study procedure. The research involved the analysis of twenty-six studies covering different areas, such as manufacturing, supply chains, energy systems, and urban areas, with a focus on the implementation of hybrid models that combine discrete, continuous, and agent-based simulation methodologies. The main results reveal that hybrid simulation is a versatile and effective tool for monitoring, control, and optimization of complex systems, promoting greater accuracy and agility in decision-making. Furthermore, this technique facilitates the development of digital twins, which are essential for the intelligent management of resources and processes in Industry 4.0. The conclusions indicate that integrating different simulation models may constitute a central strategy to support technological innovation, promote industrial sustainability, and strengthen business competitiveness in the digital era, offering solutions adaptable to the demands of an increasingly dynamic and complex environment.

Keywords: Hybrid Simulation. Discrete Event Simulation. Agent-Based Simulation. System Dynamics. Industry 4.0.

RESUMEN

Las técnicas de simulación pueden aplicarse de forma integrada en sistemas complejos en el contexto de la Industria 4.0. Entre ellas destacan la simulación de eventos discretos, la simulación basada en agentes y la dinámica de sistemas. Esta investigación tiene como objetivo general identificar, mediante un estudio de alcance, los vínculos, aplicaciones, características y tendencias de la simulación híbrida en el contexto de la Industria 4.0. La metodología se fundamenta en la perspectiva hipotético-deductiva, con un diseño de investigación cuantitativo, mediante la aplicación del procedimiento de estudio de alcance (*scoping study*). Se analizaron veintiséis estudios en áreas como manufactura, cadenas de suministro, sistemas energéticos y entornos urbanos, centrados en modelos híbridos que integran simulación discreta, continua y basada en agentes. Los resultados muestran que la simulación híbrida es una herramienta eficaz para el monitoreo, control y optimización de sistemas complejos, mejorando la precisión y la agilidad en la toma de decisiones. Asimismo, facilita el desarrollo de gemelos digitales, esenciales para la gestión inteligente de recursos y procesos. Se concluye que la integración de modelos de simulación constituye una estrategia clave para impulsar la innovación tecnológica, promover la sostenibilidad industrial y fortalecer la competitividad empresarial en entornos dinámicos y complejos.

Palabras clave: Simulación Híbrida. Simulación de Eventos Discretos. Simulación Basada en Agentes. Dinámica de Sistemas. Industria 4.0.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, conhecida também como a quarta revolução industrial, surge da digitalização da atividade fabril, na qual a produção é integrada e controlada por meio de sensores e equipamentos conectados à rede, criando uma ligação entre o mundo físico e o virtual. Essa nova abordagem tem como base a inter-relação de conceitos como a Internet das Coisas (IoT), Sistemas Físico-Cibernéticos (CPS), Internet dos Serviços (IoS) e fábricas inteligentes (Hofmann; Rüsçh, 2017). Além desses conceitos fundamentais, a simulação emerge como técnica de muita importância para a manufatura, contribuindo para a eficiência e qualidade no desenvolvimento de produtos. A simulação permite que dados de um sistema real sejam representados simultaneamente em um ambiente computadorizado, fornecendo *insights* que podem aprimorar os processos industriais.

Dentre as técnicas de simulação, algumas se destacam, a saber: modelagem e simulação baseada em agentes (*agente-based modeling and simulation – ABSM*), dinâmica de sistemas (*system dynamics – SD*) e simulação de eventos discretos (*discrete event simulation – DES*) (Ferreira; Armellini; Santa-Eulália, 2020). Um dos métodos para aplicar a simulação na indústria é a utilização de mais de uma técnica na solução de um mesmo problema, caracterizando assim a simulação híbrida, conforme descrito por Eldabi *et al.* (2016), essa abordagem permite uma compreensão mais aprofundada de sistemas complexos, já que os pesquisadores podem analisar o problema sob diversas óticas e dimensões.

Partindo da multiplicidade de desafios encontrados no cotidiano empresarial, a escolha da técnica de modelagem ideal pode ser determinante para alcançar resultados satisfatórios. Essa seleção depende dos objetivos almejados, da natureza dos dados disponíveis e da complexidade do problema em questão. Neste contexto, a simulação híbrida surge como uma ferramenta promissora, oferecendo a flexibilidade necessária para integrar diferentes métodos e superar as limitações de cada um isoladamente, possibilitando a criação de modelos mais simples, intuitivos e eficientes (Scheidegger *et al.* 2018).

Sendo assim, as questões de pesquisa que orientam este trabalho são as seguintes: (i) Quais são as abordagens baseadas em simulação que estão sendo empregadas de forma híbrida no contexto da Indústria 4.0? (ii) Quais são os propósitos, a natureza empírica e as áreas de aplicação dos estudos sobre simulação híbrida na Indústria 4.0? Esta pesquisa justifica-se pela importância do tema no contexto empresarial e atual, como pode ser observado em Cavata *et al.* (2020), Ghasemi *et al.* (2024), Mokhtari e Imanpour (2023), Tissot *et al.* (2022), Yang *et al.* (2023), Zúñiga *et al.* (2023), entre outros.

Portanto, o objetivo geral deste artigo identificar, por meio de um estudo de escopo, os vínculos, aplicações, características e tendências da simulação híbrida no contexto da Indústria 4.0.

Especificamente, pretende-se: (i) Identificar as características/particularidades da simulação híbrida; (ii) Verificar as características/particularidades da Indústria 4.0; (iii) Detectar o(s) relacionamento(s) entre a simulação híbrida e a Indústria.

Este trabalho é estruturado em cinco seções. Logo após a introdução, o referencial teórico apresenta os principais resultados de autores que pesquisaram o uso e as aplicações de simulação híbrida no contexto da indústria 4.0. A seção de metodologia caracteriza a pesquisa realizada e os procedimentos adotados para a elaboração do estudo de escopo. Em seguida, os resultados obtidos são apresentados, orientados pelas questões de pesquisa e objetivos do trabalho. Por fim, a seção de conclusão sintetiza os principais resultados encontrados, bem como as contribuições e sugestões de pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A nova onda de avanço tecnológico é conhecida como Indústria 4.0. O termo surgiu e se difundiu primeiramente na Alemanha, quando se tentava desenvolver um programa de fábricas inteligentes apoiadas na computação e conectividade. Até então se conhecia três revoluções industriais que foram grandes transformações nas formas de organizar o trabalho e de produzir, além da energia usada e da natureza dos produtos. A quarta revolução industrial é representada por sistemas de manufatura modular e tem como característica cenários onde os produtos controlam o próprio processo de fabricação. Tais produtos podem ser fabricados em tamanhos de lotes individuais, conservando condições econômicas de produção em massa (BAUR; WEE, 2015; LASI et al., 2014; LUCAČ, 2015).

No contexto da Indústria 4.0, a simulação é tida como uma das tecnologias que estão transformando a produção industrial. Demais tecnologias são o *Big Data* e seu uso analítico e inteligente, a realidade aumentada, os robôs autônomos, os sistemas de integração horizontal e vertical, a Internet das Coisas (IoT) na indústria etc. (Gerbert et al., 2015).

A simulação é considerada como uma das técnicas-chave da pesquisa operacional, por ser uma das mais utilizadas e utiliza o computador para imitar a operação de sistema ou um processo inteiro (Hillier; Lieberman, 2013). Conforme Ferreira, Armellini e Santa-Eulalia (2020), na área de simulação no contexto da Indústria 4.0, há várias abordagens, como a simulação de eventos discretos (*discrete event simulation* – DES), a dinâmica de sistemas (*system dynamics* – SD), modelagem e simulação baseada em agente (*agente-based modeling and simulation* – ABMS), a simulação híbrida (*hybrid simulation*), gêmeos digitais (*digital twins*), realidade aumentada, simulação de redes de Petri, comissionamento virtual (*virtual commissioning*), realidade virtual e inteligência artificial. Estas

podem ser utilizadas em de forma híbrida para alcançar resultados mais significativos para determinados tipos de problemas empresariais de complexidade.

Abo-Khalil (2023) demonstrou que a abordagem de gêmeos digitais híbridos melhora significativamente a previsão, monitoramento, estabilidade e manutenção de sistemas energéticos, comprovando sua eficiência em estudos de caso reais, além de destacar a potencialidade de personalizar e otimizar operações em tempo real, contribuindo para maior confiabilidade do sistema de energia.

Al-Subaihawi, Ricles e Quiel (2022) apresentaram que a implementação do método de atualização em tempo real resultou em previsão significativamente mais precisa das forças de amortecimento e da resposta estrutural, permitindo uma avaliação mais confiável de possíveis danos durante eventos sísmicos de alta intensidade.

Azucena *et al.* (2021) desenvolveram uma ferramenta capaz de prever interrupções, analisar cenários de resiliência do sistema de transporte, identificar interdependências críticas, além de demonstrar o potencial de aplicação em infraestruturas críticas de transporte multimodal.

Camargo *et al.* (2023) demonstraram que os modelos de simulação híbridos obtidos têm alta precisão temporal, capazes de simular diferentes mudanças de processo, incluindo a inserção de novas atividades, mantendo capacidade de análise de hipóteses.

Carramiñana *et al.* (2024) expuseram a viabilidade de uma estrutura de simulação híbrida para análises de risco, aumento na capacidade de previsão de impactos, melhor suporte à tomada de decisão, e uma abordagem escalável, reutilizável e explicável, capaz de simular estratégias de mitigação de riscos e aumentar a resiliência das cidades.

Covi *et al.* (2024) advogaram que o método híbrido se mostrou eficiente, com alta precisão na simulação de sistemas com múltiplos inversores, e uma significativa redução do tempo de processamento em comparação com simulações EMT completas, confirmando a viabilidade da abordagem para aplicações de análise e controle em sistemas de energia compatíveis com a Indústria 4.0.

Ferrari *et al.* (2022) demonstraram que a abordagem híbrida é eficaz na simulação de sistemas complexos de armazenamento, com melhorias na precisão das análises, identificação de gargalos, e potencial aumento na eficiência operacional do sistema de armazenamento automatizado.

Fischer *et al.* (2021) apresentaram a viabilidade e os benefícios do uso de simulação híbrida com atualização em tempo real para otimizar cronogramas na construção de estacas, com potencial de melhorar eficiência, reduzir atrasos, e apoiar tomadas de decisão mais rápidas e precisas.

Gangwar *et al.* (2023) provaram a eficácia em prever preços de energia elétrica com 85% de

acerto, gerar múltiplos cenários que avaliam impactos econômicos na operação industrial, reduzir perdas financeiras, além de evidenciar o potencial de uso de simulação híbrida combinada com previsão estatística para a gestão energética na Indústria 4.0.

Golroudbary *et al.* (2019) evidenciaram que a abordagem híbrida fornece *insights* sobre os efeitos de variáveis críticas na capacidade e risco da logística de última milha, contribuindo para estratégias de melhora na eficiência e sustentabilidade do sistema logístico equipado com tecnologias da Indústria 4.0.

Heinzl *et al.* (2018) corroboraram que a simulação híbrida baseada em hyPDEVS permite uma integração eficiente de modelos, melhora a velocidade de simulação (calculada em segundos para cenários complexos), e potencialmente aumenta a precisão em aplicações industriais, apoiando a tomada de decisão na Indústria 4.0

Lei *et al.* (2023) demonstraram que estratégias de inspeção baseadas em gatilho beta podem melhorar significativamente a eficácia na detecção de falsificações, aumentando a resiliência do sistema, além de avaliar as diferenças de desempenho entre cenários com diferentes contramedidas.

Li *et al.* (2021) comprovaram que o controle de modo deslizante aplicado na RTHS melhora a estabilidade e o desempenho dos testes, mesmo diante de incertezas, sugerindo uma abordagem eficiente para testes e validações de estruturas complexas na indústria 4.0.

Meneghello *et al.* (2025) evidenciaram melhorias na precisão de previsão de tempos de ciclo, redução de erro nas métricas de fila e tempos, validação da eficácia do método Rims+ em ambientes com filas e congestionamentos, além de destacarem a viabilidade da combinação de simulação híbrida com ML para aplicações na Indústria 4.0.

Muerza, Urciuoli e Habas (2023) encontraram aumento de aproximadamente 55,7% nos lucros e redução de 24,2% nas emissões de CO₂e por tonelada de *biocommodity* produzida, demonstrando que o modelo ajuda na tomada de decisões mais sustentáveis e lucrativas.

Mušič e Sagawa (2024) destacaram que o sistema híbrido pode estabilizar o WIP mesmo diante de variações de demanda, melhorando a resposta do sistema de produção, com potencial aplicação prática em fábricas mais inteligentes e flexíveis.

Nguyen (2024) provou que a estrutura proposta se mostrou eficaz para orientar a construção de modelos híbridos, facilitou a comunicação e entendimento do processo de modelagem, e foi validada por meio de estudo de caso na COVID-19, demonstrando sua aplicabilidade em problemas complexos relevantes na Indústria 4.0.

Rodrigue *et al.* (2024) demonstraram que a abordagem híbrida reduz em até 78% o tempo de CPU na simulação, mantendo alta precisão na conservação de cargas térmicas e potências, além de

permitir simulações mais eficientes em redes de grande escala.

Silva *et al.* (2022) validaram a abordagem em um caso de estudo real, demonstrando que a simulação híbrida pode prever desempenho operacional, identificar estratégias de configuração otimizadas, reduzir riscos na implementação e acelerar a tomada de decisões sobre automação com robôs *plug & produce*.

Sobottka *et al.* (2018) desenvolveram de forma bem-sucedida um módulo de otimização híbrido, que demonstrou potencial de melhora na eficiência energética e na produtividade, além de validar a abordagem para aplicações industriais específicas, com sugestões de melhorias futuras.

Takeuchi *et al.* (2023) validaram um sistema de medição de força, demonstraram maior precisão na análise de força de reação, redução de erros e aumento da reprodutibilidade experimental, além de potencial para aplicação futura em sistemas de automação e monitoramento em tempo real em estruturas.

Tsokanas *et al.* (2022) mostraram que modelos de ordem reduzida baseados em expansão de caos polinomial e redes neurais podem reproduzir de forma confiável as respostas de modelos completos, permitindo simulações híbridas em tempo real, com alta fidelidade e eficiência computacional.

Tsokanas, Pastorino e Stojadinović (2022) validaram um esquema de controle preditivo adaptativo que garantiu melhorias na precisão das simulações híbridas, especialmente na compensação de atrasos, demonstrando robustez e estabilidade do método mesmo com variações paramétricas e dinâmicas dos sistemas testados.

Tur *et al.* (2024) validaram um modelo de catenária em tempo real, com boa concordância com dados experimentais até 20 Hz, demonstração da estabilidade do sistema mediante controle LQG, e potencial aplicação em testes de desempenho de pantógrafos com maior precisão e segurança.

Witteveen, Koller e Penninger (2022) demonstraram eficácia do método iterativo para alcançar o acoplamento entre sistema numérico e real, com resultados de exemplos práticos (como a suspensão de uma roda e amortecedores), evidenciando a convergência e a aplicabilidade do procedimento para sistemas de baixa velocidade e dinâmica moderada.

Xanthopoulos e Kostavelis (2024) expuseram que a abordagem híbrida DES-SD é promissora para o desenvolvimento de réplicas digitais realistas, possibilitando uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas de cadeias de suprimentos e contribuindo para a inovação na gestão e controle em ambientes da Indústria 4.0.

3 METODOLOGIA

A explicação científica adotada neste trabalho seguiu a perspectiva hipotético-dedutiva (Carvalho, 2000). Ao longo do estudo de escopo desenvolvido, foram formuladas proposições que contribuíram para o alcance do objetivo da pesquisa. Em relação à abordagem utilizada, foi empregada uma abordagem qualitativa (Bryman, 1989; Creswell, 1994). A abordagem qualitativa foi utilizada para a verificação de trabalhos selecionados, mantendo uma estreita proximidade com o fenômeno investigado e coletado alguns dados. O procedimento de pesquisa adotado é o estudo de escopo (*scoping study*). Segundo Arksey e O'Malley (2005), esse tipo de estudo envolve uma revisão de literatura com o objetivo principal de identificar e selecionar os trabalhos mais relevantes em um determinado campo de estudo. De acordo com esses autores, os principais motivos para a realização deste estudo de escopo incluíram a investigação da natureza de um tema, a ampliação do alcance e a apresentação dos resultados de uma atividade de pesquisa, a demonstração do potencial para uma revisão sistemática completa, além de identificar lacunas na literatura existente. Neste estudo, utilizou-se esse procedimento exatamente para descobrir essas lacunas de pesquisa existentes até o momento da coleta dos dados. As considerações de Arksey e O'Malley (2005) e de Levac, Colquhoun e O'Brien (2010) foram levadas em conta na condução do estudo de escopo.

Os passos seguidos nesta pesquisa estão detalhados a seguir:

- a) Passo 1: Identificação da questão de pesquisa. Nesta etapa, foi essencial iniciar o processo com a definição da questão de pesquisa. As questões de pesquisa orientam as fases subsequentes do estudo e devem ser claramente delineadas. Elas possuem uma natureza ampla (Arksey; O'Malley, 2005; Levac; Colquhoun; O'Brien, 2010).
- b) Passo 2: Identificação de estudos relevantes. A identificação de estudos primários (publicados ou não) e revisões foram o mais abrangente possível. A estratégia de busca por evidências de pesquisa deve cobrir diferentes fontes (Arksey; O'Malley, 2005). Para a obtenção de uma perspectiva ampla, foram feitas buscas em fontes eletrônicas, conforme sugerido por Kitchenham (2004). Os benefícios de pesquisar em bases de dados são destacados por Dieste e Padua (2007). Nesta etapa, foi escolhida a base de dados que estava disponível para acesso pela universidade no momento da pesquisa, sendo assim, foi utilizada a ScienceDirect. A busca foi realizada com as seguintes palavras chaves: “*hybrid simulation*” OR “*multimethod simulation*” AND “*industry 4.0*”.
- c) Passo 3: Seleção de estudos. Nesta etapa houve a definição de critérios *post hoc* de inclusão e exclusão para selecionar os artigos a serem utilizados neste trabalho, assim, de acordo com o resumo dos artigos selecionados pelas palavras chaves, foi analisado se realmente se tratava

de uma aplicação dentro da indústria 4.0. Os artigos que estavam fora desse parâmetro foram descartados da seleção. A característica *post hoc* garante maior familiaridade com a literatura, aprimorando a seleção com base na relevância (Arksey; O'Malley, 2005).

- d) Passo 4: Registro dos dados. O registro dos dados envolveu a extração de informações de cada estudo como uma revisão narrativa (Arksey; O'Malley, 2005; Pawson, 2002). Os dados foram tabulados de forma a contribuir para a resposta das questões de pesquisa levantadas.
- e) Passo 5: Agrupamento, resumo e relato dos resultados nesta etapa do estudo de escopo, foi apresentada uma visão geral de todas as citações revisadas. As decisões sobre a melhor forma de introduzir esse material foram importantes, sendo duas maneiras consideradas: uma análise numérica básica da natureza, extensão e distribuição do material incluído no estudo; e a organização temática da literatura (Arksey; O'Malley, 2005).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram selecionados 26 artigos que abordam conceitos e atividades relacionadas a diferentes áreas de pesquisa, incluindo mecatrônica, engenharia, sistemas de informação, simulação, estruturas e manufatura. A Tabela 1 apresenta a categorização dos estudos selecionados, exibindo o ID da publicação (identificador utilizado), autores, anos e suas respectivas instituições e fontes. Ressalta-se que os estudos foram publicados em periódicos internacionais, reforçando a abrangência, a relevância e o rigor acadêmico das contribuições selecionadas. Destaca-se que a maioria dos artigos analisados (7; 26,92%) foi publicada em 2024, seguida por 2023 (6; 23,08%) e 2022 (6; 23,08%). Esse resultado indica que o tema tem apresentado relevância crescente no contexto atual.

Tabela 1. Lista dos trabalhos selecionados.

ID	Autores	Ano	Fonte	Instituição dos pesquisadores
P1	Abo-Khalil	2023	Case Studies in Thermal Engineering	University of Sharjah
P2	Al-Subaihawi, S.; Ricles, J. M.; Quiel, S. E.	2022	Soil Dynamics and Earthquake Engineering	Lehigh University
P3	Azucena, J. et al.	2021	Simulation Modelling Practice and Theory	University of Arkansas
P4	Camargo, M. et al.	2023	Information Systems	University of Tartu; Universidad de los Andes; Apromore, Tartu
P5	Carramiñana, D. et al.	2024	Simulation Modelling Practice and Theory	Universidad Politécnica de Madrid

P6	Covi, P. et al.	2024	Engineering Structures	University of trento;Joint Research Centre (JRC)
P7	Ferrari, A. et al.	2022	IFAC-PapersOnLine	Politecnico di Torino
P8	Fischer, A. et al.	2021	IFAC-PapersOnLine	Tchnical University of Munich
P9	Gangwar, S. et al.	2023	Computers & Chemical Engineering	Universidade Rovira i Virgili; Messer Ibérica de Gases S.A.U. School of Engineering Science; School of Engineering; Faculty of Process and Environmental Engineering
P10	Golroudbary, S. R. et al.	2019	Procedia Manufacturing	Institute of Computer Engineering; Vienna University of Technology
P11	Heinzl, B. et al.	2018	IFAC-PapersOnLine	Rutgers University
P12	Lei, R. et al.	2023	Manufacturing Letters	Southeast University; Purdue University
P13	Li, H. et al.	2021	Mechanical Systems and Signal Processing	Sapienza University of Rome; Fondazione Bruno Kessler; University of Trento; Free University of Bolzano University of Zaragoza; Instituto Real de Tecnologia KTH; CIRCE – Research Centre for Energy Resources and Consumption
P14	Meneghello, F. et al.	2025	Information Systems	University of Ljubljana; Universidade Federal de São Carlos
P15	Muerza, Urciuoli e Habas	2023	Journal of Cleaner Production	University of Strathclyde
P16	Mušič , G.; Sagawa, J. K.	2024	Computers & Industrial Engineering	IMT Atlantique
P17	Nguyen, L. K. N.	2024	European Journal of Operational Research	University of Southern Denmark; Aalborg University; University of Stuttgart e Integrate A/S Fraunhofer Austria Research GmbH; Vienna University of Technology; dwh GmbH, Simulation Services
P18	Rodrigue, D. et al.	2024	Energy and AI	Tokyo Institute of Technology; Kyoto University
P19	Silva, E. R. et al.	2022	Journal of Manufacturing Systems	ETH Zurich; Siemens Industry Software NV
P20	Sobotka, T. et al.	2018	Procedia Manufacturing	
P21	Takeuchi, T. et al.	2023	Engineering Structures	
P22	Tsokanas, N. et al.	2022	Mechanism and Machine Theory	

P23	Tsokanas, N.; Pastorino, R. e Stojadinović, B.	2022	Mechanism and Machine Theory	ETH Zurich; Siemens Industry Software NV
P24	Tur, M. et al.	2024	Mechatronics	Universitat Politècnica de València
P25	Witteveen, W.; Koller, L. e Penninger, D.	2022	Mechanical Systems and Signal Processing	University of Applied Sciences
P26	Xanthopoulos, A.; Kostavelis, I.	2024	Procedia Computer Science	Democritus University of Thrace; Hellenic Open University

Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Conforme a Tabela 2, os estudos apresentados têm como objetivo principal desenvolver, validar e aplicar modelos e metodologias de simulação híbrida em diferentes contextos, como sistemas energéticos, processos industriais, cadeias de suprimentos, áreas urbanas e automação de manufatura. Muitas dessas pesquisas buscam melhorar o controle, monitoramento e previsão de sistemas complexos através da integração de modelos discretos e contínuos, combinados com técnicas de análise de dados, aprendizado de máquina e automação (P1, P2, P7). Por exemplo, projetos voltados para a estabilidade de redes energéticas utilizam simulações híbridas para prever respostas em condições adversas, como terremotos, com maior precisão e velocidade, apoiando estratégias de manutenção preditiva e gestão eficiente (P1, P2, P6, P8).

Outras investem na criação de gêmeos digitais (*digital twins*), que representam sistemas complexos como armazenamento automatizado e resistências estruturais, permitindo monitoramento em tempo real, previsão de comportamentos e suporte à decisão (P12, P13). Há também estudos voltados à mitigação de riscos na cadeia de suprimentos e à resiliência urbana, usando simulações aceleradas que proporcionam respostas rápidas para problemas emergentes (P6, P7, P13).

Tabela 2. Objetivos das pesquisas dos artigos selecionados.

ID	Objetivo do estudo
P1	Investigar e estruturar o uso de gêmeos digitais para melhorar a estabilidade de sistemas de energia, integrando metodologias de modelagem baseadas em dados e físicas para alta fidelidade, com o objetivo de aumentar a previsão, o monitoramento e a manutenção proativa desses sistemas.
P2	O objetivo principal é desenvolver e validar um método de atualização em tempo real do modelo de amortecedores viscosos não lineares (NLVD) usando um filtro de Kalman estendido (UKF) para melhorar a previsão da resposta estrutural durante simulações híbridas em tempo real (RTHS), especialmente em cenários de terremoto.
P3	O objetivo é desenvolver uma ferramenta de simulação multimodal que integre modelos estatísticos espaço-temporais e simulação de eventos discretos para analisar a resiliência, interdependência e gerenciamento de infraestruturas críticas de transporte multimodal, especialmente em situações de interrupções e eventos extremos.
P4	O objetivo principal é propor uma abordagem híbrida que combina técnicas de Mineração de Processos Orientada a Dados (DDS) e Aprendizado Profundo (DL) para aprender modelos de

-
- P5 simulação de processos de negócio a partir de registros de eventos, permitindo simular diferentes mudanças, incluindo a adição de atividades novas, enquanto mantém alta precisão temporal. O objetivo principal do trabalho é propor uma estrutura de simulação híbrida para a mitigação de riscos em cidades, facilitando a tomada de decisões baseada em dados e aumentando a resiliência urbana, através de uma modelagem que integra diferentes sistemas críticos e suas interdependências.
- P6 Investigar e desenvolver um método de simulação híbrido baseado em fasores dinâmicos e transitórios eletromagnéticos para sistemas conectados à rede com múltiplos inversores, visando simulações eficientes e precisas.
- P7 O objetivo geral do trabalho é explorar e aplicar uma abordagem de Gêmeo Digital baseada em simulação híbrida para otimizar sistemas de armazenamento automatizado, contribuindo para a pesquisa no contexto da Indústria 4.0.
- P8 Investigar e aplicar uma abordagem de simulação híbrida para otimizar o cronograma do projeto de estacas escavadas, utilizando dados reais de equipamentos em tempo real, dentro de um contexto de Indústria 4.0.
- P9 O objetivo principal é desenvolver uma metodologia de otimização e previsão de preços de eletricidade usando modelos de séries temporais (ARIMA), combinando essa previsão com análise de cenários para otimizar a operação de unidades industriais sob incertezas de mercado, promovendo uma gestão eficiente de energia na indústria, alinhada aos conceitos da Indústria 4.0.
- P10 Propor uma estrutura de simulação híbrida que auxilie na previsão de eventos que possam interromper operações logísticas, especificamente na gestão de capacidade e risco na entrega logística de última milha, contribuindo para a tomada de decisão e melhoria da eficiência operacional em contextos da Indústria 4.0.
- P11 Investigar e comparar abordagens de simulação híbrida, especificamente co-simulação e hypDEVs, para melhorar a eficiência e velocidade da simulação de processos industriais, apoiando a tomada de decisão na indústria, alinhado ao contexto da Indústria 4.0.
- P12 O objetivo principal do trabalho é estudar estratégias de mitigação contra peças falsificadas em cadeias de suprimentos de TIC, utilizando modelagem e simulação híbrida para avaliar a resiliência do sistema sob diferentes cenários de ameaça.
- P13 O objetivo do trabalho é desenvolver e avaliar uma estratégia de controle robusto baseado em modo deslizante (SMC) para sistemas de transferência em simulações híbridas em tempo real (RTHS), com foco na melhoria da estabilidade e do desempenho de testes de estruturas complexas, promovendo uma abordagem que possa substituir uma planta de controle de ordem superior por uma de menor ordem, mantendo a robustez mesmo com incertezas.
- P14 O objetivo principal do artigo é desenvolver e analisar uma abordagem de integração em tempo de execução, chamada Rims+, que combina técnicas de simulação baseada em decisões, aprendizado profundo e previsão para melhorar a precisão na modelagem de processos de negócios, especialmente na presença de filas e congestionamentos, aplicando-se ao contexto de processos de negócios e manufatura da Indústria 4.0.
- P15 Desenvolver um modelo de simulação híbrido que avalie o desempenho econômico e ambiental de uma planta de transformação multiprodutos, promovendo a integração da seleção de fornecedores, operações de produção e sustentabilidade em uma cadeia de suprimentos de biomassa, contribuindo para a viabilidade de uma Indústria de Economia Circular (IEC).
- P16 Implementar e validar um modelo híbrido de simulação de eventos discretos (DED) em malha fechada, para controle da carga de trabalho em sistemas de manufatura com fluxo unidirecional, buscando melhorar a estabilidade do WIP e a resposta a variações de demanda.
- P17 O objetivo é desenvolver uma estrutura de modelagem de simulação híbrida que auxilie na compreensão, projeto, e implementação de modelos complexos, permitindo integrar diferentes métodos de simulação (SD e ABM). Essa estrutura busca facilitar a construção, validação e aplicação de modelos híbridos para problemas reais, incluindo aplicações no âmbito da Indústria 4.0.
- P18 Investigar a utilização de uma abordagem híbrida que combina simulação física e aprendizado de máquina para otimizar e acelerar a simulação de redes de aquecimento urbano, reduzindo custos computacionais enquanto mantém acuracidade na modelagem do sistema.
- P19 O objetivo do trabalho é desenvolver e validar uma abordagem em três etapas que combina experimentos físicos e simulação híbrida para avaliar o desempenho de robôs assistentes na manufatura, facilitando a tomada de decisão antes do investimento técnico na automação, além de verificar a viabilidade operacional de robôs *plug & produce* na Indústria 4.0.
-

P20	O objetivo do trabalho é desenvolver um módulo de otimização para uma nova ferramenta de planejamento de produção que integra simulação híbrida de peças discretas e fluxos de energia, visando aumentar a eficiência energética e a produtividade em sistemas de manufatura, dentro do contexto da Indústria 4.0.
P21	O objetivo principal foi desenvolver e validar um sistema de medição de força de reação para melhorar a precisão na análise de isoladores sísmicos, utilizando simulação híbrida para integrar testes experimentais e modelos numéricos, com potencial aplicação em monitoramento e controle de estruturas.
P22	O objetivo principal é propor uma estrutura de redução de ordem de modelos baseada em expansão de caos polinomial e redes neurais <i>feedforward</i> para garantir a realização de simulações híbridas em tempo real, mantendo alta fidelidade dos resultados.
P23	O objetivo principal do trabalho é desenvolver e validar um esquema de controle preditivo de modelo adaptativo para melhorar a precisão de simulações híbridas em tempo real, compensando atrasos e variações dinâmicas na planta durante testes híbridos em tempo real.
P24	Propor um método de testes HiL para pantógrafos ferroviários, desenvolvendo um modelo de catenária baseado em decomposição modal que pode lidar com afrouxamento de componentes, podendo modelar qualquer configuração de seção de catenária em tempo real, e validando a eficiência do sistema com boas concordâncias entre o modelo e testes experimentais até 20 Hz.
P25	Investigar uma metodologia de simulação híbrida baseada em procedimentos iterativos para acoplamento de sistemas numéricos e sistemas reais, demonstrando sua aplicabilidade com exemplos práticos, incluindo aplicações de sistemas de suspensão e amortecedores.
P26	O objetivo principal é desenvolver e discutir uma abordagem híbrida de simulação que combine DES (<i>Discrete Event Simulation</i>) com SD (<i>System Dynamics</i>), visando avançar o controle do tipo pull na gestão da cadeia de suprimentos e levar a Engenharia de Sistemas a um novo patamar, facilitando a criação de réplicas digitais realistas e melhorando a otimização de processos na Indústria 4.0.

Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

A Tabela 3 apresenta os métodos de simulação identificados nos artigos, os softwares utilizados nas pesquisas e classificação/tipos de modelos. No âmbito do software, a maioria dos trabalhos não especifica nomes de ferramentas comerciais, mas adotam plataformas e formalismos. Dentre os expostos têm-se o MATLAB/Simulink, OpenSees, AnyLogic e Formalismo P-DEVS. O uso de modelos híbridos envolveu elementos físicos, analíticos e de aprendizado de máquina. Os modelos utilizados variam entre físicos tradicionais, análise estatística, redes neurais, modelos de eventos discretos e contínuos, classificando-se majoritariamente como modelos de alta fidelidade, modelos de alta complexidade e de alta abstração, dependendo do objetivo de cada estudo.

Tabela 3. Métodos de simulação, software e classificação/tipos de modelos.

ID	Método de Simulação	Software de Simulação	Classificação/tipos de modelos
P1	O trabalho utiliza uma abordagem de modelagem híbrida, que combina simulações baseadas em modelos físicos (físicos e de engenharia) com técnicas de análise de dados, aprendizado de máquina e simulações estatísticas para representar e prever o comportamento do sistema de energia. A técnica principal é a <i>Simulação Híbrida em Tempo Real</i> (RTHS - Real-Time Hybrid Simulation), que	O artigo não especifica nomes de softwares comerciais	Modelos híbridos, que combinam modelos físicos tradicionais com modelos analíticos baseados em dados e aprendizado de máquina, classificados como modelos de alta fidelidade e alta complexidade.
P2		O artigo não indica explicitamente um	Modelos utilizados são modelos de amortecedores viscosos não lineares (NLVD),

	combina elementos experimentais e numéricos durante a análise dinâmica.	software comercial específico.	ajustados com o Modelo Maxwell Não Linear Explícito, e atualizados via filtros de Kalman — ou seja, modelos híbridos envolvendo componentes experimentais e numéricos.
P3	A abordagem é híbrida, combinando análise estatística espaço-temporal com modelos de simulação de eventos discretos.	O artigo menciona que a ferramenta desenvolvida é de código aberto, mas não especifica qual software exatamente foi utilizado.	Modelos híbridos, combinando modelos estatísticos espaço-temporais e de simulação de eventos discretos.
P4	Um método híbrido que combina Modelos de Processos Estocásticos derivados de DDS com geração de sequências de eventos por modelos de DL, especificamente usando representações de atividades por <i>embeddings</i> para facilitar a inserção de atividades novas.	O artigo não especifica um software de simulação particular.	Modelos híbridos de simulação baseados em processos estocásticos e modelos de aprendizado profundo.
P5	O método consiste em uma abordagem híbrida que combina modelagem baseada em agentes, modelagem de redes e simulação discreta em tempo acelerado, além da federação de simuladores específicos de sistemas.	O artigo não especifica nomes de softwares específicos.	Trata-se de um modelo híbrido de simulação, combinando modelagem baseada em agentes, redes e simulação discreta, voltado para representar sistemas de sistemas complexos.
P6	Simulação híbrida que combina modelos de transitórios eletromagnéticos (EMT) e fasores dinâmicos, implementada no MATLAB/Simulink.	MATLAB/Simulink.	Modelos mistos de transitórios eletromagnéticos e fasores dinâmicos, de nível intermediário entre modelos detalhados e médios. É um modelo híbrido que integra simulação de eventos discretos e modelagem baseada em agentes, numa representação de sistema de armazenamento automatizado.
P7	O método utilizado combina simulação de eventos discretos (DES) com Modelagem Baseada em Agentes (ABM), formando uma abordagem de simulação híbrida.	O artigo não especifica o software.	Modelo híbrido, combinando simulação de eventos discretos com processos detalhados e análise em tempo real.
P8	Método de simulação híbrida baseado em eventos discretos (DES), com integração de níveis macro e microsimulação e atualização em tempo real dos dados do equipamento. O método de simulação empregado é a geração de cenários de Monte Carlo, baseado em previsões estatísticas de preços de eletricidade (modelo ARIMA), com aplicação de cenários discretos para análise de risco e otimização do planejamento operacional.	O artigo não especifica um software.	Modelos de previsão de séries temporais (ARIMA), modelos de simulação de Monte Carlo, modelos de otimização, modelos de cenário probabilístico.
P9	Método de simulação híbrida baseado em eventos discretos (DES), com integração de níveis macro e microsimulação e atualização em tempo real dos dados do equipamento. O método de simulação empregado é a geração de cenários de Monte Carlo, baseado em previsões estatísticas de preços de eletricidade (modelo ARIMA), com aplicação de cenários discretos para análise de risco e otimização do planejamento operacional.	O artigo não especifica explicitamente um software de simulação.	Modelos de previsão de séries temporais (ARIMA), modelos de simulação de Monte Carlo, modelos de otimização, modelos de cenário probabilístico.
P10	Uma combinação de Modelagem baseada em Agentes (ABM) e Dinâmica de Sistemas (DS), formando uma técnica híbrida para avaliar comportamentos complexos e	O artigo não especifica um software.	Modelos híbridos de simulação, combinando elementos de modelos de agentes e dinâmica de sistemas; modelos de eventos discretos também podem estar envolvidos.

	<i>feedbacks</i> dinâmicos no sistema de logística.		
P11	O trabalho utiliza métodos de simulação híbrida, incluindo co-simulação de múltiplos ambientes de simulação acoplados e formalismo hyPDEVS para modelagem integrada de sistemas discretos e contínuos.	O artigo não especifica um software de simulação.	Modelos híbridos discretos e contínuos, que podem ser classificados como modelos de simulação híbrida com formalismo hyPDEVS, voltados à representação de sistemas com eventos discretos e variáveis contínuas.
P12	O método empregado foi uma simulação híbrida, integrando múltiplos módulos de eventos discretos para modelar diferentes agentes e processos na cadeia produtiva e de suprimentos.	Não explicitamente mencionado no trecho, porém, o artigo cita a biblioteca AnyLogic e o software GIDEP como recursos, sugerindo uso de ferramentas compatíveis com simulação híbrida como AnyLogic	Modelos híbridos de eventos discretos e de rede, focados em simulação de processos de manufatura, cadeia de suprimentos e análise de risco em contexto de segurança de componentes.
P13	A técnica utilizada é a "Simulação Híbrida em Tempo Real" (RTHS – <i>Real-Time Hybrid Simulation</i>), onde partes do sistema são simuladas por computador (modelo digital) e partes físicas por dispositivos de hardware em tempo real, integrando esses componentes em uma simulação unificada.	O artigo não especifica detalhadamente o software.	Modelos físicos, digitais, híbridos, de sistemas mecânicos e estruturais, integrados em um sistema de controle robusto com modelos de incertezas inclusas.
P14	O método utilizado é uma técnica híbrida que combina simulação de eventos discretos (DED) com modelos preditivos de aprendizado profundo (DL), especificamente usando o método Rims+ para integrar estratégias de decisão dinâmicas com previsão em tempo de execução.	O artigo não especifica uma ferramenta de software de simulação específico.	Modelos utilizados são híbridos, combinando modelos de simulação de eventos discretos com modelos preditivos de aprendizado profundo (<i>deep learning</i>), podendo ser classificados como modelos de simulação híbrida preditiva.
P15	Uma abordagem híbrida que combina modelagem baseada em agentes (ABM) e simulação de eventos discretos (SED).	O artigo não especifica nomes de softwares.	Modelo híbrido baseado em simulação de eventos discretos e modelagem por agentes (ABM + SED) — um modelo de simulação de múltiplos níveis que captura interações sociais e dinâmicas operacionais.
P16	Simulação híbrida, que combina modelos contínuos de controle (controladores PI) com modelos de eventos discretos (DES), acoplados para representar o sistema produtivo em malha fechada.	O artigo menciona o uso de SimEvents (Mathworks) para implementação do sistema híbrido.	Modelo híbrido de eventos discretos acoplado com controle contínuo (malha fechada), envolvendo sistemas de simulação híbrida ou integrada.
P17	A abordagem combina Modelagem de Dinâmica de Sistemas (SD) com Modelos Baseados em Agentes (ABM).	O artigo não especifica softwares específicos utilizados na implementação, pois	Modelos híbridos que combinam SD e ABM, classificados como modelos de simulação híbrida, capazes de

		o foco está mais na estrutura conceitual do que na implementação técnica.	representar sistemas com múltiplos níveis de análise.
P18	Um método híbrido que integra simulação física de redes de distribuição de calor com modelos baseados em redes neurais treinadas para substituir clusters de subestações.	O artigo não especifica um software específico de simulação física ou de ML.	Modelo híbrido que integra modelos físicos detalhados com modelos de aprendizado de máquina (redes neurais) como substitutos de <i>clusters</i> . Pode-se considerar como modelos de alta abstração com componentes de modelos dinâmicos físicos e de ML.
P19	Utiliza-se uma combinação de simulação híbrida que integra experimentos físicos, simulação de eventos discretos e modelagem digital apoiada por uma abordagem em três etapas, incluindo simulação de processos, modelagem de performance e avaliação de cenário.	O software mencionado é o Enterprise Dynamics, que foi utilizado para conduzir os experimentos de simulação de processos.	Modelos híbridos que combinam elementos de simulação de eventos discretos com modelos físicos, além de representações digitais de sistemas físicos e processos operacionais.
P20	Foi utilizado um método de simulação híbrida, especificamente uma combinação de simulação de eventos discretos (SED) para fluxo de materiais e uma simulação contínua baseada em equações diferenciais ordinárias (EDOs) para fluxos de energia, integrados pelo formalismo P-DEVS (<i>Parallel Discrete Event System Specification</i>).	MATLAB com toolbox DEVS desenvolvido por HS Wismar, além de implementação em C++ para otimização.	Modelo híbrido, de simulação combinada de eventos discretos e modelos contínuos, implementado em formalismo P-DEVS.
P21	Foi utilizado um método de simulação híbrida, combinando análise numérica (OpenSees, OpenFresco) com testes físicos em tempo real, conectando sistemas de modelagem computacional a testes experimentais.	OpenSees e OpenFresco, plataformas de análise estrutural e simulação híbrida em tempo real.	Modelos híbridos (combinam modelos físicos e digitais), modelos de elementos finitos e modelos experimentais em tempo real.
P22	O método utilizado é a Simulação Híbrida em Tempo Real (HS), que combina modelos numéricos de alta dimensão com respostas experimentais, implementando métodos de redução de ordem para viabilizar a execução em tempo real.	O software principal foi o Simcenter Amesim.	Modelos de alta dimensão (completo) e modelos de ordem reduzida, além de modelos híbridos que combinam elementos numéricos e experimentais.
P23	O método utilizado é a simulação híbrida em tempo real, apoiada por controle preditivo de modelo adaptativo, que integra modelos de resistência e componentes físicos com modelos computacionais para simulação de sistemas dinâmicos.	O artigo não especifica claramente um software.	Modelos do tipo ARX (<i>AutoRegressive with eXogenous inputs</i>), modelos de estado espaço, além de modelos de sistemas lineares em tempo variável.
P24	Simulação híbrida (HiL) envolvendo modelos de catenária em tempo real, controle LQG para estabilização, e técnicas de decomposição modal para modelagem do sistema.	O artigo não especifica explicitamente o software, porém, menciona o uso de recursos	Modelos de elementos finitos discretizados utilizando método de base modal, combinados com modelos de massa concentrada e controle de feedback em tempo real.

P25	Método iterativo de acoplamento de subsistemas: combina simulação numérica com testes experimentais, utilizando uma abordagem de loop de Newton-Raphson para alcançar a convergência entre subsistemas	computacionais que suportam a simulação em tempo real. O artigo menciona o uso de plataformas de simulação generalistas como Scilab, ProLinRacing, ou ferramentas semelhantes; porém, não especifica explicitamente.	Modelos híbridos de sistemas mecânicos, baseados em FRFs e componentes físicos com comportamento linear ou moderadamente não linear
P26	A metodologia consiste na combinação de simulação de eventos discretos (DES) com simulação de dinâmica de sistemas (SD), formando uma abordagem híbrida para modelar e analisar o comportamento de cadeias de suprimentos complexas	O texto não especifica um software concreto.	Modelo híbrido de simulação, combinando modelos de eventos discretos e de dinâmica de sistemas, que opera em níveis de abstração diferentes para uma análise multiescala

Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

As principais áreas de aplicação das abordagens de simulação híbrida e automação inteligente, como se pode observar na Tabela 4, abrangem uma grande quantidade de diferentes setores, desde energia e manufatura a construção civil, transporte, infraestrutura urbana, saúde e segurança. No setor de energia, há aplicações, em geral, em gerenciamento de redes elétricas, geração de energia renovável, armazenamento e manutenção preditiva dos sistemas energéticos visando aumentar a confiabilidade e a sustentabilidade (P6). Na manufatura e processos industriais, tem-se a respeito da reconfiguração de fábricas, otimização da produção, controle de robôs colaborativos e redução de riscos operacionais buscando aumentar a eficiência e a flexibilidade (P6). A construção civil coloca essas tecnologias no emprego de testes de estruturas, monitoramento de obras e otimização de cronogramas de grandes projetos (P8). No transporte e logística, as estratégias auxiliam no gerenciamento de cadeias de suprimentos, previsão de interrupções, análise da resiliência e melhorias na eficiência das operações, especialmente na última milha (P7). As cidades inteligentes obtêm benefícios, com planejamento urbano, gerenciamento de riscos e melhoria na infraestrutura crítica, com suporte de IoT e análise de dados em tempo real (P5). Além disso, na área de saúde, há aplicações na modelagem da transmissão de doenças, como a COVID-19, e na segurança de cadeias de fornecimento, com estratégias de prevenção de falsificações, rastreabilidade e automação de inspeções, fortalecendo a segurança e a eficiência dos sistemas críticos (P5). Essas aplicações evidenciam o potencial dessas tecnologias para impulsionar a transformação digital de setores estratégicos, promovendo maior eficiência, sustentabilidade e resiliência de sistemas complexos na era da Indústria 4.0 (P5, P6, P7, P8).

Quanto aos principais conceitos usados na Indústria 4.0, conforme ilustrado na publicação, estão a integração de sistemas ciber-físicos, que agregam componentes físicos a elementos digitais para permitir automação e monitoramento em processos industriais e urbanos (P5, P8); ainda a Internet das Coisas (IoT), que conecta sensores, atuadores e dispositivos inteligentes à rede para possibilitar coleta e troca de dados em tempo real, proporcionando a tomada de decisão autônoma (P5, P1). Também são observados os gêmeos digitais, que virtualmente representam objetos, processos ou sistemas físicos, permitindo simulações, monitoramento e manutenção preditiva (P5, P1); outrossim, a automação inteligente utilizada na controladora de robôs colaborativos e sistemas automatizados com processamento de dados em tempo real (P5, P2). A análise de *Big Data* e dados em tempo real é utilizada para otimizar processos e desenvolver estratégias (P5, P4), além do *Machine Learning* e Inteligência Artificial (IA) automáticas para automação de tarefas complexas, possibilitando previsões e identificação de padrões (P5, P4). A simulação híbrida e a modelagem preditiva fortalecem a previsão de comportamentos de sistemas complexos, contribuindo para o planejamento eficiente (P5, P10). Tecnologias como *blockchain* garantem rastreabilidade, segurança e autenticidade nas cadeias de suprimentos (P5, P12), e a automação e o controle remoto aumentam a flexibilidade operacional (P5, P3). Por fim, a visualização inteligente e a tomada de decisão baseada em dados facilitam a compreensão de informações complexas, apoiando estratégias eficientes, sustentáveis e confiáveis em diferentes contextos industriais e urbanos.

Os principais resultados obtidos ao longo do trabalho indicam que a abordagem em gêmeos digitais híbridos melhora consideravelmente as previsões, o monitoramento, a estabilidade e a manutenção de sistemas energéticos, mostrando que é eficiente sob estudos de caso reais e sinalizando o potencial de personalização e otimização das operações em tempo real, contribuindo para o aumento da confiabilidade do sistema de energia (P1). No âmbito de análise de estruturas de edifícios sujeitas a terremotos, a técnica aplicada permitiu exibindo avaliações precisas, com potencial de aplicação para a indústria de engenharia estrutural, controle de estruturas e engenharia de materiais, por meio de monitoramento em tempo real, análise de grandes volumes de dados, modelagem digital e atualizações contínuas do modelo, em conformidade com os princípios da Indústria 4.0 responsabilizando para a automação inteligente (P2). Finalmente, no âmbito de estabilidade de tensão e análise de sistemas de energia, foi possível aumentar a previsão, monitoramento e manutenção preditiva, mostrando que gêmeos digitais híbridos aumentam a confiabilidade e eficiência de sistemas energéticos complexos (P1). Na aplicação de simulação híbrida na cadeia de suprimentos e armazenamento automatizado, a abordagem resultou em melhorias na precisão das análises, identificação de gargalos e potencial de aumento na eficiência operacional, fortalecendo a integração

de sistemas virtuais e físicos (P7). Por fim, na construção civil e indústria de manufatura, o uso de simulação híbrida com atualização em tempo real contribuiu para a otimização de cronogramas, redução de atrasos e suporte a decisões rápidas e precisas na construção de estacas e na produção de componentes, ampliando os benefícios da automação e digitalização nestes setores (P8).

Tabela 4. Áreas de aplicação, conceitos da indústria 4.0 e resultados.

ID	Áreas de aplicação	Conceitos utilizados da Indústria 4.0
P1	Aplicações em estabilidade de tensão, análise de estabilidade dinâmica, manutenção preditiva de transformadores de potência, otimização da integração de fontes renováveis e avaliação de falhas e riscos em sistemas de energia. A técnica foi aplicada na análise de estruturas de edifícios sujeitos a sismos, particularmente em testes de simuladores de terremotos, e tem potencial para aplicações na indústria de Engenharia Estrutural, Controle de Estruturas, e Engenharia de Materiais e Componentes.	Integração de sistemas ciber-físicos, Internet das Coisas (IoT), análise de <i>Big Data</i> , manutenção preditiva, automação inteligente, e a criação de gêmeos digitais como elementos centrais de Indústria 4.0.
P2	Infraestruturas de transporte multimodal, sistemas de transporte hidroviários, análise de infraestrutura crítica, gestão de interrupções, planejamento estratégico e avaliação econômica de sistemas logísticos. A principal área de aplicação refere-se à simulação de processos de negócio, com impacto potencial na Indústria 4.0, especialmente na análise, monitoramento preditivo e otimização de processos industriais e de manufatura.	Conceitos incluem Monitoramento em tempo real, Dados e análises em tempo real (<i>Big Data</i>), Modelagem e simulação digital (<i>Digital Twins</i>) e atualização contínua de modelos, alinhando-se aos princípios da Indústria 4.0 de automação inteligente e tomada de decisão baseada em dados. Uso de análise de dados, modelagem preditiva, simulação em tempo real,
P3	Infraestruturas de transporte multimodal, sistemas de transporte hidroviários, análise de infraestrutura crítica, gestão de interrupções, planejamento estratégico e avaliação econômica de sistemas logísticos. A principal área de aplicação refere-se à simulação de processos de negócio, com impacto potencial na Indústria 4.0, especialmente na análise, monitoramento preditivo e otimização de processos industriais e de manufatura.	integração de diferentes fontes de dados, além de ferramentas de código aberto e open data, típicos do paradigma da Indústria 4.0.
P4	Área de aplicação principal: gestão de risco urbano, resiliência de cidades, infraestrutura crítica, planejamento urbano inteligente, e tomadas de decisão em ambientes urbanos complexos.	O artigo faz referência ao uso de logs de eventos digitais, análise preditiva, simulação avançada, e integração de dados, conceitos-chave na Indústria 4.0.
P5	Sistema de geração de energia renovável, micro-redes, sistemas de inversores conectados à rede elétrica, e geração distribuída - áreas relacionadas ao gerenciamento e controle de energia na Indústria 4.0. A técnica foi aplicada na cadeia de suprimentos, especificamente em sistemas de armazenamento automatizado, armazéns inteligentes, e logística industrial dentro do contexto da Indústria 4.0.	Conceitos incluem a integração de IoT, sistemas ciber-físicos, análise de dados em tempo real, sistemas autônomos, e visualização inteligente, todos utilizados para melhorar a resiliência urbana e a gestão de infraestruturas críticas.
P6	Sistema de geração de energia renovável, micro-redes, sistemas de inversores conectados à rede elétrica, e geração distribuída - áreas relacionadas ao gerenciamento e controle de energia na Indústria 4.0. A técnica foi aplicada na cadeia de suprimentos, especificamente em sistemas de armazenamento automatizado, armazéns inteligentes, e logística industrial dentro do contexto da Indústria 4.0.	Integração de sistemas inteligentes de geração de energia, automação, e simulação avançada com foco na eficiência e confiabilidade, compatível com aspectos de IoT, controle distribuído, e sistemas inteligentes conectados.
P7	Principalmente na construção civil, especificamente na produção de estacas escavadas, e potencialmente aplicável também na indústria de manufatura e manutenção preditiva.	Gêmeo Digital, automação, IoT (sensores), sistemas cyber-físicos, integração de sistemas virtuais e físicos.
P8	Aplicada ao planejamento de operação de usinas de produção de gás, com foco na	Integração de sistemas de automação, coleta e análise de dados em tempo real, Internet das Coisas (IoT), tomada de decisão autônoma, <i>digital twin</i> e conectividade.
P9		Dados em tempo real, uso de previsão estatística, análise de risco, automação e

	gestão energética, mercado de eletricidade, otimização de custos e análise de risco, envolvendo sistemas de produção industrial, mercado de energia, gestão de recursos e otimização de processos complexos.	otimização, integração de sistemas de energia com o mercado, suporte à tomada de decisão inteligente.
P10	Logística de última milha, gestão de operações, avaliação de riscos, sustentabilidade na cadeia de suprimentos, transporte inteligente, e operações de entrega em contextos da Indústria 4.0.	Integração de sistemas ciber-físicos, tomada de decisão autônoma, conectividade, uso de sistemas inteligentes para otimização de operações, e gerenciamento de riscos em tempo real.
P11	Aplicações em sistemas industriais como fornos transportadores, com foco na eficiência energética e operacional, além de sistemas de produção industrial em geral.	Integração de sistemas, <i>digital twins</i> , automação inteligente, otimização em tempo real, conectividade e interoperabilidade de modelos, suporte a decisão baseada em simulações rápidas e precisas.
P12	Aplicada na gestão de cadeias de suprimentos de TIC, segurança de componentes eletrônicos, análise de risco, e avaliação de estratégias de recuperação e resiliência no contexto da Indústria 4.0.	Modelagem de redes inteligentes, rastreabilidade, automação, monitoramento em tempo real, blockchain, análise de risco, e estratégias de prevenção de falsificação.
P13	As aplicações mais evidentes são na Engenharia Civil (estruturas e sismos), Engenharia Mecânica, Indústria Automobilística, Aeroespacial, e em testes de materiais e componentes estruturais, justamente para avaliar o comportamento sob condições que combinam elementos físicos e modelos virtuais.	Conceitos como automação avançada, integração de sistemas cyberfísicos, controle híbrido, simulação em tempo real, IoT (sensores e atuadores conectados), estão implícitos na abordagem de RTHS.
P14	As aplicações principais são processos de negócios, manufatura, agendamento de recursos, gerenciamento de filas e controle de produção, todos relevantes ao contexto da Indústria 4.0, onde a integração de simulação, AI e dados em tempo real é fundamental.	Conceitos incluem automação inteligente, coleta e análise de dados em tempo real, uso de IA e ML para previsão e decisão, CX de manutenção preditiva, gestão de filas e recursos otimizados, integrando sistemas ciber-físicos e arquitetura de IA.
P15	Aplicada à cadeia de suprimentos de biomassa na agroindústria de transformação de resíduos agrícolas, especificamente para avaliar desempenho financeiro e impacto ambiental, promovendo sustentabilidade e economia circular.	Integração de sistemas ciber-físicos, tomada de decisão baseada em dados, automação, sustentabilidade, e digitalização dos processos - todos relacionados à proposta de simulação híbrida para suporte à decisão em uma cadeia de suprimentos inteligente.
P16	Manufatura de bens de consumo, especificamente em oficinas de fluxo unidirecional, fabricação de camisas de cilindro, e controle da carga de trabalho em sistemas de produção.	Comunicação em tempo real, automação inteligente, controle de sistemas em malha fechada com <i>feedback</i> contínuo, uso de modelagem e simulação avançada, integração de dados para tomada de decisão.
P17	Embora o foco principal seja uma estrutura geral, há uma ênfase na aplicação ao estudo do controle da transmissão da COVID-19 em redes de casas de repouso, o que demonstra aplicação em saúde. A estrutura também se relaciona a domínios industriais e organizacionais, típicos da Indústria 4.0, como manufatura, gestão de operações, saúde e logística.	Conceitos relacionados incluem sistemas ciber-físicos, automação, tomada de decisão baseada em dados.
P18	Sistemas de distribuição de energia térmica (aquecimento urbano), redes de energia, com potencial aplicação em Indústria 4.0 para gestão inteligente de redes energéticas.	Automação, integração de modelos físicos e digitais, uso de inteligência artificial, otimização de processos, redução de custos

		por meio de simulação eficiente e digitalização de redes energéticas.
P19	Na avaliação de desempenho de robôs colaborativos em linhas de produção, otimização de reconfiguração de fábricas, simulação de processos colaborativos na manufatura digital, entre outros aspectos relacionados à automação industrial na Indústria 4.0.	Automação colaborativa, manufatura inteligente, conectividade de dispositivos, sistemas ciber-físicos, integração de dados e sistemas, além de sistemas <i>plug & produce</i> e manutenção preditiva.
P20	Aplicada na simulação e otimização de sistemas de manufatura integrados, considerando aspectos produtivos e energéticos, alinhando-se à indústria 4.0, incluindo controle de produção, sequenciamento de tarefas e gestão energética.	Integração de sistemas ciber-físicos, simulação em tempo real, automação avançada, computação de alto desempenho, análise de dados, e suporte à decisão autônoma.
P21	Aplicada na área de engenharia estrutural, especialmente em análise de isoladores sísmicos, controle e monitoramento de estruturas, podendo também ser estendida a outros sistemas de engenharia que exijam integração entre testes físicos e modelagem digital.	Monitoramento em tempo real, automação, integração de sistemas físico-digitais, análise de dados, e possibilidade de implementação de sistemas inteligentes de controle e diagnóstico.
P22	A aplicação principal é em engenharia de sistemas e estruturas mecânicas complexas, especialmente na condução de testes híbridos para simulação de respostas dinâmicas de sistemas mecânicos, o que é relevante para a Indústria 4.0 na integração de modelos digitais e físicos.	Conceitos de sistemas de simulação por modelos digitais, integração de modelos virtuais com físicos, automação, e necessidade de respostas rápidas e confiáveis em ambientes industriais inteligentes.
P23	As aplicações principais referidas são em testes estruturais, controle de sistemas mecânicos e de engenharia, incluindo simulação de respostas a cargas sísmicas e controle de dispositivos dinâmicos em ambientes de teste híbrido em tempo real.	Integração de sistemas de controle em ambientes ciberfísicos, automação inteligente, sistemas de teste autônomos, e uso de modelagem e monitoramento em tempo real, alinhando-se a conceitos de automação e <i>digital twin</i> .
P24	Na área de sistemas ferroviários, especificamente na interação pantógrafo-catenária, testes de estabilidade de sistemas de controle, simulação de linhas aéreas de transmissão, e engenharia de sistemas mecatrônicos aplicados ao transporte ferroviário.	Automação, simulação em tempo real, controle avançado, integração de componentes físicos e virtuais, uso de sistemas de teste e diagnóstico inteligentes, além de modelos digitais (<i>digital twin</i>) aplicado ao sistema ferroviário.
P25	Engenharia Mecânica (exemplo de suspensão de roda), Testes de componentes de força, como amortecedores, indústria de veículos e sistemas de vibração e isolamento.	Integração de sistemas físicos e digitais, testes virtuais e reais, uso de modelos digitais para validar componentes, e métodos de simulação para reduzir custos e aumentar eficiência na manufatura e testes.
P26	Embora o foco principal seja na cadeia de suprimentos e manufatura, o artigo indica que a aplicação da técnica é multidisciplinar, incluindo manufatura, sistemas de serviço, economia e ciências sociais, refletindo o potencial do método em várias áreas da Indústria 4.0.	<i>Digital twin</i> , réplicas digitais, sistemas ciber-físicos, automação, integração de dados, modelagem preditiva, e uso de tecnologias digitais para otimização de processos.

Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

5 CONCLUSÃO

Primeiramente, verificou-se que o objetivo geral deste trabalho foi atingido, uma vez que foi possível realizar uma análise abrangente das características e particularidades da simulação híbrida, bem como da sua relação com as especificidades da Indústria 4.0. Observou-se que a simulação híbrida se apresentou como uma abordagem altamente flexível e integrada, capaz de combinar diferentes técnicas de modelagem, como simulação baseada em agentes, eventos discretos e dinâmicas de sistemas, o que permitiu modelar sistemas industriais complexos com maior precisão, eficiência e adaptabilidade. Além disso, evidenciou-se que a Indústria 4.0 promove a digitalização, conectividade e autonomia nos processos produtivos, facilitando o monitoramento em tempo real, a tomada de decisão baseada em dados e a otimização de recursos através de conceitos como IoT, sistemas cibernético-físicos e fábricas inteligentes. Por fim, constatou-se que a simulação híbrida se configura como uma abordagem fundamental para suportar a implementação dos princípios da Indústria 4.0, possibilitando a simulação de cenários complexos, a testagem de estratégias de otimização e o desenvolvimento de gêmeos digitais, que contribuíram para a melhoria da eficiência, resiliência e sustentabilidade dos sistemas industriais. Dessa forma, evidenciou-se que a relação entre a simulação híbrida e a Indústria 4.0 é intrínseca, sendo a primeira uma abordagem metodológica essencial para impulsionar a transformação digital nas manufaturas.

Quanto às contribuições acadêmicas, o trabalho forneceu uma visão consolidada das aplicações, metodologias e plataformas utilizadas na implementação de simulação híbrida na Indústria 4.0, reforçando a importância dessa abordagem para o desenvolvimento de modelos preditivos, otimizações e sistemas de monitoramento embarcados. Além disso, contribuiu para o fortalecimento do entendimento das inter-relações entre diferentes técnicas de modelagem, ampliando o horizonte de pesquisa na área de simulação de sistemas complexos. Empresarialmente, os *insights* obtidos podem orientar organizações empresariais na escolha de estratégias e ferramentas de simulação que promovam maior eficiência operacional, sustentabilidade e inovação tecnológica, apoiando a tomada de decisões mais embasadas, ágeis e sustentáveis.

Por fim, sugestões de pesquisa futura incluem aprofundar os estudos sobre a integração de novas tecnologias emergentes, como inteligência artificial, *machine learning* e Internet das Coisas, com as metodologias de simulação híbrida, de modo a criar modelos ainda mais dinâmicos e autônomos. Além disso, recomenda-se explorar a aplicação de simulações híbridas em diferentes contextos industriais, incluindo setores que ainda enfrentam desafios de implementação, bem como a avaliação de impactos econômicos e ambientais de modo mais detalhado, a fim de ampliar o

entendimento do potencial de tais ferramentas na promoção do desenvolvimento sustentável e da inovação continuada na Indústria 4.0.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Iniciação à Pesquisa Científica, Tecnológica e em Inovação da Universidade Federal de Catalão (UFCAT) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (PIBIC), a qual foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. O apoio recebido contribuiu de forma significativa para o aprimoramento da formação acadêmica e para o fortalecimento da pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

ABO-KHALIL, A. G. Digital twin real-time hybrid simulation platform for power system stability. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 49, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103237>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X23005439>. Acesso em: 27 ago. 2025.

AL-SUBAIHAWI, S.; RICLES, J. M.; QUIEL, S. E. Online explicit model updating of nonlinear viscous dampers for real time hybrid simulation. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 154, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107108>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0267726121005303>. Acesso em: 27 ago. 2025.

ARKSEY, H.; O'MALLEY, L. Scoping studies: towards a methodological framework. **International Journal of Social Research Methodology**, v. 8, n. 1, p. 19-32, 2005. DOI <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1364557032000119616>. Acesso em: 27 ago. 2025.

AZUCENA, J. et al. Hybrid simulation to support interdependence modeling of a multimodal transportation network. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 107, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102237>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569190X20301696>. Acesso em: 27 ago. 2025.

BAUR, C.; WEE, D. Manufacturing's next act. McKinsey Quarterly. 2015. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/ourinsights/manufacturings-next-act>. Acesso em: 29 jan. 2018.

BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. London: Uniwin Hyman, 1989.

CAMARGO, M. et al. Learning business process simulation models: A Hybrid process mining and deep learning approach. **Information Systems**, v. 117, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.is.2023.102248>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306437923000844>. Acesso em: 27 ago. 2025.

CARRAMIÑANA, D. et al. Towards resilient cities: A hybrid simulation framework for risk mitigation through data-driven decision making. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 133, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102924>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X24000388>. Acesso em: 27 ago. 2025.

CARVALHO, M. C. M. **Construindo o saber**. 2.ed. Campinas, SP: Papirus, 2000.

CAVATA, J. T. et al. Highlighting the benefits of Industry 4.0 for production: an agent-based simulation approach. **Gestão & produção**, 2020. DOI <https://doi.org/10.1590/0104-530X5619-20>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/H9r8h3vZcWt5pMhJLvDRkxm/?format=html&lang=en>.

COVI, P. et al. Seismic experimental analysis of a full-scale steel building with passive fire protections. **Engineering Structures**, v. 300, 2024. DOI

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117203>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623016188>. Acesso em: 27 ago. 2025.

CRESWELL, J. W. **Research design: qualitative & quantitative approaches**. London: Sage, 1994.

DIESTE, O.; PADUA, A. G. Developing Search Strategies for Detecting Relevant Experiments for Systematic Reviews. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EMPIRICAL SOFTWARE ENGINEERING AND MEASUREMENT, 1., 2007. **Proceedings** [...]. Madrid: ESEM, 2007, p. 215224. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4343749/>. Acesso em: 27 ago. 2025.

ELDABI, T. et al. Hybrid simulation: historical lessons, present challenges and futures. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2016. **Proceedings** [...]. Washington: IEEE, 2016, p. 1388-1403. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7822192>. Acesso em: 27 ago. 2025.

FERRARI, A. et al. A Roadmap towards an Automated Warehouse Digital Twin: current implementations and future developments. **IFAC-PapersOnLine**, v. 55, p. 1899-1905, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.676>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322019942>. Acesso em: 27 ago. 2025.

FERREIRA, W. P.; ARMELLINI, F.; SANTA-EULALIA, L. A. Simulation in industry 4.0: a state-of-the-art review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 149, n. 1, p. 1-17, nov. 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835220305635> . Acesso em: 27 ago. 2025.

FISCHER, A. et al. Cyclic Update of Project Scheduling by Using Telematics Data. **IFAC-PapersOnLine**, v. 54, p. 217-222, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896321007321>. Acesso em: 27 ago. 2025.

GANGWAR, S. et al. Scheduling optimization and risk analysis for energyintensive industries under uncertain electricity market to facilitate financial planning. **Computers & Chemical Engineering**, v. 174, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108234>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135423001047>. Acesso em: 27 ago. 2025.

GERBERT, P. et al. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. 2015. Disponível em: <
https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx>. Acesso em: 29 jan. 2018.

GHASEMI, A. et al. Simulation optimization applied to production scheduling in the era of industry 4.0: A review and future roadmap. **Journal of Industrial Information Integration**, mar. 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100599>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X24000438>. Acesso em: 27 ago. 2025.

GOLROUDBARY, S. R. et al. Sustainable Operations Management in Logistics Using Simulations and Modelling: A Framework for Decision Making in Delivery Management. **Procedia Manufacturing**, v. 30, p. 627-634, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.088>.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919301209>. Acesso em: 27 ago. 2025.

HEINZL, B. et al. Simulation-based Assessment of Energy Efficiency in Industry: Comparison of Hybrid Simulation Approaches. **IFAC PapersOnLine**, v. 51, p. 689-694, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.117>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318301216>. Acesso em: 27 ago. 2025.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. Introdução à pesquisa operacional. Porto Alegre: AMGH, 2013.

HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23–34, ago. 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361517301902>. Acesso em: 27 ago. 2025.

KITCHENHAM, B. **Procedures for Performing Systematic Reviews**. Joint Technical Report, Department of Computer Science, Keele University (TR/SE-0401) and National ICT Australia Ltd. (0400011T.1), 2004.

LASI, H.; FETTKE, P.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014. DOI <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12599-014-0334-4>. Acesso em: 29 jan. 2018.

LEI, R. et al. Simulation modeling of the counterfeit threat and countermeasures in ICT manufacturing supply chains. **Manufacturing Letters**, v. 35, p. 105-116, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.101>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846323001621>. Acesso em: 27 ago. 2025.

LEVAC, D.; COLQUHOUN, H.; O'BRIEN, K. K. Scoping studies: advancing the methodology. **Implementation Science**, v. 5, n. 69, p. 1-9, 2010. DOI <https://doi.org/10.1186/1748-5908-5-69>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/1748-5908-5-69>. Acesso em: 27 ago. 2025.

LI, H. et al. Sliding mode control design for the benchmark problem in realtime hybrid simulation. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 151, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107364>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327020307500>. Acesso em: 27 ago. 2025.

LUCAČ, D. The fourth ICT-based Industrial Revolution “Industry 4.0”- HMI and the case of CAE/CAD innovation with EPLAN P8. **Proceedings...Belgrade : TELFOR IEEE**, 2015. p. 835-838. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/7368809/7377376/07377595.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2018.

MENEGHELLO, F. et al. Runtime integration of machine learning and simulation for business processes: Time and decision mining predictions. **Information Systems**, v. 128, 2025. DOI

<https://doi.org/10.1016/j.is.2024.102472>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306437924001303>. Acesso em: 27 ago. 2025.

MOKHTARI, F; IMANPOUR, A. A digital twin-based framework for multi-element seismic hybrid simulation of structures. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 186, mar. 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109909>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327022009773>. Acesso em: 27 ago. 2025.

MUERZA, V.; URCIUOLI, L.; HABAS, S. Z. Enabling the circular economy of biosupply chains employing integrated biomass logistics centers - A multi-stage approach integrating supply and production activities. **Journal of Cleaner Production**, v. 384, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135628>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622052027>. Acesso em: 27 ago. 2025.

MUŠIČ , G.; SAGAWA, J. K. Closed-loop workload input–output control of production systems: A hybrid simulation study. **Computers & Industrial Engineering**, v. 198, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110669>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835224007915>. Acesso em: 27 ago. 2025.

NGUYEN, L. K. N.; HOWICK, S.; MEGIDDO, I. A framework for conceptualising hybrid system dynamics and agent-based simulation models. **European Journal of Operational Research**, v. 315, p. 1153-1166, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.01.027>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221724000468>. Acesso em: 27 ago. 2025.

PAWSON, R. Evidence-based policy: in search of a method. **Evaluation**, v. 8, n. 2, p. 157-181, 2002. DOI <https://doi.org/10.1177/13589020020080025>. Disponível em:
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1358902002008002512>. Acesso em: 27 ago. 2025.

RODRIGUE, D. et al. Topology reduction through machine learning to accelerate dynamic simulation of district heating. **Energy and AI**, v. 17, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100393>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666546824000594>. Acesso em: 27 ago. 2025.

SCHEIDEGGER, A. P. G. et al. An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. **Computers & Industrial Engineering**, v. 124, p. 474-492, out. 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.07.046>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835218303693>. Acesso em: 27 ago. 2025.

SILVA, E. R. et al. Plug & Produce robot assistants as shared resources: A simulation approach. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 63, p. 107-117, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.03.004>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612522000383>. Acesso em: 27 ago. 2025.

SOBOTTKA, T. et al. Hybrid simulation-based optimization of discrete parts manufacturing to increase energy efficiency and productivity. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 413-420, 2018. DOI

<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.139>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918301781>. Acesso em: 27 ago. 2025.

TAKEUCHI, T. et al. Scaled dynamic loading tests on seismic isolation bearing excluding the contamination of friction and inertia forces. **Engineering Structures**, v. 296, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116844>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623012592>. Acesso em: 27 ago. 2025.

TISSOT, G. et al. A hybrid simulation/optimization architecture for developing a digital twin. **IFAC-Papers online**, p. 532-537, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.448>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322017384>. Acesso em: 27 ago. 2025.

TSOKANAS, N. et al. Model order reduction for real-time hybrid simulation: Comparing polynomial chaos expansion and neural network methods. **Mechanism and Machine Theory**, v. 178, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105072>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X22003172>. Acesso em: 27 ago. 2025.

TSOKANAS, N.; PASTORINO, R.; STOJADINOVIĆ, B. Adaptive model predictive control for actuation dynamics compensation in real-time hybrid simulation. **Mechanism and Machine Theory**, v. 172, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104817>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X22000878>. Acesso em: 27 ago. 2025.

TUR, M. et al. Hardware-in-the-Loop pantograph tests with general overhead contact line geometry. **Mechatronics**, v. 102, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2024.103231>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415824000965>. Acesso em: 27 ago. 2025.

WITTEVEEN, W.; KOLLER, L.; PENNINGER, D. Non-simultaneous real-time hybrid simulation of a numerical and experimental mechanical system with moderate nonlinearities via iterative coupling based on Frequency Response Functions. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 163, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108055>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327021004441>. Acesso em: 27 ago. 2025.

XANTHOPOULOS, A.; KOSTAVELIS, I. Novel Simulation Optimization Approach for Supply Chain Coordination and Management. **Procedia Computer Science**, v. 232, p. 1646-1653, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.162>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050924001637>. Acesso em: 27 ago. 2025.

YANG, L. et al. Adoption of information and digital technologies for sustainable smart manufacturing systems for industry 4.0 in small, medium, and micro enterprises (SMMEs). **Technological Forecasting and Social Change**, v. 188, mar. 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122308>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162522008290>. Acesso em: 27 ago. 2025.

ZÚÑIGA, E. R. et al. An integrated discrete-event simulation with functional resonance analysis and work domain analysis methods for industry 4.0 implementation. **Decision Analytics Journal**, set. 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100323>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772662223001637>. Acesso em: 27 ago. 2025.