

BLOCKCHAIN NA INDÚSTRIA 4.0 - DEFINIÇÃO, APLICABILIDADE E DESENVOLVIMENTO

Gabriel Arão¹

Jones Yudi²

Grupo de Automação e Controle, Universidade de Brasília

¹ gabriel.arao@aluno.unb.br, ² jonesyudi@unb.br

Resumo.

Indústria 4.0 é um termo guarda-chuva que se refere à adoção de diversas tecnologias emergentes e novos paradigmas em diversos setores da indústria, como Internet das Coisas, Inteligência Artificial, Sistemas Ciber Físicos, Virtualização, entre outros. Essa nova revolução industrial garante maior automação, produtividade, qualidade, confiabilidade, segurança e eficiência quando comparado com o modelo tradicional, chamado de Indústria 3.0.

Chegando na esteira de tecnologias inovadoras, Blockchain chamou muita atenção pelo seu uso bem-sucedido em criptomoedas, demonstrando sua capacidade de criar sistemas descentralizados e muito seguros. As suas características de segurança inerentes, inovação baseada em tecnologias já existentes e conhecidas, e a relativa simplicidade da ideia garantem aplicabilidade nos mais diversos contextos e motivaram a rápida evolução da tecnologia para se adaptar à realidade de Internet das Coisas presente na Indústria 4.0.

Atualmente, Blockchain já é considerada uma das tecnologias habilitadoras da revolução que é a Indústria 4.0, conferindo maior transparência e rastreabilidade nos processos industriais, maior nível de automação e facilidade no gerenciamento de redes IoT, além de fornecer maior privacidade e governança sobre os dados, facilitando a construção de ecossistemas colaborativos e descentralizados, essenciais para se garantir a rápida adaptabilidade da indústria em um mundo globalmente conectado com mudanças rápidas e constantes. Além disso, o conceito de tokenização existente em Blockchain condiz com o conceito de sistemas ciber físicos da Indústria 4.0, podendo ser naturalmente aplicado para melhorar rastreamento de bens e o acompanhamento do ciclo de vida de produtos e maquinário.

O presente artigo de revisão visa apresentar em detalhes o que é Blockchain, a evolução da tecnologia desde a sua concepção, incluindo os tipos de Blockchain, uma representação de sua arquitetura geral em camadas, estrutura de dados básica e as principais soluções comerciais disponíveis. Além disso, é apresentado o estado da arte em termos de aplicações de Blockchain na Indústria 4.0, que incluem o gerenciamento e segurança de dispositivos IIoT, armazenamento e compartilhamento de dados industriais e demais aplicações Industriais. Por fim, as principais vertentes de pesquisa e desenvolvimento são apresentados, evidenciando os principais problemas e desafios em aberto atualmente que devem ser superados para garantir a evolução e popularização da tecnologia.

Palavras-chave: Blockchain; Indústria 4.0; IIoT; Cibersegurança;

1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 representa uma revolução marcada por um novo nível de conectividade entre os dispositivos industriais, no chão de fábrica, mas também entre o chão de fábrica e os níveis mais gerenciais da indústria, uma revolução puxada pelos avanços nos protocolos de comunicação TCP/IP e a consolidação da internet como veículo de conectividade global.

Como consequência dessa conectividade sem precedentes e a velocidade com que os dados agora estão disponíveis para serem usados, a Quarta Revolução Industrial é caracterizada pela intensa digitalização de produtos e processos, que se tornam mais flexíveis e passam a poder responder e se adaptar rapidamente a novos contextos, além de possibilitar a tomada de decisão mais rápida e embasada nos níveis gerenciais.

A conectividade de equipamentos e dispositivos via internet veio a ser conhecida como Internet das Coisas (IoT na sigla em inglês) e, aplicada ao contexto da indústria, Internet das Coisas Industrial (IIoT), que é portanto considerada a base da Indústria 4.0. A rápida disponibilidade dos dados, novas possibilidades de controle e o grande volume de dados gerados fizeram com que outras tecnologias emergentes fossem incorporadas ao contexto da Indústria 4.0, como sistemas ciber físicos, Inteligência Artificial, Big Data, nuvens de dados entre outros.

A história da Indústria 4.0 ainda é muito recente, mas as vantagens em termos de automação, produtividade, qualidade, confiabilidade e eficiência são inquestionáveis. Ainda assim, o cenário atual da Indústria 4.0 é centralizado na nuvem, o que representa um ponto de falha único na arquitetura, além de trazer custos de armazenamento e manutenção que crescem juntos da indústria. Além disso, apesar do crescente nível de integração e conectividade presente dentro das organizações, a integração e conectividade entre organizações é difícil e insegura, uma vez que a arquitetura centrada em

nuvem não prevê mecanismos de compartilhamento de dados e controle de acesso que sejam facilmente gerenciáveis e rastreáveis.

Assim como a indústria foi revolucionada por tecnologias que permitiram novos níveis de integração e conectividade, a criação de ambientes colaborativos e que promovam o compartilhamento de dados de maneira segura e confiável pode ser muito benéfica. Tais ambiente podem propiciar o desenvolvimento de novos modelos de Inteligência Artificial, melhorias em eficiência e espaço para inovação.

Blockchain é uma tecnologia que surgiu e se popularizou através das criptomoedas, demonstrando ser capaz de criar plataformas descentralizadas onde clientes podem realizar trocas de maneira segura. O grau de confiança conquistado pelo Blockchain é suficiente para que milhões de pessoas comprem e troquem tokens digitais, com a certeza de que as transações realizadas não serão desfeitas e que os tokens adquiridos não serão perdidos. Além disso, o código aberto das soluções permitiu o desenvolvimento colaborativo do Blockchain e a criação de diversas plataformas com novas propostas e inovações.

As características de segurança e a confiança conquistada pelo Blockchain por pessoas ao redor do mundo incentivaram o desenvolvimento e evolução da tecnologia para atender outros contextos, como a Internet das Coisas, onde a perspectiva da criação de ambientes colaborativos seguros e confiáveis possibilitam novos modelos de negócio e chamam a atenção. No contexto da Indústria 4.0, a adoção de Blockchain é vista como um novo nível de integração e conectividade entre dispositivos, pessoas e organizações.

Este artigo de revisão tem como objetivo familiarizar o leitor com o que é Blockchain, como ele é aplicável na Indústria 4.0 e qual o atual estágio de desenvolvimento da tecnologia. As principais contribuições deste trabalho são:

1. Apresentar e definir o que é Blockchain: suas características, evolução, tipos, estrutura de dados, arquitetura e soluções comerciais.
2. Definir as principais aplicações de Blockchain na Indústria 4.0.
3. Discutir os principais desafios para adoção de Blockchain na Indústria 4.0 e fornecer um contexto do estágio atual do desenvolvimento da tecnologia.

O artigo está estruturado da seguinte forma: na seção 2 são apresentados outros trabalhos de revisão relacionados. Na seção 3 é definido o que é Blockchain e os principais pontos para entendimento da tecnologia. As seções 4 e 5 discutem as principais aplicações e desafios para Blockchain na Indústria 4.0, respectivamente. Por fim, a seção 6 conclui o artigo.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Com a crescente relevância do tema, diversos trabalhos de revisão podem ser encontrados nos anos recentes. A tabela 1 resume os principais trabalhos de revisão considerados e os compara com o presente artigo.

Aceto *et al.* (2019) e Zheng *et al.* (2021) colocam a Indústria 4.0 sob a perspectiva de suas tecnologias habilitadoras, incluindo Blockchain como uma das tecnologias mais recentes e disruptivas. A partir dessa perspectiva é possível descobrir como Blockchain se encaixa no cenário mais amplo da Indústria 4.0. Segundo Aceto *et al.* (2019), as características inerentes do Blockchain fazem com que seja uma solução quase ideal para suprir os muitos requisitos da visão colaborativa na Indústria 4.0, especialmente no que se refere à segurança da integração horizontal e ponta a ponta. Zheng *et al.* (2021) destaca o uso de Blockchain para rastreamento de materiais e acompanhamento do ciclo de vida de produtos inteligentes.

Perera *et al.* (2020), Hameed *et al.* (2022) e Huo *et al.* (2022) se aprofundam na estrutura de dados, taxonomia, topologia de rede, funcionamento e evolução do blockchain, deixando clara a rápida evolução da tecnologia e os principais desafios enfrentados, além das diversas soluções atualmente sob desenvolvimento. Perera *et al.* (2020) foca na discussão da aplicabilidade de Blockchain na construção civil e discute o conceito, arquitetura, interpretação e casos de uso do Blockchain, bem como perspectivas futuras. Hameed *et al.* (2022) apresenta as características, evolução, tipos e arquitetura em camadas do Blockchain, discutindo também os requisitos de segurança na Indústria 4.0 e como Blockchain se encaixa para suprir essas necessidades, ao mesmo tempo que aponta as questões de segurança não cobertas pelo Blockchain. Huo *et al.* (2022) Apresenta uma definição e arquitetura em camadas do Blockchain, citando as principais aplicações e fornecendo um método para pesquisa em Blockchain focado em suprir as demandas de cada camada da arquitetura.

Já Alladi *et al.* (2019), Wang *et al.* (2020b), Zuo (2021) e Pérez *et al.* (2022) focam na aplicação prática da tecnologia no contexto da Indústria 4.0, considerando diversos setores da indústria. São apresentados benefícios, desafios e perspectivas futuras, incluindo novos modelos de negócio que podem surgir com o uso de Blockchain. Alladi *et al.* (2019) aponta o uso de Blockchain no contexto de saúde e farmácia, logística, energia, e Supply Chain, enquanto que Wang *et al.* (2020b) discute seu uso em Smart Cities, Smart Homes, Big data, veículos elétricos, entre outros. Zuo (2021) trás uma extensa explicação do que é Blockchain, benefícios e desafios da adoção na Indústria 4.0, discutindo seu uso em Supply Chain, manufatura robotizada, manufatura aditiva, Edge Computing e indústria de energia. Por fim, Pérez *et al.* (2022) foca no uso de Blockchain para dar suporte à customização em massa na indústria de manufatura.

Focando nos temas de segurança e privacidade, Sengupta *et al.* (2020) discute ataques e vulnerabilidades em IoT, ao mesmo tempo que lista soluções que se baseiam em Blockchain. Joshi *et al.* (2022) foca na discussão sobre benefícios

e dificuldades da adoção de Blockchain para privacidade e segurança na Indústria 4.0. Por fim, Zhang e Chen (2020) compila diversas pesquisas e tendências considerando Blockchain, IoT, Indústria 4.0 e Business Analytics.

Tabela 1: Relação de trabalhos relacionados

Referência	Foco
Alladi <i>et al.</i> (2019)	Análise do benefícios e desafios do uso de Blockchain em IIoT por caso de uso.
Aceto <i>et al.</i> (2019)	Discussão acerca das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, incluindo Blockchain como a mais recente.
Wang <i>et al.</i> (2020b)	Aplicações e desafios do uso de Blockchain em IoT e IIoT.
Sengupta <i>et al.</i> (2020)	Ataques, vulnerabilidades e soluções usando Blockchain em IoT e IIoT.
Zhang e Chen (2020)	Tendências e pesquisas em IoT, Blockchain, Indústria 4.0 e Business Analytics.
Perera <i>et al.</i> (2020)	Discussão sobre os riscos, benefícios e a aplicabilidade de Blockchain para a construção civil.
Zuo (2021)	Aplicações e novos modelos de negócio com o uso de Blockchain em IoT, principalmente em manufatura inteligente.
Zheng <i>et al.</i> (2021)	Revisão sistemática acerca da aplicabilidade de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, incluindo Blockchain.
Hameed <i>et al.</i> (2022)	Análise aprofundada na taxonomia do Blockchain e discussão sobre requisitos e segurança de aplicá-lo na Indústria 4.0.
Joshi <i>et al.</i> (2022)	Benefícios e dificuldades na adoção de Blockchain para segurança e privacidade no contexto de Indústria 4.0.
Huo <i>et al.</i> (2022)	Apresenta um método de realização de pesquisas na área, além de comparar as principais plataformas disponíveis no mercado para uso de Blockchain.
Pérez <i>et al.</i> (2022)	Discute as vantagens e cria um framework para aplicar Blockchain em modelos de negócio baseados em customização em massa.
Este trabalho (2023)	Definir o que é Blockchain, suas características, evolução, tipos, estrutura de dados, arquitetura e soluções comerciais, bem como discutir o estado da arte em termos de aplicações na Indústria 4.0 e as principais vertentes de pesquisa para desenvolvimento e evolução da tecnologia neste contexto.

3. DEFINIÇÃO DE BLOCKCHAIN

Blockchain é um mecanismo que permite o registro de informações, em especial transações, de maneira segura, confiável e descentralizada. Em um sistema de informação tradicional existe um servidor central responsável por receber, checar e armazenar as informações enviadas pelos clientes da rede. Com Blockchain, os nós da rede agem tanto como cliente quanto como servidores e, através de protocolos de comunicação Peer-to-Peer (P2P) e mecanismos de consenso, dividem a responsabilidade de receber, checar e armazenar as informações que transitam pela rede.

Proposto inicialmente por Nakamoto (2008) no lançamento da criptomoeda Bitcoin, o termo blockchain não foi usado inicialmente, só se popularizando mais tarde (Johnsen, 2020). O sistema proposto usa Blockchain com o conceito de tokenização, onde cada token é atribuído a um cliente, podendo ser transferido para outros. Todas as transações são públicas, chegadas e registradas pelos demais clientes da rede através do Blockchain, que possui características que garantem segurança suficiente para que muitas pessoas confiem e adotem o Bitcoin como unidade monetária.

Desde o lançamento do Bitcoin e a popularização das criptomoedas, Blockchain já evolui e se modificou o suficiente para ser aplicável em diversos contextos. Um dos marcos mais importantes da tecnologia foi a criação de Smart Contracts pela plataforma Ethereum, que são programas armazenados na estrutura de dados do Blockchain, e que são automaticamente executados quando as condições do contrato são atendidas, sem nenhuma entidade reguladora central.

Algumas das características de segurança do Blockchain que fazem com que essa seja uma tecnologia tão atrativa são:

- **Descentralização:** A descentralização de sistemas de informação trazem diversos benefícios. O fato da informação estar armazenada em vários dispositivos faz com que o sistema seja redundante, resiliente a falhas e menos propenso a ataques cibernéticos comuns em redes centralizadas.
- **Imutabilidade:** Uma tentativa de alterar registros passados é frustrada pois, devido ao fato dos registros serem distribuídos entre todos os nós da rede, essa ação precisa passar pelo mecanismo de consenso para ser verificado e aprovado por todos os demais participantes. Além disso, a estrutura de dados adotada em Blockchain faz com que todo o histórico de informações possa ser rapidamente checado, de forma que a menor alteração é imediatamente percebida.
- **Não repúdio:** Blockchain exige que todo registro seja assinado digitalmente pelo dispositivo emissor da informação. Quando em um contexto de tokenização, é inegável afirmar que os dois nós realizaram uma transação, devido à presença das assinaturas de ambas as partes.

- **Transparência/Auditabilidade:** Na rede descentralizada criada via Blockchain, todos os nós da rede compartilham as tarefas de verificação e armazenamento dos registros e transações, de forma que essas informações são públicas e auditáveis para os participantes da rede.
- **Anonimidade:** A rede possui identificadores internos (como número da carteira, no caso de criptomoedas), de forma que os integrantes da rede não precisam compartilhar informações acerca de si mesmos para participarem. Ainda assim, devido à publicidade dos registros e a existência de informação externa, é possível quebrar a anonimidade de pessoas em alguns casos, sendo necessário o uso de outras técnicas caso se deseje garantir a anonimidade.
- **Autonomia da rede:** Uma rede descentralizada que usa Blockchain e Smart Contracts é capaz de operar de forma autônoma, emitindo, verificando e armazenando transações e demais informações automaticamente.

O comportamento básico da rede Blockchain é o seguinte:

1. Um cliente da rede emite um novo registro ou transação, verificável pela sua assinatura digital.
2. A mensagem é transmitida por toda a rede, checando no máximo de clientes possível.
3. Os registros e transação mais recentes são verificados e, caso sejam válidos, são incluídos em um bloco.
4. Os clientes verificam a validade das informações e, caso esteja em conformidade, realizam o procedimento descrito pelo algoritmo de consenso para incluir o bloco na estrutura do Blockchain.
5. A nova cadeia de blocos é transmitida pela rede e armazenada pelos clientes.

Os nós da rede sempre consideram a cadeia mais longa como sendo a mais correta. Em caso de empate, as cadeias de tamanhos iguais são mantidas até que haja um desempate. As mensagens não precisam chegar a todos os nós, contanto que chegue para a maioria, garantindo uma alta tolerância à falhas.

3.1 Evolução e tipos de Blockchain

Alguns autores como Hameed *et al.* (2022) e Ahmed *et al.* (2022) dividem a evolução do Blockchain em 5 momentos, representados na figura 1. As características mais marcantes de cada era são descritas a seguir:

1. **Blockchain 1.0 - Criptomoedas:** Inaugurando a era do Blockchain está o Bitcoin e demais criptomoedas. Blockchain é usado com o conceito de tokens digitais e transferência de valores.
2. **Blockchain 2.0 - Smart Contracts:** A primeira evolução que marcou Blockchain foi a concepção de Smart Contracts pela plataforma Ethereum. Smart Contracts são programas auto executáveis gravados no Blockchain, permitindo a automação de tarefas, e são a base para as próximas evoluções.
3. **Blockchain 3.0 - Aplicações Descentralizadas:** Conforme Blockchain passou a ser utilizado em contextos como Supply Chain e Smart Health, o volume de dados passou a ser um problema. A terceira evolução da tecnologia visou aplicar Blockchain para descentralizar o trabalho realizado por servidores, com alta capacidade de armazenamento, e a criação de aplicações descentralizadas mais seguras. Uma das grandes vantagens dessa evolução foi a possibilidade dos programadores usarem qualquer linguagem de programação para desenvolvimento dessas soluções.
4. **Blockchain 4.0 - Indústria:** Conforme Blockchain e Indústria 4.0 convergem, Blockchain precisou evoluir para acompanhar e suprir as demandas dos diversos cenários Industriais. Não apenas requisitos de armazenamento como também segurança, privacidade, escalabilidade e vazão de dados são prioridades nessa fase da evolução.
5. **Blockchain 5.0 - Inteligência Artificial:** A mais recente evolução diz respeito à descentralização da Web e de técnicas de Inteligência Artificial (IA). Com Blockchain preparado para ser aplicado em contextos reais, o enorme volume de dados pode ser usado para construção de modelos inteligentes de maneira descentralizada, colaborativa e segura, mantendo a privacidade e propriedade dos dados.

Por fim, é importante ressaltar os diferentes tipos de Blockchain que surgiram com a evolução da tecnologia (Hameed *et al.*, 2022):

- **Blockchain Público:** É a concepção original do Blockchain, consiste em uma rede pública, sem permissionamento, onde os nós da rede podem entrar e sair quando desejarem. Tem como característica o uso de mecanismos de recompensa e punição, para incentivar o bom comportamento dos clientes.
- **Blockchain Privado:** Também conhecidas como redes Blockchain com permissionamento, são redes totalmente controladas por uma organização, exigindo que todos os dispositivos sejam previamente cadastrados para receber permissão para participar. Normalmente são redes menores e tem como característica a busca por mais eficiência e segurança, mesmo que isso resulte no aumento de complexidade, hierarquização e menor grau de descentralização na rede.

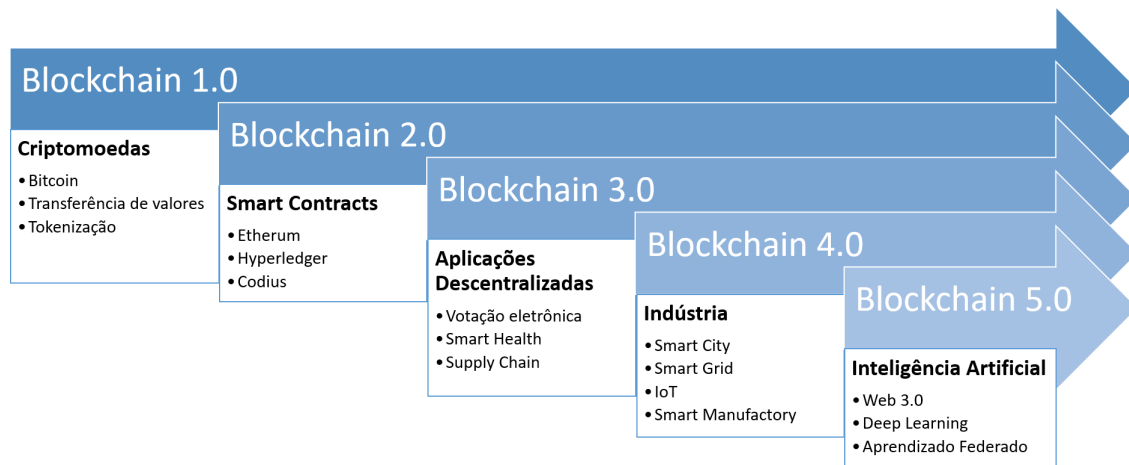


Figura 1: Evolução do Blockchain

- **Blockchain Híbrido ou Consórcio:** O conceito intermediário entre os dois tipos anteriores, surge a partir da necessidade de cooperação entre organizações. Mantém o permissionamento na rede, porém com maior grau de descentralização, onde uma única organização não possui controle total sobre a rede, e com mais cuidado com relação aos dados gravados no Blockchain.

3.2 Estrutura de dados e modelos de armazenamento

A estrutura de dados do Blockchain, conforme apresentada por Nakamoto (2008) e representada na figura 2, é feita para garantir a integridade das informações gravadas, facilitando a verificação dos blocos e suas transações. Ela consiste em uma cadeia de blocos, onde o bloco seguinte aponta e comprova a autenticidade do anterior através de uma função hash. As informações gravadas no corpo do bloco também são facilmente verificáveis através do uso de uma Árvore de Merkle (Merkle, 1989).

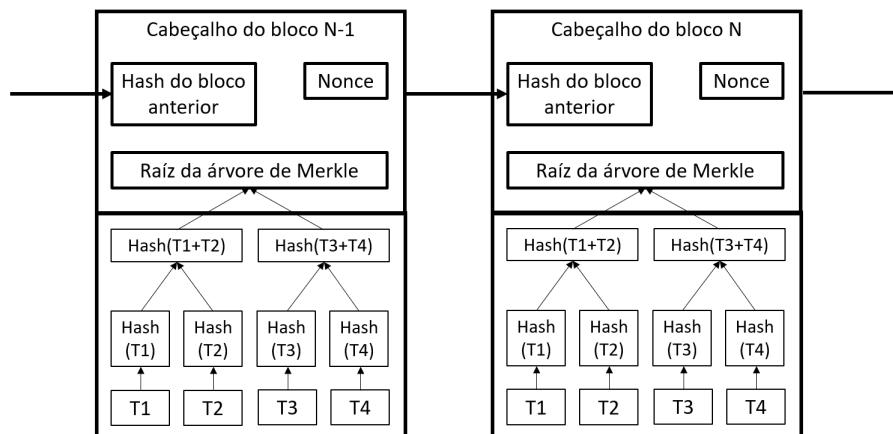


Figura 2: Estrutura de dados básica em blockchain

Na figura 2 estão visíveis o cabeçalho e o corpo da estrutura, de maneira simplificada. Cada bloco possui o hash do bloco anterior em seu cabeçalho, com exceção do primeiro bloco, chamado de bloco gênese (Perera *et al.*, 2020). Além disso, um valor aleatório (*Nonce*) é usado em alguns algoritmos de consenso para manipular o resultado do hash do bloco atual.

As transações T1 a T4, representadas na figura, fazem parte de uma árvore binária conhecida como Árvore de Merkle, que facilita a verificação da integridade dos dados, além de aliviar o volume de dados armazenados em nós com menor capacidade, que podem armazenar somente os cabeçalhos e solicitar as transações quando necessário. Apesar da figura, mais que 4 transações podem ser gravadas em um único bloco.

Além disso, é importante mencionar que existem 2 modelos de armazenamento de dados em aplicações Blockchain, que podem levar a modificações na sua estrutura base. São eles:

- **Armazenamento On-Chain:** Os dados são armazenados no próprio Blockchain, seguindo a estrutura tradicional apresentada. Nesse modelo os dados gravados são visíveis para todos na rede e pode exigir maior espaço de armazenamento dos dispositivos e maior latência na rede.

- **Armazenamento *Off-Chain*:** Os dados são armazenados fora do Blockchain, que mantém apenas os valores hash desses dados, para verificação de integridade. Esse modelo garante a privacidade dos dados, além de exigir menor capacidade de armazenamento e reduzir a latência na rede, porém aumentando a complexidade da solução e fazendo com que os dados não compartilhem das características de segurança do Blockchain.

3.3 Arquitetura em camadas

Huo *et al.* (2022), Hameed *et al.* (2022) e Perera *et al.* (2020) apresentam representações em camadas da arquitetura de Blockchain, que pode ser resumida na arquitetura de 5 camadas mostrada na figura 3. Na arquitetura em camadas normalmente cada camada possui uma interface de comunicação com as camadas acima e abaixo e limites bem definidos, entretanto, em uma arquitetura descentralizada, algumas camadas são mais abstratas e servem mais para facilitar o entendimento.

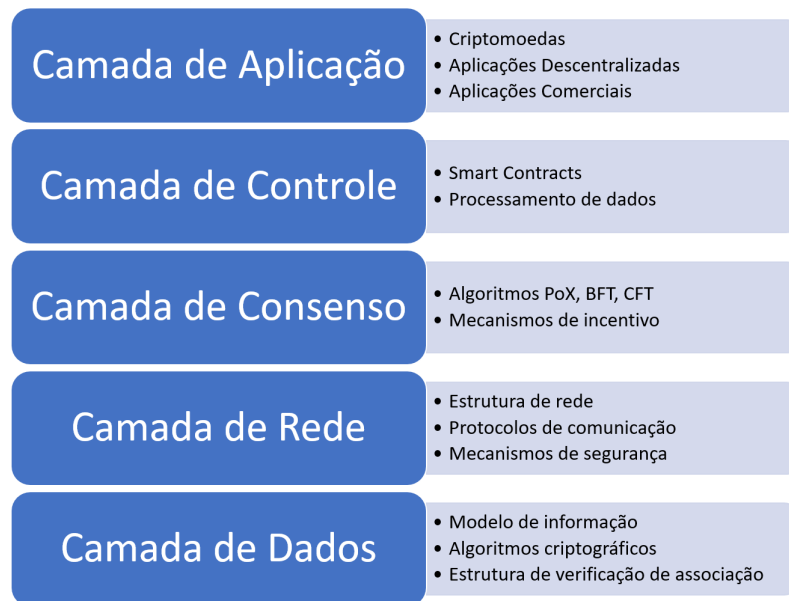


Figura 3: Arquitetura em camadas em blockchain

- **Camada de Aplicação:** É a camada que contém a interface com o usuário, e se comunica com a camada de controle, fazendo solicitações e criando novos contratos, normalmente através de APIs.
- **Camada de Controle:** Uma camada que representa a programação do Blockchain. Essa camada dita como se dá o processamento e verificação de dados, a execução de Smart Contracts, consulta de dados no modelo *Off-Chain* e demais lógicas de alto nível, normalmente especializadas para o caso de uso.
- **Camada de Consenso:** Contém o algoritmo de consenso usado para a verificação e armazenamento dos dados de forma distribuída e coordenada, além dos mecanismos de recompensa e punição usados para incentivar o bom comportamento dos clientes em redes públicas.

Os mecanismos de consenso podem ser divididos em 3 categorias:

1. **PoX (Proof of X)** são normalmente usados em redes Blockchain públicas por possuírem mecanismos de incentivo embutidos. São mecanismos que exigem que os clientes se comprometam com recursos próprios a favor da rede, de forma que um atacante pode perder ou desperdiçar esses recursos caso o restante da rede não concorde com seu comportamento, enquanto que clientes honestos são recompensados.
Proof of Work (PoW), mecanismo famoso por ter sido adotado pelo Bitcoin (Nakamoto, 2008), exige poder de processamento de seus clientes para criação e inclusão de blocos na estrutura, não sendo apropriado para dispositivos com baixo poder de processamento, como em aplicações IoT, sendo mais apropriado a aplicação de outros mecanismos como Proof of Stake (PoS), Proof of Authority (PoA) ou Proof of Elapsed Time (PoET), entre tantos outros.
2. **BFT (Byzantine Fault Tolerance):** são inspirados no Problema dos Generais Bizantinos, da Teoria dos Jogos (Huo *et al.*, 2022), em que os generais devem chegar a um acordo quanto à estratégia de ataque a ser usada, mesmo que alguns dos generais sejam inimigos infiltrados. Contanto que os inimigos estejam em minoria, esses algoritmos são capazes de alcançar o consenso.
Esses mecanismos não possuem uma mecânica de incentivo e são mais utilizados em redes privadas, em ambientes controlados, com menos nós na rede e onde se assume que a maioria dos dispositivos sejam honestos e funcionando corretamente. O algoritmo mais conhecido é o Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT).

3. **CFT (Crash Fault Tolerance):** são mecanismos focados na resiliência da rede, sendo capazes de alcançar consenso mesmo quando parte da rede está comprometida. Os algoritmos mais conhecidos incluem Paxos, Raft e Kafka (Huo *et al.*, 2022).

- **Camada de Rede:** Camada que encapsula a estrutura de rede e protocolos de comunicação P2P e de broadcast, além dos mecanismos de segurança para transporte dos dados. Com relação à estrutura de rede, ela pode ser **não estruturada**, que é a arquitetura mais tradicional, ou **estruturada**, que torna a rede mais complexa porém melhora a vazão de dados consideravelmente, sendo aplicável principalmente para redes privadas.
- **Camada de Dados:** Representa a estrutura de dados, funções hash, árvore de Merkle e demais algoritmos criptográficos, além do teor das informações gravadas.

3.4 Soluções comerciais

Atualmente existe uma gama de opções de plataformas Blockchain para se escolher, para os mais diversos cenários e aplicações. Os critérios que organizações devem considerar para realizar a escolha de uma plataforma específica incluem custo, mecanismo de consenso, suporte a Smart Contracts, performance, ferramentas de desenvolvimento disponíveis, maturidade da plataforma, entre outros. Huo *et al.* (2022) e Perera *et al.* (2020) analisam as características das plataformas Blockchain mais populares, que incluem Ethereum, IBM Blockchain, Hyperledger Fabric, Hyperledger Sawtooth, Azure Blockchain, entre outros.

De forma geral, a escolha da plataforma de Blockchain ideal envolve o trilema representado na figura 4, onde não é possível atender todos os requisitos de segurança, descentralização e escalabilidade simultaneamente (Perera *et al.*, 2020; Huo *et al.*, 2022). A segurança, considerado um dos pilares e motivos para adoção do Blockchain, é garantido pelas principais plataformas comerciais, que então escolhem atender aplicações que exigem mais escalabilidade ou descentralização.

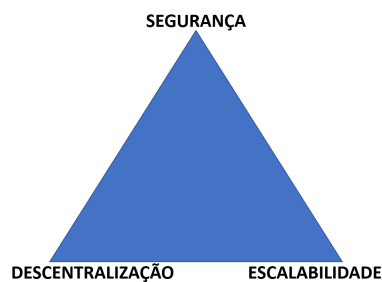


Figura 4: Trilema do desenvolvimento em Blockchain

A relação de oposição entre escalabilidade e descentralização vem do fato de que, quanto maior a rede, maior será a latência de comunicação para que todos participem do processo de consenso, principalmente em mecanismos BFT, fazendo com que se abra mão da descentralização e se concentre mais poder de decisão em alguns nós da rede em prol de mais escalabilidade da rede.

4. APLICAÇÕES DE BLOCKCHAIN NA INDÚSTRIA 4.0

As aplicações de Blockchain na Indústria 4.0 podem ser divididas em 3 vertentes principais (Huo *et al.*, 2022):

1. **Gerenciamento e segurança de dispositivos:** são aplicações que usam Blockchain para cadastro e autenticação de dispositivos, unificando o padrão de gerenciamento mesmo com a heterogeneidade de dispositivos IoT e explorando as vantagens oferecidas pela descentralização;
2. **Armazenamento e compartilhamento de dados:** usam Blockchain para criar uma camada de controle de acesso aos dados que promove mais privacidade e facilita o gerenciamento e compartilhamento de informações dentro de uma organização ou em um contexto mais amplo, envolvendo múltiplas organizações.
3. **Aplicações Industriais:** adaptam as soluções e aplicam a um caso de uso real, usando Blockchain para rastrear matéria-prima, produtos e operações industriais através do conceito de tokenização, regulam trocas energéticas ou o processo de Aprendizado de Máquina distribuído, entre outras aplicações.

A seguir são apresentados os principais e mais recentes avanços em aplicações nessas 3 áreas.

4.1 Gerenciamento e segurança de dispositivos

De maneira geral, redes IIoT devem adotar sistemas para gerenciamento e autenticação dos dispositivos da rede. Os principais desafios enfrentados por tais sistemas estão relacionados à proteção das chaves criptográficas, a privacidade dos dados e a rastreabilidade da atividade dos dispositivos na rede, além da detecção automática de falhas e ataques que

devem desencadear medidas que visam mitigar possíveis danos. Além disso, redes IIoT muitas vezes são heterogêneas e os sistemas de gerenciamento devem fornecer um certo nível de padronização no cadastro e gerenciamento desses dispositivos.

De forma geral, Blockchain pode fornecer uma estrutura segura que oferece imutabilidade, não repúdio, que facilita a detecção de anomalias e com suporte para redes heterogêneas para registrar informações que, em conjunto com outras técnicas criptográficas, pode oferecer a privacidade e confidencialidade necessárias para tais sistemas. Além disso, tarefas rotineiras e o registro de atividades podem ser automatizadas através de Smart Contracts.

Wang *et al.* (2021) propõe um sistema baseado em Blockchain e Smart Contracts para autenticação de dispositivos IIoT sem Certificado Digital. O esquema descentraliza o processo de geração de chaves, considerado um risco de segurança em outros sistemas de autenticação similares, tornando a rede mais resistente a ataques como *Man-in-the-Middle* (MitM).

Latif *et al.* (2021) demonstra o uso de Blockchain em uma planta de processamento de frutas, usando Blockchain privado e Smart Contracts para criar uma camada de registro e autenticação de usuários e dispositivos IIoT, além de transmitir comandos aos atuadores e armazenar dados da operação.

Li *et al.* (2022) propõe um protocolo AGKA (Assimetric Group Key Agreement) para lidar com a segurança das chaves criptográficas usando Blockchain, o que garante a automação do controle de acesso usando Smart Contracts, além das características de imutabilidade e não repúdio do Blockchain.

4.2 Armazenamento e compartilhamento de dados

Em aplicações IoT é comum haver um grande volume de dados que devem ser armazenados e compartilhados com terceiros de maneira segura. O sistema ideal para compartilhamento deve ter uma certa granularidade de permissões para possibilitar compartilhamento somente aos dados necessários e nenhum outro, além de oferecer rastreabilidade dos acessos realizados e a facilidade de gerenciar e revogar os acessos quando necessário.

Blockchain pode ser usado para se criar uma camada intermediária entre os dados e os usuários, verificando permissões e registrando todos os acessos realizados de maneira transparente e rastreável. A descentralização da solução facilita a criação de cenários colaborativos entre organizações que desejam compartilhar dados de maneira segura e controlada.

Gai *et al.* (2020) propõe uma combinação de Blockchain e Edge Computing, usando técnicas de Privacidade Diferencial para garantir a privacidade de dados sobre alocação de tarefas. O sistema garante eficiência energética, segurança e governança dos dados privados dos usuários.

Tian *et al.* (2021) propõe o BML-ES, um framework para uso de Machine Learning (ML) em IIoT baseado em Blockchain. Baseado no conceito de Federated Learning, o framework propõe uma estratégia para agregar os modelos de ML locais para obtenção de um modelo global, bem como o uso de Smart Contracts como mecanismo de incentivo para a participação dos nós na rede.

Rahman *et al.* (2021) desenvolve um sistema Blockchain com armazenamento híbrido *on-chain* e *off-chain* na nuvem para eficiência em dispositivos IIoT, além de um método criptográfico para preservar a privacidade dos dados armazenados ao mesmo tempo que permite o compartilhamento e a rapidez na resposta a queries.

Qi *et al.* (2020) propõe o CpdS, um sistema voltado para armazenamento eficiente e compartilhamento de dados descentralizado e unificado para IIoT. Baseado em Blockchain, o sistema permite que múltiplas organizações gerenciem acesso e compartilhem dados de maneira segura ao mesmo tempo que garante a eficiência de armazenamento usando técnicas de compressão de dados.

Gao *et al.* (2020) considera os riscos de segurança e privacidade em Pervasive Edge Computing (PEC) e Software-Defined Networks (SDN), dois paradigmas emergentes em IIoT, e propõe o uso de Blockchain e Proxy Reencryption para permitir o compartilhamento seguro de dados entre dispositivos, bem como reduzir riscos de segurança provenientes da arquitetura centralizada. Smart Contracts também são usados para busca e atualização de registros em Blockchain.

Yu *et al.* (2021) desenvolve um sistema para compartilhamento de Smart Factory Big Data (SFBDB) com parceiros comerciais baseado em Blockchain. O sistema realiza registro e autenticação de dispositivos e usuários, registrando acessos realizados e sendo capaz de detectar e rastrear anomalias e acessos não autorizados, revogando automaticamente o acesso.

Lu *et al.* (2021) propõe um protocolo baseado em Blockchain para compartilhamento de dados de sensores IIoT armazenados em nuvem. Um novo esquema de assinatura em grupo é desenvolvido e combinado com Smart Contracts e Proxy Reencryption para garantir privacidade, segurança e eficiência.

4.3 Aplicações Industriais

A Indústria 4.0 engloba uma série de setores que podem se beneficiar do uso de Blockchain, como a manufatura, a gestão da cadeia de suprimentos, saúde, energia, veículos autônomos, entre outros. A seguir estão descritos algumas das principais e mais recentes pesquisas nas áreas da indústria cuja aplicação de Blockchain é mais proeminente.

4.3.1 Smart Grid

Um novo termo derivado da Indústria 4.0 e que abarca uma série de tecnologias emergentes é Smart Grid, relacionada com o uso de IoT no setor de energia e que permite um maior controle e rastreabilidade sobre consumo e produção

energética. Blockchain é encarado como uma tecnologia promissora para possibilitar trocas energéticas mais seguras e eficientes, de maneira descentralizada e independente.

Li *et al.* (2018) propõe um sistema para troca energética segura baseado em Blockchain de consórcio. Através do uso de Smart Contracts, o sistema garante o cumprimento do acordo entre as partes, automatizando a tarefa e eliminando riscos de transações fraudulentas, além de propor um esquema para determinação de preços de forma dinâmica.

Li *et al.* (2020) apresenta o FeneChain, um sistema baseado em Blockchain que supervisiona e gerencia o processo de troca energética, focado em segurança, privacidade e eficiência. No contexto da Indústria 4.0, o sistema garante a aquisição de energia rastreável e de maneira segura.

Guan *et al.* (2020) apresenta o BC-ETS, um sistema que visa melhorar a eficiência, segurança e escalabilidade de esquemas de troca energética tradicionais. Baseado em Blockchain, o sistema usa um esquema baseado em crédito para se adequar à capacidade computacional de dispositivos IoT.

4.3.2 Machine Learning

O volume de dados gerados em aplicações IoT é perfeito para treinar modelos de ML, que dependem desses dados. Um novo método de treinamento, conhecido como Federated Learning (FL) (McMahan *et al.*, 2017) permite que modelos de ML sejam treinados de maneira descentralizada, sem a necessidade de reunir os dados em um servidor, preservando a privacidade dos dados, promovendo mais eficiência nas comunicações da rede e reduzindo custos de armazenamento e manutenção.

Porém, FL ainda requer que o poder decisório seja concentrado na figura central de um orquestrador, o que diminui a sua característica descentralizada. O uso de Blockchain unido a FL é visto como uma forma de tornar o método descentralizado de fato, tornando-o ainda mais promissor para uma série de desafios. A principal preocupação envolvida no uso de Blockchain e FL é como preservar a privacidade dos modelos de ML que são enviados pela rede.

Jia *et al.* (2021) reconhece os benefícios de FL mas aponta para vulnerabilidades e ataques que visam os modelos de ML locais gerados. Para oferecer mais segurança e privacidade, é proposto um sistema para FL baseado em Blockchain que utiliza Privacidade Diferencial e Criptografia Homomórfica para proteger os modelos de ML compartilhados.

Zhang *et al.* (2021) propõe BC-EdgeFL, um modelo de transmissão de dados para FL e Edge Computing baseado em Blockchain. Os experimentos mostram altas taxas de acurácia do modelo e de detecção de informações ilegais, tornando o sistema seguro e eficiente.

4.3.3 Supply Chain

Rastreabilidade e compartilhamento de informações entre organizações parceiras é especialmente relevante na cadeia de suprimentos, também conhecida como supply chain, sendo um ambiente natural para a aplicação de Blockchain, que permite alcançar um novo nível de segurança e colaboração entre os muitos stakeholders. O uso de Blockchain trás mais transparência e informação acerca da produção, gerando mais inovação, eficiência e confiança de ponta a ponta da cadeia, desde os fornecedores primários até o cliente final.

Sistemas de compartilhamento de dados como os desenvolvidos por Yu *et al.* (2021) e Lu *et al.* (2021) são essenciais para possibilitar uma maior adoção de Blockchain em Supply Chain. Rashid *et al.* (2022) realiza uma análise aprofundada sobre os impactos da adoção da tecnologia em termos de rastreabilidade, transparência, performance e confiança entre as partes.

Cao *et al.* (2019) propõe um sistema baseado em Blockchain para rastreabilidade de Supply Chain na indústria metalúrgica, tornando a produção mais transparente e aumentando a rastreabilidade do trabalho realizado. Além disso, o maior nível de automação e informação eleva a eficiência e confiança em toda a cadeia.

5. EVOLUÇÃO E MELHORIAS EM BLOCKCHAIN

Existem diversos desafios que precisam ser vencidos para ampliar a confiança e adoção de Blockchain em IIoT. Primeiramente, as limitações de armazenamento e processamento dos dispositivos exige a construção de modelos de armazenamento inovadores, estruturação da rede com separação de responsabilidades, simplificações na estrutura de dados básica, além de mecanismos de consenso energeticamente eficientes.

Muitos contextos industriais também exigem alta escalabilidade, comunicação com baixa latência e grande vazão de dados, requisitos que Blockchain ainda sofre para atender. Tentativas de melhorar a escalabilidade, conforme indica o trilema do Blockchain, acarretam em menor descentralização, que se traduz em hierarquização e divisão de tarefas na rede, fragmentação e distribuição dos dados e o uso de entidades que centralizam algum tipo de poder decisório para orquestração da rede.

Visando remover as limitações de armazenamento e escalabilidade para aplicação de Blockchain em IoT, Yu *et al.* (2020) propõe LayerChain. Através de uma estrutura de rede hierarquizada e clusterização dos nós, LayerChain reduz os requisitos de armazenamento do sistema e os tempos de propagação de blocos, sendo conveniente para aplicações IIoT de larga escala e baixo delay.

Cui *et al.* (2020) propõe o protocolo CoDAG visando melhorar a vazão de dados em Blockchain. O protocolo organiza os nós como um Grafo Acíclico Dirigido (DAG na sigla em inglês) compactado, além de realizar simplificações na estrutura de dados. Simulações de ataques são realizadas para demonstrar a segurança do protocolo.

Cai *et al.* (2021) propõe o uso de Sharding para distribuição de dados em Blockchain visando melhorias na vazão e escalabilidade. Um modelo de otimização multiobjetivo é proposto para definição dos parâmetros.

Cao *et al.* (2020) propõe um modelo de otimização multiobjetivos para definir os parâmetros de uma rede Blockchain privada, visando otimizar escalabilidade, descentralização, latência e custo. O mecanismo de consenso adotado foi PBFT, adequado para redes privadas.

Visando melhorar problemas de segurança presentes em mecanismos de consenso, Wang *et al.* (2020a) propõe PoRX, um esquema de incentivo baseado em crédito que pode ser usado em conjunto com mecanismos PoX e voltado para IIoT. O esquema reforça ainda mais as recompensas e punições, incentivando mais efetivamente o bom comportamento da rede.

6. CONCLUSÃO

Neste artigo de revisão foi apresentada a tecnologia Blockchain e as características inerentes que a torna tão atrativa. Uma contextualização com a evolução histórica do Blockchain foi feita, desde a concepção até o que é chamado de Blockchain 5.0. Foram definidos os tipos de Blockchain público, privado e de consórcio, salientando suas diferenças e aplicações. Para aprofundar no entendimento da tecnologia, a estrutura básica do Blockchain foi descrita e ilustrada, bem como a arquitetura em camadas, desde a camada de dados até a aplicação final, destacando a camada de consenso e os principais mecanismos existentes.

Uma visão geral das soluções comerciais presentes no cenário atual foi discutido, juntamente com o trilema envolvido no desenvolvimento de uma solução Blockchain. Na sequência, as principais e mais recentes pesquisas na área revelam o estado da arte na aplicação de Blockchain no contexto da Indústria 4.0, descrevendo como a tecnologia pode criar ambientes de colaboração e gerenciamento de dispositivos e dados descentralizados, seguros e com maior grau de automação. Por fim, os principais desafios para expandir a adoção de Blockchain em IIoT são descritos, juntamente com pesquisas que trazem avanços significativos para a área.

7. REFERÊNCIAS

- Aceto, G., Persico, V. e Pescapé, A., 2019. “A survey on information and communication technologies for industry 4.0: State-of-the-art, taxonomies, perspectives, and challenges”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 21, No. 4, pp. 3467–3501.
- Ahmed, I., Zhang, Y., Jeon, G., Lin, W., Khosravi, M.R. e Qi, L., 2022. “A blockchain-and artificial intelligence-enabled smart iot framework for sustainable city”. *International Journal of Intelligent Systems*.
- Alladi, T., Chamola, V., Parizi, R.M. e Choo, K.K.R., 2019. “Blockchain applications for industry 4.0 and industrial iot: A review”. *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 176935–176951.
- Cai, X., Geng, S., Zhang, J., Wu, D., Cui, Z., Zhang, W. e Chen, J., 2021. “A sharding scheme-based many-objective optimization algorithm for enhancing security in blockchain-enabled industrial internet of things”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 17, No. 11, pp. 7650–7658.
- Cao, B., Wang, X., Zhang, W., Song, H. e Lv, Z., 2020. “A many-objective optimization model of industrial internet of things based on private blockchain”. *IEEE Network*, Vol. 34, pp. 78–83.
- Cao, Y., Jia, F. e Manogaran, G., 2019. “Efficient traceability systems of steel products using blockchain-based industrial internet of things”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 16, No. 9, pp. 6004–6012.
- Cui, L., Yang, S., Chen, Z., Pan, Y., Xu, M. e Xu, K., 2020. “An efficient and compacted dag-based blockchain protocol for industrial internet of things”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 16, pp. 4134–4145.
- Gai, K., Wu, Y., Zhu, L., Zhang, Z. e Qiu, M., 2020. “Differential privacy-based blockchain for industrial internet-of-things”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 16, pp. 4156–4165.
- Gao, Y., Chen, Y., Hu, X., Lin, H., Liu, Y. e Nie, L., 2020. “Blockchain based iiot data sharing framework for sdn-enabled pervasive edge computing”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 17, No. 7, pp. 5041–5049.
- Guan, Z., Lu, X., Wang, N., Wu, J., Du, X. e Guizani, M., 2020. “Towards secure and efficient energy trading in iiot-enabled energy internet: A blockchain approach”. *Future Generation Computer Systems*, Vol. 110, pp. 686–695.
- Hameed, K., Barika, M., Garg, S., Amin, M.B. e Kang, B., 2022. “A taxonomy study on securing blockchain-based industrial applications: An overview, application perspectives, requirements, attacks, countermeasures, and open issues”. *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 26, p. 100312.
- Huo, R., Zeng, S., Wang, Z., Shang, J., Chen, W., Huang, T., Wang, S., Yu, F.R. e Liu, Y., 2022. “A comprehensive survey on blockchain in industrial internet of things: Motivations, research progresses, and future challenges”. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 24, pp. 88–122.
- Jia, B., Zhang, X., Liu, J., Zhang, Y., Huang, K. e Liang, Y., 2021. “Blockchain-enabled federated learning data protection aggregation scheme with differential privacy and homomorphic encryption in iiot”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 18, No. 6, pp. 4049–4058.
- Johnsen, M., 2020. *Blockchain in Digital Marketing: A New Paradigm of Trust*. Maria Johnsen.
- Joshi, S., Pise, A.A., Shrivastava, M., Revathy, C., Kumar, H., Alsetoohy, O. e Akwafo, R., 2022. “Adoption of blockchain technology for privacy and security in the context of industry 4.0”. *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 2022.

- Latif, S., Idrees, Z., Ahmad, J., Zheng, L. e Zou, Z., 2021. "A blockchain-based architecture for secure and trustworthy operations in the industrial internet of things". *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 21.
- Li, J., Qiao, Z. e Peng, J., 2022. "Asymmetric group key agreement protocol based on blockchain and attribute for industrial internet of things". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
- Li, M., Hu, D., Lal, C., Conti, M. e Zhang, Z., 2020. "Blockchain-enabled secure energy trading with verifiable fairness in industrial internet of things". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 16, pp. 6564–6574.
- Li, Z., Kang, J., Yu, R., Ye, D., Deng, Q. e Zhang, Y., 2018. "Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, pp. 3690–3700.
- Lu, J., Shen, J., Vijayakumar, P. e Gupta, B.B., 2021. "Blockchain-based secure data storage protocol for sensors in the industrial internet of things". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 18, No. 8, pp. 5422–5431.
- McMahan, B., Moore, E., Ramage, D., Hampson, S. e y Arcas, B.A., 2017. "Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data". In *Artificial intelligence and statistics*. PMLR, pp. 1273–1282.
- Merkle, R.C., 1989. "A certified digital signature". In *Conference on the Theory and Application of Cryptology*. Springer, pp. 218–238.
- Nakamoto, S., 2008. "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system". *Decentralized Business Review*, p. 21260.
- Perera, S., Nanayakkara, S., Rodrigo, M., Senaratne, S. e Weinand, R., 2020. "Blockchain technology: Is it hype or real in the construction industry?" *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 17, p. 100125.
- Pérez, A.T.E., Rossit, D.A., Tohmé, F. e Óscar C. Vásquez, 2022. "Mass customized/personalized manufacturing in industry 4.0 and blockchain: Research challenges, main problems, and the design of an information architecture". *Information Fusion*, Vol. 79, pp. 44–57.
- Qi, S., Lu, Y., Zheng, Y., Li, Y. e Chen, X., 2020. "Cpds: Enabling compressed and private data sharing for industrial internet of things over blockchain". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 17, No. 4, pp. 2376–2387.
- Rahman, M.S., Khalil, I., Moustafa, N., Kalapaaking, A.P. e Bouras, A., 2021. "A blockchain-enabled privacy-preserving verifiable query framework for securing cloud-assisted industrial internet of things systems". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 18, No. 7, pp. 5007–5017.
- Rashid, A., Ali, S.B., Rasheed, R., Amirah, N.A. e Ngah, A.H., 2022. "A paradigm of blockchain and supply chain performance: a mediated model using structural equation modeling". *Kybernetes*.
- Sengupta, J., Ruj, S. e Bit, S.D., 2020. "A comprehensive survey on attacks, security issues and blockchain solutions for iot and iiot". *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 149, p. 102481.
- Tian, Y., Li, T., Xiong, J., Bhuiyan, M.Z.A., Ma, J. e Peng, C., 2021. "A blockchain-based machine learning framework for edge services in iiot". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 18, No. 3, pp. 1918–1929.
- Wang, E.K., Liang, Z., Chen, C.M., Kumari, S. e Khan, M.K., 2020a. "Porx: A reputation incentive scheme for blockchain consensus of iiot". *Future Generation Computer Systems*, Vol. 102, pp. 140–151.
- Wang, Q., Zhu, X., Ni, Y., Gu, L. e Zhu, H., 2020b. "Blockchain for the iot and industrial iot: A review". *Internet of Things*, Vol. 10, p. 100081.
- Wang, W., Xu, H., Alazab, M., Gadekallu, T.R., Han, Z. e Su, C., 2021. "Blockchain-based reliable and efficient certificateless signature for iiot devices". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
- Yu, K., Tan, L., Aloqaily, M., Yang, H. e Jararweh, Y., 2021. "Blockchain-enhanced data sharing with traceable and direct revocation in iiot". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 17, pp. 7669–7678.
- Yu, Y., Liu, S., Yeoh, P.L., Vucetic, B. e Li, Y., 2020. "Layerchain: a hierarchical edge-cloud blockchain for large-scale low-delay industrial internet of things applications". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 17, No. 7, pp. 5077–5086.
- Zhang, C. e Chen, Y., 2020. "A review of research relevant to the emerging industry trends: Industry 4.0, iot, blockchain, and business analytics". *Journal of Industrial Integration and Management*, Vol. 5, No. 01, pp. 165–180.
- Zhang, P., Hong, Y., Kumar, N., Alazab, M., Alshehri, M.D. e Jiang, C., 2021. "Bc-edgefl: A defensive transmission model based on blockchain-assisted reinforced federated learning in iiot environment". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 18, No. 5, pp. 3551–3561.
- Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A. e Perona, M., 2021. "The applications of industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review". *International Journal of Production Research*, Vol. 59, No. 6, pp. 1922–1954.
- Zuo, Y., 2021. "Making smart manufacturing smarter—a survey on blockchain technology in industry 4.0". *Enterprise Information Systems*, Vol. 15, No. 10, pp. 1323–1353.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O autor é o único responsável pelas informações incluídas neste trabalho.

BLOCKCHAIN IN INDUSTRY 4.0 - DEFINITION, APPLICABILITY AND DEVELOPMENT

Gabriel Araújo¹

Jones Yudi²

^{1,2} Control and Automation Group, Universidade de Brasília

¹ gabriel.arao@aluno.unb.br, ² jonesyudi@unb.br

Abstract:

Industry 4.0 is an umbrella term that refers to the adoption of various emerging technologies and new paradigms in various industry sectors, such as Internet of Things, Artificial Intelligence, Cyber-Physical Systems, Virtualization, among others. This new industrial revolution ensures greater automation, productivity, quality, reliability, safety and efficiency when compared to traditional models, called Industry 3.0.

Arriving on the hall of innovative technologies, Blockchain has drawn a lot of attention for its successful use in cryptocurrencies, demonstrating its ability to create decentralized and very secure systems. Its inherent security features, innovation based on existing and known technologies, and the relative simplicity of the idea ensure applicability in the most diverse contexts and motivated the rapid evolution of technology to adapt to the reality of the Internet of Things present in Industry 4.0.

Currently, Blockchain is already considered one of the enabling technologies of the revolution that is Industry 4.0, providing greater transparency and traceability in industrial processes, a greater level of automation and ease in managing IoT networks, in addition to providing greater privacy and governance over data, facilitating the construction of collaborative and decentralized ecosystems, essential to ensure the rapid adaptability of the industry in a globally connected world with rapid and constant changes. In addition, the concept of tokenization existing in Blockchain is consistent with the concept of cyber-physical systems of Industry 4.0, and can naturally be applied to improve asset tracking and the monitoring of the life cycle of products and machinery.

The present review article aims to present in detail what Blockchain is, the evolution of the technology since its conception, including Blockchain types, a representation of its general layered architecture, basic data structure and the main commercial solutions available. In addition, the state of the art in terms of Blockchain applications in Industry 4.0 is presented, which include the management and security of IIoT devices, storage and sharing of industrial data and other Industrial applications. Finally, the main aspects of research and development are presented, highlighting the main problems and challenges currently open that must be overcome to ensure the evolution and popularization of technology.

Palavras-chave: Blockchain; Industry 4.0; IIoT; Cybersecurity