

Integração de IoT EM INFRAESTRUTURA DE QUALIDADE 4.0: POTENCIALIDADES E DESAFIOS



<https://doi.org/10.56238/arev7n3-262>

Data de submissão: 25/02/2025

Data de publicação: 25/03/2025

Robson Santos da Silva
Doutoramento em Gestão do Conhecimento
Universidade de São Paulo
E-mail: cigrobson@yahoo.com.br

Roberto Mariano de Araújo Filho
Doutoramento em Educação Matemática e Tecnológica
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte
E-mail: robertomariano@uern.br

Marcos Heleno Guerson de Oliveira Junior
Mestrado em Engenharia de Transportes
Universidade de São Paulo/Instituto de Pesos e Medidas de São Paulo
E-mail: guersonjr@gmail.com

Maria Lídia Rebello Pinho Dias Scoton
Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica
Universidade de São Paulo
E-mail: lidia.rebello.dias@gmail.com

Paulo Henrique Lima Brito
Instituto de Pesos e Medidas de São Paulo
E-mail: phlbruto@ipem.sp.gov.br

Eduardo Mario Dias
Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica
Universidade de São Paulo
E-mail: emdias02@gmail.com

Marcos Oliveira
Soluções de Infraestrutura de Qualidade São Paulo
E-mail: marcos@solucoesiq.com

RESUMO

A crescente utilização da Internet das Coisas (IoT) tem o potencial de transformar a Infraestrutura de Qualidade (QI), abrangendo todos os seus componentes fundamentais: metrologia, padronização, acreditação, avaliação de conformidade e vigilância de mercado. O objetivo deste trabalho é analisar as aplicações, potencialidades e desafios do uso da IoT no contexto do QI 4.0. A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão integrativa, e os resultados indicam que a IoT pode facilitar a automação de processos, melhorar a rastreabilidade de produtos e serviços e possibilitar a criação de novos padrões baseados em dados em tempo real. No entanto, desafios significativos, como segurança cibernética, privacidade de dados e interoperabilidade de dispositivos, devem ser superados para que o QI 4.0 seja totalmente realizado.

Palavras-chave: IoT. Infraestrutura de qualidade. Indústria 4.0. Inovação. Tecnologia.

1 INTRODUÇÃO

Infraestrutura de Qualidade (QI) é o sistema que compreende instituições públicas e privadas, políticas, marcos legais e regulatórios e práticas destinadas a apoiar e melhorar a qualidade, segurança e integridade ambiental de bens e serviços e processos (INetQI, 2018). Como um sistema globalmente abrangente, o QI protege os consumidores, facilita o funcionamento dos mercados domésticos nos países e garante o reconhecimento internacional de seus signatários. Para o efeito, conta com várias componentes-chave, incluindo metrologia, normalização, acreditação, avaliação da conformidade e fiscalização do mercado.

A digitalização da informação progrediu, incorporando cada vez mais inovações na vida cotidiana, ou seja, produtos ou processos novos ou aprimorados (ou combinações dos mesmos) que diferem significativamente dos produtos ou processos anteriores da unidade e foram disponibilizados a usuários potenciais (produto) ou colocados em uso pela unidade (processo) (OCDE, 2018). Atualmente, entre as inovações digitais de destaque estão inteligência artificial (IA), robótica, Internet das Coisas (IoT), veículos autônomos, impressão 3D, nanotecnologia, biotecnologia, armazenamento de energia, aprendizado de máquina, computação em nuvem, big data, realidade aumentada e virtual, gêmeos digitais, entre outros (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016).

Esse conjunto de tecnologias, cuja conectividade entre si e com agentes humanos é possibilitada pela internet, caracteriza a 4^a Revolução Industrial. Trata-se de uma nova etapa da industrialização, também conhecida como Indústria 4.0, que se distingue das experiências anteriores por promover uma integração sem precedentes entre os domínios físico, digital e biológico, fomentando avanços significativos, bem como riscos substanciais (SCHWAB, 2018).

Esse fenômeno, caracterizado por sua rapidez, abrangência e intensidade, tem resultado em novas demandas que exigem maior qualidade, eficiência e sustentabilidade nos processos, produtos e serviços a serem atendidos (PTB, 2018). Esses novos requisitos sociais e econômicos impactaram o QI, criando a necessidade de aprimoramento de todos os seus componentes para continuar promovendo a segurança e a competitividade sem comprometer a inovação.

Ao consultar a literatura existente, é possível notar um aumento substancial de pesquisas e estudos que exploram a integração da IoT para aprimorar as cadeias de suprimentos e fortalecer o conceito de cadeia de valor (SOUZA; ALMEIDA, 2021); (BROWN et al., 2020); (MILICEVIC et al., 2022). No entanto, há uma necessidade crescente de mais estudos e contribuições que abordem sua utilização dentro da QI, inclusive em relação ao tema central deste artigo, que visa analisar as aplicações, potencialidades e desafios do uso da IoT no contexto da QI 4.0.

A IoT, composta por dispositivos físicos capazes de gerar dados em escala global, emergiu como uma das tecnologias mais promissoras para os sistemas ciberfísicos que caracterizam a Indústria 4.0. Isso também é verdade para o QI devido ao seu potencial de permitir o aprimoramento de todos os seus principais componentes (UNIDO, 2022).

A IoT ocupa uma posição central nas melhorias necessárias para estruturar a Infraestrutura de Qualidade 4.0 (QI 4.0), também conhecida como Infraestrutura de Qualidade Inteligente (MILICEVIC et al., 2022), ao permitir o compartilhamento, a integração, a interação, a sincronização e a disponibilidade de dados em tempo real. Essas ações são consideradas essenciais para a confiabilidade dos serviços técnicos que se enquadram na alçada da QI (HARRISON et al., 2010). Embora a IoT e a QI já estejam avançadas em nível global, no Brasil o processo de pesquisa e inovação nessas áreas ainda está em desenvolvimento. O país enfrenta falta de investimento, infraestrutura inadequada e necessidade de treinamento profissional para acompanhar as tecnologias emergentes. Esses fatos justificam o tema abordado neste artigo.

Para atingir o objetivo da pesquisa, foi realizada uma revisão integrativa, que incluiu a análise de artigos científicos especializados, documentos oficiais e práticas identificadas em uma instituição governamental que integra a QI no estado de São Paulo, Brasil. O Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo (IPEM-SP) é uma instituição pública com a missão de executar as atividades de QI em São Paulo. O estado de São Paulo abriga a maior população do Brasil e contribui com 32% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. No cenário nacional, o IPEM-SP se destaca na pesquisa de QI; Portanto, informações do instituto foram incorporadas a este estudo para alinhar teoria e prática.

2 CONCEITOS E PRÁTICAS

As fases da industrialização são abordadas sob a perspectiva das mudanças que cada fase trouxe para a forma como as pessoas interagem, vivem e produzem os bens e serviços que consomem (UNCTAD; OMC, 2005). O final do século 18 testemunhou a 1^a Revolução Industrial (IR), caracterizada pela produção mecânica movida a água e vapor, que envolveu a produção de peças intercambiáveis para fins de manutenção. O 2^o IR, iniciado nas últimas décadas do século 19, foi caracterizado por eletricidade e linha de montagem, possibilitando a produção em massa. O uso de computadores, internet, automação e equipamentos eletrônicos possibilitou o 3^o IR. A 4^a RI, contexto histórico atual, caracteriza-se pela promoção de inovações profundas e contínuas em todas as áreas do conhecimento, incluindo a QI.

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DE INFRAESTRUTURA DE QUALIDADE

As bases tecnológicas que caracterizam essas três primeiras revoluções foram fundamentais para o surgimento e expansão das ferrovias, infraestrutura rodoviária, urbanização, eletrificação, sistemas telegráficos e telefônicos, telecomunicações e expansão do comércio marítimo, aéreo e terrestre. Além disso, houve avanços significativos em áreas como medicina, química, metalurgia, alimentos, produção, petróleo e gás.

Do ponto de vista geopolítico, essas mudanças criaram um contexto global que, desde a década de 1970, passou a ser conhecido como globalização (FUCHS, 2018). Desde então, esse termo tem sido usado para descrever as mudanças aceleradas e significativas que caracterizam o mundo, abrangendo aspectos ambientais, sociais, políticos e econômicos.

Para que a produção industrial, o comércio, o atendimento às demandas de diversos mercados consumidores, logística e transporte ocorram em escala global, a metrologia (BIPM, 2021), a ciência da medição, suas aplicações e todos os aspectos teóricos e práticos da medição, independentemente da incerteza da medição e do campo de aplicação, foi fundamental. Assim, desde o final do século 19, quando a metrologia foi efetivamente adotada por vários países, foram criadas inúmeras normas, testes e certificações, que, ao longo do tempo, sofreram modificações e combinações.

Para melhor compreender e coordenar esse novo cenário, no qual, além da metrologia, outras áreas do conhecimento se tornaram importantes, a Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD) e a Organização Mundial do Comércio (OMC) publicaram, em 2005, um documento intitulado "Inovações na Estratégia de Exportação: uma abordagem estratégica para o desafio da garantia da qualidade" (UNCTAD; OMC, 2005).

A principal contribuição deste documento foi a introdução de um novo conceito denominado Infraestrutura de Qualidade (QI), que engloba o conjunto de instituições públicas e privadas envolvidas na formulação, emissão e implementação de normas, bem como em avaliações de conformidade que incluem inspeção, testes, certificação, metrologia e acreditação, com o objetivo de prevenir barreiras comerciais e facilitar a cooperação tecnológica.

Embora as inovações que caracterizam a 4^a Revolução Industrial ocorram desde o final do século 20 e início do século 21, o ano de 2011 é particularmente importante. Na feira de Hannover, universidades, centros de pesquisa, empresas de tecnologia e o governo alemão anunciaram um novo conceito chamado Indústria 4.0 com as seguintes características (ARCIDIACONO; PIERONI, 2018).

- Interoperabilidade – Tomada de decisão descentralizada por máquinas inteligentes que se comunicam entre si e com humanos.
- Modularidade – produção e personalização sob demanda.

- Virtualização – réplicas digitais que realizam simulações, rastreamento e monitoramento de processos produtivos por meio de sensores.
- Orientação a serviços – utilização de tecnologias otimizadas voltadas para soluções.
- Operações em tempo real – coleta de dados e tomada de decisão no prazo.
- Interação – a interação entre humanos por meio das mídias sociais contribui para a geração de big data, que se estende às máquinas, criando redes de comunicação entre elas (FUCHS, 2018).

Em 2013, o relatório final intitulado "Recomendações para a implementação da iniciativa estratégica Industrie 4.0 (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013), patrocinado pelo Ministério Federal de Educação e Pesquisa da Alemanha, ratificou essas características por meio do conceito cuja essência é o reconhecimento de que se trata de uma fase de industrialização em que a automação industrial ocorre por meio da conectividade possibilitada pelos Sistemas Ciber-Físicos (CPS) e outras tecnologias. Essas tecnologias podem criar interconexões entre os mundos físico, digital e biológico para criar sistemas de produção mais integrados, eficientes e seguros (SCHWAB, 2018); (FALLER; FELDMÜLLER, 2015).

Na Indústria 4.0, por meio da digitalização e integração das cadeias de valor, o objetivo é descentralizar o controle de processos e fomentar a colaboração entre dispositivos inteligentes por meio de interconexões que ocorrem ao longo de toda a cadeia produtiva e logística. Essa transformação muda a maneira como as máquinas se comunicam e usam as informações para otimizar a produção.

Para as operações que viabilizam a Indústria 4.0, também conhecida como Smart Factory, destacam-se diversas tecnologias, entre elas: CPS, manufatura aditiva, IA, aprendizado de máquina, robótica, Cobots, Big Data, Cloud Computing, IoT, realidade aumentada e virtual (AR/VR) e Cibersegurança (STATISTA, 2024); (KLINGENBERG et al., 2021); (MUHURI; SHUKLA; ABRAÃO, 2019); (JARA; LADID; SKARMETA, 2014).

Em 2018, a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO) apresentou um documento intitulado "Infraestrutura de Qualidade: boa governança no Desenho de Políticas de Qualidade" (UNIDO, 2018), cuja aplicabilidade foi testada com vinte e seis países e três grupos regionais na África e na Ásia. Este documento tem como objetivo alertar e fornecer orientações para que os países desenvolvam uma QI robusta.

De acordo com o documento, políticas públicas que possibilitem uma QI sólida são essenciais para que os países promovam o comércio nacional, regional e internacional, bem como para garantir a sustentabilidade ambiental e o bem-estar social. A UNIDO também destaca a importância de estabelecer sistemas de QI que atendam aos requisitos internacionais e estimulem o desenvolvimento

industrial, a competitividade e a inovação, além de garantir a segurança alimentar e proteger a saúde humana e ambiental.

Para atingir esses objetivos, a instituição considera que os países devem desenvolver, com base em suas necessidades específicas, princípios orientadores para uma política de qualidade fundamentada (UNIDO, 2018) na coerência, propriedade, otimização, sustentabilidade e inclusão. Além disso, a produção de guias técnicos é classificada como essencial por serem documentos que ajudam a identificar e descrever os principais aspectos relacionados à governança, instituições, serviços, empresas e consumidores no contexto da QI.

A disruptão que a Indústria 4.0 causou em relação aos conceitos e práticas que permearam as três primeiras revoluções industriais as torna cada vez mais obsoletas. E, como o IQ está inseparavelmente ligado à indústria, há uma necessidade urgente de que seus fundamentos sejam revistos e aprimorados também (BIPM, 2021).

2.2 INTERNET DAS COISAS

Embora as pesquisas iniciais sobre IoT remontem a 1980, foi no período entre 1999 e 2003, com base em estudos desenvolvidos no MIT/EUA, que o interesse pela IoT se expandiu. Foi uma tecnologia inovadora que ofereceu a possibilidade de codificar e rastrear objetos, contribuindo para acelerar processos, aumentar a eficiência e reduzir erros em diferentes contextos e áreas do conhecimento (GBM, 2024).

Com o avanço da tecnologia, o termo "coisa" passou a abranger tudo na natureza que pode gerar e compartilhar dados, incluindo seres vivos de todos os tipos e até pessoas. Assim, a IoT passou a suportar uma rede aberta e abrangente de entidades que, ao incorporar e utilizar dispositivos inteligentes conectados à internet, ganharam a capacidade de compartilhar dados e recursos, utilizar as informações recebidas para agir em resposta a situações ou mudanças ambientais e, em casos específicos, se auto-organizarem (LIAO et al., 2018).

As redes IoT podem ser integradas, dependendo da situação, por atuadores, sensores, dispositivos de conectividade, controladores, computadores, dispositivos de armazenamento e processamento de dados e dispositivos de interface de usuário para visualização de dados. Além disso, há necessidade de tecnologias de comunicação, como Wi-fi, Bluetooth ou redes celulares, incluindo sinais 5G. A coleta, o processamento e o armazenamento de dados são estruturados a partir de sistemas embarcados ou plataformas de computação em nuvem, onde algoritmos avançados de análise de dados e inteligência artificial transformam informações brutas em insights úteis (FERGUSON, 2002). Esses insights podem ser usados para tomada de decisão automatizada ou para informar usuários humanos.

2.3 IOT: MENTALIDADE E PRÁTICAS

Considerando os fundamentos que definem e caracterizam a IoT, fica evidente que ela é uma tecnologia indispensável, com sua contribuição advinda de uma estrutura baseada em conectividade e inteligência (ZHONG, et al., 2017). Sua aplicação tem o potencial necessário para aumentar a precisão e a confiabilidade, promovendo a eficiência e a sustentabilidade de vários tipos de operações (KAMILARIS; PRENAFETA-BOLDÚ, 2018).

A integração destes componentes permite a criação de soluções avançadas que revolucionam vários setores. Na Indústria 4.0, por exemplo, a IoT facilita a implementação de fábricas inteligentes onde a produção pode ser monitorada e otimizada em tempo real. Sensores instalados em máquinas podem detectar anomalias antes que elas se tornem falhas, reduzindo o tempo de inatividade e aumentando a eficiência operacional (KAMILARIS; PRENAFETA-BOLDÚ, 2018).

A IoT também se apresentou como uma oportunidade para melhorar o QI. Por exemplo, alguns Institutos Nacionais de Metrologia estão adotando a IoT para a emissão de Certificados Digitais de Calibração (DCC), uma iniciativa que visa garantir a confiabilidade dos dados dos sensores (BIPM, 2021) ao fornecer informações detalhadas sobre a calibração dos dispositivos, juntamente com a identificação e autenticidade dos dados, garantindo assim sua validade para aplicações críticas.

Apesar das perspectivas promissoras em torno do uso da IoT, ainda existem desafios para sua aplicação efetiva em QI. Um dos fatores mais significativos que impactam essa situação é a qualidade das informações geradas, considerando que, atualmente, uma parcela substancial dos dados não é padronizada, dificultando sua validação e quantificação (MUSTAPÄÄ et al., 2020).

Além das questões tecnológicas, existem especificidades no contexto global. O Brasil, por exemplo, é um dos países em desenvolvimento que se destaca por ser a maior economia da América do Sul e a 8^a maior do mundo. No entanto, apesar dessa posição, enfrenta diversas dificuldades em relação à implementação da IoT. Nesse contexto, os desafios incluem investimentos insuficientes em equipamentos que incorporem essas tecnologias, falta de padronização e processos eficientes e formas deficientes de relacionamento entre as empresas em toda a cadeia produtiva. Em relação aos recursos humanos, destacam-se questões relacionadas à qualidade da educação e falhas no desenvolvimento de competências profissionais e digitais da população (CNI, 2016).

Em relação ao IQ, apesar de o país ocupar a 17^a posição no Programa Global Quality Infrastructure Index (GQII) (GQII, 2023), ele ainda enfrenta dificuldades decorrentes de descontinuidade ou sobreposições de estratégias e ações. Isso se reflete, por exemplo, na existência de vários termos e nomenclaturas oficiais usados para se referir à Indústria 4.0, incluindo: manufatura avançada, fábrica inteligente, indústria conectada, manufatura inteligente e neoindustrialização.

Para exemplificar esses desafios, o estado de São Paulo dentro de sua estrutura administrativa, uma organização para lidar com questões relacionadas à QI denominada Instituto Paulista de Pesos e Medidas (IPEM-SP). Trata-se de uma instituição estadual, fundada em 1967, que também integra o Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial do Brasil.

Dentre os serviços prestados pelo IPEM-SP é possível destacar: verificação metroológica; inspeção de instrumentos de medição; inspeção de produtos pré-embalados; inspeção de produtos têxteis; Inspeção de produtos sujeitos à avaliação da conformidade obrigatória; inspeção e monitoramento de veículos que transportam GLP fracionado; e suporte técnico metroológico (IPEM, 2023).

Trata-se de um conjunto de serviços voltados para o apoio à economia industrial e comercial de São Paulo por meio de um sistema de inspeção e controle de qualidade. No entanto, os avanços tecnológicos, a alta densidade populacional e a urbanização intensificaram a demanda por serviços de verificação e metrologia legal para garantir precisão nas transações comerciais, manter a confiança do mercado e proteger ainda mais os direitos do consumidor.

Como parte da estratégia de entender e incorporar as inovações trazidas pela IoT e outras tecnologias que caracterizam a Indústria 4.0, o IPEM-SP, por meio de sua Diretoria de Projetos e Transformação Digital, realizou questionários entre março e abril de 2024. O objetivo foi compreender a percepção de colaboradores em posições de liderança em setores estratégicos em relação a aspectos relacionados à transformação digital e à Indústria 4.0, com foco em infraestrutura, gestão de dados, sistemas e aplicações de informação, atendimento ao público-alvo, gestão de pessoas e educação. Os resultados desta pesquisa (IPEM, 2023) identificaram, na prática, as potencialidades e desafios enfrentados por uma organização em processo de transição para o QI 4.0.

A primeira constatação foi que mais de 80% dos agentes em cargos de liderança entendem a importância da transformação digital e identificam como essencial o entendimento completo das tecnologias que sustentam a Indústria 4.0, considerando as mudanças que essas inovações estão provocando nos serviços prestados pelo instituto. No entanto, reconhecem a necessidade de aprimorar suas competências digitais (VUORIKARI; KLUZER; PUNIE, 2022), tanto em sentido amplo quanto especificamente. Isso significa que na IoT, por exemplo, essa melhoria teria que abordar, no mínimo, questões relacionadas a hardware (sensores, atuadores ou dispositivos de transmissão), middleware (armazenamento e processamento de dados), software e aplicativos (interface e apresentação de dados) (MAJSTOROVIC, et al., 2019).

Em relação à infraestrutura tecnológica, observou-se que mais de 75% dos colaboradores a reconhecem como uma base essencial para a gestão de dados, informações e conhecimento, e que seu

aprimoramento traz benefícios resultando em inovação de processos internos e melhoria no atendimento aos diferentes segmentos que compõem o público-alvo. Nesse aspecto, a IoT é vista como uma tecnologia capaz de gerar bons resultados considerando sua capacidade de coletar e servir como porta de entrada para sistemas de armazenamento e processamento de grandes volumes de dados gerados por dispositivos em tempo real.

O aprimoramento da segurança cibernética e a proteção de dados sensíveis também foram considerados importantes para garantir a integridade e a confidencialidade das informações por 90% dos profissionais. Para os técnicos do Instituto, ações para implementar medidas robustas de segurança, como criptografia e autenticação multifator, foram consideradas indispensáveis para proteger os sistemas, permitir conectividade confiável e implementar redes avançadas, como o 5G.

A importância da continuidade e aprimoramento das ações para promover uma cultura organizacional que valorize a inovação e a adaptação tecnológica foi destacada por mais de 80% dos participantes. Nesse contexto, a colaboração com outras instituições e a harmonização com as normas internacionais das quais o país é signatário também foram classificadas como essenciais para a superação de desafios.

Considerando as diferentes etapas e contextos vivenciados por diferentes países na 4^a Revolução Industrial (UNIDO, 2018), é possível concluir que as avaliações dos colaboradores sobre os desafios enfrentados pelo IPEM-SP correspondem, em maior ou menor grau, ao que se observa no contexto internacional. Assim, é uma experiência que identifica, do ponto de vista dos profissionais que atuam em QI, diversos aspectos relacionados à aplicabilidade, potencialidades e desafios que permeiam o uso de tecnologias, incluindo IoT, nessa transição para QI 4.0.

2.4 IOT E QI 4.0: CONECTIVIDADE EM EVOLUÇÃO

A digitalização marcou o início de uma era em que as instituições que operam em QI precisaram reestruturar suas operações internas para fornecer serviços baseados na integração, integridade e interoperabilidade do sistema (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016). Na Quarta Revolução Industrial, esse cenário tornou-se mais dinâmico devido às crescentes demandas por conectividade, que se tornaram o aspecto central da Indústria 4.0 e, consequentemente, da QI 4.0 e seus componentes, com foco em Metrologia 4.0, Padronização 4.0 e Acreditação 4.0 (HARMES-LIEDTKE; OTEIZA, 2021).

A IoT é uma tecnologia indispensável na fabricação ciberfísica (FANG, et al., 2023). Portanto, para responder à pergunta – Quais são as aplicações, potencialidades e desafios do uso da IoT no contexto da Infraestrutura de Qualidade 4.0? – Foi realizada uma pesquisa de revisão integrativa, cujo método, coleta de dados e resultados são descritos a seguir.

3. MÉTODO

Os procedimentos deste estudo foram baseados em pesquisa exploratória devido à necessidade de obter mais informações e familiaridade com o tema, tornando mais explícito (VERGARA, 2003). De forma a atingir o objetivo proposto e responder à questão central de investigação – Quais as aplicações, potencialidades e desafios da utilização da IoT no contexto da Infraestrutura de Qualidade 4.0? – adotou-se como método a revisão integrativa (TORRACO, 2005) que se caracteriza pela busca comprehensiva, avaliação, extração, análise e síntese de referências sobre o tema, integrando diferentes tipos de estudos e fontes de informação e apresentando os resultados.

As bases de dados selecionadas para esta pesquisa foram IEEE Xplore e Science Direct, motivadas pela alta relevância e qualidade dos artigos indexados, que são revisados por pares e frequentemente citados em estudos sobre metrologia, QI e IoT. Além disso, esses bancos de dados fornecem acesso a publicações de conferências de alto impacto, como o IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT. Embora ACM e Scopus também sejam fontes valiosas, foi tomada a decisão de focar nos bancos de dados mencionados devido ao escopo científico do estudo.

Mesa 1: Parâmetros de pesquisa

Termos de pesquisa	("Internet das Coisas" OU "IoT") E ("infraestrutura de qualidade" OU metrologia OU padronização OU acreditação OU "avaliação da conformidade")
Campos de pesquisa	Título, resumo e palavras-chave
Bancos	IEEE Xplore e ScienceDirect – selecionados como bancos de dados devido à sua relevância acadêmica, confiabilidade, abordagem interdisciplinar e número de artigos científicos revisados por pares relacionados à questão de pesquisa.
Tipo de informação	Artigos científicos
Prazo	De 2020 a 2024
Área geográfica	Sem restrições
Idioma	Inglês
Tipo de fonte	Diário
Áreas de conhecimento	Informática; Engenharia; Multidisciplinar; Padronização; Metrologia; Industrial; Muito.
Critérios de inclusão	Artigos completos publicados em Periódicos relacionados a Internet das Coisas, Infraestrutura de Qualidade, Metrologia, Padronização, Acreditação, Avaliação da Conformidade publicados nos últimos 5 (cinco) anos.
Critérios de exclusão	Documentos não relacionados aos temas de interesse; Artigos não disponíveis para acesso total

A revisão também incluiu documentos oficiais do governo; diretrizes, recomendações e relatórios emitidos por instituições reconhecidas internacionalmente que contribuam para estudos e pesquisas relacionados aos temas de interesse.

A combinação dessas diversas fontes garantiu uma abordagem multidimensional e enriquecida, permitindo a identificação de lacunas de conhecimento, o desenvolvimento de novas perspectivas teóricas e a proposição de recomendações práticas baseadas em evidências (SILVA; SPANHOL, 2013). A metodologia fortaleceu a validade e a relevância das conclusões apresentadas, contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento na área estudada.

3.1 RECOLHA DE DADOS

Os resultados das pesquisas realizadas nas bases IEEE Xplore e Sciencedirect, de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 1, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados

Descrição	Resultados	
	IEEE Xplore	Ciência direta
Número total de documentos encontrados	288	67
Distribuição por ano	2024 (32); 2023 (61); 2022 (61); 2021 (71); 2020 (55)	2024 (11); 2023 (18); 2022 (20); 2021 (9); 2020 (9)
Documentos eliminados após a leitura dos resumos	253	51
Documentos lidos na íntegra	35	16
Documentos eliminados após a leitura completa	26	14
Documentos validados e incorporados ao artigo após leitura completa	9	2
Principais fontes	Jornal IEEE Internet das Coisas; Revista IEEE Internet das Coisas	Jornal de Sistemas de Manufatura; Jornal de Integração de Informações Industriais

A pesquisa inicial, guiada pelos termos de pesquisa da revisão, resultou em 355 documentos, sendo 288 do IEEE Xplore e 67 do ScienceDirect, mostrando distribuição anual variada. Após a busca inicial, os resumos de cada documento foram lidos para verificar sua relevância para a pesquisa. Durante esse processo, 304 artigos foram eliminados. Posteriormente, os textos completos dos demais artigos que atenderam aos critérios de inclusão foram lidos para garantir a relevância e a qualidade dos artigos para o estudo e determinar sua capacidade de abordar a questão de pesquisa. Após essa revisão, 40 artigos foram eliminados, restando 11 artigos, conforme apresentado na Tabela 2. Os documentos foram fundamentais para analisar as interseções entre IoT e componentes de QI.

3.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dados coletados foram analisados qualitativamente, com foco nas interseções entre IoT e os componentes da QI. Os resultados mostraram que mais de 70% dos artigos discutem o uso de IoT em

QI indiretamente, ou seja, eles se concentram nas formas como essa tecnologia é usada e se cruza com a Indústria 4.0.

A Tabela 3 identifica e agrupa os artigos selecionados considerando suas interseções com os componentes da IC.

Tabela 3: Artigos, resumos e interseções

Artigo	Resumos e interseções
Metrologia	
Fang et al. (2023)	Resumo: Propõe um modelo para calibração remota de fontes de tensão utilizando o método de visão comum do GPS, abordando a relação entre tensão, frequência e tempo. Interseção: calibração remota precisa e confiável por meio de medição em sistemas IoT.
Ziegler (2020)	Resumo: Revisão sobre gêmeos digitais destacando a importância de uma estrutura de referência universal. Interseção: o uso de gêmeos digitais, integrando IoT para precisão e eficiência.
Normalização	
Pivoto et al. (2021)	Resumo: Revisão de arquiteturas de Sistemas Ciber-Físicos (CPS) para aplicações industriais de IoT. Interseção: Analisa as arquiteturas CPS para aplicações industriais de IoT essenciais para precisão e eficiência na Indústria 4.0
Sharma et al. (2022)	Resumo: Análise da padronização da IA, destacando a necessidade de maior contribuição internacional. Interseção: Destaca a necessidade de padronização em IA, que se integra aos sistemas IoT, auxiliando no credenciamento e na avaliação de conformidade.
Lee et al. (2021)	Resumo: Análise de padrões de interoperabilidade e segurança em IoT. Interseção: Necessidade de interoperabilidade e segurança.
Acreditação	
Karie et al. (2021)	Resumo: Analisa as abordagens de coleta de dados e padronização na manufatura inteligente. Interseção: Coleta de dados e padronização de processos na manufatura inteligente, integrando IoT.
Minani et al. (2024)	Resumo: Avalia padrões e estruturas de segurança para ambientes inteligentes baseados em IoT. Interseção: padrões de segurança para ambientes inteligentes baseados em IoT, cruciais para confiabilidade e segurança.
Avaliação da conformidade	
Arzo et al. (2021)	Resumo: Discute ferramentas e desafios no teste de sistemas IoT. Interseção: Teste de sistemas IoT para garantir que os dispositivos atendam aos padrões de qualidade.
Schlemitz & Mezhuyev (2024)	Resumo: Estudo sobre testes de sistemas IoT na indústria, com ênfase em testes de integração. Interseção: garantindo que dispositivos e sistemas sejam de alta qualidade e seguros
Fiscalização do mercado	
Minani et al. (2024)	Resumo: Pesquisa sobre tecnologia de liberação de dados e monitoramento de localização em redes de sensores baseadas em IoT. Interseção: Monitoramento de dados e localização em redes de sensores IoT, crucial para precisão e segurança.
Lin (2021)	Resumo: Revisão da automação de redes para IoT, com foco nos desafios e oportunidades da automação. Interseção: automação de rede IoT, crucial para operação eficiente e segura do sistema.

Os resultados indicam que o uso da IoT no QI 4.0 é abordado principalmente como uma tecnologia capaz de garantir a precisão, eficiência e credibilidade exigidas pelos componentes do QI. Outros estudos dizem respeito à conectividade, que, como característica central da IoT, é assegurada por uma rede que inclui a internet; Atuadores; sensores que coletam dados ambientais e operacionais; Tecnologias Wi-fi e 5G que garantem uma transmissão eficiente de dados. Esses dados são então

processados e transformados em insights acionáveis por meio da IA. As medidas de segurança também desempenham um papel proeminente na garantia de confiabilidade e conformidade contínuas.

4. DISCUSSÃO

A pesquisa destaca a importância da IoT para o QI 4.0, identificando sua capacidade de promover inovações disruptivas e aumentar a eficiência dos processos. Um exemplo é o estudo sobre calibração remota de fontes de tensão utilizando o método de visão comum GPS (FANG, et al., 2023), que demonstra como a IoT pode automatizar e aumentar a precisão na metrologia. Além disso, a análise da padronização em IA (ZIEGLER, 2020) reafirma a necessidade de padrões robustos para garantir segurança e ética no uso da tecnologia, aspecto fundamental para a confiança e eficácia nas operações metroológicas.

Os sistemas ciberfísicos (CPS), que combinam computação, redes e processos físicos, são essenciais para a automação e controle em diversos setores (PIVOTO, et al., 2021). A integração de gêmeos digitais (SHARMA, et al., 2022), que replicam virtualmente entidades físicas para otimização de operações, é um exemplo de CPS que ilustra a necessidade de tecnologias emergentes para desenvolver padrões baseados em dados vitais para metrologia e avaliação de conformidade. A interoperabilidade e a segurança também são pilares fundamentais, conforme destacado na revisão dos padrões existentes em IoT (LEE, et al., 2021), garantindo uma comunicação segura e eficiente entre os dispositivos.

A necessidade de segurança em ambientes inteligentes baseados em IoT é reforçada por revisões de padrões e estruturas (KARIE; YANG; KEBANDLE, 2021), enquanto a análise sistemática da IoT (MINANI, et al., 2024) identifica a necessidade de estruturas de segurança integradas para proteger dados sensíveis. A pesquisa sobre liberação de dados e tecnologia de monitoramento de localização (ARZO, et al., 2021) explora como a integração de sensores e a computação distribuída podem aumentar a eficiência e a precisão na coleta e processamento de dados. Esse avanço é complementado pelo uso de abordagens robustas de ciência de dados (SCHLEMITZ; MEZHUYEV, 2024), essenciais para lidar com a complexidade e variabilidade dos dados.

Estudos sobre sistemas IoT na indústria (MINANI, et al., 2024) demonstram a eficácia de testes combinados para garantir a funcionalidade e segurança dos dispositivos, o que também pode contribuir para a fiscalização do mercado. A discussão sobre automação de redes para IoT (LIN, 2021) destacou a redução da complexidade e o aumento da eficiência operacional como principais benefícios.

Esse conjunto de aspectos se alinha estreitamente com a perspectiva do Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), que afirma que a transformação digital da metrologia na Alemanha

deve enfatizar a transformação digital dos serviços metrológicos; metrologia na análise de grande volume de dados; metrologia de sistemas de comunicação para digitalização; e metrologia para simulações e instrumentos de medição virtuais (PTB, 2018).

Entre as iniciativas que reconhecem os desafios identificados nos artigos e buscam soluções relacionadas a dados, segurança, padronização, avaliação da conformidade e aspectos dentro do contexto da QI está a European Metrology Cloud (THIEL, et al., 2017). Esta iniciativa da Associação Europeia dos Institutos Nacionais de Metrologia visa criar uma plataforma colaborativa em que os Institutos Nacionais de Metrologia, os governos, as indústrias e outras partes interessadas no contexto da QI da União Europeia terão a oportunidade de melhorar os seus sistemas de medição através da interoperabilidade, apoiar a inovação industrial, modernizar as infraestruturas metrológicas, realizar ensaios, prestar serviços de calibração, emitir certificados, promover a rastreabilidade e exercer a fiscalização do mercado através da digitalização.

A análise dos artigos e as intersecções com os componentes de QI, juntamente com a discussão prévia de cada estudo, permitiram abordar a questão de pesquisa: Quais são as aplicações, potencialidades e desafios do uso da IoT no contexto da Infraestrutura de Qualidade 4.0? A análise da revisão identificou os desafios e potencialidades no contexto de cada estudo selecionado.

Dentre as potencialidades, destacam-se: (i) Maior precisão e eficiência – por meio de calibração remota, gêmeos digitais e arquiteturas CPS (FANG, et al., 2023); (ZIEGLER, 2020); (PIVOTO, et al., 2021); (ii) Padrões e segurança aprimorados – por meio de padronização, interoperabilidade e estruturas de segurança de IA (SHARMA, et al., 2022); (LEE, et al., 2021); (MINANI, et al., 2024); (iii) Gerenciamento confiável de dados – por meio de coleta de dados padronizada, monitoramento e automação de rede (KARIE; YANG; KEBANDLE, 2021); (MINANI, et al., 2024); (LIN, 2021).

Por outro lado, os desafios são caracterizados por: (i) Obstáculos técnicos e regulatórios: para padronização, interoperabilidade e segurança (SHARMA, et al., 2022); (LEE, et al., 2021); (ii) Complexidade da integração: em ambientes IoT diversos e em evolução (ARZO, et al., 2021); (SCHLEMITZ; MEZHUYEV, 2024); (PIVOTO, et al., 2021); (iii) Garantir a privacidade e a precisão: nos processos de monitoramento e automação de dados (KARIE; YANG; KEBANDLE, 2021); (MINANI, et al., 2024); (MINANI, et al., 2024).

Apesar do rigor metodológico que fundamenta esta pesquisa, é importante reconhecer as limitações dos estudos revisados. Muitos artigos analisam casos específicos que podem não refletir a diversidade de aplicações de IoT em QI em diferentes setores. Além disso, a rápida evolução da tecnologia IoT pode tornar algumas descobertas rapidamente obsoletas. A revisão também se limitou a artigos publicados em inglês, excluindo pesquisas potencialmente relevantes em outros idiomas.

Para pesquisas futuras, sugere-se investigar padrões e protocolos para integração de IoT em QI, com foco na interoperabilidade entre diferentes dispositivos e sistemas. Além disso, recomenda-se um estudo aprofundado dos impactos da IoT na qualidade e conformidade de produtos e serviços, analisando diversos setores e mapeando áreas que precisam de melhorias para garantir a plena integração dessas tecnologias.

5. CONCLUSÃO

A IoT é uma tecnologia essencial para a consolidação do QI 4.0, pois permite a melhoria da precisão, eficiência e automação de todos os seus componentes por meio de diferentes aplicações. No entanto, a implementação efetiva da IoT na QI enfrenta desafios consideráveis, incluindo a necessidade de padronização de dados, segurança cibernética e o desenvolvimento de normas e critérios de avaliação. Além disso, a formação de profissionais e a criação de uma cultura de inovação são consideradas essenciais para superar a resistência à mudança e garantir a adoção bem-sucedida dessas tecnologias. Assim, a IoT pode desempenhar um papel crucial na evolução para a Infraestrutura de Qualidade 4.0, mas requer uma integração cuidadosa e coordenada para atingir todo o potencial.

REFERÊNCIAS

AL-FUQAHÀ, A.; GUIZANI, M.; MOHAMMADI, M.; ALEDHARI, M.; AYYASH, M. Internet of Things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 17, n. 4, p. 2347-2376, 2015.

ARCIDIACONO, G.; PIERONI, A. The revolution lean six sigma 4.0. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, v. 8, n. 1, p. 141-149, 2018.

ARZO, S. T.; NAIGA, C.; GRANELLI, F.; BASSOLI, R.; DEVETSIKOTIS, M.; FITZEK, F. H. P. A theoretical discussion and survey of network automation for IoT: challenges and opportunity. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 8, n. 15, p. 12021-12045, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3075901>. Acesso em: 20 mar. 2025.

BROWN, C.; ELO, T.; HOVHANNISYAN, K.; HUTZSCHENREUTER, D.; KUOSMANEN, P.; MAENNEL, O.; MUSTAPAA, T.; NIKANDER, P.; WIEDENHOEFER, T. Infrastructure for digital calibration certificates. In: *IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR INDUSTRY 4.0 & IOT*, 2020, Roma. Proceedings [...]. Roma: IEEE, 2020. p. 1-6.

BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. The second machine age: work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. New York: W. W. Norton & Company, 2016.

DA SILVA, A. R. L.; SPANHOL, F. J. From creative thinking to innovative practice in distance education. In: ULBRICHT, V.; VANZIN, T.; DA SILVA, A. R. L.; BATISTA, C. R. (ed.). Contributions of creativity in different areas of knowledge. São Paulo: Pimenta Cultura, 2013. v. 1, p. 45-67.

FALLER, C.; FELDMÜLLER, D. Industry 4.0 learning factory for regional SMEs. *Procedia CIRP*, v. 32, p. 88-91, 2015.

FANG, S.; DUAN, Y.; LI, X.; MA, X.; LAN, K. A new model for remote calibration of voltage source based on GPS common-view method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 72, Art. no. 5501309, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3239920>. Acesso em: 20 mar. 2025.

FERGUSON, T. Have your objects call my object. *Harvard Business Review*, v. 80, p. 1-7, 2002.

FUCHS, C. Industry 4.0: the digital German ideology. *TripleC: Communication, Capitalism & Critique*, v. 16, p. 280-289, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.31269/vol16iss1pp280-289>. Acesso em: 20 mar. 2025.

GBM. Industry 4.0 market size – by technology (IoT, digital twin, big data analytics, cybersecurity, cloud computing, robotics & automation, augmented reality), by end-user (manufacturing, automotive, healthcare, energy & utilities, food & beverage), forecast 2024–2032. [S.I.]: GBM, [s.d.].

GLOBAL QUALITY INFRASTRUCTURE INDEX (GQII) PROGRAM. GQII 2023. International Organization for Standardization, 2023. Disponível em: <https://gqii.org/gqii-2023/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

HARMES-LIEDTKE, U.; OTEIZA, J. Global Quality Infrastructure Index Report 2020. [S.l.]: [s.n.], 2021.

HARRISON, C.; ECKMAN, B.; HAMILTON, R.; HARTSWICK, P.; KALAGNANAM, J.; PARASZCZAK, J.; WILLIAMS, P. Foundations for smarter cities. *IBM Journal of Research and Development*, v. 54, n. 4, p. 1-16, 2010.

INTERNATIONAL BUREAU OF WEIGHTS AND MEASURES. National metrology systems: developing the institutional and legislative framework. 2021. Disponível em: <https://www.bipm.org/documents/20126/42177518/NationalMetrologySystems.pdf/3f13d88c-aef6-9c50-62dc-39fa6f48f6e9>. Acesso em: 21 mar. 2025.

INTERNATIONAL NETWORK ON QUALITY INFRASTRUCTURE. Quality infrastructure definition. Geneva: INetQI, 2018.

IPEM-SP. Service charter. Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo, 2023a. Disponível em: <https://www.ipem.sp.gov.br/index.php/institucional/carta-de-servicos>. Acesso em: 20 mar. 2025.

IPEM-SP. Office of projects and digital transformation. Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo, 2023b. Disponível em: <https://www.ipem.sp.gov.br>. Acesso em: 20 mar. 2025.

JARA, A.; LADID, L.; SKARMETTA, A. The Internet of Things through IPv6: an analysis of challenges, solutions and opportunities. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, [s.l.], [s.n.], 2014.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 – securing the future of German manufacturing industry. *acatech – National Academy of Science and Engineering*, 2013.

KAMILARIS, A.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X. Deep learning in agriculture: a survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 147, p. 70-90, 2018.

KARIE, N. M.; SAHRI, N. M.; YANG, W.; VALLI, C.; KEBANDE, V. R. A review of security standards and frameworks for IoT-based smart environments. *IEEE Access*, v. 9, p. 121975-121995, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109886>. Acesso em: 20 mar. 2025.

KLINGENBERG, C. O.; BORGES, M. A. V.; ANTUNES JR., J. A. V. Industry 4.0 as a data-driven paradigm: a systematic literature review on technologies. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 32, n. 3, p. 570-592, 2021.

LEE, E.; SEO, Y.-D.; OH, S.-R.; KIM, Y.-G. A survey on standards for interoperability and security in the Internet of Things. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 23, n. 2, p. 1020-1047, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3067354>. Acesso em: 20 mar. 2025.

LIAO, Y.; LOURES, E. R.; DESCHAMPS, F.; BREZINSKI, G.; VENÂNCIO, A. The impact of the fourth industrial revolution: a cross-country/region comparison. *Production*, v. 28, e20180061, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20180061>. Acesso em: 20 mar. 2025.

LIN, B. Research on data release and location monitoring technology of sensor network based on Internet of Things. *Journal of Web Engineering*, v. 20, n. 3, p. 689-712, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.13052/jwe1540-9589.2036>. Acesso em: 20 mar. 2025.

MAJSTOROVIC, V.; ZIVKOVIC, S.; DJURDJANOVIC, D.; SABBAGH, R.; KVRGIC, V.; GLIGORIJEVIC, N. Building of Internet of Things model for cyber-physical manufacturing metrology model (CPM3). *Procedia CIRP*, v. 81, p. 862-867, 2019.

MILICEVIC, K.; OMRCEN, L.; KOHLER, M.; LUKIC, I. Trust model concept for IoT blockchain applications as part of the digital transformation of metrology. *Sensors*, v. 22, n. 4708, 2022.

MINANI, J. B.; SABIR, F.; MOHA, N.; GUÉHÉNEUC, Y.-G. A systematic review of IoT systems testing: objectives, approaches, tools, and challenges. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. 50, n. 4, p. 785-815, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSE.2024.3363611>. Acesso em: 20 mar. 2025.

MINANI, J. B.; SABIR, F.; MOHA, N.; GUÉHÉNEUC, Y.-G. A multimethod study of Internet of Things systems testing in industry. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 11, n. 1, p. 1662-1684, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3291233>. Acesso em: 20 mar. 2025.

MUHURI, P. K.; SHUKLA, A. K.; ABRAHAM, A. Industry 4.0: a bibliometric analysis and detailed overview. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 78, p. 218-235, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.11.007>. Acesso em: 20 mar. 2025.

MUSTAPÄÄ, T.; AUTIOSALO, J.; NIKANDER, P.; SIEGEL, J. E.; VIITALA, R. Digital metrology for the Internet of Things. In: *GLOBAL INTERNET OF THINGS SUMMIT (GIOTS)*, 2020, Dublin. Proceedings [...]. Dublin: IEEE, 2020. p. 1-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/GIOTS49054.2020.9119603>. Acesso em: 20 mar. 2025.

NATIONAL CONFEDERATION OF INDUSTRY. Challenges for Industry 4.0 in Brazil. Brasília: CNI, 2016.

OECD/EUROSTAT. Oslo Manual 2018: guidelines for collecting, reporting and using data on innovation. 4. ed. Paris: OECD Publishing, 2018.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT. Metrology for the digitalization of the economy and society. In: *The PTB digitalization strategy (Status 2018)*. Berlin: PTB, 2018.

PIVOTO, D. G. S.; DE ALMEIDA, L. F. F.; DA ROSA RIGHI, R.; RODRIGUES, J. J. P. C.; LUGLI, A. B.; ALBERTI, A. M. Cyber-physical systems architectures for industrial Internet of Things applications in Industry 4.0: a literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 58, p. 176-192, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.11.017>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SCHLEMITZ, A.; MEZHUYEV, V. Approaches for data collection and process standardization in smart manufacturing: systematic literature review. *Journal of Industrial Information Integration*, v. 38, 100578, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100578>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SCHWAB, K. *The fourth industrial revolution*. São Paulo: EDIPRO, 2018.

SHARMA, A.; KOSASIH, E.; ZHANG, J.; BRINTRUP, A.; CALINESCU, A. Digital twins: state of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*, v. 30, 100383, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SOUZA, M. C.; ALMEIDA, M. F. Smart revolution and metrology: a longitudinal science mapping approach. *Meas. Sens.*, v. 18, 100340, 2021.

STATISTA. Industry 4.0: in-depth market analysis. 2024. Disponível em: <https://www.statista.com/study/66974/in-depth-reportindustry-40/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

THIEL, F.; ESCHE, M.; TORO, F. G.; OPPERMANN, A.; WETZLICH, J.; PETERS, F. The European metrology cloud. In: *INTERNATIONAL CONGRESS OF METROLOGY*, 2017, [S.1.]. Proceedings [...]. [S.1.]: [s.n.], 2017.

TORRACO, R. J. Writing integrative literature reviews: guidelines and examples. *Human Resource Development Review*, v. 4, n. 3, p. 356-367, 2005.

UNIDO. Quality infrastructure: good governance in quality policy design. Vienna: UNIDO, 2018.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT; WORLD TRADE ORGANIZATION. Innovations in export strategy: a strategic approach to the quality assurance challenge. Geneva: UNCTAD & WTO, 2005.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. Smart quality infrastructure for sustainability. Vienna: UNIDO, 2022.

VERGARA, S. C. Research projects and reports in administration. São Paulo: Atlas, 2003.

VUORIKARI, R.; KLUZER, S.; PUNIE, Y. DigComp 2.2: the digital competence framework for citizens – with new examples of knowledge, skills and attitudes. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. (EUR 31006 EN).

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: a review. *Engineering*, v. 3, n. 5, p. 616-630, 2017.

ZIEGLER, W. A landscape analysis of standardisation in the field of artificial intelligence. *J. ICT Standardization*, v. 8, n. 2, p. 151-184, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.13052/jicts2245-800X.824>. Acesso em: 20 mar. 2025.