

APLICAÇÕES DO STATISTICAL PROCESS MONITORING NA INDÚSTRIA 4.0: MAPEAMENTO POR PATENTES TECNOLÓGICAS

*STATISTICAL PROCESS MONITORING APPLICATIONS IN INDUSTRY 4.0: MAPPING BY
TECHNOLOGICAL PATENTS*

FERNANDA MOREIRA DE SOUZA BERRETTA
UFSCAR

ANA LÚCIA VITALE TORKOMIAN
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

PEDRO CARLOS OPRIME

Comunicação:

O XIII SINGEP foi realizado em conjunto com a 13th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

APLICAÇÕES DO STATISTICAL PROCESS MONITORING NA INDÚSTRIA 4.0: MAPEAMENTO POR PATENTES TECNOLÓGICAS

Objetivo do estudo

O presente estudo tem por objetivo mapear como o Statistical Process Monitoring (SPM) tem sido aplicado como tecnologia habilitadora na Indústria 4.0, identificando áreas de aplicação, integração com tecnologias emergentes e potenciais contribuições para a evolução da Gestão da Qualidade.

Relevância/originalidade

O artigo explora o papel do SPM dentro da Indústria 4.0 a partir de patentes, fonte ainda pouco explorada na literatura de Qualidade 4.0, permitindo identificar tendências tecnológicas e lacunas de inovação com base em registros de propriedade intelectual.

Metodologia/abordagem

A metodologia escolhida conta com pesquisa documental e exploratória com análise quantitativa e qualitativa de 119 patentes publicadas entre 2005 e 2025, obtidas nas bases INPI, LATIPAT, Espacenet e USPTO, considerando códigos técnicos, títulos, resumos e áreas de aplicação relacionados ao SPM.

Principais resultados

O SPM apresenta integração crescente com sistemas ciberfísicos, machine learning, IoT e big data analytics, demonstrando versatilidade em diferentes setores industriais e papel estratégico na automação, otimização e controle inteligente de processos complexos e digitalizados, revelando ser uma importante tecnologia na I4.0.

Contribuições teóricas/metodológicas

O tipo de metodologia escolhida amplia o entendimento sobre a relação entre SPM e Indústria 4.0, validando o uso de patentes como fonte de dados para pesquisas em Gestão da Qualidade e identificando padrões técnicos e setoriais de aplicação.

Contribuições sociais/para a gestão

Esse estudo fornece informações estratégicas para gestores e formuladores de políticas sobre a adoção do SPM em ambientes industriais digitais, auxiliando na tomada de decisões para inovação, aumento da competitividade e desenvolvimento de soluções adaptadas à transformação digital.

Palavras-chave: Statistical Process Monitoring, Indústria 4.0, Patentes

STATISTICAL PROCESS MONITORING APPLICATIONS IN INDUSTRY 4.0: MAPPING BY TECHNOLOGICAL PATENTS

Study purpose

This study aims to map how Statistical Process Monitoring (SPM) has been applied as an enabling technology in Industry 4.0, identifying areas of application, integration with emerging technologies and potential contributions to the evolution of Quality Management.

Relevance / originality

The article explores the role of SPM within Industry 4.0 based on patents, a source still little explored in the Quality 4.0 literature, making it possible to identify technological trends and innovation gaps based on intellectual property records.

Methodology / approach

The chosen methodology includes documentary and exploratory research with quantitative and qualitative analysis of 119 patents published between 2005 and 2025, obtained from the INPI, LATIPAT, Espacenet and USPTO databases, considering technical codes, titles, abstracts and areas of application related to SPM.

Main results

SPM is increasingly integrated with cyber-physical systems, machine learning, IoT and big data analytics, demonstrating versatility in different industrial sectors and a strategic role in the automation, optimization and intelligent control of complex and digitalized processes, proving to be an important technology

Theoretical / methodological contributions

The type of methodology chosen broadens the understanding of the relationship between SPM and Industry 4.0, validating the use of patents as a source of data for research into Quality Management and identifying technical and sectoral patterns of application.

Social / management contributions

This study provides strategic information for managers and policymakers on the adoption of SPM in digital industrial environments, helping them to make decisions on innovation, increasing competitiveness and developing solutions adapted to the digital transformation.

Keywords: Statistical Process Monitoring, Industry 4.0, Patents

APLICAÇÕES DO *STATISTICAL PROCESS MONITORING* NA INDÚSTRIA 4.0: MAPEAMENTO POR PATENTES TECNOLÓGICAS

1 Introdução

A evolução dos modelos industriais, desde a mecanização da Primeira Revolução Industrial até a automação eletrônica da Terceira Revolução, sempre esteve acompanhada por transformações na gestão da qualidade, que passou da simples inspeção para um componente estratégico nas organizações. A atual Quarta Revolução Industrial, conhecida como Indústria 4.0 — termo cunhado em 2011 na Alemanha — representa uma ruptura significativa ao integrar tecnologias como sistemas ciber-físicos (*cyber-physical systems* – CPS), *Internet* das Coisas (IoT), *big data analytics*, computação em nuvem, manufatura aditiva, simulação, realidade aumentada, cibersegurança e inteligência artificial, promovendo ambientes produtivos altamente conectados, autônomos e impulsionadores da competitividade (ANTONY *et al.*, 2021; BIGLIARDI *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2018).

Nesse novo paradigma, a gestão da qualidade também passa por transformações, emergindo o conceito de Qualidade 4.0 (Q4.0), ainda em desenvolvimento. A incorporação de tecnologias digitais à Q4.0 revolucionou o controle e a melhoria de processos e produtos, possibilitando a identificação e o diagnóstico de problemas em tempo real ao longo da cadeia produtiva (ANTONY *et al.*, 2021; BIGLIARDI *et al.*, 2020). Isso foi potencializado pela digitalização das plantas industriais, permitindo o controle remoto dos sistemas produtivos, a realização de simulações virtuais e a antecipação de riscos à integridade dos processos (MAHMOUD *et al.*, 2019; SACOMANO *et al.*, 2018).

Entre as técnicas tradicionais da gestão da qualidade que ganham novas possibilidades de aplicação nesse contexto, Colosimo *et al.* (2024) destaca o monitoramento estatístico do processo (*Statistical Process Monitoring* – SPM). Originalmente concebido para o controle da variabilidade e melhoria contínua da qualidade, o SPM, na Indústria 4.0, é potencializado pelo uso de sensores, sistemas de coleta de dados em tempo real e algoritmos de análise, ampliando seu papel para o monitoramento inteligente de processos complexos e altamente automatizados.

Diante disso, surge a seguinte questão de pesquisa: Como o SPM tem sido utilizado nas indústrias que operam com as tecnologias 4.0?

Para responder essa questão, este trabalho propõe realizar uma análise documental em bases abertas de patentes, com o objetivo de mapear como o SPM tem sido aplicado no contexto da Indústria 4.0, identificando as principais áreas e setores onde ocorrem registros de inovações. Com isso, busca-se compreender o estado atual das aplicações do SPM e suas possíveis contribuições para a evolução da Gestão da Qualidade.

2 Referencial Teórico

Nesta seção será discutido os temas de Qualidade 4.0, monitoramento estatístico do processo e como as patentes mostram a aplicação da técnica estatística dentro da Indústria 4.0.

2.1 Qualidade 4.0

A gestão da qualidade evoluiu ao longo das sucessivas revoluções industriais, ampliando seu escopo e complexidade. Contudo, diante dos desafios impostos pela Quarta Revolução Industrial, diversos autores apontam que a área da qualidade enfrenta um momento de revisão e adaptação. Broday (2022) e Zonnenshain e Kenett (2020) destacam que, embora a gestão da qualidade possua múltiplos campos de atuação, sua evolução recente tem sido limitada por barreiras organizacionais e tecnológicas.

Nesse contexto, surge o conceito de Qualidade 4.0, resultado de esforços para alinhar práticas tradicionais de qualidade às novas demandas tecnológicas da Indústria 4.0. O termo foi introduzido por Dan Jacob, ao propor que a qualidade se tornasse uma estratégia corporativa liderada pela alta gestão, com o objetivo de impulsionar o desempenho organizacional (ALSADI *et al.*, 2024).

Na literatura, essa concepção se divide em duas abordagens (ALSADI *et al.*, 2024). A primeira compreende a Qualidade 4.0 como dependente das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, tais como sistemas ciber-físicos (CPS), *Internet das Coisas* (IoT), computação em nuvem e *big data analytics*. Sob essa perspectiva, a Qualidade 4.0 é essencialmente uma iniciativa focada em tecnologia, que transforma os processos de gestão da qualidade ao permitir o monitoramento contínuo, a análise preditiva e a automação de decisões.

A segunda abordagem entende a Qualidade 4.0 como uma evolução independente das iterações anteriores da gestão da qualidade — Controle da Qualidade (CQ), Garantia da Qualidade (QA) e Gestão da Qualidade Total (TQM) — enfatizando a atualização das ferramentas e métodos para incluir capacidades preditivas e preventivas, com apoio de tecnologias digitais (COLOSIMO *et al.*, 2024).

Apesar dos avanços conceituais, ainda não há uma definição universalmente aceita de Qualidade 4.0 (BRODAY, 2022), refletindo o caráter emergente e em construção desse campo. Entretanto, prevalece o entendimento de que essa nova qualidade está fundamentada no uso de tecnologias avançadas para projetar, operar e manter sistemas adaptativos, preditivos e automatizados, como sintetizado por Antony *et al.* (2021).

Entre essas tecnologias, destacam-se o *big data analytics*, a inteligência artificial, os sensores inteligentes, a *Internet das Coisas* e os sistemas ciber-físicos, que, combinados, promovem a digitalização e a automação do monitoramento da qualidade.

Nesse cenário, técnicas tradicionais como o monitoramento estatístico do processo (*Statistical Process Monitoring* – SPM) passam a desempenhar um papel estratégico, pois são potencializadas pela integração com sistemas automatizados de coleta e análise de dados em tempo real. Assim, o SPM, historicamente associado ao controle da variabilidade e à melhoria contínua, se consolida como um mecanismo proativo e inteligente de monitoramento, essencial para antecipar falhas, otimizar processos e fortalecer a resiliência dos sistemas produtivos característicos da Indústria 4.0.

2.2 Monitoramento Estatístico do Processo (SPM)

No início do século XX, o controle estatístico do processo (em inglês *Statistical Process Control* – SPC) foi a primeira metodologia a adotar técnicas estatísticas para monitorar a variabilidade dos processos na indústria, posteriormente referido como Monitoramento Estatístico do Processo (em inglês *Statistical Process Monitoring* – SPM) (COLOSIMO *et al.*, 2024; GOEDHART; WOODALL, 2022; WOODALL; MONTGOMERY, 2014).

Pesquisas, como a dos autores Colosimo *et al.* (2024) e Tang *et al.* (2024) apontam o uso do SPM na Indústria 4.0. Eles sugerem que é de grande relevância fazer o monitoramento para com as tecnologias como IoTs, computação em nuvem, simulação, realidade aumentada, robôs autônomos, cibersegurança, manufatura aditiva e *big data analytics*, trazendo tal ferramenta de forma central dentro da Qualidade 4.0.

Nesse sentido, os gráficos de controle (SPM) tem potencial de identificar e diferenciar causas comuns e causas especiais de variabilidade dos processos. As causas comuns referem-se a variáveis que não são passíveis, ou não são economicamente viáveis, de se identificar e controlar, resultando em aleatoriedade inevitável. Por sua vez, as causas especiais devem-se a fontes de variação que podem ser identificadas e removidas (TANG *et al.*, 2024; MUKHERJEE, 2015).

Em linhas gerais, a implantação do SPM envolve tradicionalmente duas Fases (COLOSIMO *et al.*, 2024). Na Fase I ocorre a definição das características de qualidade e da coleta e análise dos dados para estimativa de parâmetros estatísticos, como a média e desvio padrão da média, que serão monitorados a partir de gráficos de controle. A partir destes dados calculam-se os limites de controle superior e inferior das cartas de controle que serão utilizadas na Fase II, ou etapa de monitoramento (COLOSIMO *et al.*, 2024; MUKHERJEE, 2015).

O desempenho esperado dos gráficos de controle reflete os erros α e β . O erro α é a taxa de falsos positivos (quando o processo está sob controle, mas o valor encontrado do parâmetro monitorado está fora dos limites), e o erro β é a taxa de falsos negativos (quando o processo está fora de controle, mas o valor encontrado do parâmetro monitorado cai dentro dos limites). Assim, quanto menor o erro α aceito, maior o erro β . Para $h = 3$ (valor da distribuição normal padrão, cuja área sob a curva normal é de 99,73%), com parâmetros estatísticos conhecidos e processo sob controle, em média 1 ponto em 370 sairá fora dos limites calculados.

Nota-se, portanto, que o campo do SPM está sendo transformado e guiado para uma inovação tecnológica, nessa nova era industrial. As aplicabilidades prometem aprimorar a qualidade industrial e promover um futuro mais sustentável e centrado no ser humano (COLOSIMO *et al.*, 2024). Essas inovações frequentemente resultam em registros de propriedade intelectual, como as patentes, que constituem uma fonte estratégica de informação para identificar tendências emergentes, avaliar o grau de maturidade tecnológica e compreender como o SPM está sendo incorporado ou adaptado no contexto da Indústria 4.0. Assim, a seguir, discute-se a importância das patentes como fonte de inovação, bem como sua utilização como base para a análise documental proposta neste estudo.

2.3 Patentes sobre a aplicação do SPM na Indústria 4.0

De acordo Braga *et al.* (2018) a patente, nos primórdios, era vista como um privilégio e se baseava no direito natural do inventor. A primeira Lei de Patente reconhecida foi a Lei de Patentes de Veneza de 1474, nesta, o Estado reconhecia que o inventor tivesse exclusividade sobre seu invento. Em 1594, por exemplo, Galileu Galilei teve um invento seu reconhecido enquanto patente, tratava-se da bomba de água.

Nessa época, as patentes eram vistas como privilégios, não eram tão descritivas e nem contavam com uma grande divulgação, contudo, ao longo dos séculos, esse formato foi reformulado. Um marco relevante na história foi em 1778, quando as especificações das patentes deveriam, a partir de então, ser suficientemente completas e detalhadas para permitir que qualquer pessoa, com conhecimento na técnica à qual a invenção se referia, a compreendesse e aplicasse sem experimentação indevida (BRAGA *et al.*, 2018). Desde então, as patentes passaram a desempenhar um papel essencial na sistematização, difusão e proteção do conhecimento técnico.

Atualmente, as patentes são reconhecidas como um dos instrumentos mais robustos de proteção da propriedade intelectual e também como indicadores da capacidade de inovação de indivíduos, instituições e países (BRAGA *et al.*, 2018; GRZEGORCZYK, 2020). Para além de seu papel jurídico, elas exercem funções estratégicas no ambiente corporativo e científico. Grzegorzcyk (2020) ressalta que os motivos para patentear um invento vão além da proteção intelectual. As patentes permitem bloquear concorrentes, gerar receitas por meio de licenciamento ou venda, fortalecer a imagem de empresas inovadoras e facilitar alianças estratégicas. Elas também funcionam como ferramentas de negociação, proteção contra litígios e até como ativos intangíveis em operações financeiras e fusões. Além disso, empresas podem utilizar patentes para definir padrões industriais ou criar barreiras tecnológicas que reforcem sua vantagem competitiva.

Portanto, uma patente pode ser definida por: um direito temporário e territorial concedido pelo Estado ao titular da patente para explorar, licenciar ou excluir a terceiros, com exclusividade, o objeto de sua invenção (BRAGA *et al.*, 2018). Dessa forma, analisar patentes significa entender que elas são fontes ricas de informação tecnológica, revelando tendências emergentes, lacunas de mercado e áreas de concentração de esforços inovadores.

Bases como a do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), Espacenet (EPO), e USPTO disponibilizam um amplo repositório de patentes, com ferramentas de busca que permitem ao pesquisador investigar temas específicos, setores, países, depositantes e classificações técnicas (BRAGA *et al.*, 2018).

Nesse sentido, este artigo utiliza o levantamento e a análise de patentes como estratégia metodológica para entender como o SPM — uma técnica consolidada de monitoramento estatístico — tem sido incorporado às tecnologias emergentes da Indústria 4.0. A partir desse levantamento, é possível identificar áreas de inovação tecnológica, padrões de aplicação por setor e até mesmo evidências de consolidação ou estagnação de determinadas abordagens. Assim, as patentes funcionam, neste contexto, como instrumentos de leitura do avanço tecnológico global, permitindo visualizar o papel do SPM como tecnologia habilitadora de processos industriais inteligentes, conectados e autônomos.

3. Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma análise documental, de natureza descritiva e exploratória, fundamentada em dados secundários extraídos de bancos de patentes. O objetivo é apresentar as patentes relacionadas ao monitoramento estatístico do processo (SPM) aplicadas às tecnologias da Indústria 4.0, bem como identificar eventuais lacunas entre as aplicações descritas na literatura acadêmica e aquelas efetivamente registradas como inovações no cenário real.

A pesquisa será realizada nas seguintes bases de patentes:

- INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) – base brasileira;
- EPO – base internacional, com predominância de patentes registradas na Europa;
- Latipat – base especializada no contexto latino-americano.
- USPTO – base estadunidense.

Foram definidos os seguintes termos de busca, adaptados às especificidades linguísticas de cada base, conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 1.

Termos de busca para as bases de patentes adotadas na pesquisa

Base	Termo
INPI	monitoramento estatístico do processo
EPO	<i>statistical process monitoring</i>
Latipat	<i>monitoreo estadístico del proceso</i>
USPTO	monitoramento estatístico do processo
	<i>statistical process monitoring</i>

Essas bases foram selecionadas em função de sua abrangência, acesso aberto e relevância para a identificação de inovações tecnológicas em diferentes contextos geográficos e econômicos.

Em seguida, foram aplicados critérios de inclusão e exclusão para avaliação das patentes, conforme Tabela 2. O primeiro recorte conta com a exclusão de patentes em idiomas senão inglês, português e espanhol. A seguir, foi feito um recorte temporal, abrangendo patentes de 2005 à até 23 de maio de 2025, uma vez que as patentes possuem validade de 20 anos,

quando não renovadas. Esse recorte temporal é suficiente para entender o estado atual da arte do tema *Statistical Process Monitoring* dentro da Indústria 4.0, ao final foram obtidos 119 patentes para estudo.

Tabela 2.

Critérios de inclusão e exclusão para análise de patentes

Critério de inclusão	Critério de exclusão
Patentes em inglês, espanhol, português	Idioma: patentes em demais idiomas
Patentes de 2005 à 2025	Patentes que foram publicadas até 2004

As informações observadas foram a evolução temporal conforme a publicação de patentes, quem eram os inventores, principais atores solicitantes de patentes, CPI e CPC para identificar de qual área trata-se a patente, os títulos e resumos, pois buscou-se associar se as patentes possuem conexão com as tecnologias da Indústria 4.0 e com quais.

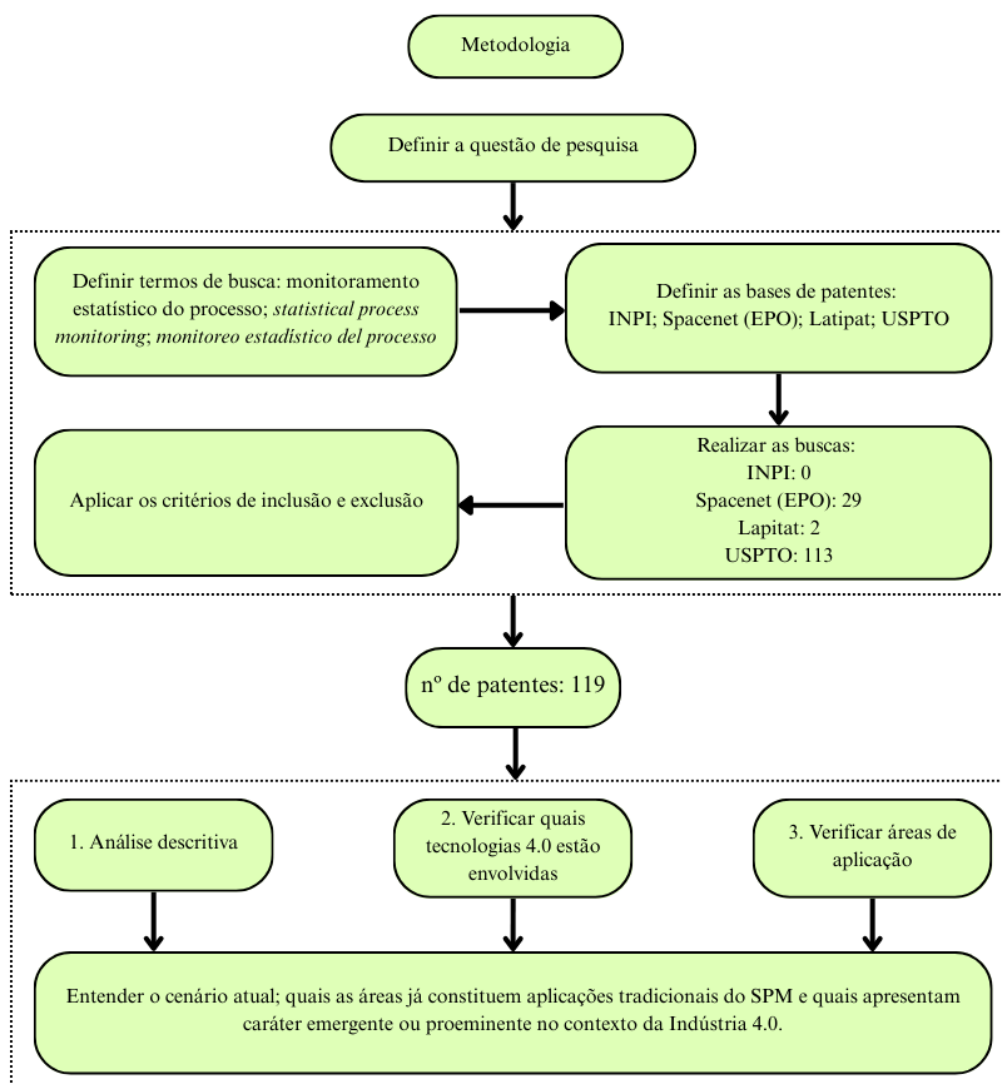


Figura 1. Etapas da pesquisa

Os resultados descritivos foram obtidos por meio do *software Excel*, permitindo melhor tratamento e visualização dos dados. Na sequência, foi apresentado uma análise qualitativa dos títulos e resumos, com o intuito de identificar:

- As principais tecnologias envolvidas na aplicação do SPM;
- As respectivas áreas de aplicação, como manufatura, saúde, energia, cibersegurança, entre outras.

Essa abordagem permitiu cruzar os achados obtidos nas bases de patentes com as evidências identificadas na literatura acadêmica, possibilitando verificar quais áreas já constituem aplicações tradicionais do SPM e quais apresentam caráter emergente ou proeminente no contexto da Indústria 4.0. A Figura 1 ilustra a metodologia escolhida para esta pesquisa.

4 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia aplicada. Verificar o cenário atual permite verificar quais são as tendências para o *Statistical Process Monitoring*, maiores áreas de aplicação, a quais tecnologias esta ferramenta está aliada.

4.1 Estado atual da arte por meio da análise descritiva

Os dados coletados apontaram que existem 119 patentes dentro do escopo da pesquisa. Dessas, nota-se que em 2008 houve um boom de patentes na área. Hoje, esse cenário está mais estagnado, contando com 5 patentes em 2024 e 7 em 2023, conforme Figura 2.

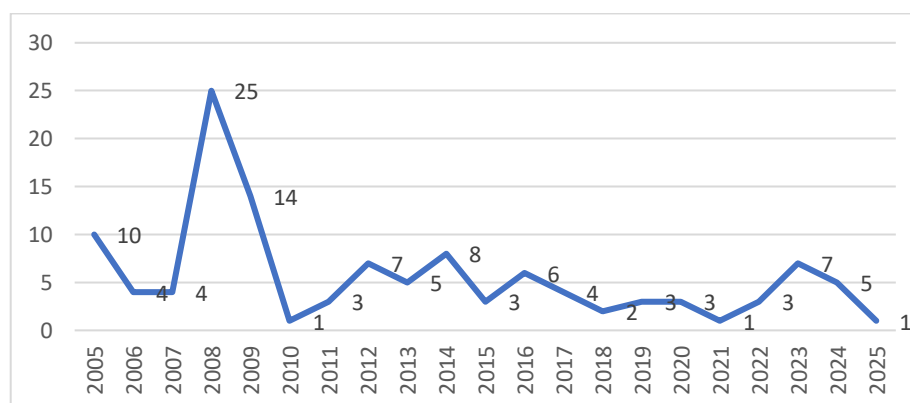


Figura 2. Quantidade de patentes por ano

Ao observar a tipografia dos códigos de publicação das patentes, foi possível identificar que a maioria das patentes ainda está em fase de pedido publicado (A1), o que significa que são pedidos que já foram divulgados, mas nem todos foram concedidos. Há uma presença de patentes já concedidas (B1, B2), o que indica maturidade em parte dos desenvolvimentos. Os códigos A2 e A indicam publicações iniciais, muitas vezes sem avaliação completa ainda. A Tabela 3 apresenta a quantidade de patentes conforme a sua classificação.

Tabela 3.

Classificação das patentes de acordo com o código de publicação

Código de Publicação	Ocorrências
A1	75
B2	25
A	12
B1	5
A2	2

A tipografia dos códigos também observamos o país de origem da patente. Patentes que possuem as siglas US, DE, HK, CN, TW, KR e CO representam respectivamente os Estados Unidos, Alemanha, Hong Kong, China, Taiwan, Coreia do Sul e Colômbia. Além disso, também aparece o código WO, e esse indica que a patente foi depositada na WIPO (Organização Mundial da Propriedade Intelectual). As patentes em estudo revelaram ser em sua maioria dos Estados Unidos. Em específico, tem-se 86 patentes dos EUA, 7 da China, 2 da WIPO, as demais nacionalidades apresentaram 1 patente cada. O mapa de árvore, na Figura 3, apresenta de forma visível os países de origem das patentes.



Figura 3. Países de origem das patentes

A identificação dos inventores com maior número de depósitos de patentes permite compreender quem são os principais agentes individuais no desenvolvimento tecnológico relacionado ao tema estudado. Dessa forma, foi feito um *rank* listando os nove primeiros inventores conforme a quantidade de depósitos de patentes, apresentado na Tabela 4. O *rank* vai até a sétima posição, apesar de terem 9 nomes, ao passo que foi observado apenas os inventores que tinham a partir de três patentes.

Tabela 4.
Principais inventores

Rank	Inventor	Ocorrências
1	Miller, John P.	25
2	Kant, Ravi	8
3	Eryurek, Evren	7
4	Kavaklioglu, Kadir	6
5	Blevins, Terrence L.	5
	Schwarm, Alexander T.	4
6	Nixon, Mark	4
	Wojsznis, Wilhelm K.	3
7	Worek, Christopher	3
	Perez, Carlos Felipe Alcala	3

O primeiro colocado do *rank*, John P. Miller, se destacou, pois, realizou depósito de inventos no período de 2005 a 2014. Ele teve inventos depositados junto à Evren Eryurek, Ravi Kant e Kadir Kavaklioglu, segundo, terceiro e quarto colocados no *ranking*, respectivamente. Os inventos deles giram em torno da temática de detecção de situações anormais, desenvolvimento de diagnósticos de plantas de processos e detecção de desvio de variável.

O inventor da quinta posição, Terrence L. Blevins, possui inventos com Mark Nixon, localizado na posição 6, e com os dois dos colocados na posição sete, Wilhelm K. Wojsznis e Christopher Worek. Suas patentes em comum compartilham o objetivo de monitorar e controlar a qualidade do processo de forma preditiva e automatizada, com base em modelagem estatística multivariada, coleta contínua de dados e integração com sistemas digitais de controle.

Seguindo essa linha de identificar os principais inventores, também é importante identificar os principais solicitantes de patentes. A diferença entre esse é que, os inventores são pessoas físicas que criaram a invenção, portanto, elas devem ser nomeadas na patente como reconhecimento pelo trabalho criativo, além disso, elas têm direito moral ao reconhecimento, mas não necessariamente detêm os direitos legais sobre a patente. Já os solicitantes, geralmente são as pessoas física ou jurídica (normalmente uma empresa, universidade ou instituição) que detêm os direitos sobre a patente, ou seja, trata-se de quem registra o pedido junto ao escritório de patentes, assim, detém o direito de exploração comercial, licenciamento, venda ou defesa jurídica da invenção.

Nesse caso, também é importante observar que a USPTO só passou a fornecer dados completos e confiáveis de solicitantes a partir de 2013, isso se ocorreu devido à padronização dos arquivos, mudanças legais com o *America Invents Act*, e modernização tecnológica de seus sistemas de informação. Os demais escritórios já tinham a informação do solicitante desde antes de 2013. A partir dos resultados coletados, foi contabilizado o número de pedidos por solicitantes e eles foram ranqueados, a Tabela 5 apresenta quem são os principais solicitantes de patentes a partir de quem solicitou pelo menos dois pedidos.

Tabela 5.
Principais solicitantes de patentes

Rank	Solicitante	Nº de Pedidos
1	Fisher Rosemount Systems Inc/Rosemount Inc	6
	Wojsznis, Wilhelm K.	4
2	Blevins, Terrence L	4
	Nixon, Mark	3
	Worek, Christopher	3
3	Johnson Controls Technology Company	3

Em linhas gerais, nota-se que os principais solicitantes de patentes são grandes corporações. Também se observa que os inventos dos primeiros ranqueados no Quadro 4 - John P. Miller, Evren Eryurek, Ravi Kant e Kadir Kavaklioglu - quase não possuem a informação de quem são os solicitantes de patentes, pois são inventos que vem da base de dados USPTO que tiveram solicitação de patente antes de 2013, com ressalva para os últimos inventos de 2014 e 2015, que foram solicitados pela Rosemount Inc.

Este ano, 2025, a Fisher-Rosemount Systems fez a solicitação de patente, revelando ser a patente mais recente dentro do escopo dessa pesquisa. O invento, tem como nome “Raw Sensor Data Input To Control System”. Demais inventos que foram solicitados as patentes por essa organização trabalham com essa temática de monitoramento, diagnóstico e controle de processos industriais com base em análise estatística multivariada e dados em tempo real.

Alguns nomes como Terrence L. Blevins, Mark Nixon, Wilhelm K. Wojsznis e Christopher Worek aparecem como solicitantes de patentes, além de serem os inventores dessas.

O terceiro colocado no *ranking* da Tabela 5, a Johnson Controls Technology Company, possui solicitação para patente de três inventos, que possuem autoria de Carlos Felipe Alcala Perez, que também aparece no Quadro 4 como um dos principais inventores. A temática desses inventos gira em torno do desenvolvimento de métodos avançados de diagnóstico de falhas para

sistemas de gerenciamento predial, com foco em tomada de decisão confiável e antecipada baseada em dados.

As últimas análises descritivas feitas são sobre os códigos de IPC e CPC. O código ICP vai mostrar qual classificação internacional a patente está ocupando. Esse código tem foco técnico. O código CPC trata-se de uma classificação cooperativa, foi criada pelo EPO e é mais detalhada e precisa.

A Tabela 6 apresenta os principais IPCs que apareceram no escopo dessa pesquisa, e a quantidade de ocorrência, foram listados os códigos que tinham a partir de 2 ocorrências.

Tabela 6.
Principais IPCs registradas

Código	Área técnica	Ocorrências
G05B23/02	Monitoramento do desempenho de processos usando técnicas estatísticas	4
G05B19/418	Controle programável de processos industriais	4
G06Q10/06	Gestão eletrônica de operações empresariais	3
G06Q50/04	Sistemas de gestão para setores específicos (ex: produção)	3
G01K13/00	Medição de temperatura por contato ou sem contato direto	2
G06F17/18	Recuperação de informações; extração de dados estruturados e não estruturados	2

Os primeiros códigos – G05B23/02 e G0519/418 – são sobre controle e monitoramento de sistemas industriais. O primeiro código trata do monitoramento do desempenho de processos com técnicas estatísticas, como controle estatístico de processo (CEP) e análise multivariada. A presença deste código indica forte integração entre estatística e automação, o que sugere ênfase em diagnósticos preditivos, manutenção inteligente e qualidade de processos.

O segundo código refere-se controle programável de processos industriais, como PLCs (Controladores Lógicos Programáveis) e sistemas SCADA. Este é o núcleo tecnológico predominante. As patentes estão majoritariamente voltadas à automação industrial e ao controle inteligente de processos, reforçando o alinhamento com a Indústria 4.0.

Os códigos G06Q50/06 e G06Q10/04 tratam de apoio analítico e computacional. São ligados ao processamento de dados digitais para finalidades específicas e à gestão eletrônica de operações, especialmente para setores produtivos. Assim, indicam que os sistemas de controle e monitoramento envolvem algoritmos, modelagem e lógica computacional e que há um componente de gestão operacional digitalizada, integrando dados do chão de fábrica com sistemas decisórios empresariais.

O código G01K13/00 abrange o tema de monitoramento físico e sensoriamento em tempo real, pois trata-se de medição de temperatura de materiais por métodos físicos e químicos.

Por fim, o código G06F17/18, voltado à recuperação e organização de informações, demonstra que os sistemas de SPM analisados também lidam com grandes volumes de dados, exigindo capacidades de extração, indexação e uso inteligente da informação. Isso se alinha diretamente às abordagens de *big data analytics* e inteligência artificial, que caracterizam a Qualidade 4.0.

A seguir, apresenta-se as principais CPC, por meio da Tabela 7. Foram listados os códigos que apareceram pelo menos seis vezes nas patentes.

Códigos como G05B23/024, G05B23/0254, G05B23/0221 e G05B23/021, referem-se ao monitoramento inteligente e preditivo. Em específico, as patentes visam prever falhas ou comportamentos anômalos com base em dados coletados ao longo do tempo e simulação de sistemas. Trata-se de um pilar da manutenção preditiva e da indústria inteligente, também se evidencia o uso de técnicas estatísticas aplicadas ao diagnóstico automático, reforçando a aderência de métodos como controle estatístico de processos e análise multivariada. Tais

códigos também demonstram preocupação com resiliência e confiabilidade de sistemas, incluindo tecnologias de detecção autônoma e diagnósticos em tempo real. Em linhas gerais, tais códigos indicam que muitas soluções são voltadas ao monitoramento contínuo e imediato de processos, alinhando-se com sistemas de controle reativos e proativos.

Tabela 7.
Principais CPCs registradas

Código	Área técnica	Ocorrências
G05B23/024	Monitoramento com análise preditiva ou com base em dados históricos	28
Y02P90/02	Tecnologias industriais para redução de impactos ambientais	17
G05B23/0254	Diagnóstico de falhas baseado em dados estatísticos	14
G05B19/418	Controle programável de processos industriais	12
G05B23/021	Monitoramento com base em sinais em tempo real	10
G05B23/0221	Deteção e análise de falhas em processos	9
G05B15/02	Supervisão de sistemas de controle automático	8
G05B19/41875	Controle de processos com algoritmos adaptativos e inteligentes	7
Y02P90/80	Tecnologias ambientais aplicadas a eficiência energética e sustentabilidade	6
G06Q10/06	Gestão eletrônica de operações empresariais	6

A aplicação de inteligência artificial no controle de processos é vista nos códigos G05B19/41875, G05B19/418 e G05B15/02. Isso ocorre porque mostra que os sistemas aprendem ou se ajustam automaticamente, como algoritmos adaptativos e heurísticos. Também apontam a aplicação explícita de IA, como *machine learning* e sistemas fuzzy, para tomada de decisão e otimização de processos industriais. Por fim, indicam preocupação com a coordenação e supervisão de múltiplos sistemas autônomos, garantindo segurança e desempenho global.

A presença do código G06Q10/06 demonstra que esses sistemas também têm aplicação em níveis gerenciais, promovendo integração entre o chão de fábrica e a gestão estratégica, por meio de sistemas de informação.

Os códigos também apresentam temáticas voltadas para sustentabilidade e impacto ambiental, conforme códigos Y02P90/02 e Y02P90/80. Em específico, revela comprometimento com a sustentabilidade, demonstrando que os sistemas visam otimizar recursos e minimizar emissões/poluição e destaca patentes com foco em eficiência energética, redução de consumo e controle ambiental inteligente.

Tais resultados evidenciam que o *Statistical Process Monitoring* (SPM) vem sendo aplicado com o suporte de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como sensores inteligentes, *machine learning* e sistemas ciberfísicos. Esse movimento representa uma concretização prática dos princípios da Qualidade 4.0, que busca aliar o controle estatístico tradicional à conectividade, à automação, à análise preditiva e à tomada de decisão baseada em dados em tempo real.

4.2 Análise Qualitativa

A análise qualitativa foi feita a partir da leitura dos títulos e resumos das patentes encontradas nas bases descritas na Seção 3 deste trabalho.

Em linhas gerais, notou-se que as patentes tinham como temáticas centrais o monitoramento de processos industriais por meio de técnicas estatísticas. Evidencia-se o controle estatístico do processo (CEP), análise estatística multivariada, detecção e diagnóstico de falhas, monitoramento em tempo real (*on-line*), uso de imagens e sensores para aquisição de dados.

Muitas invenções estão alinhadas com os princípios da Indústria 4.0, especialmente por incorporarem coleta de dados em tempo real via sensores e sistemas inteligentes, análise de grandes volumes de dados (*big data*) para monitoramento e controle, integração com sistemas ciberfísicos, incluindo plantas de processos industriais, máquinas CNC, motores, fornos, etc., uso de algoritmos adaptativos, redes neurais, PCA dinâmica, e outras técnicas de inteligência artificial para aprimorar o monitoramento e a tomada de decisão.

Foi possível verificar que existem cinco categorias temáticas ligadas à Indústria 4.0.: i) Monitoramento e Diagnóstico em Processos Industriais, nesta tem-se a utilização de SPM para detectar desvios, falhas e estados anômalos em sistemas como motores, válvulas, plantas químicas e equipamentos semicondutores; ii) Controle Estatístico Multivariado, em que aplicação de PCA e outras abordagens multivariadas são feitas para sintetizar variáveis de processo e realizar análises preditivas; iii) *Abnormal Situation Management*, neste, os modelos preditivos, estratégias de controle adaptativo e uso de controle estatístico servem para antecipar falhas, como em trocadores de calor, colunas de destilação, e fornos de coque; iv) SPM com Dados de Imagem e Sensores Inteligentes, nesta categoria os métodos integram processamento de imagens, sensores e aprendizado estatístico para controle de qualidade e diagnóstico de defeitos; v) Monitoramento de Ambientes Específicos, trata de casos mais nichados, como produção de penicilina, monitoramento ambiental agrícola via IoT, ou controle de temperatura em motores.

As soluções patenteadas reforçam a importância de estatísticas descritivas, controle por cartas (como EWMA, Shewhart), e controle multivariado como ferramentas essenciais para garantia da qualidade em tempo real, melhoria contínua de processos, redução de alarmes falsos e tomada de decisão automatizada em ambientes industriais.

5 Discussão

O escopo desta pesquisa visava fazer um mapeamento do uso do *Statistical Process Monitoring* dentro da Indústria 4.0. Para isso, foi verificado quais são as patentes sobre o tema nas principais bases de busca, INPI, Latipat, Scapenet (EPO) e USPTO desde o ano de 2005. A partir disso foi possível verificar a evolução temporal das patentes dentro dessa temática, observando que ao longo do tempo as patentes foram cada vez mais se conectando às tecnologias da Indústria 4.0.

Também foi observado os principais inventores e solicitantes de patentes, bem como foi analisado em quais escritórios essas patentes são principalmente depositadas, e de quais países eram seus depositantes, revelando que o principal escritório escolhido é o USPTO e as patentes são provenientes dos Estados Unidos.

Portanto, embora a aplicação do *Statistical Process Monitoring* já esteja consolidada em setores industriais consolidados, observa-se uma lacuna em setores emergentes ou em países em desenvolvimento, como o Brasil e demais países da América Latina, onde não foram encontrados registros de patentes sobre o tema no período analisado. Essa ausência revela uma oportunidade para universidades, centros de pesquisa e empresas brasileiras investirem em tecnologias de monitoramento estatístico alinhadas à Indústria 4.0. A predominância de patentes nos Estados Unidos, especialmente depositadas no USPTO, pode estar relacionada ao forte investimento em digitalização industrial, incentivos à inovação e ao ecossistema robusto de propriedade intelectual. Essa concentração geográfica reforça a importância de políticas públicas de fomento à inovação e proteção intelectual nos países latino-americanos para ampliar sua presença tecnológica neste campo.

O principal inventor, John P. Miller, contém um alto volume de invenções relacionadas ao SPM dentre os anos de 2005 a 2015, demonstrando ser o principal inventor. Dois inventos dele estão relacionados à Fisher-Rosemount Systems Inc, organização essa que é especializada

em oferecer serviços de controle nos EUA. Inclusive, neste ano de 2025, essa organização patenteou um invento relacionado ao tema de SPM, nomeado como “Raw Sensor Data Input To Control System”, revelando ser uma organização que opera com o SPM regularmente.

A análise dos códigos IPC e CPC, permitiram verificar que as patentes giram em torno do controle automatizado de processos industriais, com apoio de algumas tecnologias da indústria 4.0, como os sensores, *big data analytics*, sistemas ciberfísicos, *machine learning* e simulação. Tais tecnologias permitem, portanto, automatizar decisões operacionais, monitorar e diagnosticar falhas ou anomalias, integrar dados físicos com inteligência computacional, em diversos setores produtivos, como o de manufatura de máquinas – por exemplo: prensas -, setor petroquímico, eletrônico, saúde, ambiental e serviços. Tal fato, mostra que o SPM consegue se adaptar à vários setores, ainda que o setor industrial seja predominante.

A análise qualitativa reforçou que as patentes operam com tecnologias ligadas à Indústria 4.0., por meio da identificação de cinco categorias que evidenciam as formas com que o SPM é utilizado. A primeira delas diz respeito ao monitoramento e diagnóstico em processos industriais, em que o SPM é utilizado para detectar desvios, falhas e condições anômalas em ativos como motores, válvulas, plantas químicas e semicondutores. Em seguida, observa-se uma categoria voltada ao controle estatístico multivariado, que se destaca pelo uso de abordagens como PCA (Análise de Componentes Principais) para a síntese de variáveis e antecipação de falhas. A terceira categoria, *abnormal situation management*, reúne estratégias que integram modelos preditivos e algoritmos adaptativos para prevenir ocorrências críticas em equipamentos complexos, como fornos e trocadores de calor. A quarta categoria, SPM com dados de imagem e sensores inteligentes, demonstra o uso de tecnologias avançadas de sensoriamento e visão computacional aliadas à estatística, ampliando as possibilidades de controle de qualidade em tempo real. Por fim, a categoria de monitoramento de ambientes específicos agrupa aplicações direcionadas a contextos nichados, como a produção de penicilina, o controle térmico de motores e o monitoramento ambiental agrícola com tecnologias baseadas em IoT.

A categorização das patentes evidencia como o SPM evoluiu para atender às novas exigências da Qualidade 4.0, que valoriza a integração entre sistemas físicos e digitais, o uso de análises preditivas e a capacidade de resposta autônoma diante de desvios no processo. Tecnologias como redes neurais, processamento de imagens e monitoramento remoto tornam possível um controle estatístico mais robusto, adaptativo e conectado ao ciclo de melhoria contínua. Essa abordagem está alinhada ao conceito de Qualidade 4.0, em que a excelência operacional é sustentada por inteligência artificial, conectividade e análise de dados em tempo real.

O SPM demonstra ser uma tecnologia habilitadora da Indústria 4.0 não apenas por seu papel tradicional no controle de qualidade, mas por sua capacidade de se integrar a sistemas ciberfísicos, inteligência artificial e *big data*. Essa adaptabilidade amplia seu uso para ambientes produtivos dinâmicos, caracterizados por variabilidade elevada e exigência de respostas em tempo real.

Uma limitação do estudo é que ele se baseou exclusivamente em patentes publicadas, não considerando publicações acadêmicas ou aplicações industriais não patenteadas. Sugestões de pesquisas futuras, recomenda-se investigar se e como empresas nacionais aplicam práticas de SPM no contexto da Indústria 4.0, bem como explorar demais ferramentas da Qualidade 4.0 que já estejam associadas a soluções patenteadas.

6 Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo mapear o uso do *Statistical Process Monitoring* (SPM) no contexto da Indústria 4.0 por meio da análise de patentes depositadas nas principais bases

internacionais entre 2005 e 2025. Os resultados evidenciaram uma evolução significativa no uso do SPM, demonstrando que, ao longo do tempo, as tecnologias envolvidas nas patentes passaram a incorporar cada vez mais elementos característicos da Indústria 4.0, como sensores inteligentes, *big data analytics*, *machine learning* e sistemas ciberfísicos.

Observou-se que a maioria das patentes foi depositada no escritório norte-americano (USPTO), predominantemente por organizações sediadas nos Estados Unidos. Em contraste, países latino-americanos — como o Brasil — apresentaram baixa ou nenhuma atividade patenteária relacionada ao tema, o que revela uma lacuna importante e uma oportunidade para o avanço da inovação tecnológica na região. Nesse cenário, destaca-se o inventor John P. Miller como figura central no desenvolvimento de soluções baseadas em SPM, com atuação recorrente vinculada à organização Fisher-Rosemount Systems Inc., especializada em controle de processos industriais.

A análise das classificações IPC e CPC revelou que o foco das patentes está no controle automatizado de processos, com aplicações em setores diversos, como manufatura, petroquímico, eletrônico, saúde e agronegócio. A análise qualitativa permitiu identificar cinco categorias tecnológicas principais associadas ao uso do SPM: i) monitoramento e diagnóstico de processos industriais; ii) controle estatístico multivariado; iii) gestão de situações anormais; iv) integração com sensores inteligentes e dados de imagem; e v) monitoramento de ambientes específicos. Essas categorias demonstram a versatilidade e a capacidade do SPM de atuar como tecnologia habilitadora da Indústria 4.0, promovendo controle de qualidade mais preciso, diagnóstico preditivo e tomada de decisão em tempo real.

Ao evidenciar as aplicações do SPM com tecnologias digitais, este estudo contribui para a compreensão de como o conceito de Qualidade 4.0 tem sido efetivamente operacionalizado em patentes. As soluções encontradas apontam para uma qualidade orientada por dados, responsiva e distribuída, reforçando o papel do SPM como tecnologia-chave no monitoramento inteligente de processos produtivos. Assim, a Qualidade 4.0 deixa de ser apenas uma diretriz conceitual e passa a representar um campo concreto de inovação tecnológica protegida e aplicada.

Por fim, reconhece-se como limitação deste estudo o fato de ter se baseado exclusivamente em documentos de patente, não contemplando publicações científicas ou aplicações práticas não patenteadas. Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se investigar se e como empresas nacionais aplicam práticas de SPM no contexto da Indústria 4.0, mesmo que não registrem patentes, outra oportunidade de pesquisa futura tem-se a exploração outras ferramentas da Qualidade 4.0 que já estejam associadas a soluções patenteadas.

REFERÊNCIAS

- Alsadi, J., Alkhatib, F., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., Tortorella, G., & Cudney, E. A. (2024). A systematic literature review with bibliometric analysis of Quality 4.0. *The TQM Journal*, 37(5), 1446–1470. <https://doi.org/10.1108/TQM-05-2023-0160>
- Antony, J., McDermott, O., & Sony, M. (2021). Quality 4.0 conceptualisation and theoretical understanding: A global exploratory qualitative study. *The TQM Journal*, 34(5), 1169–1188. <https://doi.org/10.1108/TQM-03-2021-0079>
- Ariffin, T. A. M. T., et al. (2022, February 16). IoT attacks and mitigation plan: A preliminary study with Machine Learning Algorithms. *2022 International Conference on Business Analytics for Technology and Security (ICBATS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICBATS54253.2022.9758933>
- Bigliardi, B., Bottani, E., & Casella, G. (2020). Enabling technologies, application areas and impact of industry 4.0: A bibliographic analysis. *Procedia Manufacturing*, 42, 322–326. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.086>

Braga, E. J., Souza, A. R., Soares, P. L. L., & Rodrigues, R. C. (2018). The role of specification in patent applications: A comparative study on sufficiency of disclosure. *World Patent Information*, 53, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2018.05.002>

Broday, E. E. (2022). The evolution of quality: From inspection to quality 4.0. *International Journal of Quality and Service Sciences*, 14(3), 368–382. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-04-2021-0056>

Colosimo, B. M., et al. (2024). Statistical process monitoring from Industry 2.0 to Industry 4.0: Insights into research and practice. *Technometrics*, 1–35. <https://doi.org/10.1080/00401706.2024.2321163>

Goedhart, R., & Woodall, W. H. (2022). Monitoring proportions with two components of common cause variation. *Journal of Quality Technology*, 54(3), 324–337. <https://doi.org/10.1080/00224065.2021.1986549>

Grzegorzczuk, T. (2020). Managing intellectual property: Strategies for patent holders. *The Journal of High Technology Management Research*, 31(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.hitech.2020.100372>

Mahmoud, M. S., Hamdan, M. M., & Baroudi, U. A. (2019). Modeling and control of cyber-physical systems subject to cyber attacks: A survey of recent advances and challenges. *Neurocomputing*, 338, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.01.091>

Mukherjee, P. S. (2015). On phase II monitoring of the probability distributions of univariate continuous processes. *Statistical Papers*, 57(2), 539–562. <https://doi.org/10.1007/s00362-014-0601-y>

Sacomano, J. B., Gonçalves, R. F., Silva, M. T., Bonilla, S. H., & Sátyro, W. C. (2018). *Indústria 4.0: Conceitos e fundamentos*. Edgard Blucher. <https://doi.org/10.5151/9788580393016>

Tang, A., Mukherjee, A., & Castagliola, P. (2024). A distribution-free Max-EWMA scheme for multi-aspect process monitoring with industrial applications. *Computers & Industrial Engineering*, 191, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109024>

Woodall, W. H., & Montgomery, D. C. (2014). Some current directions in the theory and application of statistical process monitoring. *Journal of Quality Technology*, 46(1), 72–83. <https://doi.org/10.1080/00224065.2014.11917955>

Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>

Zonnenshain, A., & Kenett, R. S. (2020). Quality 4.0—the challenging future of quality engineering. *Quality Engineering*, 32(4), 614–626. <https://doi.org/10.1080/08982112.2019.1706744>