

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO (CEP) APLICADO AO PROCESSO DE FABRICAÇÃO¹

A BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF STATISTICAL PROCESS CONTROL (SPC) APPLIED ON MANUFACTURING PROCESS

Antonio Karlos Araújo Valença*  E-mail: akavalenca@gmail.com
Rodrigo César Reis de Oliveira**  E-mail: rodrigo.oliveira@feac.ufal.br

*Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB, Brasil.

**Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, AL, Brasil.

Resumo: Neste trabalho, foi realizada uma extensa revisão bibliométrica sobre a produção científica de controle estatístico de processo, aplicada à indústria de transformação, mapeando as principais pesquisas da literatura, bem como os principais periódicos que estão publicando esta pesquisa. O controle estatístico de processo é uma das principais ferramentas que permitem aos gestores de produção determinar se os processos atendem aos requisitos pré-determinados pelos clientes, proporcionando melhor qualidade do produto e do processo. A análise ilustra a evolução da pesquisa nas últimas décadas, os principais periódicos para publicação, o nível de concentração ou fragmentação da comunidade científica e a densidade geográfica das colaborações em pesquisa. Por fim, também são apresentados os principais temas que têm sido abordados pela comunidade científica que debatem o CEP em aplicações de manufatura e pesquisas futuras para o direcionamento deste tema.

Palavras-chave: Controle Estatístico de Processo. Processo de Fabricação. Bibliometria. CEP.

Abstract: In this work, an extensive bibliometric review was carried out on the scientific production of statistical process control, applied to the manufacturing industry, mapping the main research in the literature, as well as the main journals that are publishing this research. Statistical process control is one of the main tools that allow production managers to determine whether processes meet the requirements predetermined by customers, providing better product and process quality. The analysis illustrates the evolution of research over the last decades, the main journals for publication, the level of concentration or fragmentation of the scientific community, and the geographical density of research collaborations. Finally, the main themes that have been addressed by the scientific community that debate the SPC in manufacturing applications and future research for the direction of this theme are also presented.

Keywords: Statistical Process Control. Manufacturing Process. Bibliometrics. SPC.

¹ Este trabalho fez o uso de ferramenta de Inteligência Artificial para aprimoramento e correções ortográficas.

1 INTRODUÇÃO

Em um mercado cada vez mais competitivo, uma das principais estratégias adotadas pelas empresas para obter vantagens competitivas é monitorar seus processos e obter qualidade no desenvolvimento de seus produtos (Andres-Jimenez *et al.*, 2020; Bottani *et al.*, 2023). Dentre as diversas ferramentas existentes utilizadas para avaliar a qualidade e o controle de processos no contexto da indústria de transformação, vale destacar o Controle Estatístico de Processo (CEP), que permite monitorar e controlar a qualidade da produção que normalmente precisam atender a determinadas métricas.

Existem diversas ferramentas de Controle Estatístico de Processo que são utilizadas para monitorar e controlar a qualidade dos processos produtivos. Ao escolher as ferramentas certas e interpretar corretamente os dados estatísticos coletados, é possível identificar áreas de melhoria e implementar medidas corretivas para garantir que o processo esteja operando dentro de limites estatísticos aceitáveis e produzindo produtos ou serviços de alta qualidade. Um dos mais proeminentes elementos do CEP são os gráficos de controle ou gráficos de Shewhart, que fornecem informações sobre as disfunções dos processos produtivos (Ensslin *et al.*, 2017).

Na literatura é possível encontrar trabalhos com algumas das ferramentas mais comuns que auxiliam na mensuração de dados e na tomada de decisão. Tran *et al.* (2021) utilizaram gráficos de controle unilaterais para monitorar variáveis em ciclos curtos de produção. Abbas *et al.* (2020) desenvolveram gráficos de controle com média móvel duplamente ponderada exponencialmente (DEWMA) para monitorar esquemas de amostragem de conjuntos simples.

Peksen, Acar e Malalasekera (2012) otimizaram computacionalmente o processo de colagem térmica em fibrosos porosos para melhorar a capacidade do produto e a eficiência energética. Sahay, Ghosh e Bheemarthi (2011) aplicaram a metodologia DMAIC combinada com os princípios do Lean Manufacturing e Six Sigma na melhoria do processo produtivo de alavancas de freio automotivas.

Sunadi, Purba e Hasibuan (2020) implementaram o ciclo PDCA no controle estatístico no processo de fabricação de latas de alumínio de cerveja e bebidas.

Zhao *et al.* (2009) desenvolveram um sistema inteligente de controle de qualidade baseado nos princípios da Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA).

Nos processos de fabricação, diferentes áreas de aplicação do CEP podem ser direcionadas. Estudos bibliométricos e de revisão apontaram aplicações nas áreas da indústria alimentícia (Lim; Antony; Albliwi, 2014), produção de plástico (Echchakoui; Barka, 2020), produção de automóveis (Azizi, 2015), materiais de construção (Sarkar, 2022), entre outras. Recentemente estão sendo realizadas aplicações de CEP em conjunto com a automação de processos baseados nas ferramentas da indústria 4.0 (Muller *et al.*, 2020) e a prestação de serviços na área da saúde (Gupta; Provost; Kaplan, 2023).

Portanto, as informações supracitadas apontam e exemplificam o quão vasto é a aplicação do Controle Estatístico de Processo e sua importância para o processo e controle de qualidade. Assim, este artigo tem como objetivo realizar uma extensa análise bibliométrica apresentando diversos pontos e vertentes dos estudos que focalizaram o CEP, em nível global. Ao final deste artigo, espera-se que o leitor tenha uma compreensão clara do CEP e sua aplicação na indústria, bem como uma apreciação do papel crítico que desempenha na melhoria contínua da qualidade e eficiência dos processos de produção.

2 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS (CEP)

O controle Estatístico de Processo (CEP) é um método avançado de controle de qualidade (CQ) que utiliza métodos estatísticos para detectar padrões na qualidade de bens produzidos em um processo de fabricação ou comportamentos anômalos nos serviços prestados por uma empresa (Alshraideh; Del Castilho; Del Val, 2020). Seu principal objetivo é garantir que um processo esteja funcionando dentro de limites estatísticos aceitáveis e previsíveis para minimizar defeitos e maximizar a eficiência.

Se por algum motivo houver problemas no processo, ele pode ser interrompido, quando e onde for apropriado, para identificar os erros e corrigir. Dessa forma, permite manter a qualidade no processo, minimizando perdas e tornando-o mais eficiente, para que gere produtos com qualidade que atendam aos requisitos do cliente.

O controle estatístico de processo (CEP) tornou-se popularmente conhecido através de sua aplicação no processo de recuperação e desenvolvimento da indústria japonesa após a Segunda Guerra Mundial. Os princípios desenvolvidos por Walter Shewhart envolviam a aplicação de ferramentas estatísticas para examinar processos e quando ações corretivas eram necessárias.

Posteriormente, William Edwards Deming foi capaz de implementar os princípios de controle de qualidade e melhoria dos sistemas de produção japoneses. Deming definiu sistemas como sendo uma série de funções ou atividades dentro da organização que trabalham em conjunto para atingir determinados objetivos, de modo que, se não houver determinação e comunicação efetiva entre todas as partes envolvidas, o sistema não funciona (Rienzo, 1993).

As atividades que envolvem o CEP estão na coleta regular de dados durante a produção e no uso desses dados para calcular estatísticas, como média, desvio padrão, amplitude e distribuição de probabilidade. Essas estatísticas são usadas para determinar se um processo está dentro de limites estatísticos aceitáveis ou se está produzindo resultados fora de controle, indicando a necessidade de ajustes ou correções. Diversas aplicações colocam o CEP como uma das metodologias mais usuais e eficazes no controle de processos.

Ramos (1997) comenta que as diversas vantagens de aplicar o CEP nas operações das empresas podem levar a ganhos, não só estratégicos, mas também econômicos, o que beneficia o ambiente de trabalho e motiva os colaboradores a alcançarem melhores resultados a cada dia. Por exemplo, Bahria *et al.* (2018) estudaram o impacto das estratégias de manutenção no controle de qualidade no sistema de fabricação, e Egorov, Kapitanov e Loktev (2017) a implementação de métodos estatísticos de controle de processo para reduzir os custos de produção e melhorar a qualidade de produtos.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Os estudos que tratam da bibliometria tiveram relevância destacada a partir da publicação do trabalho de Pritchard (1969) que introduziu uma metodologia de análise estatística e matemática para medir a produção acadêmica. Atualmente, a bibliometria é amplamente utilizada em trabalhos que apresentam sólidas revisões

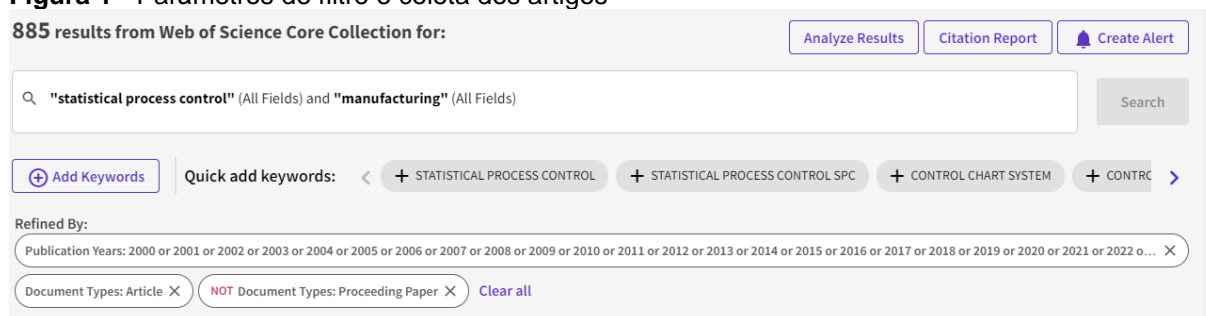
de literatura que contribuem significativamente para o entendimento e evolução do campo científico.

As técnicas bibliométricas, diferentemente das revisões de literatura, que muitas vezes carecem de rigor, conseguem mapear um campo de pesquisa sem viés subjetivo e com acurácia quantitativa (Tranfield, Denyer & Smart, 2003; Caviggioli & Ughetto, 2019).

Diversos estudos têm utilizado a técnica da bibliometria para mensurar a produção científica e construir um panorama das publicações ao longo dos anos (Durisin; Calabretta; Parmeggiani, 2010; Padilla-Ospina; Medina-Vásquez; Rivera-Godoy, 2018; Ratinho; Harms; Walsh, 2015; Sol; Grimes, 2016; Tenca; Croce; Gueto, 2018; Zhu; Guan, 2013). Este artigo seguiu a abordagem bibliométrica padrão adotada nesses trabalhos para avaliar a capacidade intelectual subjacente à estrutura central da pesquisa, bem como para abrir caminhos para futuras explorações do Controle Estatístico de Processos aplicado aos processos de fabricação.

O processo de seleção iniciou-se com a definição dos limites conceituais da pesquisa. O objetivo foi buscar artigos publicados que relacionassem a aplicação do CEP nos processos de fabricação. A base de dados escolhida foi a coleção principal da Web of Science (WoS), devido à extensa gama de periódicos indexados. Os parâmetros de filtro estão expostos na Figura 1. Os dados foram coletados e revisados em fev/2024.

Figura 1 - Parâmetros de filtro e coleta dos artigos



Fonte: Autores (2024).

Os dados coletados na etapa de busca foram organizados de duas formas. As primeiras informações foram tabuladas em planilha eletrônica para separação das informações relevantes e analisadas via Excel. Posteriormente, os dados foram
Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 23, n. 4, e-5096, 2023.

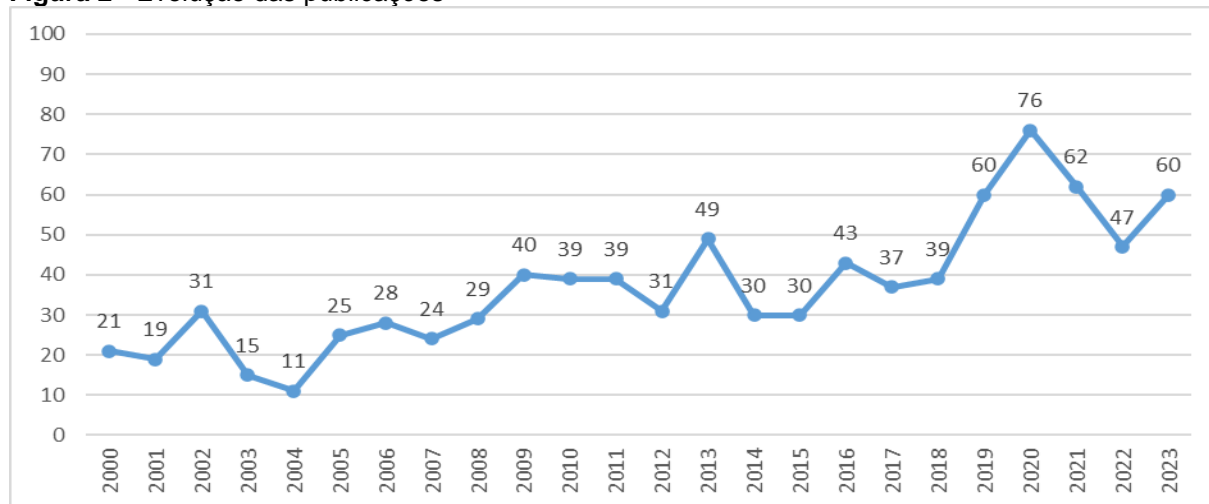
gerados em arquivos de texto para serem analisados por meio do software de mapas bibliométricos, conhecido como VOSViewer (Van Eck; Waltman, 2010). Nesse software, foram analisados os mapas de autoria e coautoria, citação, referências, mapas geográficos e periódicos. Essa dupla separação dos arquivos foi realizada devido à quantidade de trabalho retornado da busca, além de entender e detalhar os objetivos da aplicação do CEP nos processos de fabricação.

4 RESULTADOS DA PESQUISA

4.1 Análise das publicações

A Figura 2 mostra a evolução das publicações ao longo dos 23 anos. O ano com o menor quantitativo de trabalhos publicados foi 2004 com 11 artigos. No entanto o artigo dos autores Tong, Tsung e Yen (2004) foi o mais citado com 52 citações e 11 referências. Neste artigo os autores objetivaram a melhoria do nível sigma do processo de triagem na fabricação de placas de circuito interno (PCB) montadas em superfície, sendo a triagem o processo mais crítico na fabricação PCB. A ferramenta escolhida para a melhoria foi a aplicação da abordagem DMAIC.

Figura 2 - Evolução das publicações



Fonte: Autores (2024).

O maior número de artigos foi encontrado em 2020, com 76 artigos. O trabalho de Hsu *et al.* (2020) foi destaque com 70 citações e 14 referências. Neste artigo, os autores apresentam um estudo sobre diagnóstico de falhas em turbinas eólicas e manutenção preditiva por meio de controle estatístico de processos e Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 23, n. 4, e-5096, 2023.

aprendizado de máquina. Este estudo aplica técnicas estatísticas de controle de processo e aprendizado de máquina para diagnosticar falhas em turbinas eólicas e prever necessidades de manutenção, analisando 2,8 milhões de dados de sensores coletados de 31 turbinas eólicas de 2015 a 2017 em Taiwan. Os resultados indicaram um alto nível de precisão, cerca de 92,68% para o modelo de árvore de decisão e 91,98% para o modelo de floresta aleatória. O estudo demonstra que, por meio de mineração e modelagem de dados, as falhas das turbinas eólicas podem ser detectadas e as necessidades de manutenção das peças podem ser previstas.

Outro destaque foi o trabalho de Gao *et al.* (2020) que obteve 69 citações e 246 referências citadas. Neste estudo os autores realizaram uma análise de big data para fábricas inteligentes do futuro, além de discutir elementos essenciais e soluções promissoras possibilitadas pela ciência de dados que são críticas para o processamento de dados de alto volume, velocidade, variedade e baixa veracidade, para a criação de valor agregado nas fábricas inteligentes do futuro.

A distribuição das obras por categoria permite ver em qual delas as obras foram identificadas e alocadas de acordo com seu conteúdo. Para esse viés, a Tabela 1 apresenta o top 5 das categorias que apresentaram maior número de estudos juntamente com os estudos mais citados. Foram identificadas 80 categorias que possuíam pelo menos 1 trabalho publicado. Dos dados apresentados na base de dados, os maiores quantitativos foram para a categoria Engenharia de Manufatura (310), seguida por Engenharia Industrial (289) e Ciência da Gestão da Pesquisa Operacional (262).

Tabela 1 - Top 5 das categorias apresentadas pela base de dados WOS

Categoria WOS	Nº Publicações	Mais Citados
Engenharia de Manufatura	310	He e Wang (2007)
Engenharia Industrial	289	Colledani <i>et al.</i> (2014)
Ciência da Gestão da Pesquisa Operacional	262	Xie, Goh e Ranjan (2002)
Sistema de Controle de Automação	154	Zhao, Zhang e Xu (2006)
Probabilidade Estatística	128	Zou, Tsung e Wang (2007)

Fonte: Autores (2024).

A análise por segmento traz a preferência para que os trabalhos sejam focados na resolução de problemas, melhoria de processos ou algum estudo específico. Para a classificação dos artigos, foi necessário analisar os títulos e resumos para identificar qual segmento o trabalho abordava. Uma classificação semelhante foi apresentada no trabalho de Caviggioli e Ughetto (2019), no qual os autores classificaram as obras em três segmentos, indústria, negócios e sociedade. Assim, os empregos foram classificados em duas categorias principais, indústria/manufatura (81,36%) e serviços (10,17%). No entanto, alguns estudos focaram seus objetivos na combinação de atividades da indústria e dos serviços, por isso foram colocados em uma categoria específica, ambos os segmentos (6,78%), e os trabalhos que não puderam ser categorizados por tratarem de trabalhos experimentais ou simulação de dados, foram classificados como N/A (1,69%), como pode ser observado no Tabela 2.

Tabela 2 - Distribuição de Papéis sobre CEP por segmento de atividade

Segmento	Nº Artigos	% Nº Artigos
Indústria/Manufatura	720	81,36%
Serviço	90	10,17%
Ambos os Segmentos	60	6,78%
N/A	15	1,69%
Total	855	100%

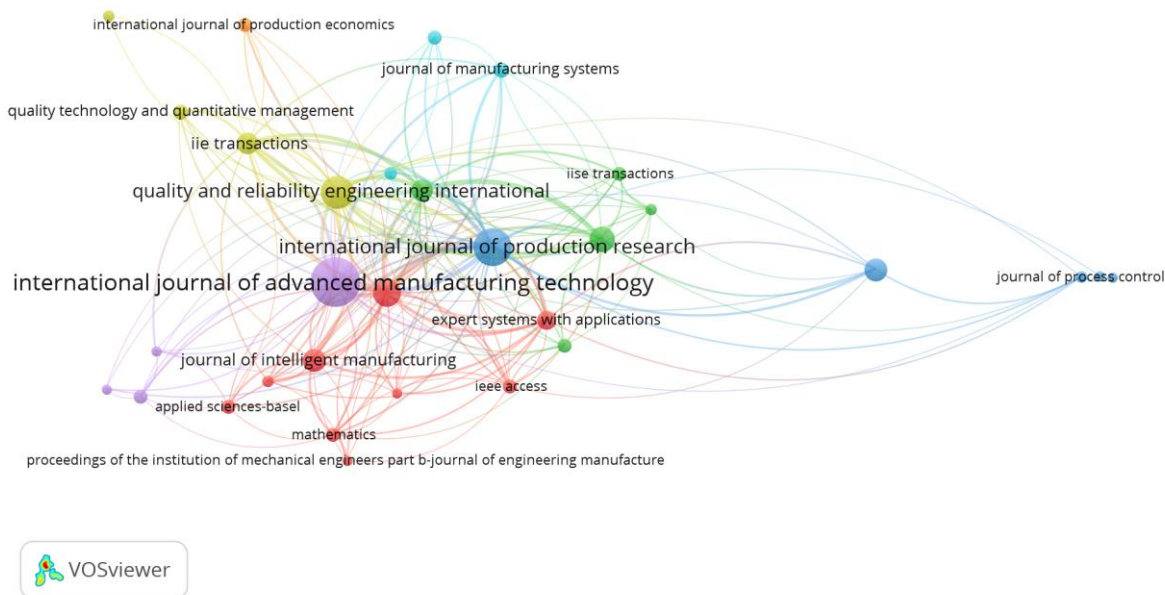
Fonte: Autores (2024).

4.2 Análise de periódicos

Bradford (1934) afirma que a análise por periódicos possibilita compreender a produtividade dessas fontes de informação, permitindo uma avaliação dos trabalhos publicados. Nesse sentido, a Figura 3 apresenta o mapa da rede de ocorrência com os periódicos que publicaram trabalhos sobre o tema. O mapa foi gerado no software VOSViewer e 266 periódicos foram identificados. No entanto, apenas 31 fontes mostraram ligação, em termos de publicação, com outros periódicos nos quais publicaram trabalhos. A Tabela 4 apresenta o ranking Top 10, com destaque para a revista intitulada International Journal of Advanced Manufacturing Technology com 121 artigos, identificados no cluster verde. Dentre os artigos mais citados, destaca-se o trabalho de Woodall (2000), com 291 citações, publicadas no Journal

of Quality Technology, identificadas no cluster azul. A associação por clusters permite identificar os periódicos que tratam de assuntos de uma mesma área.

Figura 3 - Mapa da rede de periódicos



Fonte: Autores (2024).

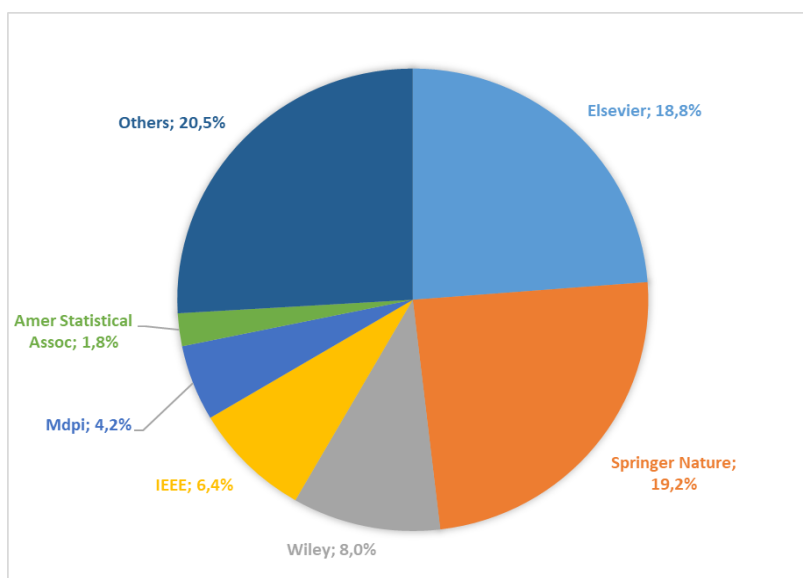
Tabela 3 - Top 10 de periódicos

Periódico	Nº Documentos	Mais Citados	Nº Citação
International Journal of Advanced Manufacturing Technology	114	Saghaei <i>et al.</i> (2009)	86
International Journal of Production Research	66	Hassan <i>et al.</i> (2003)	110
Quality and Reliability Engineering International	52	Wang e Tsung (2005)	98
Computers & Industrial Engineering	37	Hwarng e Hubele (1993)	93
Journal of Quality Technology	29	Woodall (2000)	291
IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing	25	He e Wang (2007)	288
Journal of Intelligent Manufacturing	25	Zorriassatine e Tannock (1998)	106
Technometrics	23	Zou, Tsung e Wang (2007)	201
IIE Transactions	22	Cassady <i>et al.</i> (2000)	101
Expert System with Applications	17	Yu (2011)	101

Fonte: Autores (2024).

Dentro da análise das revistas, buscou-se apresentar as principais editoras nas quais essas revistas estão registradas. A Figura 4 mostra a distribuição das editoras, com destaque para Taylor & Francis (21,1%), Springer Nature (19,2%) e Elsevier (18,8%) que correspondem a cerca de 60% do total de editoras.

Figura 4 - Distribuição das principais editoras dos periódicos



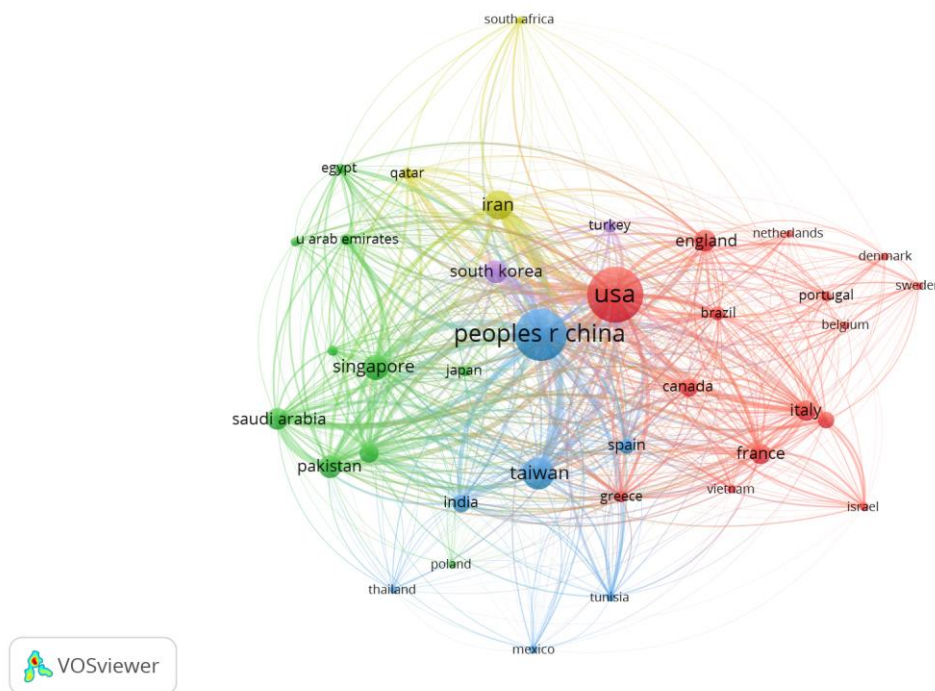
Fonte: Autores (2024).

4.3 Análise por Região Geográfica e Afiliações

Dados sobre as afiliações institucionais dos autores dos artigos examinados são úteis para compreender a abrangência geográfica da amostra estudada. Foram identificadas 869 organizações (sendo 851 instituições de ensino, ou seja, Centros de Pesquisa e Universidades) e 73 países (29 na Europa, 27 na Ásia, 9 na América, 8 na África e 2 na Oceania). Esta análise teve como objetivo identificar os principais países de pesquisa sobre o CEP nos processos de fabricação. Para entender esses dados, a Figura 5 foi gerada através do VOSViewer e ilustra o mapa de colaboração entre países. Os dados da pesquisa confirmam que os três países com maior número de publicações foram Estados Unidos, China e Taiwan, com 237, 210 e 76 publicações, respectivamente. Com base nesses dados e tendo o entendimento histórico de que o CEP foi originalmente desenvolvido por Engenheiros e Pesquisadores dos Estados Unidos, deve-se afirmar que este país tem a

predominância no desenvolvimento de pesquisas que buscam aprimorar a aplicação dessa ferramenta de gestão nos processos de fabricação.

Figura 5 - Mapa de conexões entre países dos autores que publicaram artigos



Fonte: Autores (2024).

Por fim, a Tabela 5 apresenta as melhores colocações entre as instituições que possuíam autores afiliados, com destaque para a Hong Kong University of Science Technology, com 37 artigos produzidos por autores da instituição. Nos Estados Unidos, destacam-se a Pennsylvania University e Virginia Tech University, com 23 e 19 artigos publicados sobre CEP, respectivamente.

Tabela 4 – Instituições que mais publicaram perfilados com seus países

Instituição	País	Nº Artigos
Hong Kong University of Science Technology	China	37
Nanyang Technology University	Singapura	27
Shanghai Jiao Tong University	China	26
National University of Singapore	Singapura	23
Pennsylvania State University	Estados Unidos	23
Virginia Polytechnic Institute State University	Estados Unidos	19

Fonte: Autores (2024).

4.4 Análise Bibliométrica de Autoria

Nesta seção, são apresentados os resultados bibliométricos relacionados à autoria e coautoria dos trabalhos. A informação organizada no VOSViewer conta com 2135 autores de obras, sendo os 3 mais prolíficos, Fu-Gee Tzung (31 obras), Zhang Wu (17 obras) e Muhammed Riaz (16 obras). O artigo de Tzung (2000) destacou-se com 48 citações, Wu *et al.* (2010) obteve 51 citações e Riaz *et al.* (2014) foram citados em 29 trabalhos. O Quadro 6 mostra a distribuição dos artigos por número de autores. O maior número de autores (12) foi encontrado nos trabalhos de Silva *et al.* (2017) e Zhao *et al.* (2023). As configurações mais frequentes nas publicações são grupos de dois, três ou quatro autores (78,5%). Pode-se dizer que essas evidências sugerem que os estudos sobre CEP são realizados por pequenos grupos de estudiosos, e isso parece ser coerente devido ao número de artigos encontrados no conjunto de dados que foram processados na elaboração desta pesquisa.

Tabela 5 - Número de artigos do CEP por número de autores

Nº Autores	Nº de Artigos	%
1	67	7,6%
2	235	26,6%
3	274	31,1%
4	186	21,1%
5	64	7,2%
6	26	2,9%
7	16	1,8%
8	7	0,8%
9	5	0,6%
10	2	0,2%
11	1	0,1%
12	2	0,1%
Total	885	100%

Fonte: Autores (2024).

As informações dos autores que estudaram e publicaram artigos sobre CEP foram organizadas no Tabela 7, agrupadas em um ranking top 5. A Tabela também apresenta os países desses autores, suas afiliações, número de artigos publicados e número de citações em periódicos indexados na Web of Science. O primeiro autor do ranking foi Fu-Gee Tzung com 29 artigos (2,3% do total de artigos), explicando sobre a medição do desempenho do processo através de dados via gráficos e

ferramentas de CEP. O segundo autor mais citado foi Zhang Wu com 51 citações e 23 artigos produzidos.

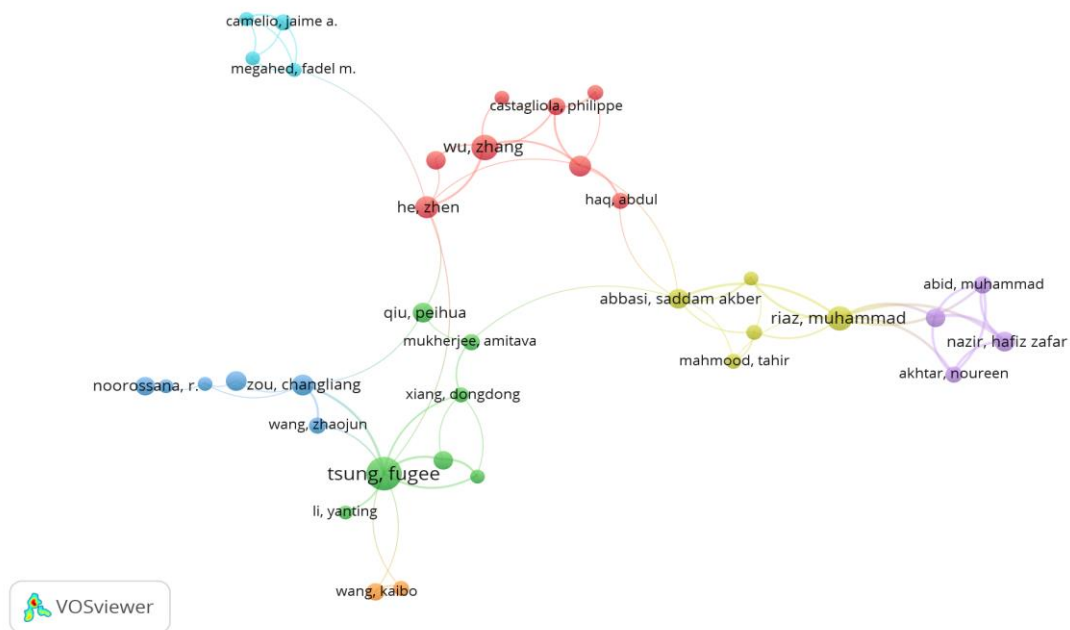
Tabela 6 - Autores mais prolíficos por número de artigos e por número de citações na Web of Science

Autor	País	Filiação	Nº Artigos	Nº de Citações (WOS)
Tsung, FG.	China	Nankai University	29	138
Wu, Z.	Singapura	Nanyang Technology University	23	51
Riaz, M.	Arábia Saudita	King Fahd University of Petroleum and Minerals	18	58
Xie, M.	Singapura	National University of Singapore	16	175
Shamsuzzaman, M.	Singapura	National University of Singapore	15	34

Fonte: Autores (2024)

Para compreender a rede de conexões entre os autores, foi elaborado um mapa de rede através do VOSVier, mostrado na Figura 6. Foram identificados cerca de 7 clusters agrupados por similaridade de conteúdo. O cluster vermelho tem a maior associação com 8 autores, com destaque para o autor Zhang Wu (17 artigos). No cluster verde há 7 autores associados com destaque para Fu-Gee (29 artigos) como autor principal do grupo. O cluster azul possui 6 autores com destaque para Amirhossein Amiri (10 artigos). O cluster amarelo possui 5 autores com destaque para Muhammad Raiz (16 artigos). Os agrupamentos lilás e azul claro apresentaram o mesmo número de autores associados (4), com destaque para os autores Hafiz Zafar Nazir (10 artigos) e Jaime Camelio (7 artigos), respectivamente. Por fim, o cluster laranja apresentou 2 autores com destaque para Kaibo Wang com 8 trabalhos.

Figura 6 - Mapa de rede entre autores e coautores dos trabalhos analisados



Fonte: Autores (2024).

4.5 Perspectivas de Pesquisas Futuras

Através do mapa de rede das palavras-chave, é possível visualizar as perspectivas de pesquisas futuras, envolvendo o CEP nos processos de fabricação. O mapa da Figura 7 mostra a ocorrência das palavras em função do ano em que apareceram, quanto mais clara a coloração do círculo, mais recente a ocorrência da palavra. Um mínimo de 15 ocorrências foi estabelecido como métrica para sua visualização clara. Com base nas informações geradas pelo VOSViewer, a ocorrência da palavra Machine Learning data relevância no ano de 2019, em verde, e se conecta com as palavras controle de processo, previsão, multivariada, análise de componentes independentes, diagnóstico de falhas de controle de qualidade.

Um dos primeiros artigos a sugerir o uso de técnicas de ciência de dados para melhorar as técnicas de CEP foi Kourtí e Macgregor (1996). Neste trabalho, os autores propõem gráficos de controle multivariados tradicionais baseados na estatística X^2 e T^2 . Métodos são sugeridos para detectar as variáveis que contribuem para o sinal fora de controle do gráfico multivariado. Os métodos são ilustrados em um processo simulado de um reator de polietileno de alta pressão e baixa

Tabela 7 - Autores que pesquisaram Machine Learning em Controle Estatístico de Processo

Autor	Periódico
Acosta and Sant'Anna (2022)	International Journal of Quality & Reliability Management
Chou <i>et al.</i> (2020)	Computers & Industrial Engineering
Hsu <i>et al.</i> (2020)	Ieee Access
Ke and Huang (2021)	Polymers
Khoza and Grobler (2019)	Progress in Artificial Intelligence: 19th EPIA Conference on Artificial Intelligence
Liu <i>et al.</i> (2020)	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology

Fonte: Autores (2024).

Trabalhos recentes (Yeganeh *et al.*, 2023; Lee, 2023) fizeram abordagens de controle de processos integradas ao machine learning para evitar erros na interpretação de gráficos, devido ao grande volume de dados gerados nos processos produtivos. Os gráficos de controle têm sido amplamente utilizados como método de monitoramento de processos on-line, no processo de detecção de ocorrências de falhas operacionais durante sua execução (Chan *et al.*, 2002; He, 2013; Yu; Xi, 2009). No entanto, como os gráficos de controle assumem que os dados do processo são normalmente distribuídos, eles não funcionam tão bem quando assumem suposições para interpretação fora de controle (Lee, 2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo buscou apresentar uma vasta análise bibliométrica da produção científica sobre Controle Estatístico de Processo, aplicada à manufatura para compreender o que vem sendo estudado sobre esse tema e abrir caminhos para novas perspectivas de trabalhos futuros que possam melhorar o controle e a qualidade de processos e produtos. A estratégia utilizada levou à seleção de 885 artigos encontrados na base de dados Web of Science. Foram identificadas publicações inerentes às áreas relacionadas à cadeia de suprimentos, modelos de negócios, redução de custos, atendimento aos requisitos dos consumidores, gestão da manutenção e aspectos ambientais.

Três categorias se destacaram com o maior número de artigos, sendo Engenharia de Manufatura, Engenharia Industrial e Ciência da Gestão da Pesquisa Operacional, respectivamente. O periódico de maior destaque foi o The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (114 artigos) e a editora com mais

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 23, n. 4, e-5096, 2023.

artigos indexados foi a Elsevier (18,8%). O ano de 2020 despontou com o maior número de publicações sobre o Controle Estatístico de Processos. Esse achado aponta para as áreas em que a literatura mais se desenvolve com relação à maioria das pesquisas sobre o impacto do Controle Estatístico de Processo nos processos de fabricação.

Os principais resultados da análise bibliométrica podem ser resumidos e apresentados a seguir:

- a) A literatura científica que trata do Controle Estatístico de Processo envolveu 266 periódicos, 869 instituições, 73 países e 2135 autores em todo o mundo, mas concentra-se basicamente em dez periódicos que cobrem mais de 30% da amostra identificada.
- b) Os autores com maior relevância nas publicações sobre Controle Estatístico de Processo em manufaturas foram Fu-Gee Tsung e Zhang Wu. O trabalho com maior número de citações foi He e Wang (2007) com 307 citações e o maior número de autores (12) foi encontrado nos trabalhos de Silva *et al.* (2017) e Zhao *et al.* (2023).
- c) Estados Unidos, China e Taiwan foram os países com maior número de publicações sobre Controle Estatístico de Processo, correspondendo a mais de 50% da amostra analisada. A Hong Kong University of Science Technology (China), Nanyang Technology University (Singapura), Shanghai Jiao Tong University (China) foram as instituições que mais realizaram estudos sobre Controle Estatístico de Processos.
- d) Os autores e as instituições estão dispersos, e a cooperação entre os estudiosos ainda é limitada, no sentido de colaboração entre países. A conectividade limitada dos autores e a presença de pouquíssimos autores-chave como nós centrais no mapa da rede de citações denota certa fragmentação no campo de estudo do Controle Estatístico de Processos, tornando o debate limitado a poucos grupos específicos.

Este trabalho não está isento de limitações, pelo contrário, é necessário acompanhar constantemente o que está sendo divulgado sobre a aplicação e o monitoramento do Controle Estatístico de Processo nos processos de fabricação, tendo em vista o avanço gradativo das ferramentas tecnológicas que auxiliam os gestores de produção e estudiosos da área. Pesquisas recentes estão trazendo o

aprendizado de máquina como uma poderosa ferramenta auxiliar para controle e monitoramento de processos usando tabelas e gráficos de controle. Isso reflete o poder da aplicação de técnicas de classificação automatizadas, que, embora mais precisas, são mais objetivas e úteis para explorar amostras maiores.

Portanto, entende-se que o impacto das pesquisas no Controle Estatístico de Processo ainda necessita de maiores investigações, uma vez que os processos estão em constante avanço para melhorias e reduções de perdas nas indústrias de transformação. Assim, esta revisão bibliométrica poderá servir como ponto de partida para ampliar ainda mais a análise nos próximos anos. Acredita-se que este trabalho possa fornecer uma direção para pesquisadores que enfrentam o desafio de explorar as contribuições existentes sobre o impacto dos CEP nos processos de fabricação.

REFERÊNCIAS

ABBAS, Nasir. Homogeneously weighted moving average control chart with an application in substrate manufacturing process. **Computers & Industrial Engineering**, v. 120, p. 460-470, 2018.

ABBAS, Zameer *et al.* Enhanced nonparametric control charts under simple and ranked set sampling schemes. **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, v. 42, n. 14, p. 2744-2759, 2020.

ACOSTA, Simone Massulini; SANT'ANNA, Angelo Marcio Oliveira. Machine learning-based control charts for monitoring fraction nonconforming product in smart manufacturing. **International Journal of Quality & Reliability Management**, n. ahead-of-print, 2022.

ALSHRAIDEH, Hussam; DEL CASTILLO, Enrique; DEL VAL, Alain Gil. Process control via random forest classification of profile signals: An application to a tapping process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 58, p. 736-748, 2020.

ANDRES-JIMENEZ, Jose *et al.* An Intelligent Framework for the Evaluation of Compliance with the Requirements of ISO 9001: 2015. **Sustainability**, v. 12, n. 13, p. 5471, 2020.

ARGOUD, M. *et al.* 300mm pilot line DSA contact hole process stability. In: **Alternative Lithographic Technologies VI. SPIE**, 2014. p. 474-484.

AZIZI, Amir. Evaluation improvement of production productivity performance using statistical process control, overall equipment efficiency, and autonomous maintenance. **Procedia manufacturing**, v. 2, p. 186-190, 2015.

BAHRIA, Nadia *et al.* Maintenance and quality control integrated strategy for manufacturing systems. **European Journal of Industrial Engineering**, v. 12, n. 3, p. 307-331, 2018.

BEDFORDJONES, P. E. The application of statistical process-control (spc) in the manufacturing of steel tubing. In: **CIM BULLETIN**. 101 6TH AVE SW, STE 320, CALGARY AB T2P 3P4, CANADA: CANADIAN INST MINING METALLURGY PETROLEUM, 1984. p. 57-57.

BOTTANI, Eleonora *et al.* Statistical process control of assembly lines in manufacturing. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 32, p. 100435, 2023.

BRADFORD, Samuel C. Sources of information on specific subjects. **Engineering**, v. 137, p. 85-86, 1934.

CASSADY, C. Richard *et al.* Combining preventive maintenance and statistical process control: a preliminary investigation. **IIE Transactions**, v. 32, p. 471-478, 2000.

CAVIGGIOLI, Federico; UGHETTO, Elisa. A bibliometric analysis of the research dealing with the impact of additive manufacturing on industry, business and society. **International journal of production economics**, v. 208, p. 254-268, 2019.

CHAN, L. Y. *et al.* Cumulative probability control charts for geometric and exponential process characteristics. **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 1, p. 133-150, 2002.

CHI, Hoi-Ming *et al.* Machine learning and genetic algorithms in pharmaceutical development and manufacturing processes. **Decision Support Systems**, v. 48, n. 1, p. 69-80, 2009.

CHOU, Shih-Hsiung *et al.* Implementation of statistical process control framework with machine learning on waveform profiles with no gold standard reference. **Computers & Industrial Engineering**, v. 142, p. 106325, 2020.

COATES, P. D.; SPEIGHT, R. G. Towards intelligent process control of injection moulding of polymers. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 209, n. 5, p. 357-367, 1995.

COLLEDANI, Marcello *et al.* Design and management of manufacturing systems for production quality. **Cirp Annals**, v. 63, n. 2, p. 773-796, 2014.

DURISIN, Boris; CALABRETTA, Giulia; PARMEGGIANI, Vanni. The intellectual structure of product innovation research: a bibliometric study of the journal of product

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 23, n. 4, e-5096, 2023.

innovation management, 1984–2004. **Journal of Product Innovation Management**, v. 27, n. 3, p. 437-451, 2010.

ECHCHAKOUI, Saïd; BARKA, Noureddine. Industry 4.0 and its impact in plastics industry: A literature review. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 20, p. 100172, 2020.

EGOROV, Sergey; KAPITANOV, Alexey; LOKTEV, Dmitriy. Implementation of statistical process control methods as a way to reduce production costs and improve product quality. In: **MATEC Web of Conferences. EDP Sciences**, 2017.

ENSSLIN, Leonardo *et al.* Avaliação de desempenho na aplicação do controle estatístico de processos: seleção de referencial teórico internacional e análise bibliométrica. **Revista Alcance**, v. 24, n. 3, p. 396-412, 2017.

ESMONDE-WHITE, Karen A. *et al.* Raman spectroscopy as a process analytical technology for pharmaceutical manufacturing and bioprocessing. **Analytical and bioanalytical chemistry**, v. 409, n. 3, p. 637-649, 2017.

GAO, Robert X. *et al.* Big data analytics for smart factories of the future. **CIRP annals**, v. 69, n. 2, p. 668-692, 2020.

GODINHO FILHO, Moacir; GANGA, Gilberto Miller Devós; GUNASEKARAN, Angappa. Lean manufacturing in Brazilian small and medium enterprises: implementation and effect on performance. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 24, p. 7523-7545, 2016.

GUPTA, Munish; PROVOST, Lloyd P.; KAPLAN, Heather C. Challenging Cases in Statistical Process Control for Quality Improvement in Neonatal Intensive Care. **Clinics in Perinatology**, 2023.

HASSAN, Adnan *et al.* Improved SPC chart pattern recognition using statistical features. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 7, p. 1587-1603, 2003.

HE, Q. Peter; WANG, Jin. Fault detection using the k-nearest neighbor rule for semiconductor manufacturing processes. **IEEE transactions on semiconductor manufacturing**, v. 20, n. 4, p. 345-354, 2007.

HE, Shu-Guang; HE, Zhen; WANG, Gang A. Online monitoring and fault identification of mean shifts in bivariate processes using decision tree learning techniques. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 24, p. 25-34, 2013.

HSU, Jyh-Yih *et al.* Wind turbine fault diagnosis and predictive maintenance through statistical process control and machine learning. **Ieee Access**, v. 8, p. 23427-23439, 2020.

HUNT, S. J. The IBM statistical process control implementation program: an interactive videodisc approach. In: **1991 Proceedings IEEE/SEMI International Semiconductor Manufacturing Science Symposium**. IEEE, 1991. p. 1-3.

HWARNG, H. Brian; HUBELE, Norma Faris. Back-propagation pattern recognizers for X control charts: methodology and performance. **Computers & Industrial Engineering**, v. 24, n. 2, p. 219-235, 1993.

KE, Kun-Cheng; HUANG, Ming-Shyan. Quality classification of injection-molded components by using quality indices, grading, and machine learning. **Polymers**, v. 13, n. 3, p. 353, 2021.

KHANZADEH, Mojtaba *et al.* Dual process monitoring of metal-based additive manufacturing using tensor decomposition of thermal image streams. **Additive Manufacturing**, v. 23, p. 443-456, 2018.

KHOZA, Sibusiso C.; GROBLER, Jacomine. Comparing machine learning and statistical process control for predicting manufacturing performance. In: **EPIA conference on artificial intelligence**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 108-119.

KIM, Dongil *et al.* Machine learning-based novelty detection for faulty wafer detection in semiconductor manufacturing. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 4, p. 4075-4083, 2012.

KOURTI, Theodora; MACGREGOR, John F. Multivariate SPC methods for process and product monitoring. **Journal of quality technology**, v. 28, n. 4, p. 409-428, 1996.

LEE, Chang Ki. The RNVP-based process monitoring with transforming non-normal data to multivariate normal data. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 118, p. 105623, 2023.

LIM, Sarina Abdul Halim; ANTONY, Jiju; ALBLIWI, Saja. Statistical Process Control (SPC) in the food industry—A systematic review and future research agenda. **Trends in food science & technology**, v. 37, n. 2, p. 137-151, 2014.

LIU, Jia *et al.* Machine learning-driven in situ process monitoring with vibration frequency spectra for chemical mechanical planarization. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 111, p. 1873-1888, 2020.

MULLER, Thomas *et al.* Why and how to move from SPC (statistical process control) to APC (automated process control). In: **Design and Modeling of Mechanical Systems-IV: Proceedings of the 8th Conference on Design and Modeling of Mechanical Systems, CMSM'2019, March 18–20, Hammamet, Tunisia**. Springer International Publishing, 2020. p. 33-40.

NICOLAY, Christopher R. *et al.* Systematic review of the application of quality improvement methodologies from the manufacturing industry to surgical healthcare. **Journal of British Surgery**, v. 99, n. 3, p. 324-335, 2012.

PADILLA-OSPINA, Ana Milena; MEDINA-VÁSQUEZ, Javier Enrique; RIVERA-GODOY, Jorge Alberto. Financing innovation: A bibliometric analysis of the field. **Journal of Business & Finance Librarianship**, v. 23, n. 1, p. 63-102, 2018.

PAPADOPOULOS, Chrissoleon T.; LI, Jingshan; O'KELLY, Michael EJ. A classification and review of timed Markov models of manufacturing systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 128, p. 219-244, 2019.

PEKSEN, Murat; ACAR, Memis; MALALASEKERA, Weeratunge. Computational optimisation of the thermal fusion bonding process in porous fibrous media for improved product capacity and energy efficiency. In: **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 226, n. 4, p. 316-323, 2012.

PRITCHARD, Alan. Statistical bibliography or bibliometrics. **Journal of documentation**, v. 25, p. 348, 1969.

QURESHI, Karishma M. *et al.* Assessing Lean 4.0 for Industry 4.0 Readiness Using PLS-SEM towards Sustainable Manufacturing Supply Chain. **Sustainability**, v. 15, n. 5, p. 3950, 2023.

RAMOS, Alberto Wunderler. Controle estatístico de processo. **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a serviço da modernização da empresa**, v. 2, 1997.

RATINHO, Tiago; HARMS, Rainer; WALSH, Steven. Structuring the technology entrepreneurship publication landscape: Making sense out of chaos. **Technological forecasting and social change**, v. 100, p. 168-175, 2015.

RIAZ, Muhammad *et al.* On efficient phase II process monitoring charts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, p. 2263-2274, 2014.

RIENZO, Thomas F. Planning Deming management for service organizations. **Business Horizons**, v. 36, n. 3, p. 19-30, 1993.

SACHS, Emanuel; HU, Albert; INGOLFSSON, Armann. Run by run process control: Combining SPC and feedback control. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**, v. 8, n. 1, p. 26-43, 1995.

SAGHAEI, Abbas; MEHRJOO, Marzieh; AMIRI, Amirhossein. A CUSUM-based method for monitoring simple linear profiles. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 45, p. 1252-1260, 2009.

SAHAY, Chittaranjan; GHOSH, Suhash; BHEEMARTHI, Pradeep Kumar. Process improvement of brake lever production using DMAIC (+). In: **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. 2011. p. 801-826.

SARKAR, Debasis. Advanced materials management for Indian construction industry by application of statistical process control tools. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 6934-6939, 2022.

SCHONBERGER, Richard J. Total quality management cuts a broad swath—through manufacturing and beyond 078. **Organizational Dynamics**, v. 20, n. 4, p. 16-28, 1992.

SILVA, A. F. *et al.* Multivariate statistical process control of a continuous pharmaceutical twin-screw granulation and fluid bed drying process. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 528, n. 1-2, p. 242-252, 2017.

STAAL, R.; RATHERT, H.; SCHLOSSER, G. Statistical Process-Control (SPC) and Automatic Process-Control (APC). **Chemie Ingenieur Technik**, v. 66, n. 1, p. 40-49, 1994.

SUN, Yutao; GRIMES, Seamus. The emerging dynamic structure of national innovation studies: a bibliometric analysis. **Scientometrics**, v. 106, p. 17-40, 2016.

SUNADI, Sunadi; PURBA, Humiras Hardi; HASIBUAN, Sawarni. Implementation of statistical process control through PDCA cycle to improve potential capability index of drop impact resistance: a case study at aluminum beverage and beer cans manufacturing industry in Indonesia. **Quality Innovation Prosperity**, v. 24, n. 1, p. 104-127, 2020.

TENCA, Francesca; CROCE, Annalisa; UGHETTO, Elisa. Business angels research in entrepreneurial finance: A literature review and a research agenda. **Contemporary Topics in Finance: A Collection of Literature Surveys**, p. 183-214, 2019.

TOMBA, Emanuele *et al.* Latent variable modeling to assist the implementation of Quality-by-Design paradigms in pharmaceutical development and manufacturing: A review. **International journal of pharmaceutics**, v. 457, n. 1, p. 283-297, 2013.

TRAN, Kim Duc *et al.* One-sided Shewhart control charts for monitoring the ratio of two normal variables in short production runs. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 69, p. 273-289, 2021.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British journal of management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003.

TSUNG, Fu-gee. Statistical monitoring and diagnosis of automatic controlled processes using dynamic PCA. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 3, p. 625-637, 2000.

VAN ECK, Nees; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010.

WANG, Kaibo; TSUNG, Fugee. Using profile monitoring techniques for a data-rich environment with huge sample size. **Quality and reliability engineering international**, v. 21, n. 7, p. 677-688, 2005.

WOODALL, William H. Controversies and contradictions in statistical process control. **Journal of quality technology**, v. 32, n. 4, p. 341-350, 2000.

WU, Zhang *et al.* A combined synthetic&X chart for monitoring the process mean. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 24, p. 7423-7436, 2010.

XIE, Min; GOH, Thong Ngee; RANJAN, Priya. Some effective control chart procedures for reliability monitoring. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 77, n. 2, p. 143-150, 2002.

YAO, Yuan; GAO, Furong. A survey on multistage/multiphase statistical modeling methods for batch processes. **Annual Reviews in Control**, v. 33, n. 2, p. 172-183, 2009.

YE, Zehao *et al.* In-situ point cloud fusion for layer-wise monitoring of additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 61, p. 210-222, 2021.

YEGANEH, Ali *et al.* A network surveillance approach using machine learning based control charts. **Expert Systems with Applications**, v. 219, p. 119660, 2023.

YU, Jian-Bo. Bearing performance degradation assessment using locality preserving projections. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 6, p. 7440-7450, 2011.

YU, Jian-bo; XI, Li-feng. A neural network ensemble-based model for on-line monitoring and diagnosis of out-of-control signals in multivariate manufacturing processes. **Expert systems with applications**, v. 36, n. 1, p. 909-921, 2009.

ZHAO, Fang *et al.* 1H NMR-based process understanding and biochemical marker identification methodology for monitoring CHO cell culture process during commercial-scale manufacturing. **Biotechnology Journal**, p. 2200616, 2023.

ZHAO, Xiuxu *et al.* Research and application of intelligent quality control system based on FMEA repository. In: **2009 International Conference on Information Technology and Computer Science**. IEEE, 2009. p. 514-517.

ZHU, Wenjia; GUAN, Jiancheng. A bibliometric study of service innovation research: based on complex network analysis. **Scientometrics**, v. 94, n. 3, p. 1195-1216, 2013.

ZORRIASSATINE, F.; TANNOCK, J. D. T. A review of neural networks for statistical process control. **Journal of intelligent manufacturing**, v. 9, p. 209-224, 1998.

ZOU, Changliang; TSUNG, Fugee. A multivariate sign EWMA control chart. **Technometrics**, v. 53, n. 1, p. 84-97, 2011.

SCHEMES, Moving Average. Monitoring General Linear Profiles Using Multivariate Exponentially Weighted. **Technometrics**, v. 49, n. 4, 2007.

AUTORES

Antonio Karlos Araújo Valença

Doutorando em Engenharia Mecânica na Universidade Federal da Paraíba. Mestrado em Engenharia Mecânica com ênfase na área de Processos de Fabricação pela Universidade Federal da Paraíba (PPGEM/UFPB). Graduado em Engenharia de Produção pela Faculdade de Administração e Negócios de Sergipe (FANESE). Ex-Professor Substituto (2022-2023) no Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DEP/UFRN).

Rodrigo César Reis de Oliveira

Doutor em Administração pelo Núcleo de Pós-Graduação em Administração da UFBA (NPGA-UFBA). Mestre em Administração pelo Programa de Pós-graduação em Administração da UFPE (PROPAD-UFPE). Graduado em Administração pela Universidade Federal da Paraíba. Professor Adjunto da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade (FEAC), da Universidade Federal de Alagoas. Professor de graduação e do Mestrado Profissional em Administração Pública (PROFIAP-UFAL).



Artigo recebido em: 02/12/2023 e aceito para publicação em: 21/02/2024
DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i4.5096>