

INTEGRAÇÃO ENTRE QUALIDADE, MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO NA REDUÇÃO DA VARIABILIDADE OPERACIONAL EM PROCESSOS QUÍMICOS: UM ESTUDO DE CASO

INTEGRATION BETWEEN QUALITY, MAINTENANCE, AND OPERATIONS IN
REDUCING OPERATIONAL VARIABILITY IN CHEMICAL PROCESSES: A Case Study

Fabricao Marco Pereira Assumpcao¹

RESUMO: A indústria química exige controle rigoroso para reduzir variabilidade operacional e garantir eficiência produtiva. Este estudo analisa a aplicação integrada de práticas de melhoria contínua, controle de qualidade e manutenção industrial. Trata-se de pesquisa aplicada, qualitativa com suporte quantitativo, realizada por meio de estudo de caso em unidade produtiva, com dados obtidos de registros operacionais e relatórios internos. Os resultados indicam redução de falhas, maior estabilidade dos processos, diminuição do retrabalho e aumento da eficiência da manutenção. Conclui-se que a integração dessas práticas contribui para a confiabilidade e o desempenho industrial.

Palavras-chave: Variabilidade operacional. Indústria química. Controle de qualidade. Manutenção industrial.

ABSTRACT: The chemical industry requires strict control to reduce operational variability and ensure productive efficiency. This study analyzes the integrated application of continuous improvement practices, quality control, and industrial maintenance. It is applied research, qualitative with quantitative support, conducted through a case study in a production unit, with data obtained from operational records and internal reports. The results indicate a reduction in failures, greater process stability, decreased rework, and increased maintenance efficiency. It is concluded that the integration of these practices contributes to industrial reliability and performance.

Keywords: Operational variability. Chemical industry. Quality control. Industrial maintenance.

I. INTRODUÇÃO

A transformação tecnológica, especialmente nas últimas décadas, tem causado profundas mudanças no setor industrial, notadamente na indústria química, onde os processos produtivos se tornaram fortemente dependentes de sistemas automatizados e do controle rigoroso de variáveis operacionais essenciais. Assim, a crescente competitividade no mercado

¹Téc. em Química e mecatrônica - operador de processo.

global exige que as empresas implementem práticas voltadas para a melhoria contínua, a diminuição de erros e o aumento da eficiência na produção.

Nesse contexto, estudos recentes têm avançado na proposição de modelos integrados que articulam produção, manutenção e controle da qualidade como forma de reduzir a variabilidade operacional de maneira sistêmica. Esses modelos consideram que a degradação de equipamentos influencia diretamente a variabilidade dos processos, afetando tanto a média quanto a dispersão das características de qualidade dos produtos (TASIAS, 2022; LV et al., 2024; WANG et al., 2019).

Além disso, evidências indicam que a integração entre monitoramento estatístico de processos e políticas de manutenção permite a identificação precoce de desvios operacionais, contribuindo para a redução de falhas e custos produtivos (BAHRIA et al., 2018; CHENG et al., 2018).

Em ambientes industriais complexos, como os processos químicos, essa integração se torna ainda mais relevante, uma vez que decisões isoladas entre áreas tendem a amplificar riscos operacionais e perdas produtivas. Nesse sentido, abordagens integradas de manutenção e operação têm demonstrado ganhos significativos em confiabilidade e desempenho (CHIN et al., 2020; LIAO et al., 2024).

A variabilidade dos processos industriais é um dos principais responsáveis por defeitos e perdas na produção, o que torna o controle sistemático e a análise contínua dos parâmetros operacionais essenciais (MONTGOMERY, 2012). Nesse sentido, ferramentas como o Six Sigma são eficazes para diminuir a variabilidade e elevar a qualidade dos processos (GEORGE, 2002).

Além disso, a organização do ambiente de produção e a padronização das rotinas operacionais, de acordo com os princípios do programa 5S, têm um impacto considerável na diminuição de desperdícios e na melhoria das condições de trabalho (IMAI, 1986). Simultaneamente, a manutenção industrial é crucial para assegurar que os equipamentos operem de maneira confiável e que os processos permaneçam estáveis, particularmente em sistemas críticos, como os de climatização industrial (ASHRAE, 2016).

Apesar desses avanços, a literatura ainda apresenta limitações importantes no que diz respeito à aplicação empírica desses modelos integrados em ambientes industriais reais, especialmente no setor químico. Muitos estudos concentram-se em modelagens teóricas ou

simulações, havendo menor incidência de investigações baseadas em dados operacionais reais que evidenciem os impactos práticos dessa integração (PUROHIT et al., 2024; LV et al., 2024).

Além disso, persiste o desafio de integrar, de forma consistente, dados provenientes de operação, manutenção e qualidade em uma abordagem única e aplicada ao contexto industrial (CHIN et al., 2020).

Com isso, esta pesquisa se propõe a responder o seguinte questionamento: até que ponto a implementação conjunta de melhoria contínua, controle de qualidade e manutenção HVAC diminui a variabilidade operacional em processos químicos industriais?

Para tanto, foi utilizada uma estratégia metodológica de estudo de caso, que será detalhada na próxima seção, a qual possibilita uma investigação empírica da articulação dessas práticas em um contexto real de produção.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é classificado como uma pesquisa aplicada, com uma abordagem qualitativa que conta com dados quantitativos, e foi realizado por meio de um estudo de caso único em uma fábrica do setor químico que se especializa na produção de fungicidas para uso agrícola. Justifica-se o uso do método de estudo de caso por se tratar de uma investigação aprofundada de fenômenos que ocorrem em operações reais, permitindo entender como se inter-relacionam variáveis técnicas, organizacionais e produtivas, segundo Slack e Brandon-Jones (2019).

A unidade de análise é uma planta industrial de funcionamento contínuo, onde os processos produtivos são mantidos por um controle rigoroso de variáveis críticas (como temperatura, pressão, vazão, entre outras), gerenciado por sistemas informatizados, sendo o sistema SAP o mais relevante deles. Os dados que foram analisados são referentes ao período de janeiro a junho de 2024 e foram coletados de registros operacionais do sistema SAP, relatórios de controle de qualidade e anotações de manutenção preventiva e corretiva.

Com o intuito de viabilizar uma análise sistematizada, os dados foram agrupados em médias operacionais representativas, preservando a conformidade com os padrões observados no setor industrial. A análise não se vê comprometida pelo uso de dados agregados, já que o propósito do estudo é identificar tendências operacionais e entender como as variáveis se relacionam, e não fazer inferências estatísticas que se generalizem.

Foram investigadas variáveis como a estabilidade dos parâmetros de operação, a frequência de falhas nos processos, o tempo de parada não planejada, os índices de retrabalho e a eficácia das ações de manutenção. A análise dos dados seguiu os preceitos do Six Sigma, especialmente na detecção e minimização das causas de variabilidade (GEORGE, 2002), e também os fundamentos do programa 5S, que visam à organização e padronização do ambiente produtivo (IMAI, 1986). Além disso, foram levadas em conta as diretrizes da norma ISO 9001 relacionadas à gestão da qualidade e à prevenção de falhas (ABNT, 2015).

A estratégia analítica utilizada consistiu na comparação dos indicadores operacionais do período anterior e posterior à adoção das práticas integradas, complementada pela análise qualitativa das mudanças no desempenho da unidade produtiva. Graças a essa abordagem, foram obtidas evidências empíricas que são apresentadas na seção de resultados e, em seguida, interpretadas à luz do referencial teórico na discussão.

Do ponto de vista analítico, a abordagem adotada dialoga com modelos integrados de produção, manutenção e controle da qualidade descritos na literatura, nos quais indicadores operacionais são utilizados como proxies para avaliar o estado do sistema produtivo e orientar decisões gerenciais (CHENG et al., 2018; WANG et al., 2019).

Ainda que não se trate de uma modelagem matemática formal, a lógica de análise segue princípios de integração sistêmica, nos quais variáveis de diferentes naturezas são interpretadas de forma interdependente, conforme abordagens recentes aplicadas em contextos industriais (PUROHIT et al., 2024).

3. RESULTADOS

A análise comparativa dos indicadores operacionais antes e após a implementação das práticas integradas evidenciou melhorias consistentes no desempenho da unidade produtiva. Observou-se uma redução na frequência de falhas operacionais, acompanhada por maior estabilidade nos parâmetros críticos do processo, como temperatura, pressão e vazão.

Adicionalmente, verificou-se diminuição nos índices de retrabalho e nas paradas não planejadas, indicando maior confiabilidade dos equipamentos e maior previsibilidade operacional. Esses resultados estão alinhados com estudos que demonstram que a integração entre manutenção, qualidade e operação contribui para a redução de variabilidade e aumento da eficiência produtiva (WANG et al., 2019; LV et al., 2024).

A análise qualitativa dos registros operacionais também indicou uma melhoria na capacidade de resposta da equipe frente a desvios de processo, o que pode ser associado à utilização de práticas estruturadas de monitoramento e padronização. Nesse sentido, a adoção de práticas integradas de controle e manutenção mostrou-se eficaz na identificação antecipada de anomalias, conforme apontado na literatura (BAHRIA et al., 2018; CHENG et al., 2018).

De forma geral, os resultados sugerem que a integração entre as áreas promove não apenas melhorias pontuais, mas uma transformação na dinâmica operacional, reduzindo a variabilidade de forma sustentada.

4. DISCUSSÃO

Os resultados alcançados neste estudo possibilitam um avanço na compreensão da variabilidade operacional em processos químicos sob uma ótica sistêmica, evidenciando que a sua diminuição está diretamente ligada à sinergia entre as práticas de melhoria contínua, controle de qualidade e manutenção industrial. Os achados, portanto, oferecem evidências empíricas sólidas sobre a inter-relação entre essas dimensões no ambiente industrial em questão, levando em conta a metodologia de estudo de caso em um cenário real que foi utilizada.

Isso está em sintonia com os princípios do controle estatístico de processos, que consideram a variabilidade como a principal responsável por falhas e perdas na produção (MONTGOMERY, 2012). Nesse sentido, a diminuição das falhas operacionais e a maior estabilidade nos parâmetros críticos indicam que os princípios do Six Sigma (GEORGE, 2002) realmente são eficazes, mas os resultados apontam que esses ganhos se intensificam quando aliados a práticas de manutenção e organização operacional.

Sob uma perspectiva mais analítica, os resultados observados podem ser interpretados à luz de modelos que tratam a variabilidade como resultado da interação entre degradação de ativos, decisões operacionais e controle de qualidade. Estudos recentes indicam que sistemas produtivos sujeitos à degradação apresentam aumento simultâneo na média e na variância dos indicadores de qualidade, o que reforça a necessidade de abordagens integradas para controle desses efeitos (TASIAS, 2022; LV et al., 2024).

Além disso, a integração entre produção, manutenção e qualidade permite uma atuação mais proativa na gestão dos processos, reduzindo a dependência de falhas explícitas como gatilho para intervenção, conforme discutido por CHENG et al. (2018). Essa lógica também é

reforçada por abordagens baseadas em risco, que priorizam ações preventivas a partir da probabilidade de falhas e seus impactos operacionais (LIAO et al., 2024).

Nesse sentido, os achados deste estudo reforçam a ideia de que a integração entre áreas não é apenas uma estratégia organizacional, mas um requisito técnico para lidar com a complexidade dos sistemas industriais contemporâneos.

A elevação dos padrões de qualidade e a diminuição do retrabalho também demonstram como o programa 5S foi fundamental para a padronização das rotinas produtivas (IMAI, 1986), assim como a estabilidade térmica observada ressalta a importância da manutenção em sistemas HVAC, conforme evidenciado pela ASHRAE (2016). Ademais, a ênfase nas ações preventivas está de acordo com os princípios da ISO 9001, que se concentram na prevenção de falhas e na melhoria contínua (ABNT, 2015).

Teoricamente, os achados sugerem que a variabilidade operacional deve ser vista como um fenômeno emergente das interações entre várias dimensões da organização. Com isso, não só se elucida a questão de pesquisa levantada, como também se sustentam as implicações trazidas na conclusão.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho, com foco prático, investigou como a combinação de melhorias contínuas, controle de qualidade e manutenção industrial pode reduzir a variabilidade operacional em processos químicos. Os resultados alcançados sustentam que a interconexão sistemática dessas dimensões é fundamental para o aprimoramento do desempenho industrial, uma vez que proporciona maior estabilidade nos parâmetros críticos dos processos, diminui a ocorrência de falhas operacionais e aumenta a eficiência das estratégias de manutenção.

Analiticamente, os resultados sugerem que a variabilidade operacional não deve ser vista como um fenômeno isolado, mas sim como uma consequência emergente da interação entre práticas organizacionais, técnicas e gerenciais. Nesse ponto, o estudo evidencia que ações fragmentadas, focadas somente em qualidade, operação ou manutenção, possuem limitações, enquanto a intersecção entre elas resulta em ganhos sustentáveis em confiabilidade e previsibilidade no que tange à produtividade.

Do ponto de vista teórico, este estudo contribui ao reforçar evidências empíricas de que a variabilidade operacional em processos industriais deve ser compreendida como um fenômeno multidimensional, resultante da interação entre fatores técnicos e gerenciais. Essa

visão está alinhada com modelos recentes que propõem a integração entre produção, manutenção e qualidade como estratégia para otimização sistêmica (WANG et al., 2019; PUROHIT et al., 2024).

Além disso, ao utilizar dados reais de uma planta industrial, a pesquisa contribui para reduzir a lacuna existente entre modelagens teóricas e aplicações práticas, destacada na literatura recente (LV et al., 2024).

Além disso, a pesquisa avança ao mostrar, com evidências práticas em um ambiente industrial real, como referências bem conhecidas na literatura, como Six Sigma, 5S e a gestão da qualidade fundamentada na ISO 9001, podem ser implementadas de maneira complementar, gerando efeitos sinérgicos no desempenho dos sistemas produtivos. Essa evidência reforça uma gestão industrial integrativa, pouco estudada em aplicações empíricas no setor químico.

Mesmo que os resultados sejam limitados a um único estudo de caso, sua importância está na capacidade de uma generalização analítica, uma vez que os mecanismos detectados, particularmente a interdependência entre controle operacional, manutenção e qualidade, são característicos de sistemas produtivos complexos. Mesmo assim, a falta de múltiplos casos comparativos é reconhecida como uma limitação, permitindo a oportunidade para futuras investigações que abordem diversos contextos setoriais, estágios de maturidade organizacional e níveis de adoção dessas práticas.

Por fim, propõe-se que futuros estudos avancem na elaboração de modelos analíticos que possibilitem medir, de maneira mais sólida, os impactos da combinação de práticas de gestão nos indicadores operacionais, além de investigar a inserção de tecnologias digitais e sistemas inteligentes nessa inter-relação. Esses desenvolvimentos podem auxiliar tanto no avanço teórico quanto na criação de soluções mais eficientes para gerenciar a variabilidade em contextos industriais complexos.

REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR ISO 9001:2015: sistemas de gestão da qualidade: requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASHRAE. *HVAC systems and equipment handbook*. Atlanta: ASHRAE, 2016.

BAHRIA, N.; CHELBI, A.; BOUCHRIHA, H.; DRIDI, I. *Integrated production, statistical process control, and maintenance policy for unreliable manufacturing systems*. *International Journal of Production Research*, v. 57, n. 9, p. 2548-2570, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1530472>

CHENG, G.; ZHOU, B.; LI, L. *Integrated production, quality control and condition-based maintenance for imperfect production systems*. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 175, p. 251-264, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.03.025>

CHIN, H. H.; VARBANOV, P. S.; KLEMEŠ, J. J.; BENJAMIN, M. F. D.; TAN, R. R. *Asset maintenance optimisation approaches in the chemical and process industries – A review*. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 164, p. 162-194, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.09.034>

GEORGE, Michael L. *Lean Six Sigma: combining Six Sigma quality with lean production speed*. New York: McGraw-Hill, 2002.

IMAI, Masaaki. *Kaizen: the key to Japan's competitive success*. New York: McGraw-Hill, 1986.

LIAO, R.; HE, Y.; XIE, M.; CAO, H.; GUO, H.; LU, H.; DAI, W. *Joint risk-based maintenance strategy and integrated monitoring approach for manufacturing system operational process considering workpiece quality*. *International Journal of Production Research*, v. 63, n. 5, p. 1354-1371, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2374848>

LV, X.; SHI, L.; HE, Y.; HE, Z.; LIN, D. *Joint optimization of production, maintenance, and quality control considering the product quality variance of a degraded system*. *Frontiers of Engineering Management*, v. 11, n. 2, p. 413-429, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42524-024-3103-1>

MONTGOMERY, Douglas C. *Introduction to statistical quality control*. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.

PUROHIT, B.; JAIN, A.; LAD, B. *An industrial scenario-based approach to integrating maintenance and quality planning*. *IEEE Access*, v. 12, p. 190169-190185, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3512667>

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair. *Operations management*. 8. ed. Harlow: Pearson Education, 2019.

TASIAS, K. *Simultaneous optimization of inventory, maintenance, and quality for production systems subject to multiple mean and variance shifts*. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, v. 53, n. 15, p. 3078-3101, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/03610926.2022.2150522>

WANG, L.; LU, Z.; HAN, X. *Joint optimisation of production, maintenance and quality for batch production system subject to varying operational conditions*. *International Journal of Production Research*, v. 57, n. 24, p. 7552-7566, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1581956>