v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

RETROFIT DE PAINÉIS ELÉTRICOS EM CENTROS DE USINAGEM: AVALIAÇÃO DOS EFEITOS NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL E CONFIABILIDADE

RETROFIT OF ELECTRICAL PANELS IN MACHINING CENTERS: ASSESSMENT OF THE EFFECTS ON OPERATIONAL EFFICIENCY AND RELIABILITY

RETROFIT DE CUADROS ELÉCTRICOS EN CENTROS DE MECANIZADO: EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS EN LA EFICIENCIA OPERATIVA Y LA CONFIABILIDAD

Vitor Salmazo[1], Ronaldo Gomes Figueira[2]

e7119196
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9196

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar os efeitos associados ao *retrofit* dos componentes elétricos do painel de controle sobre o desempenho operacional e a confiabilidade de um Centro de Usinagem Romi Discovery 760, utilizado na fabricação de componentes metálicos e que apresentava obsolescência de componentes elétricos e eletrônicos, dificuldades de manutenção e necessidade de reorganização da infraestrutura do painel. Para tanto, foi desenvolvido um estudo de caso em uma metalúrgica de médio porte. A análise foi realizada a partir dos indicadores Eficiência Global do Equipamento (OEE), Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) e Tempo Médio Para Reparo (MTTR), comparando-se os períodos anterior e posterior à realização do *retrofit*. Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e do teste *t* de *Student* para amostras independentes, considerando nível de significância de 5%. Os resultados demonstraram evolução favorável dos indicadores após a intervenção, com diferenças estatisticamente significativas para o OEE, o MTBF e o MTTR. Conclui-se que, nas condições e no período analisados, o *retrofit* do painel elétrico esteve associado à melhoria da eficiência operacional, da confiabilidade e da manutenibilidade do centro de usinagem, constituindo uma alternativa tecnicamente relevante para a modernização de equipamentos industriais.

PALAVRAS-CHAVE: *Retrofit*. Centro de usinagem. Eficiência operacional. Confiabilidade. OEE.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the effects associated with the retrofit of the electrical components of the control panel on the operational performance and reliability of a Romi Discovery 760 machining center, used in the manufacture of metal components and characterized by obsolete electrical and electronic components, maintenance difficulties, and the need to reorganize the panel infrastructure. To this end, a case study was conducted in a medium-sized metalworking company. The analysis was based on the Overall Equipment Effectiveness (OEE), Mean Time Between Failures (MTBF), and Mean Time to Repair (MTTR) indicators, comparing the periods before and after the retrofit. The data were analyzed using descriptive statistics and Student's t*-test for independent samples, considering a 5% significance level. The results demonstrated favorable changes in the indicators after the intervention, with statistically significant differences in OEE, MTBF, and MTTR.*

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (UNIARA) e Eletricista Industrial na J&R Automação Industrial, com atuação em manutenção de sistemas elétricos e experiência em *retrofits* e automações industriais.

[2] Engenheiro Eletricista pela Universidade de Araraquara (UNIARA), especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho e docente do curso de Engenharia Elétrica da UNIARA, com atuação em eletroeletrônica e sistemas de energia.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

It is concluded that, under the conditions and within the period analyzed, the electrical panel retrofit was associated with improvements in the machining center's operational efficiency, reliability, and maintainability, representing a technically relevant alternative for the modernization of industrial equipment.

KEYWORDS: Retrofit. *Machining center. Operational efficiency. Reliability. OEE.*

RESUMEN
Este estudio tuvo como objetivo analizar la asociación entre el retrofit de los componentes eléctricos del panel de control y el desempeño operativo y la confiabilidad de un Centro de Mecanizado Romi Discovery 760, utilizado en la fabricación de componentes metálicos y caracterizado por la obsolescencia de sus componentes eléctricos y electrónicos, dificultades de mantenimiento y la necesidad de reorganizar la infraestructura del panel. Se desarrolló un estudio de caso en una empresa metalúrgica de mediano porte. El análisis se realizó a partir de los indicadores Eficiencia Global de los Equipos (OEE), Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y Tiempo Medio de Reparación (MTTR), comparando los períodos anterior y posterior a la realización del retrofit. Los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva y la prueba t de Student para muestras independientes, considerando un nivel de significancia del 5 %. Los resultados demostraron una evolución favorable de los indicadores después de la intervención, con diferencias estadísticamente significativas en el OEE, el MTBF y el MTTR. Se concluye que, en las condiciones y durante el período analizado, el retrofit del panel eléctrico estuvo asociado con mejoras en la eficiencia operativa, la confiabilidad y la mantenibilidad del centro de mecanizado, constituyendo una estrategia técnicamente relevante para la modernización de equipos industriales.

PALABRAS CLAVE*: Retrofit. Centro de mecanizado. Eficiencia operativa. Confiabilidad. OEE.*

INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico tem promovido mudanças significativas nos sistemas de produção industrial, exigindo que as organizações busquem continuamente alternativas para aumentar a eficiência operacional, a confiabilidade dos equipamentos e a produtividade dos processos. Nesse cenário, a modernização de máquinas e sistemas de controle tem se tornado uma estratégia importante para manter a competitividade das empresas, especialmente em ambientes produtivos que operam com equipamentos instalados há vários anos (PIETRANGELI *et al.*, 2023; SŁOWIK; SIEROCKA, 2023).

No entanto, a substituição completa de máquinas industriais frequentemente exige elevados investimentos financeiros, além de possíveis impactos na continuidade das operações produtivas. Como alternativa, muitas organizações têm adotado o *retrofit* de equipamentos, processo que consiste na atualização ou substituição de componentes tecnológicos obsoletos por soluções mais modernas, preservando a estrutura principal da máquina. Estudos indicam que essa abordagem permite prolongar a vida útil dos equipamentos, reduzir custos de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

investimento e incorporar melhorias tecnológicas capazes de aumentar a eficiência operacional e a confiabilidade dos sistemas produtivos (AL-MAEENI *et al.*, 2020; PIETRANGELI *et al.*, 2023).

Além disso, o *retrofit* tem sido amplamente discutido no contexto da modernização de sistemas industriais e da transição para modelos de manufatura mais digitalizados. A literatura destaca que a atualização de equipamentos legados possibilita a incorporação de tecnologias de automação, sistemas de monitoramento e recursos de comunicação industrial, contribuindo para a melhoria do desempenho operacional e da capacidade de controle dos processos produtivos (ARJONI *et al.*, 2017; SŁOWIK; SIEROCKA, 2023).

Entre os diversos elementos passíveis de modernização em equipamentos industriais, os painéis elétricos de controle desempenham papel fundamental no funcionamento das máquinas, sendo responsáveis pela distribuição de energia, proteção elétrica, acionamento de dispositivos e controle das operações do equipamento. Com o passar do tempo, contudo, componentes elétricos e eletrônicos podem tornar-se obsoletos ou apresentar limitações técnicas, o que pode resultar em maior incidência de falhas, dificuldades de manutenção e redução da eficiência operacional do sistema produtivo (AL-MAEENI *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a modernização dos sistemas elétricos de controle pode contribuir para a melhoria da confiabilidade operacional, dependendo da natureza da intervenção e das condições do equipamento. Estudos relacionados ao *retrofit* de máquinas-ferramenta indicam que a atualização de sistemas de controle e automação pode favorecer a estabilidade operacional e o desempenho dos equipamentos (AL-MAEENI *et al.*, 2020). Em centros de usinagem CNC, nos quais a continuidade e a estabilidade das operações são relevantes para o desempenho produtivo, intervenções dessa natureza podem representar uma estratégia para recuperação das condições operacionais de equipamentos que apresentam sinais de obsolescência (DUAN; DENG; LI, 2019).

Apesar da relevância do tema, observa-se que parte significativa dos estudos relacionados ao *retrofit* industrial concentra-se na modernização de sistemas produtivos em uma perspectiva ampla ou na incorporação de tecnologias associadas à Indústria 4.0. Permanecem menos frequentes, entretanto, estudos direcionados à avaliação dos efeitos da modernização de componentes elétricos de painéis de controle sobre indicadores de desempenho e confiabilidade de máquinas individuais (SŁOWIK; SIEROCKA, 2023; PIETRANGELI *et al.*, 2023). Essa lacuna reforça a importância de investigações realizadas em contextos industriais reais, capazes de relacionar intervenções de modernização a indicadores quantitativos de desempenho e confiabilidade.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A relevância do tema está, portanto, na necessidade de compreender os efeitos operacionais associados à modernização de sistemas elétricos de equipamentos industriais, contribuindo tanto para a discussão acadêmica sobre estratégias de *retrofit* quanto para a tomada de decisão relacionada à recuperação e modernização de ativos produtivos.

Nesse contexto, o presente estudo busca responder ao seguinte problema de pesquisa: "Qual é a associação entre o *retrofit* dos componentes elétricos do painel de controle e a eficiência operacional e a confiabilidade de um centro de usinagem?" Para tanto, desenvolveu-se um estudo de caso em um *Centro de Usinagem Romi Discovery 760*, pertencente a uma metalúrgica de médio porte localizada no interior do estado de São Paulo.

O equipamento em questão, utilizado em operações de usinagem CNC, apresentava limitações relacionadas à obsolescência de componentes elétricos e eletrônicos, dificuldades de manutenção e problemas de organização e identificação dos elementos do painel. Diante desse cenário, foi realizado o *retrofit* de seu painel elétrico, envolvendo a modernização dos componentes e da infraestrutura associada ao sistema de controle.

Logo, o objetivo deste estudo é analisar a associação entre o *retrofit* dos componentes elétricos do painel de controle e o desempenho operacional e a confiabilidade de um *Centro de Usinagem Romi Discovery 760*, mediante a comparação de indicadores de desempenho e manutenção nos períodos anterior e posterior à intervenção, quais sejam: Eficiência Global do Equipamento (*Overall Equipment Effectiveness – OEE*), Tempo Médio Entre Falhas (*Mean Time Between Failures – MTBF)* e o Tempo Médio Para Reparo (*Mean Time to Repair* – MTTR). Os dados foram analisados com o auxílio do *software IBM SPSS Statistics 21*, com o qual se conduziu o teste *t* de *Student* para amostras independentes para identificar diferenças estatisticamente significativas entre os indicadores obtidos antes e após a modernização do sistema elétrico.

Além desta seção introdutória, o referencial teórico é apresentado na seção 1. A metodologia é definida na seção 2, os resultados e discussão são apresentados na seção 3 e as considerações finais na seção 4, seguida pelas referências.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta os principais conceitos relacionados ao *retrofit* industrial aplicado a centros de usinagem, abordando a modernização de sistemas elétricos, a confiabilidade operacional e os indicadores de desempenho utilizados para avaliação da eficiência e confiabilidade industrial.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.1. Retrofit e modernização de centros de usinagem

Na manufatura moderna, os centros de usinagem desempenham papel fundamental nos processos produtivos devido à sua capacidade de executar múltiplas operações com elevada precisão e repetibilidade. Tais equipamentos, geralmente controlados por sistemas de Controle Numérico Computadorizado (CNC), possibilitam a realização de diferentes operações de usinagem em um único ciclo produtivo, contribuindo para a redução do tempo de fabricação, melhoria da qualidade dos produtos e aumento da produtividade e confiabilidade industrial (DUAN; DENG; LI, 2019).

Segundo Duan, Deng e Li (2019), equipamentos CNC possuem elevada relevância estratégica na manufatura moderna devido à sua capacidade de operar com precisão, repetibilidade e estabilidade em processos industriais complexos. Essas características tornam os centros de usinagem elementos essenciais para empresas que buscam elevados níveis de produtividade, qualidade e competitividade.

Entretanto, muitos equipamentos industriais utilizados atualmente operam há vários anos, apresentando limitações relacionadas à obsolescência tecnológica de seus sistemas elétricos e eletrônicos. Componentes de controle ultrapassados, dificuldades de manutenção e indisponibilidade de peças de reposição podem comprometer a confiabilidade operacional dos equipamentos e aumentar o número de falhas durante o processo produtivo (PIETRANGELI *et al.*, 2023; SŁOWIK; SIEROCKA, 2023).

Como alternativa à substituição completa das máquinas, o *retrofit* industrial tem sido amplamente utilizado como estratégia de modernização tecnológica. O *retrofit* pode ser definido como o processo de atualização de equipamentos existentes por meio da substituição ou modernização de componentes tecnológicos, preservando a estrutura mecânica principal da máquina e permitindo sua adequação às novas demandas produtivas e tecnológicas (PIETRANGELI *et al.*, 2023; AL-MAEENI *et al.*, 2020).

Pietrangeli *et al.* (2023) concluíram que o *retrofit* representa uma solução economicamente viável e ambientalmente sustentável, uma vez que reduz a necessidade de descarte de equipamentos e diminui os custos associados à aquisição de novas máquinas. Słowik e Sierocka (2023), por sua vez, destacam que a modernização de equipamentos industriais permite incorporar tecnologias compatíveis com os princípios da Indústria 4.0, incluindo conectividade, monitoramento em tempo real e integração de dados operacionais.

Nesse cenário, o *retrofit* de painéis elétricos em centros de usinagem assume papel relevante na modernização dos sistemas industriais. Os painéis elétricos são responsáveis pelo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

acionamento, proteção, distribuição de energia e controle operacional da máquina, integrando dispositivos como controladores, sistemas CNC, inversores de frequência, servoacionamentos e elementos de proteção elétrica. A atualização desses componentes contribui para aumentar a confiabilidade operacional, reduzir riscos de falhas decorrentes da obsolescência tecnológica e facilitar atividades de manutenção (AL-MAEENI *et al.*, 2020).

Além da substituição de componentes obsoletos, o *retrofit* possibilita a incorporação de recursos de monitoramento, aquisição de dados e comunicação industrial, permitindo maior integração entre equipamentos legados e sistemas digitais de manufatura. Segundo Arjoni *et al.* (2017), a modernização de máquinas industriais constitui uma importante estratégia para viabilizar a inserção de equipamentos existentes no contexto da Indústria 4.0, sem a necessidade de substituição integral dos ativos produtivos.

Dessa forma, o *retrofit* de centros de usinagem não se limita apenas à substituição de componentes obsoletos, mas representa uma estratégia de modernização tecnológica voltada ao aumento da eficiência operacional, da confiabilidade e da competitividade industrial, contribuindo para prolongar a vida útil dos equipamentos e ampliar sua aderência às demandas atuais da manufatura (PIETRANGELI *et al.*, 2023; SŁOWIK; SIEROCKA, 2023).

1.2. Confiabilidade operacional em sistemas industriais

Segundo Smith (2011), a confiabilidade operacional refere-se à capacidade de um sistema desempenhar suas funções adequadamente durante determinado período, sem ocorrência de falhas que comprometam sua operação. Em ambientes industriais, esse conceito está diretamente relacionado à disponibilidade dos equipamentos, à continuidade dos processos produtivos e à redução de perdas operacionais.

Nos centros de usinagem, falhas em sistemas elétricos e eletrônicos podem ocasionar interrupções inesperadas na produção, aumento dos custos de manutenção e redução da produtividade. Dessa forma, a confiabilidade operacional torna-se um fator estratégico para garantir estabilidade e eficiência nos processos industriais (SMITH, 2011; DUAN; DENG; LI, 2019).

Segundo Duan, Deng e Li (2019), a análise de confiabilidade em equipamentos CNC é fundamental para a antecipação de falhas e desenvolvimento de estratégias de manutenção mais eficientes, uma vez que o monitoramento contínuo de variáveis operacionais e dados de degradação dos componentes permite prever falhas potenciais e reduzir paradas não programadas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Sob essa perspectiva, a modernização dos sistemas elétricos de controle tende a favorecer a confiabilidade operacional, ainda que seus efeitos dependam da natureza da intervenção e das condições do equipamento. A substituição de componentes obsoletos, a reorganização da infraestrutura e a melhoria das condições de diagnóstico podem favorecer a estabilidade operacional e a manutenção dos equipamentos (AL-MAEENI *et al.*, 2020; PIETRANGELI *et al.*, 2023).

Para a avaliação da confiabilidade operacional, diversos indicadores podem ser utilizados, dentre os quais se destacam o MTBF e o MTTR, que permitem avaliar aspectos relacionados à frequência de falhas e ao tempo de recuperação dos equipamentos (MOBLEY, 2004; SMITH, 2011).

1.3. Indicadores de desempenho, eficiência e confiabilidade industrial

A avaliação do desempenho operacional de equipamentos industriais é fundamental para a identificação de perdas produtivas e análise da eficiência dos processos de manufatura. Nesse contexto, destaca-se o OEE, que integra os fatores de disponibilidade, desempenho e qualidade. A disponibilidade está relacionada ao tempo em que o equipamento permanece apto para operação, o desempenho refere-se à velocidade efetiva de produção em relação à capacidade nominal da máquina e a qualidade está associada à produção de peças conformes e livres de defeitos (NAKAJIMA, 1989).

De acordo com Nakajima (1989), o OEE permite identificar perdas operacionais e avaliar o impacto de melhorias técnicas implementadas nos sistemas produtivos. Em processos de *retrofit*, esse indicador torna-se especialmente importante, pois possibilita comparar o desempenho operacional do equipamento antes e após a modernização (AL-MAEENI *et al.*, 2020).

Além do OEE, indicadores relacionados à confiabilidade e à manutenção também são amplamente utilizados para a avaliação da eficiência operacional de sistemas industriais. O MTBF e o MTTR permitem mensurar, respectivamente, o intervalo médio entre falhas e o tempo médio necessário para reparo, fornecendo informações relevantes sobre a estabilidade operacional e a capacidade de recuperação do equipamento (MOBLEY, 2004; SMITH, 2011).

Segundo Duan, Deng e Li (2019), a modernização de sistemas elétricos e de controle pode contribuir para a melhoria de indicadores de desempenho industrial, especialmente quando reduz falhas operacionais e favorece a disponibilidade dos equipamentos.

Corroborando essa perspectiva, Pietrangeli *et al.* (2023) destacam que melhorias nos índices de disponibilidade e desempenho podem impactar os resultados do OEE. Os autores

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

também discutem que a substituição de componentes obsoletos e a implementação de sistemas mais modernos favorecem maior estabilidade operacional e melhor controle dos processos de produção.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada é apresentada nas subseções a seguir, contemplando a caracterização do estudo e do equipamento, a execução do *retrofit,* os procedimentos de coleta dos indicadores e os métodos empregados na análise dos dados.

2.1. Caracterização do estudo e do equipamento

O presente estudo possui caráter descritivo, com abordagem predominantemente quantitativa, baseando-se em evidências provenientes de documentos técnicos, registros de manutenção e indicadores operacionais coletados junto aos setores de PCP e Manutenção Industrial de uma metalúrgica de médio porte localizada no interior do estado de São Paulo. Para tanto, desenvolveu-se um estudo de caso aplicado ao *retrofit* do painel elétrico de um Centro de Usinagem *Romi Discovery 760*, visando analisar os impactos da modernização dos componentes elétricos sobre a eficiência operacional e a confiabilidade do equipamento.

Segundo Yin (2002), o estudo de caso busca compreender fenômenos contemporâneos inseridos em seu contexto real, preservando a confiabilidade e a imparcialidade das evidências analisadas. Conforme recomendado por Lakatos e Marconi (2017), realizou-se inicialmente um levantamento bibliográfico, que consistiu na identificação e análise de publicações científicas e técnicas relacionadas ao *retrofit* industrial, à confiabilidade operacional e aos indicadores de desempenho utilizados em ambientes de manufatura. Para tanto, foram consultadas bases de dados nacionais e internacionais, incluindo *Scopus, ScienceDirect, Springer e Google Acadêmico*, selecionando-se estudos que abordassem a modernização de equipamentos industriais, a digitalização de sistemas produtivos e a avaliação da eficiência operacional por meio de indicadores de desempenho e confiabilidade.

O estudo de caso foi desenvolvido em um centro de usinagem que é utilizado em operações de usinagem CNC e possui papel relevante no processo produtivo da empresa estudada, sendo empregado na fabricação de componentes metálicos com elevada exigência dimensional e operacional.

Contudo, devido ao tempo de utilização do equipamento, observavam-se limitações relacionadas à obsolescência dos componentes elétricos e eletrônicos do sistema de comando e controle, dificultando atividades de manutenção e comprometendo a confiabilidade operacional

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

da máquina. Além disso, foram identificadas dificuldades relacionadas à organização interna do painel elétrico, identificação de componentes e disposição dos cabos de potência e comando, fatores que impactavam diretamente as atividades de diagnóstico e manutenção corretiva. Diante desse cenário, optou-se pela realização do *retrofit* do painel elétrico, visando modernizar o sistema de controle e melhorar as condições operacionais do equipamento.

2.2. Caracterização e execução do retrofit

Conforme recomendado por Duan, Deng e Li (2019), a primeira etapa do *retrofit* consistiu em um diagnóstico detalhado do painel elétrico original, na qual se realizou um levantamento técnico das condições operacionais do equipamento e do painel elétrico original, contemplando a análise da arquitetura elétrica existente, disposição dos componentes, infraestrutura de cabeamento e condições gerais de operação da máquina.

Durante essa etapa, verificou-se a necessidade de reorganização física do sistema elétrico, substituição de componentes obsoletos e adequação da infraestrutura para instalação dos novos dispositivos de comando e controle. Também se conduziu uma análise para definição do novo *layout* do centro e do painel elétrico, buscando melhorar a distribuição interna dos componentes e otimizar a passagem dos cabos de potência e comando. Além disso, realizaram-se estudos relacionados à programação e integração do sistema CNC da máquina, considerando as adaptações necessárias para operação após a modernização do sistema elétrico.

Após a etapa de diagnóstico e planejamento, iniciou-se a execução do *retrofit* do painel elétrico do centro de usinagem. Inicialmente, foi realizada a desmontagem do painel antigo, com retirada dos componentes elétricos existentes e remoção da infraestrutura anterior de cabeamento. Na sequência, executou-se a desmontagem das carenagens para possibilitar acesso aos sistemas internos e adequação da nova infraestrutura elétrica e foram realizadas as atividades de retirada dos cabos antigos, reorganização da estrutura interna do painel e preparação para instalação dos novos componentes elétricos.

Após a adequação estrutural, iniciou-se a instalação e fixação dos novos dispositivos elétricos e de automação no painel de controle. Executaram-se também as atividades de montagem das novas carenagens e organização física da infraestrutura elétrica da máquina. Durante essa etapa, realizou-se o estudo da disposição dos componentes e da passagem dos cabos de potência e comando, visando melhorar a organização interna do painel elétrico e facilitar futuras intervenções de manutenção, e foram confeccionadas e instaladas etiquetas de identificação (*tags*) para componentes e circuitos elétricos, objetivando aumentar a rastreabilidade dos sistemas e melhorar a padronização do painel elétrico.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Após a conclusão das instalações elétricas, foram conduzidos estudos e adequações relacionados à programação do sistema CNC do centro de usinagem, utilizando-se, para tanto, o *software Ladder III – FANUC Ladder*, empregado na programação e parametrização do sistema de controle da máquina. Nessa etapa, foram realizadas adaptações lógicas e ajustes de programação necessários para integração dos novos componentes elétricos e adequação do funcionamento operacional do equipamento. A execução da programação contemplou testes funcionais dos sistemas elétricos e validação das rotinas operacionais, visando garantir o correto funcionamento dos dispositivos de comando, acionamento e proteção.

Após a conclusão das etapas de instalação e programação, foram realizados testes operacionais no centro de usinagem com o objetivo de validar o funcionamento do sistema elétrico modernizado, contemplando a movimentação dos eixos X, Y e Z da máquina, bem como a verificação do funcionamento do trocador de ferramentas e dos sistemas auxiliares do equipamento. Avaliaram-se também as condições gerais de operação, estabilidade do sistema de controle e integração entre os componentes elétricos instalados.

Para caracterizar tecnicamente a intervenção e permitir a compreensão das modificações realizadas no equipamento, foi elaborado um comparativo dos principais componentes elétricos e eletrônicos substituídos durante o *retrofit.* O Quadro 1 apresenta a condição anterior e posterior à intervenção, contemplando os respectivos fabricantes, modelos, funções e principais alterações técnicas e de arquitetura.

Quadro 1. Comparativo dos componentes elétricos e eletrônicos antes e após o *retrofit*

Categoria	Condição anterior	Condição posterior	Fabricante posterior	Função	Justificativa
Servo amplificador (Drive)	*Yaskawa Servopack SGDH-15AE; Yaskawa VS-626M5; Yaskawa VS-656MB5*	*FANUC Servo Amplifier βiSVSP 40/40/80-18-B*	*FANUC – A06B-6320-H344*	Acionamento e controle dos servomotores dos eixos	Consolidação de múltiplos acionadores e conversores *Yaskawa* em uma única unidade multieixo *FANUC*, reduzindo a quantidade de módulos e o espaço ocupado no painel
Motor *spindle* (Árvore)	*Yaskawa AC Spindle Motor UAASKA-08FZ1; 7,5 kW (30 min) / 5,5 kW*	*FANUC AC Spindle Motor βil 12/10000-B*	*FANUC – A06B-2447-B103; 11 kW*	Acionamento do eixo-árvore	Atualização do acionamento com motor *FANUC* de 11 kW e rotação de até 10.000 rpm

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

	(contínuo); 1.500–8.000 rpm; trifásico				
Servomotor AC (Eixos)	*Yaskawa AC Servo Motor SGMGH-13ACA6S; 1.300 W; 8,34 N·m; 1.500 rpm*	*FANUC AC Servo Motor βiS 22/3000-B*	*FANUC – A06B-2082-B503; 3,0 kW; 20 N·m; 3.000 rpm*	Acionamento dos eixos de movimentação do centro de usinagem	Substituição por servomotor *FANUC* com maior potência e torque nominal, passando de 1,3 kW/8,34 N·m para 3,0 kW/20 N·m
Módulos de entrada e saída (I/O)	*AutomationDirect Terminator I/O: T1K-01DC; T1H-EBC; T1K-08ND3; T1K-16TD2-1; T1K-16TR; T1K-16ND3*	*FANUC I/O Unit for Power Magnetics Cabinet*	*FANUC – A02B-0319-C001*	Interface de entradas e saídas do sistema de controle	Substituição dos módulos de I/O distribuídos por uma unidade de E/S centralizada e dedicada à arquitetura *FANUC*, padronizando a interface do sistema
Reatância (Filtro de linha)	Não identificado e integrado ao conversor anterior	*FANUC 3-Phase Reactor*	*FANUC – A81L-0001-0186*	Filtragem e condicionamento da alimentação elétrica do amplificador	Inclusão de reator trifásico de entrada com função de filtragem e redução de efeitos associados à alimentação elétrica
Interface de terminais	*Phoenix Contact FLKMS 50 – nº 2281597;* réguas de bornes integradas aos módulos Terminator I/O	Placa de interface *PHI* com bornes a parafuso e conector *ribbon cable*	*PHI*	Interface e conexão do cabeamento de I/O	Substituição da interface *Phoenix Contact* e das réguas anteriores por placa de interface *PHI*, buscando padronização e organização do cabeamento

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Observa-se que a intervenção não se restringiu à substituição individual de componentes, envolvendo também alterações na arquitetura de acionamento, nas interfaces de entrada e saída e na organização do sistema de controle. Destacam-se a consolidação dos acionamentos anteriormente distribuídos em uma unidade multieixo *FANUC*, a substituição da arquitetura de entradas e saídas por uma unidade dedicada e a alteração das interfaces de conexão e cabeamento.

Dessa forma, a intervenção caracterizou-se como uma modernização integrada do sistema elétrico e eletrônico do equipamento. Ressalta-se que essa característica deve ser considerada na interpretação dos resultados, uma vez que não é possível isolar, a partir do

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

delineamento adotado, o efeito individual de cada uma dessas modificações sobre os indicadores que serão analisados: OEE, MTBF e MTTR.

2.3. Definição e coleta dos indicadores

O OEE foi calculado a partir dos apontamentos de produção obtidos por meio do sistema MES (Manufacturing Execution System) instalado no centro estudado. O tempo planejado de produção foi determinado com base no relatório de planejamento de capacidade disponibilizado pelo departamento de PCP, considerando a jornada diária de 8 horas e 48 minutos. As paradas do equipamento foram classificadas em seis categorias, incluindo ocorrências relacionadas à falta de material, à falta de ordem de produção (OP) e às paradas para manutenção. O cálculo do OEE considerou os componentes disponibilidade, desempenho e qualidade, conforme a Equação 1.

$$OEE = Disponibilidade \times Desempenho \times Qualidade \quad \text{(Eq. 1)}$$

A disponibilidade foi determinada com base no tempo planejado de produção e nas paradas registradas no sistema MES. O desempenho foi calculado pela razão entre a produção real e a produção teórica, enquanto a qualidade foi determinada pela relação entre a quantidade de peças aprovadas e o total de peças produzidas, considerando as peças aprovadas e reprovadas registradas no sistema. Os cálculos foram realizados diretamente sobre os totais mensais de produção e de paradas. Os resultados foram expressos em percentual.

Para a avaliação da confiabilidade e do desempenho da manutenção, foram utilizados os indicadores MTBF e MTTR. Os dados utilizados foram obtidos a partir das ordens de serviço do setor de Manutenção Industrial. Os valores foram calculados pelo próprio setor, utilizando as fórmulas usuais na literatura, e, posteriormente, consolidados mensalmente, em correspondência à periodicidade adotada para o OEE. Ambos os indicadores foram expressos em horas.

O MTBF foi calculado pela razão entre o tempo de operação do equipamento e o número de falhas registradas, conforme a Equação 2.

$$MTBF = \frac{Tempo\ total\ de\ operação}{Número\ de\ falhas\ registradas} \quad \text{(Eq. 2)}$$

O MTTR, por sua vez, foi calculado pela razão entre o tempo total empregado nos reparos e o número de reparos realizados, conforme a Equação 3.

$$MTTR = \frac{Tempo\ total\ de\ reparo}{Número\ de\ reparos} \quad \text{(Eq. 3)}$$

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.4. Delineamento dos períodos e análise estatística

Para a análise comparativa, foram definidos três períodos. O período T1 correspondeu aos meses de janeiro, fevereiro e março de 2026, representando as condições operacionais anteriores ao *retrofit.* O período T2 correspondeu à execução da intervenção e não foi considerado na análise comparativa, por representar uma condição de transição do equipamento. O período T3 compreendeu os meses de junho, julho e agosto de 2026, representando as condições operacionais posteriores ao *retrofit.*

É importante ressaltar que a comparação foi realizada entre os conjuntos de observações mensais de T1 e T3, sem estabelecimento de correspondência entre meses específicos dos dois períodos. Essa abordagem foi adotada em razão da ausência de fundamento técnico para considerar, por exemplo, janeiro e junho, fevereiro e julho ou março e agosto como observações pareadas.

A análise estatística dos dados mensais dos períodos T1 e T3 foi realizada com o auxílio do *software IBM SPSS Statistics 21*, considerando-se as medidas de média, mediana e desvio-padrão. Inicialmente, avaliou-se a distribuição dos dados por meio dos testes de normalidade de *Shapiro-Wilk* e *Kolmogorov-Smirnov*, adotando-se nível de significância de 5%. Valores de p superiores a 0,05 foram interpretados como ausência de evidências suficientes para rejeitar a hipótese de normalidade dos dados (HAIR *et al.*, 2014). Os resultados obtidos apresentaram $p > 0,05$ em ambos os testes, não sendo observadas evidências suficientes para rejeitar a hipótese de normalidade. Entretanto, considerando-se o reduzido número de observações mensais em cada período ($n = 3$), os resultados dos testes de normalidade foram considerados apenas como evidência complementar, não sendo utilizados isoladamente para estabelecer a normalidade dos dados.

Diante da distribuição dos dados e da ausência de relação de pareamento entre as observações dos períodos T1 e T3, foi empregado o teste *t* de *Student* para amostras independentes, considerando-se nível de significância de 5%. Previamente à aplicação do teste t, foi realizada a avaliação da homogeneidade das variâncias por meio do teste de *Levene*, que não indicou diferença estatisticamente significativa entre as variâncias ($p > 0,05$). Dessa forma, foram considerados os resultados do teste *t* sob a condição de igualdade das variâncias.

A escolha desse procedimento permitiu comparar as médias dos indicadores nos períodos anterior e posterior ao *retrofit* sem estabelecer correspondência artificial entre os meses analisados. Para a interpretação dos resultados, considerou-se estatisticamente significativa a diferença entre os períodos quando o p-valor bilateral foi inferior a 0,05 (COELHO BARROS;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MAZUCHELI, 2005). Ressalta-se que o reduzido número de observações limita o poder estatístico da análise e a generalização dos resultados, sendo os achados interpretados no contexto específico do equipamento e do período estudado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da análise do OEE, MTBF e MTTR do centro de usinagem estudado, comparando o período anterior à realização do retrofit (T1) e o período posterior à sua conclusão (T3). A análise contempla a avaliação descritiva dos indicadores e a comparação estatística entre os períodos, permitindo examinar a associação entre a modernização do painel elétrico e o desempenho operacional, a confiabilidade e a manutenibilidade do equipamento estudado.

3.1. Análise descritiva dos indicadores

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas dos indicadores OEE, MTBF e MTTR, considerando os períodos T1 e T3, anterior e posterior à realização do *retrofit*, respectivamente.

Tabela 1. Estatísticas descritivas antes e após o *retrofit*

	Antes do *retrofit* (T1)			**Após o *retrofit* (T3)**		
Indicador	**Média**	**Mediana**	**Desvio-padrão**	**Média**	**Mediana**	**Desvio-padrão**
OEE (%)	60,800	61,800	1,997	69,900	70,100	1,311
MTBF (h)	29,300	29,600	2,364	43,000	43,700	3,306
MTTR (h)	3,767	3,600	0,473	2,533	2,500	0,351

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Os resultados descritivos indicam comportamento favorável dos três indicadores no período posterior à realização do retrofit. O OEE apresentou aumento da média de 60,800% no período T1 para 69,900% no período T3, acompanhado de elevação da mediana de 61,800% para 70,100%. Esse comportamento evidencia melhora do desempenho global do equipamento no período posterior à intervenção, embora não permita, isoladamente, atribuir a variação exclusivamente ao retrofit.

Em relação ao MTBF, verificou-se aumento da média de 29,300 para 43,000 horas, enquanto a mediana passou de 29,600 para 43,700 horas. Esse resultado indica aumento do intervalo médio entre falhas no período posterior ao retrofit, caracterizando comportamento mais favorável quanto à confiabilidade operacional. Para o MTTR, observou-se comportamento inverso, com redução da média de 3,767 para 2,533 horas e da mediana de 3,600 para 2,500 horas. A redução desse indicador representa menor tempo médio necessário para o reparo e,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

consequentemente, maior agilidade na recuperação do equipamento após a ocorrência de falhas.

Quanto à dispersão dos dados, o desvio-padrão do OEE foi reduzido de 1,997 para 1,311, enquanto o MTTR apresentou redução de 0,473 para 0,351 hora. Para o MTBF, por sua vez, o desvio-padrão aumentou de 2,364 para 3,306 horas. Dessa forma, embora as médias dos três indicadores tenham apresentado comportamento favorável no período posterior ao retrofit, a variabilidade dos dados apresentou comportamentos distintos entre os indicadores analisados.

A Tabela 2, por sua vez, apresenta a variação absoluta e relativa das médias obtidas em cada período.

Tabela 2. Variação dos indicadores antes e após o *retrofit*

Indicador	Média Antes (T1)	Média Após (T3)	Variação absoluta	Variação relativa
OEE (%)	60,800	69,900	+ 9,100	14,97%
MTBF (h)	29,300	43,000	+ 13,700	46,76%
MTTR (h)	3,767	2,533	-1,234	-32,74%

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Observa-se que o OEE apresentou aumento de 9,1 pontos percentuais, correspondendo a uma evolução relativa de aproximadamente 14,97% em relação à média observada no período T1. Esse resultado indica melhoria do desempenho global do equipamento no período posterior à intervenção.

O MTBF apresentou a maior variação relativa entre os indicadores analisados, passando de 29,300 para 43,000 horas, o que corresponde a um aumento de aproximadamente 46,76%. Esse comportamento indica que, no período posterior ao *retrofit*, o equipamento permaneceu, em média, por períodos mais longos em operação entre ocorrências de falhas.

O MTTR, por sua vez, apresentou redução de 1,234 hora, equivalente a uma redução relativa de 32,74%. Como esse indicador representa o tempo médio necessário para o reparo, sua redução constitui um resultado favorável, indicando menor tempo necessário para a recuperação do equipamento após ocorrências de manutenção.

Considerando os resultados obtidos, verifica-se que os três indicadores apresentaram comportamento favorável após a realização do *retrofit*: o aumento do OEE demonstra evolução do desempenho global do equipamento, ao passo que o crescimento do MTBF indica maior intervalo médio entre falhas. Paralelamente, a redução do MTTR evidencia diminuição do tempo necessário para recuperação do equipamento após ocorrências de manutenção.

Os resultados descritivos, portanto, apontam para uma associação favorável entre a modernização do painel elétrico e o desempenho do equipamento analisado. Entretanto, a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

análise das diferenças observadas entre os períodos deve ser complementada pela avaliação estatística, de modo a verificar se as variações identificadas apresentam significância estatística. Tal análise é apresentada a seguir, por meio do teste *t* de *Student* para amostras independentes.

3.2. Análise estatística dos indicadores

A fim de verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os indicadores nos períodos anterior e posterior à realização do *retrofit*, foi empregado o teste *t* de *Student* para amostras independentes. Previamente à aplicação do teste *t*, foi realizada a avaliação da homogeneidade das variâncias por meio do teste de *Levene*, que não indicou diferença estatisticamente significativa entre as variâncias dos períodos analisados ($p > 0,05$). Dessa forma, foram considerados os resultados do teste *t* sob a condição de igualdade das variâncias. Adotou-se nível de significância de 5%, sendo consideradas estatisticamente significativas as diferenças cujo *p*-valor bilateral foi inferior a 0,05 (COELHO BARROS; MAZUCHELI, 2005). A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3. Estatísticas do teste *t* de *Student* para amostras independentes dos indicadores

Indicador	Diferença média (T3-T1)	*t*	Grau de liberdade (gl)	p-valor (bilateral)	Resultado
OEE (%)	+ 9,100	+6,596	4	0,003	Significativo
MTBF (h)	+ 13,700	+5,838	4	0,004	Significativo
MTTR (h)	-1,234	-3,628	4	0,022	Significativo

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Com base nos resultados do teste realizado, verificou-se que os três indicadores analisados apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os períodos anterior e posterior à realização do *retrofit*, considerando o nível de significância de 5%.

Para o OEE, constatou-se diferença estatisticamente significativa entre os períodos anterior e posterior à realização do *retrofit*, uma vez que o *p*-valor foi inferior a 0,05. Esse resultado, associado à evolução observada na análise descritiva, indica melhora do desempenho global do equipamento no período posterior à intervenção. Essa constatação vai ao encontro das conclusões propostas por Pietrangeli *et al.* (2023), que destacam que a substituição de componentes obsoletos e a implementação de sistemas mais modernos podem contribuir para o aumento do desempenho dos equipamentos. Contudo, no presente estudo, não é possível separar o efeito da substituição dos componentes elétricos de outras modificações realizadas simultaneamente.

Da mesma forma, para o MTBF, verificou-se diferença estatisticamente significativa entre os períodos analisados, dado que o *p*-valor foi inferior ao nível de significância adotado.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Considerando que o aumento do MTBF representa maior intervalo médio entre falhas, os resultados indicam comportamento favorável da confiabilidade operacional no período posterior à intervenção. Esse achado reitera os resultados obtidos por Duan, Deng e Li (2019), segundo os quais a modernização de sistemas elétricos e de controle reduz falhas operacionais e, consequentemente, aumenta a disponibilidade dos equipamentos. Ainda assim, a interpretação deve considerar que fatores operacionais e de manutenção não foram controlados no delineamento adotado.

Em relação ao MTTR, por fim, rejeita-se a hipótese nula de igualdade das médias, indicando que a diferença observada no tempo médio para reparo foi estatisticamente significativa. A redução do MTTR pode estar associada às modificações realizadas durante o *retrofit,* incluindo a modernização do sistema de controle, a reorganização da infraestrutura do painel e a melhoria das condições de identificação e intervenção sobre os componentes, aspectos que podem ter favorecido as atividades de diagnóstico e manutenção, conforme discutido por Mobley (2004) e Smith (2011).

Em conjunto, os resultados indicam que o *retrofit* esteve associado a melhorias estatisticamente significativas nos três indicadores analisados. O aumento do OEE evidencia melhoria no desempenho global do equipamento, enquanto o aumento do MTBF indica melhoria em sua confiabilidade operacional. Adicionalmente, a redução estatisticamente significativa do MTTR sugere melhoria na capacidade de diagnóstico e recuperação do equipamento após a ocorrência de falhas. Logo, considerando simultaneamente os resultados descritivos e inferenciais, os achados fornecem evidências de uma evolução favorável do desempenho, da confiabilidade e da manutenibilidade do centro de usinagem após a realização do *retrofit*.

Todavia, esses resultados devem ser interpretados considerando o reduzido número de observações mensais analisadas, a ausência de um grupo ou equipamento de comparação e a realização de múltiplas modificações durante o *retrofit.* Tais condições limitam a generalização dos achados e não permitem atribuir exclusivamente ao *retrofit* as alterações observadas nos indicadores.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo analisar os efeitos associados ao *retrofit* dos componentes elétricos do painel de controle sobre a eficiência operacional e a confiabilidade de um *Centro de Usinagem Romi Discovery 760*, a partir da comparação de indicadores de desempenho e confiabilidade antes e após a intervenção. Os resultados evidenciaram evolução

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

favorável dos três indicadores no período posterior ao retrofit: o OEE aumentou de 60,800% para 69,900%, correspondendo a uma variação relativa de 14,97%; o MTBF passou de 29,300 para 43,000 horas, com aumento relativo de 46,76%; e o MTTR foi reduzido de 3,767 para 2,533 horas, correspondendo a uma redução relativa de 32,74%.

A análise estatística, realizada por meio do teste *t* de *Student* para amostras independentes, identificou diferenças estatisticamente significativas entre os períodos para o OEE (p = 0,003), o MTBF (p = 0,004) e o MTTR (p = 0,022). Dessa forma, nas condições e no período analisados, os resultados indicam que o *retrofit* esteve associado à melhoria do desempenho operacional, da confiabilidade e da manutenibilidade do centro de usinagem.

Do ponto de vista acadêmico, o estudo contribui para a ampliação das evidências empíricas relacionadas ao *retrofit* de equipamentos industriais, particularmente no que se refere à modernização de painéis elétricos de máquinas-ferramenta. A literatura analisada evidencia que estudos sobre *retrofit* frequentemente abordam a modernização de equipamentos em uma perspectiva ampla ou relacionada à Indústria 4.0, enquanto são menos frequentes investigações direcionadas aos efeitos da modernização de componentes elétricos sobre indicadores de desempenho de equipamentos individuais. Nesse sentido, o estudo contribui ao relacionar a intervenção física e tecnológica realizada em um equipamento industrial com indicadores quantitativos de eficiência e confiabilidade, permitindo uma avaliação objetiva do comportamento operacional antes e após a modernização.

Do ponto de vista gerencial, os resultados fornecem subsídios para a tomada de decisão relacionada à modernização de equipamentos industriais que apresentam obsolescência tecnológica. A evolução observada nos indicadores de OEE, MTBF e MTTR sugere que a modernização do painel elétrico pode contribuir para a recuperação das condições operacionais e de manutenção de equipamentos existentes, em especial, quando sua estrutura mecânica e sua capacidade produtiva permanecem adequadas às necessidades da organização. Além dos resultados diretamente relacionados aos indicadores, a intervenção promoveu a reorganização do painel, a identificação dos componentes e circuitos, a atualização da infraestrutura elétrica e adequações na programação do sistema CNC, criando condições mais favoráveis para atividades de diagnóstico, intervenção e manutenção.

Todavia, os resultados devem ser interpretados considerando as limitações do estudo. A principal delas está relacionada à realização da pesquisa em um único equipamento e em uma única organização, o que limita a generalização dos resultados para outros centros de usinagem ou diferentes contextos industriais. Além disso, a comparação foi realizada com base em períodos de três meses anteriores e posteriores ao *retrofit*, resultando em apenas três

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

observações mensais em cada período. Embora tenham sido identificadas diferenças estatisticamente significativas, o reduzido número de observações limita o poder estatístico, razão pela qual se recomenda cautela na interpretação e generalização dos resultados.

Outro aspecto limitante refere-se à existência de diferentes fatores capazes de influenciar os indicadores de desempenho e manutenção, os quais não foram isolados no presente estudo, tais como: características da demanda e do *mix* produtivo; condições de operação; intervenções de manutenção; natureza e complexidade das falhas; e atuação dos operadores. No caso do MTTR, em particular, esses fatores podem influenciar o tempo de recuperação independentemente da modernização do painel.

Como sugestões para estudos futuros, recomenda-se a realização de pesquisas envolvendo um número maior de equipamentos, diferentes organizações e períodos mais extensos de acompanhamento, permitindo aumentar a robustez das análises e a possibilidade de generalização dos resultados. Também se sugere a realização de estudos longitudinais que acompanhem o desempenho dos equipamentos por períodos mais prolongados após o *retrofit*, possibilitando avaliar a permanência dos ganhos observados.

Pesquisas futuras devem incorporar outros indicadores, como custos de manutenção e quantidade de peças produzidas, bem como realizar análises econômicas envolvendo investimento, redução de custos e retorno sobre o investimento da modernização. Por fim, estudos comparativos entre equipamentos submetidos ao *retrofit* e máquinas novas poderiam contribuir para avaliar, sob as perspectivas técnica e econômica, em quais condições a modernização de ativos existentes constitui uma alternativa mais vantajosa à substituição do equipamento.

REFERÊNCIAS

AL-MAEENI, S. S. H.; KUHNHEN, C.; ENGEL, B.; SCHILLER, M. Smart retrofitting of machine tools in the context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, v. 88, p. 369-374, 2020.

ARJONI, D. H.; MADANI, F. S.; IKEDA, G.; CARVALHO, G. M.; COBIANCHI, L. B.; FERREIRA, L. F. L. R.; VILLANI, E. Manufacture equipment retrofit to allow usage in the Industry 4.0. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CYBERNETICS, ROBOTICS AND CONTROL (CRC), 2017. *Proceedings* [...]. Phuket: IEEE, 2017. p. 155-161.

COELHO BARROS, E. A.; MAZUCHELI, J. *Estatística aplicada às ciências sociais*. Maringá: Eduem, 2005.

DUAN, C.; DENG, C.; LI, N. Reliability assessment for CNC equipment based on degradation data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 100, p. 2789-2801, 2019.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. *Multivariate data analysis*. 7. ed. Harlow: Pearson Education, 2014.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. *Fundamentos de metodologia científica*. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MOBLEY, R. K. *Maintenance fundamentals*. 2. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2004.

NAKAJIMA, S. *TPM development program*: implementing total productive maintenance. Portland: Productivity Press, 1989.

PIETRANGELI, I.; MAZZUTO, G.; CIARAPICA, F. E.; BEVILACQUA, M. Smart retrofit: an innovative and sustainable solution. *Machines*, v. 11, n. 5, p. 523, 2023.

SŁOWIK, M.; SIEROCKA, H. Manufacturing equipment retrofitting towards Industry 4.0 standards: a systematic overview of the literature. *Engineering Management in Production and Services*, v. 15, n. 3, p. 14-26, 2023.

SMITH, D. J. *Reliability, maintainability and risk*: practical methods for engineers including reliability centred maintenance and safety-related systems. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.

YIN, R. K. *Estudo de caso*: planejamento e métodos. Porto Alegre: Bookman, 2002.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.