



## PROPOSTA DE PLANO DE MANUTENÇÃO PARA UM TORNO DO LABORATÓRIO DE USINAGEM DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

*MAINTENANCE PLAN PROPOSAL FOR A TURNING MACHINE FROM MACHINING LABORATORY OF UNIVERSITY OF BRASÍLIA*

*PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO DE UN TORNO EN EL LABORATORIO DE MECANIZADO DE LA UNIVERSIDAD DE BRASÍLIA*

Letícia Corrêa Bastianon Santiago<sup>1</sup>, Bruno Souza Nunes<sup>2</sup>, Ian Rocca Amaral<sup>3</sup>, Márcio da Silva Conceição<sup>4</sup>, Aline Gonçalves dos Santos<sup>5</sup>, & Déborah de Oliveira<sup>6\*</sup>

<sup>1 2 3 4 5 6</sup> Universidade de Brasília, <sup>5</sup> Universidade Federal de Catalão

[leticiabastianon@gmail.com](mailto:leticiabastianon@gmail.com)<sup>1</sup> [brunousouzanunes1@gmail.com](mailto:brunousouzanunes1@gmail.com)<sup>2</sup> [roccamaral@gmail.com](mailto:roccamaral@gmail.com)<sup>3</sup> [marciosc56@gmail.com](mailto:marciosc56@gmail.com)<sup>4</sup> [aline\\_santos@ufcat.edu.br](mailto:aline_santos@ufcat.edu.br)<sup>5</sup> [oliveira.deborah@unb.br](mailto:oliveira.deborah@unb.br)<sup>6\*</sup>

### ARTIGO INFO.

Recebido: 19.07.2022

Aprovado: 16.08.2022

Disponibilizado: 28.09.2022

**PALAVRAS-CHAVE:** Manutenção Preventiva; Procedimento Operacional Padrão; Disponibilidade; Tornos Mecânicos.

**KEYWORDS:** Preventive maintenance; Standard Operational Procedure; Availability; Mechanical Lathes.

**PALABRAS CLAVE:** Manutención preventiva; Procedimiento Operativo Estándar; Disponibilidad; Tornos Mecánicos.

\*Autor Correspondente: Oliveira, D., de.

### RESUMO

A maior parte das pesquisas desenvolvidas no Brasil é gerada nas universidades públicas, em estudos desenvolvidos em equipamentos disponíveis em seus laboratórios. Esses equipamentos são mantidos operacionais durante longos períodos através de operações de manutenção adequadas. Com foco na área de usinagem, esse fato se torna ainda mais relevante, uma vez que os equipamentos possuem muito robustez e durabilidade. A partir de um levantamento bibliométrico, foi possível constatar que quase 50% dos estudos desenvolvidos em torneamento no país utilizam equipamentos com mais de 20 anos. Assim, este estudo tem como objetivo elaborar um plano de manutenção para os tornos disponíveis no Laboratório de Usinagem da Universidade de Brasília. Para tanto, inicialmente, identificou-se o tipo mais adequado de manutenção, seguido da determinação dos componentes de verificação. Destacou-se a manutenção preventiva, uma vez que tem baixo custo de implementação e pode resultar em economia se comparada à corretiva. Após essa etapa, foram selecionadas as atividades de verificação, os planos de implementação e controle e o procedimento operacional padrão. Através das etapas mencionadas, pôde-se verificar que a manutenção preventiva, mesmo realizada através de ações simples, porém de forma ordenada, possui potencial para melhorar a vida operacional dos tornos bem como sua disponibilidade.

### ABSTRACT

Most of the research carried out in Brazil is generated in public universities, in studies carried out on equipment available in their laboratories. These equipment's are kept operational for long periods through adequate maintenance operations. With a focus on the

manufacturing area, this fact becomes even more relevant, once the equipment has a lot of robustness and durability. From a bibliometric survey, it was possible to verify that almost 50% of the two studies carried out in a tournament in the country use equipment that is more than 20 years old. Likewise, this study had the objective of elaborating a maintenance plan for the lathes available at the Machining Laboratory of University of Brasilia. For this, initially the most suitable type of maintenance was identified, followed by the determination of two verification components. Emphasizing preventive maintenance, once we have a low cost of implementation and can result in savings compared to correction. After this stage, the verification activities, the implementation and control plans and the standard operational procedure have been selected. Through the stages, it can be verified that preventive maintenance, even carried out through simple actions, but in an orderly manner, has the potential to improve the operational life of two lathes as well as their availability.

### RESUMEN

La mayor parte de la investigación desarrollada en Brasil se genera en universidades públicas, en estudios desarrollados en equipos disponibles en sus laboratorios. Estos equipos se mantienen operativos por largos períodos mediante operaciones de mantenimiento adecuadas. Con foco en el área de mecanizado, este hecho cobra aún más relevancia, ya que el equipo es muy robusto y duradero. A partir de un levantamiento bibliométrico, se pudo verificar que casi el 50% de los estudios desarrollados en torneado en el país utilizan equipos con más de 20 años. Así, este estudio tiene como objetivo desarrollar un plan de mantenimiento para los tornos disponibles en el Laboratorio de Mecanizado de la Universidad de Brasilia. Para ello, inicialmente se identificó el tipo de mantenimiento más adecuado, seguido de la determinación de los componentes de verificación. Destacando el mantenimiento preventivo, ya que tiene un bajo costo de implementación y puede resultar en ahorros en comparación con el mantenimiento correctivo. Luego de este paso, se seleccionaron las actividades de verificación, los planes de implementación y control y el procedimiento operativo estándar. A través de los pasos mencionados, se pudo comprobar que el mantenimiento preventivo, aun realizado mediante acciones sencillas, pero de forma ordenada, tiene el potencial de mejorar la vida operativa de los tornos, así como su disponibilidad.



## 1. INTRODUÇÃO

A universidade pública é a principal desenvolvedora de pesquisa científica no Brasil, sendo responsável pela maioria dos trabalhos científicos publicados. Isso se deve, principalmente, ao financiamento público. Entretanto, devido ao cenário econômico do país, os investimentos foram reduzidos. Entre os anos de 2015 e 2017, houve uma queda de 16% e, considerando o período de 2015 a 2018, ocorreu uma redução acentuada (36%) no gasto orçamentário do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), principal financiadora das pesquisas públicas. Apesar deste contexto, a qualidade e quantidade de produção científica brasileira progrediram desde 2011. Em 2019, o Brasil foi responsável por 2,8% da produção científica mundial (CAPES, 2021; UNESCO, 2021; Clarivate Analytics, 2017; MCTIC, 2016).

Diversas pesquisas realizadas no Brasil dependem de máquinas e equipamentos disponíveis nos laboratórios das universidades, que, também, são empregados nas atividades de ensino. Frequentemente, esses itens precisam ser utilizados em longos períodos de tempo, devido à indisponibilidade de recursos para substituição por máquinas e equipamentos mais novos.

As máquinas, em geral, estão sujeitas à degradação devido ao uso e exposição a fatores ambientais, o que pode resultar em sua falha, podendo causar problemas de segurança, danos ao equipamento, problemas de qualidade e indisponibilidade inesperada. Portanto, o planejamento das intervenções de manutenção eficaz permite melhoria na eficiência e confiabilidade (de Jonge & Scarf, 2020). Assim, destaca-se a importância de realizar a manutenção adequada dos itens que compõe os laboratórios de ensino e pesquisa das universidades.

A manutenção, conforme exposto por Chin *et al.* (2020), é realizada para reduzir as falhas (taxas/frequência), prolongar o tempo de atividade e reduzir a perda de produção. Florian, Sgarbossa e Zennaro (2021) acrescentam que as ações de manutenção objetivam garantir a disponibilidade dos sistemas e o rendimento desejado.

Quando não há um plano de manutenção adequado, as máquinas podem apresentar falhas constantemente, necessitando de manutenção corretiva que, segundo Chin *et al.* (2020), ocasiona paradas frequentes e alto custos de manutenção devido às falhas inesperadas, tendo em vista que estas podem ser de alto custo para reparo ou podem ser catastróficas.

Uma máquina bastante utilizada nos laboratórios de ensino e pesquisa de cursos de engenharia é o torno, responsável pelo processo de torneamento, que, conforme exposto por Nalbant, Gokkaya e Sur (2007), é o primeiro método mais comum para corte e, principalmente, para o desbaste e semi-acabamento de peças usinadas. Assim, nota-se que o emprego deste processo pela indústria tem crescido. De acordo com dados da *Thomas Publishing Company* (2020), o uso de tornos, que já é amplamente difundido, apresenta ainda tendência de aumento, verificando-se que um número crescente de instalações de produção adotou tornos CNC como ferramenta de escolha e prevê que, até 2026, o mercado global de máquinas CNC deverá atingir US\$ 128,86 bilhões em valor, registrando uma taxa de crescimento anual de 5,5% de 2019 a 2026. Segundo dados expostos pela 3ERP (2019), esse aumento esperado se deve, principalmente, aos setores automotivo e aeroespacial e cita outros setores importantes como médico, farmacêutico, de processamento de alimentos, governo, eletrônicos, telecomunicações, embalagens, fabricação em geral, dentre outros. Portanto, destaca-se a importância de se desenvolver pesquisa e estudar o processo de torneamento.

Diante deste contexto, o presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de propor um plano de manutenção para um torno do laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de



Brasília, que é empregado para atividades de ensino e pesquisa. Assim, o presente trabalho poderá contribuir para o aumento da disponibilidade do equipamento e estabelecer um ambiente que possibilite o desenvolvimento de trabalhos acadêmicos de melhor qualidade.

Por meio do plano de manutenção para o torno com ano de fabricação de 1960, espera-se despertar a importância deste para o laboratório de engenharia mecânica da Universidade de Brasília. O laboratório é utilizado por técnicos, docentes e discentes e constitui uma ferramenta importante para a capacitação dos estudantes e o fomento à pesquisa na Universidade. Acredita-se que, com a elaboração do plano de manutenção para o torno, será proporcionada uma melhor condição para o laboratório em relação a esse tipo de maquinário e, como consequência, uma produção de peças com melhores tolerâncias e qualidade. Além disso, o plano de manutenção poderá ser replicado pelos demais laboratórios de ensino e pesquisa do Brasil.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

As atividades de manutenção adequadas são importantes para a disponibilidade de equipamentos. Como elas demandam tempo e podem atrasar a conclusão do trabalho e aumentar o custo total do sistema, o planejamento adequado da manutenção é um problema de compromisso de tempo e custo (Sharifi & Taghipour, 2021). Para tanto, é importante considerar os tipos e os indicadores de manutenção.

### 2.1. TIPOS DE MANUTENÇÃO

As principais estratégias de manutenção popularmente adotadas na prática da engenharia são as manutenções preventivas, corretivas e preditivas (Yan, Dunnett & Jackson, 2018). Conforme exposto por Savsar (2006), tradicionalmente, sabe-se que a probabilidade de falha aumenta à medida que a máquina envelhece e diminui acentuadamente após a implementação de uma manutenção preventiva planejada. Zhang e Tang (2021) expõem que a manutenção preventiva, do inglês *preventive maintenance* (PM), é uma decisão programada nas máquinas para evitar falhas inesperadas e é realizada em intervalos de tempo conhecidos, antes que a avaria ocorra e mantendo a máquina no nível de operação desejado. Para Putri, Taufik e Buana (2020), esse tipo de manutenção tem o objetivo de determinar o intervalo de tempo de manutenção adequado de forma que a confiabilidade da máquina seja mantida e opere adequadamente antes da próxima manutenção.

A manutenção corretiva (*corrective maintenance* - CM), também chamada de manutenção reativa, que se refere à correção após falha ou execução até a falha, visa reparar um sistema ou seus componentes após a ocorrência de uma falha (Theissler *et al.*, 2021). Essa manutenção, de acordo com Vitayasaka, Pongcharoen e Hicks (2019), ocorre de forma aleatória e precisa ser abordada por meio de ações de controle.

A manutenção preditiva (*predictive maintenance* - PdM), conforme exposto por Theissler *et al.* (2021), tem o objetivo de prever o momento ideal para realizar a manutenção, por meio de informações sobre o estado de saúde do sistema e/ou dados históricos de manutenção. Ainda conforme os autores, esse tipo de manutenção tenta evitar o reparo prematuro e caro de um sistema, ao mesmo tempo em que visa garantir um reparo oportuno antes de uma falha. Zhang, Yang e Wang (2019) acrescentam que a previsão da saúde da máquina pode não



apenas reduzir significativamente o tempo de inatividade inexplorado e os custos de mão de obra caros, mas também garantir uma operação segura e otimizar o plano de manutenção.

De acordo com Nikhil M. Thoppil (2020) este monitoramento preditivo está focado em identificar as condições dos componentes da máquina para prever um prazo estimado de falha, podendo, então, realizar a manutenção no melhor momento a fim de otimizar os custos, a vida útil e o desgaste do aparelho. Para realizar este monitoramento, são utilizados sensores acoplados à máquina para fornecer dados aos sistemas capazes de armazenar, interpretar e analisá-los, a partir de uma inteligência programada.

Considerando estes três principais tipos de manutenção (corretiva, preventiva e preditiva), Onawumi *et al.* (2021) desenvolveram um método programável para determinação da estratégia de manutenção adequada para máquina crítica em uma empresa de manufatura. Para tanto, aplicaram o *software* resultante em uma empresa produtora de plásticos, avaliando os critérios de segurança, produção, confiabilidade, disponibilidade de reposição, frequência de falha e a aplicabilidade do monitoramento de condição. De acordo com os resultados obtidos, a estratégia de manutenção eficaz para uma indústria de manufatura (fábrica de plásticos) é a estratégia de manutenção preditiva, seguida pela manutenção preventiva, e por fim, a manutenção corretiva.

## 2.2. INDICADORES DE MANUTENÇÃO

Ao implementar uma política de manutenção, é importante utilizar indicadores capazes de informar sobre situações de falha das máquinas e equipamentos. Estes podem estar relacionados à confiabilidade, diagnóstico e prognóstico, sendo indicações, respectivamente, de probabilidade de falha, integridade do sistema e vida útil restante (Pascal *et al.*, 2019). Conforme exposto por Darestani, Ganji e Imannezhad (2020), a medição do desempenho da manutenção ainda é pouco explorada e nenhum modelo conceitual abrangente e aceito é apresentado neste campo. Assim, diversos autores e pesquisadores têm utilizado critérios e indicadores diferentes dependendo da área de pesquisa. Portanto, neste trabalho, foram utilizados indicadores embasados por Kumar *et al.* (2013), a saber: Tempo Médio Entre Falhas (MTBF), Tempo Médio para Reparos (MTTR) e Disponibilidade.

O MTBF é o tempo médio que um ativo funcionará antes de falhar (Smith e Mobley, 2008) e constitui uma previsão da confiabilidade de um produto. É uma das formas mais comuns de previsão de confiabilidade. Em geral, esse indicador é especificado com um parâmetro de ciclo de trabalho (Serge, Patrick, Duquenoy, 2016). De acordo com Smith e Mobley (2008), é uma das primeiras e mais básicas medidas que se pode usar para medir a confiabilidade. O MTBF pode ser calculado, conforme Eq. 1 (Smith e Mobley, 2008).

$$MTBF = \frac{\text{Tempo operado}}{\text{Intervenções (Número de ordens de serviço de emergência)}} \quad (1)$$

O Tempo Médio para Reparos (Mean time to repair - MTTR) constitui uma das medidas quantitativas de manutenibilidade, que está relacionada às considerações primárias da engenharia de confiabilidade e auxilia na identificação da facilidade com que o sistema ou produto pode ser restaurado à condição de operação e o intervalo de tempo necessário



(McGraw-Hill Handbooks, 2008). Para Kardec e Nascif (2012), o MTTR é o inverso da taxa de reparos, sendo calculado pela Eq. 2.

$$MTTR = \frac{\text{Tempo Interditado}}{\text{Intervenções}} \quad (2)$$

Destaca-se que o equipamento deve estar disponível para uso sempre que necessário, não significando, portanto, que este deve estar sempre disponível. A disponibilidade do equipamento é afetada pelo tempo de inatividade programado e não programado. Em um sistema que funciona bem, o tempo de inatividade não planejado é minimizado, enquanto o tempo de inatividade planejado é otimizado. A causa mais comum de perda de disponibilidade de equipamentos são quebras inesperadas (McGraw-Hill Handbooks, 2008). A disponibilidade pode ser calculada a partir dos indicadores MTBF e MTTR. O objetivo desse indicador é informar a porcentagem de tempo operado, considerando o tempo de operação e o tempo interditado. A disponibilidade pode ser calculada conforme Eq. 3 (Kardec e Nascif, 2012).

$$\text{Disponibilidade} = \left( \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \right) \times 100 \quad (3)$$

Estes indicadores têm sido empregados por pesquisadores de forma a verificar a eficácia da aplicação de estudos de manutenção. Pinto *et al.* (2020) implementaram um plano estratégico de manutenção em uma empresa de Embreagens e Comandos Hidráulicos em duas células de produção, a de tornos CNC e a de Centros de Usinagem CNC. Para tanto, foram criados procedimentos de manutenção autônoma e planos de manutenção preventiva para serem executados dentro de um determinado prazo. Ao final do estudo, os autores constataram uma redução das quebras devido à falha em 23% para tornos CNC e 38% para centros de usinagem CNC, o que resultou em um aumento da disponibilidade das máquinas e melhoria no demais indicadores analisados, o MTTR e MTBF.

### 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa classifica-se, quanto aos objetivos, como descritiva, tendo em vista a descrição dos componentes do equipamento e das atividades de manutenção propostas. Quanto à natureza, o estudo apresenta abordagem quali-quantitativa, pois aborda características do equipamento e procedimentos, bem como, análise numérica dos indicadores propostos. No que se refere à escolha do objeto de estudo, empregou-se o estudo de caso, que foi realizado de acordo com uma sequência lógica de etapas.

Inicialmente, para conhecer a realidade da situação dos tornos utilizados nas pesquisas brasileiras, uma análise bibliométrica foi feita. Para tanto, realizou-se um levantamento de vinte e sete projetos de graduação, teses de doutorado e dissertações de mestrado, por meio de pesquisas realizadas nas plataformas Web of Science e Scopus. Para analisar o cenário atual, considerou-se trabalhos publicados dos anos de 2016 a 2021.

A partir dessa análise, iniciou-se a construção do plano de manutenção. Primeiramente, foi realizada uma comparação entre os principais tipos de manutenção e seus respectivos métodos, aplicados às máquinas-ferramentas, com o objetivo de determinar o plano de manutenção mais compatível com disponibilidade de recursos da UnB e, sobretudo, que suprisse as necessidades dos alunos e docentes. Desta forma, foi realizada uma visita ao



laboratório para melhor compreensão, tanto da estrutura da máquina-ferramenta, quanto da integridade de seus componentes.

Por meio de reuniões e entrevistas não estruturadas com os técnicos do laboratório de usinagem da UNB, os componentes a comporem o plano de manutenção foram identificados, verificou-se quais eram as atividades de manutenção já efetuadas, porém, não padronizadas e determinou-se as atividades de verificações a comporem o plano de manutenção e a sua frequência de realização.

Após essas definições, elaborou-se o POP, o *checklist* e o fluxograma para garantir a boa execução da manutenção. Estas ferramentas servirão para o operador monitorar e executar as atividades previstas no plano, podendo ter a opção de realizar análises em seu resultado e propor modificações, comparando-as entre si.

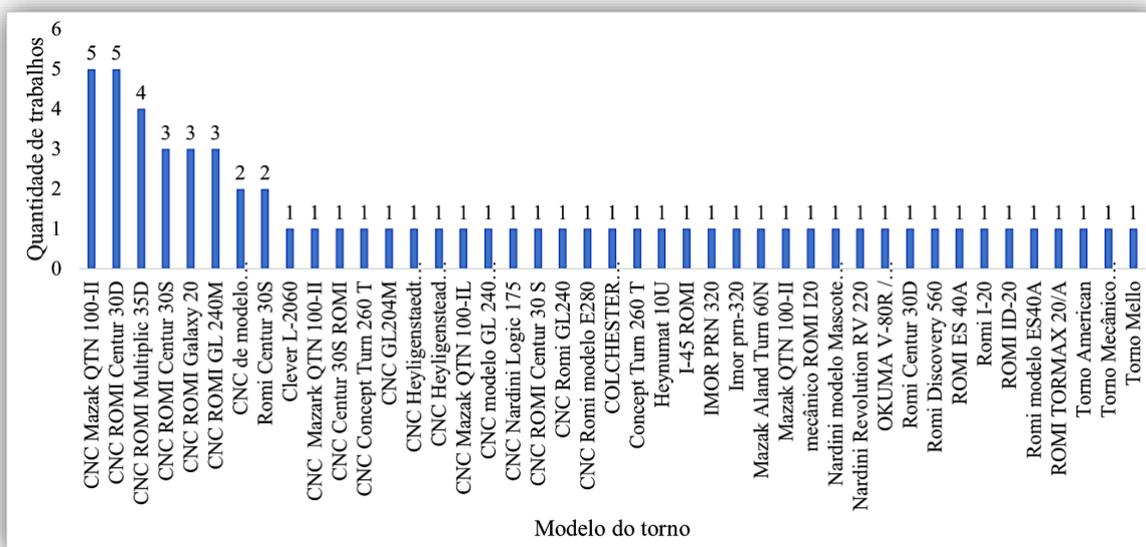
Por fim, indicadores de manutenção foram escolhidos para acompanhamento do desempenho do plano proposto. Tabelas para preenchimento dos dados de manutenção pelos técnicos e operadores do torno foram desenvolvidas, utilizando planilhas do Excel. Além disso, por meio dessa mesma ferramenta, gráficos foram construídos para melhor visualização dos dados. Estes serão atualizados conforme preenchimento das tabelas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

O gráfico elaborado, mostrado na Fig. 1, apresenta a quantidade de tornos de cada modelo presentes nos trabalhos avaliados, considerando os anos de 2016 a 2021. É possível observar que os modelos de torno que mais aparecem nos trabalhos é o Torno CNC Mazak QTN 100-II (5 trabalhos) e CNC ROMI Centur 30D (5 trabalhos), seguido pelo CNC ROMI Multiplic 35D (4 trabalhos). O modelo do torno presente na UnB e analisado neste trabalho é o IMOR RN 400.

**Figura 1.** Quantidade de trabalhos publicados em função do modelo do torno utilizado

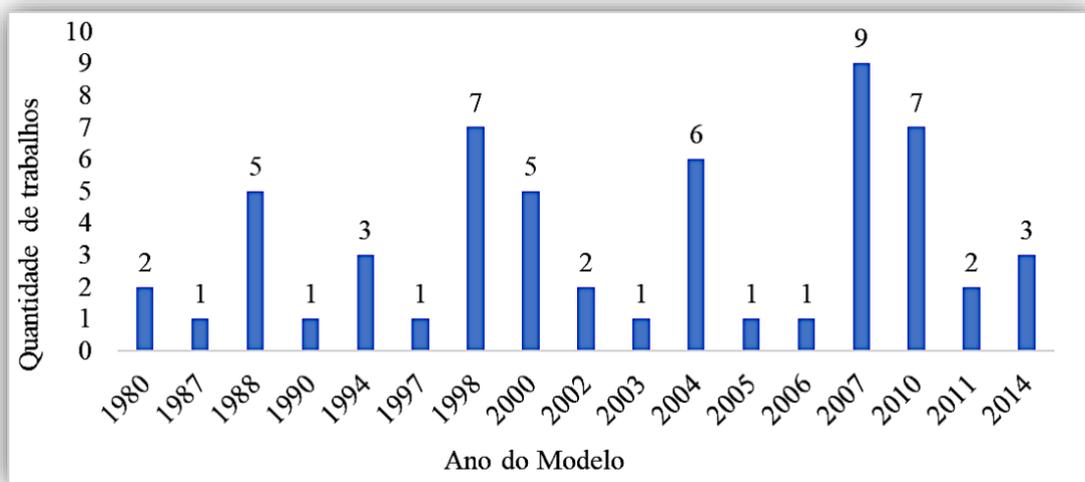


Fonte: Autores (2022).



O gráfico da Fig. 2 foi elaborado considerando os trabalhos publicados nos últimos cinco anos (2016-2021) e que possuem a informação do ano de fabricação do torno, totalizando 57. Observa-se que o torno mais recente utilizado é do ano de 2014 e o mais antigo de 1980, sendo que 28 trabalhos considerados nessa análise foram desenvolvidos utilizando tornos com mais de 20 anos (1980-2003). Entretanto, destaca-se que o ano de fabricação do torno utilizado na UnB é 1960, sendo mais antigo do que os modelos apresentados. Assim, enfatiza-se a importância de desenvolver o plano de manutenção para o torno utilizado no laboratório da UnB, que poderá também ser replicado para os demais tornos utilizados nas pesquisas brasileiras.

**Figura 2.** Quantidade de trabalhos publicados entre os anos de 2016 e 2021 em função do ano de fabricação do torno.



Fonte: Autores (2022).

Ressalta-se que para a elaboração dos gráficos apresentados nas Figs. 1 e 2, a metodologia de busca foi baseada no trabalho de Flynn *et al.* (1990), em que devem ser propostos termos para a busca. No caso deste estudo, o termo de busca específico foi torneamento. A base de dados foi o Google Acadêmico, para não favorecer nenhum grupo de pesquisa, o que poderia ocorrer com buscas em repositórios, gerando tendência nos resultados. Nota-se que esta base entrega respostas baseada na relevância (número de acessos) e considera a novidade (ano de publicação). Para o levantamento, foram selecionados apenas trabalhos de monografia, dissertações e teses, até um valor total de 100 trabalhos baixados, sendo ignorados os arquivos que continham artigos ou outros documentos. Após a coleta dos arquivos, houve o processo de triagem, em que os trabalhos que não foram indicados os equipamentos, seu modelo, ou seu ano não pôde ser obtido foram descartados do levantamento.

## 4.2. PLANO DE MANUTENÇÃO

### 4.2.1. IDENTIFICAÇÃO DO TIPO DE MANUTENÇÃO

As abordagens de manutenção preventiva e preditiva apresentam vantagens e desvantagens, que foram analisadas para escolha do melhor tipo de manutenção a ser aplicado no plano desenvolvido, considerando o contexto de laboratórios de usinagem. Na Tabela 1, são apresentadas as características importantes dessas duas abordagens.



**Tabela 1.** Vantagens e desvantagens das manutenções preventiva e preditiva

| Preventiva  |   |
|---|---|
| Vantagens   | Desvantagens  |
| Baixo custo de investimento.  | Tem o risco de se adotar uma política de manutenção inadequada para o equipamento.                |
| Programada a partir de uma gestão a fim de reduzir a necessidade de uma manutenção corretiva. | Para ser otimizada, necessita de tempo para identificar o rendimento da manutenção.               |
| Retarda o envelhecimento prematuro dos equipamentos.  | Tem-se o risco de utilizar uma política que venha a prejudicar peças com o excesso de manutenção. |
| Preditiva   |   |
| Vantagens   | Desvantagens  |
| Possui um maior coeficiente de confiabilidade por monitorar instantaneamente.                 | Alto investimento em peças para o monitoramento.  |
| Menor custo em troca de ferramentas do maquinário por realizar a troca no melhor momento.     | Calibração de sensores para fornecerem dados exatos.  |
| O equipamento terá menos interrupções para realização de manutenções.                         |   |

Fonte: Autores (2022).

Analisando os dados da Tabela 1, no que se refere ao resultado e melhor rendimento, a manutenção preditiva é mais bem avaliada. As vantagens de um maior coeficiente de confiabilidade e menor quantidade de intervenções permitem que a máquina opere por mais tempo (maior disponibilidade do equipamento) e se tenha menores custos em substituição de peças, o que pode proporcionar em uma maior produção durante a vida útil do equipamento. Entretanto, a manutenção preventiva não é dispensável, tendo em vista que, a longo prazo, seu rendimento aumenta com o nível de experiência do plano de manutenção adotado.

Também, é importante considerar que o torno em análise não opera como uma máquina da indústria, ou seja, não fica em operação de forma constante durante as horas de trabalho de uma empresa. Trata-se de uma máquina de laboratório com uso esporádico, sem fim lucrativos, utilizada para atividades acadêmicas. Portanto, a intervenção do maquinário para realizar a manutenção terá impacto reduzido e, a partir de avisos impressos no laboratório, os pesquisadores poderão se programar para uso do equipamento. Assim, identifica-se que a manutenção preditiva seria uma manutenção mais indicada para os casos em que o maquinário opera por várias horas e suas interrupções ocasionariam em grandes perdas.

Em vista dessas possíveis interrupções de uso, pode-se visualizar também a necessidade de manutenções corretivas. Ressalta-se que a realização de manutenção corretiva está associada à perda de produtividade e, ao se considerar o uso para ensino e pesquisa, pode-se considerar que o tempo de máquina parada não seria relevante. No entanto, há de se ponderar sobre as diferentes etapas administrativas associadas à obtenção e liberação de recursos em uma instituição de ensino, especificação pública, fazendo com que a execução da manutenção corretiva se torne demasiadamente demorada, podendo levar alguns semestres, o que impediria o uso do equipamento na formação dos alunos ou ainda poderia ocasionar a inutilização permanente do equipamento, caso o custo tornasse o processo inviável, indicando que métodos que evitem a necessidade de correção se destacam para esta aplicação.



Além disso, ressalta-se que o projeto não terá um investimento inicial, o que torna inviável comprar sensores, computadores e softwares para aplicar a manutenção preditiva. Portanto, ao verificar a situação atual do torno e considerando que é realizada apenas a manutenção corretiva, junto a uma rotina esporádica de lubrificação e troca de líquido, a melhor opção para otimizar este processo de manutenção seria a criação de um plano de manutenção embasado na manutenção preventiva. Kardec e Nasif (2012) também ressaltam que a escolha da manutenção preventiva é a mais ideal quanto mais fácil for a reposição, quando a ausência de manutenção pode apresentar um risco à saúde dos envolvidos, nesse caso técnicos e alunos, e quando não for possível a implementação da preditiva. Estes aspectos citados pelos autores se enquadram na realidade laboratorial da Universidade de Brasília.

Portanto, sabendo-se que ainda não há um modelo de gestão da manutenção para o torno do laboratório, a aplicação de um plano de manutenção preventiva sanaria diversos problemas e já reduziria ocasiões de interdição do equipamento. Com o baixo custo e a disponibilidade de técnicos, a aplicação deste plano torna-se viável para laboratórios de universidades com tornos antigos e sem investimento para equipamentos da manutenção preditiva.

#### **4.2.2. DETERMINAÇÃO DOS COMPONENTES DE VERIFICAÇÃO**

Para elaboração do plano preventivo adequado, é importante utilizar informações, tanto do fabricante do maquinário sobre seu ciclo de vida, quanto de dados de uso em condições específicas. Para tanto, deve-se conhecer os componentes do equipamento. No Quadro 1, são mostrados, de forma detalhada, os componentes do torno IMOR RN 400, em suas condições atuais.



**Quadro 1. Principais componentes do torno IMOR RN 400**

|   |   |   |
|---|---|---|
| Caixa Norton  | Alavanca Seletora de Polias   | Transmissão   |
|    |    |    |
| Eixo do Motor   | Caixa de Avanço e Recâmbio  | Cabeçote Móvel  |
|    |    |    |
| Conjunto de Carros  | Avental   | Placa Castanha (Cabeçote Fixo)  |
|  |  |  |
| Barramento  | Mangote   | Motor elétrico  |
|  |  |  |

Fonte: Autores (2022).

#### 4.2.3. DETERMINAÇÃO DAS ATIVIDADES DE VERIFICAÇÃO

As atividades de verificação para o plano de manutenção foram determinadas com base nos principais componentes do torno, expostos no Quadro 1. O primeiro componente é a caixa norton, onde se encontram as alavancas seletoras de velocidade. Para sua manutenção, foi determinada uma rotina de cinco atividades:



- Verificar vazamento de óleo na caixa (frequência: diária);
- Verificar ruídos anormais (frequência: diária);
- Verificar nível de óleo da caixa (frequência: semanal);
- Verificar funcionamento das alavancas (frequência: diária);
- Verificar folgas e ruídos no eixo árvore (frequência: semanal).

O funcionamento da alavanca de avanço indicará o funcionamento do fuso também. A alavanca é utilizada para selecionar as polias conectadas ao eixo de saída do motor. A seleção da polia adequada é determinada pelo técnico, conforme as necessidades da usinagem. Esse componente é localizado na parte inferior do torno, próximo à caixa norton. Além disso, sua manutenção está inclusa nas atividades anteriores.

A transmissão compreende o conjunto de engrenagens e eixos localizados atrás da caixa norton. Esse componente permite a variação na velocidade de rotação do fuso. Para manutenção adequada da transmissão, foi determinada uma rotina de 4 atividades:

- Verificar condições de integridade e folga na polia (frequência: semanal);
- Verificar folga entre as engrenagens (frequência: semanal);
- Verificar condições de integridade das engrenagens (frequência: semanal);
- Verificar condições de integridade e fixação das polias (frequência: semanal).

O eixo do motor conecta o motor elétrico do torno à polia da transmissão. Conforme pode ser observado na imagem deste componente no Quadro 1, também é possível identificar as polias e correias que transmitem a rotação. Para manutenção deste componente, foi determinada uma rotina de duas atividades:

- Verificar tensão das correias (frequência: semanal);
- Verificar condições de integridade das correias (frequência: semestral).

A caixa de avanço e recâmbio está localizada abaixo da Caixa Norton. É nela que se encontram as alavancas de automático e de velocidade. Para manutenção desse componente, foi determinada uma rotina de duas atividades:

- Verificar o nível de óleo da caixa (frequência: diária);
- Verificar o funcionamento das alavancas de automático e de velocidade (frequência: diária).

O cabeçote móvel é localizado no lado oposto ao cabeçote fixo e, assim como o conjunto de carros, se movimenta ao longo do barramento. Esse componente é utilizado como contra apoio para usinagem das peças, assim, é possível aumentar a estabilidade desta enquanto é usinada. É no cabeçote móvel que se encontra o mangote e o cone, onde se conectam mandris de haste cônica e ferramentas de corte de haste cônica, como brocas e alargadores. Para manutenção do cabeçote móvel, foi determinada uma rotina de 3 atividades:

- Verificar a folga e travamento do mangote e cabeçote (frequência: diária);
- Lubrificação do cone (frequência: diária);
- Verificação do alinhamento do cabeçote móvel com o fixo (frequência: semanal).



O conjunto de carros é composto por três partes: o carro principal, o carro transversal e o carro longitudinal. Esse conjunto é responsável pelo posicionamento da ferramenta de corte que permite a usinagem da peça. Assim como o cabeçote móvel, o conjunto de carros se movimenta ao longo do barramento, enquanto os carros transversal e longitudinal permitem o movimento da ferramenta de corte nas direções indicadas pelos nomes respectivamente. Para sua manutenção foi determinada uma rotina de 5 atividades:

- Verificar o funcionamento da alavanca de acionamento nas posições: neutro, reverso e partida (frequência: diária);
- Verificar o funcionamento das manivelas dos 3 carros (frequência: diária);
- Verificar as condições de integridade dos 3 carros (frequência: semanal);
- Verificar as condições de folga no barramento e nos 3 carros (frequência: semanal);
- Verificar as condições de integridade do varão (frequência: semanal).

O avental, conforme pode ser observado no Quadro 1, é acoplado ao conjunto de carros. Nele, são encontradas as alavancas de automático e de rosca, que permitem uma usinagem mais precisa da peça. Para manutenção do avental, foi determinada uma rotina de cinco atividades:

- Verificar presença de ruídos anormais (frequência: diária)
- Verificar se há vazamento de óleo (frequência: diária)
- Verificar o funcionamento das alavancas de automático e rosca (frequência: diária);
- Verificar nível de óleo da caixa (frequência: semanal);
- Efetuar inspeção interna: engrenagens, lubrificação, entre outras (frequência: anual).

A placa castanha, também denominada de cabeçote fixo, localizada na caixa norton, é o componente do torno em que a peça é acoplada para ser usinada. Ela é responsável por transmitir a rotação à peça. Para manutenção da placa castanha, é necessária uma rotina de duas atividades:

- Verificar condições de integridade da castanha (frequência: semanal);
- Verificar necessidade de ajuste da placa (frequência: semanal).

É importante ressaltar que, durante o uso, a placa castanha deve ser bem posicionada não só para a qualidade da usinagem como, também, para manutenção da integridade da máquina-ferramenta.

O barramento tem a função de trilho guia para movimentação do conjunto de carros e o cabeçote móvel. Para manutenção do barramento, faz-se necessário a rotina de duas atividades:

- Verificar as condições de integridade do barramento (frequência: semanal).
- Verificar a lubrificação do barramento (frequência: diária).

O Fuso consiste em um parafuso sem fim, localizado abaixo do barramento e conectado ao avental. Este componente permite a movimentação automática do conjunto de carros, determinada pelas configurações no avental. Para manutenção do fuso, foi determinada uma rotina de três atividades:



- Verificar as condições de integridade (frequência: semanal);
- Verificar se há folgas nas conexões do fuso (frequência: semanal);
- Executar inspeção geral do fuso (frequência: semestral).

Localizado abaixo do eixo árvore, o motor elétrico do torno é responsável pela conversão de energia elétrica em energia cinética, que será transferida para o eixo árvore, permitindo sua rotação. Para manutenção do motor, foi determinada uma rotina de três atividades:

- Verificar se há ruídos e vibrações anormais (frequência: mensal);
- Verificar as condições de integridade (frequência: mensal);
- Verificar a resistência do motor (frequência: semestral).

Além de todas as atividades específicas descritas, foram adicionadas à rotina de manutenção duas outras:

- Limpar o equipamento e retirar cavacos (frequência: diária);
- Verificar as condições dos fios, cabos e instalação elétrica (frequência: semanal).

A realização dos procedimentos propostos implica em baixo custo operacional, uma vez que a maioria das atividades listadas se referem à inspeção. Nos casos em que há necessidade de lubrificação, estima-se um custo mensal de R\$ 17,00 para compra de óleos lubrificantes para os barramentos e cone, considerando o valor médio de óleos para uso pesado, *heavy duty*, específicos para os componentes mencionados. Somado a isto, para a realização da limpeza do equipamento, estima-se um custo mensal de R\$ 10,00, para compra de estopa e pincel para remoção de resíduos e cavacos, respectivamente. Em suma, o custo anual para manutenção é estimado em R\$ 342,00.

Deve-se ressaltar que algumas etapas, como a verificação de vazamento de óleo, podem permitir a manutenção corretiva precoce, sem perda de lubrificante, associando, então, a um ganho, visto que o valor do óleo para Caixa Norton é estimado em R\$ 600,00. Nota-se, assim, que, caso um vazamento seja evitado, tem-se um ganho de R\$ 276,00, com base nos valores apresentados. Menciona-se que este levantamento de preços realizado em setembro de 2022, podendo ser necessária sua atualização para manter os valores adequados à época da aplicação do plano. Destaca-se ainda que, caso haja falha no equipamento, a manutenção corretiva deverá ser realizada.

#### **4.2.4. PLANO DE IMPLEMENTAÇÃO**

Com o objetivo de implantar a manutenção preventiva no torno IMOR RN 400, foi feito um Procedimento Operacional Padrão (POP) para atividades de manutenção diárias e um *checklist* de manutenção no Excel para atividades com frequência semanal, mensal, semestral e anual.

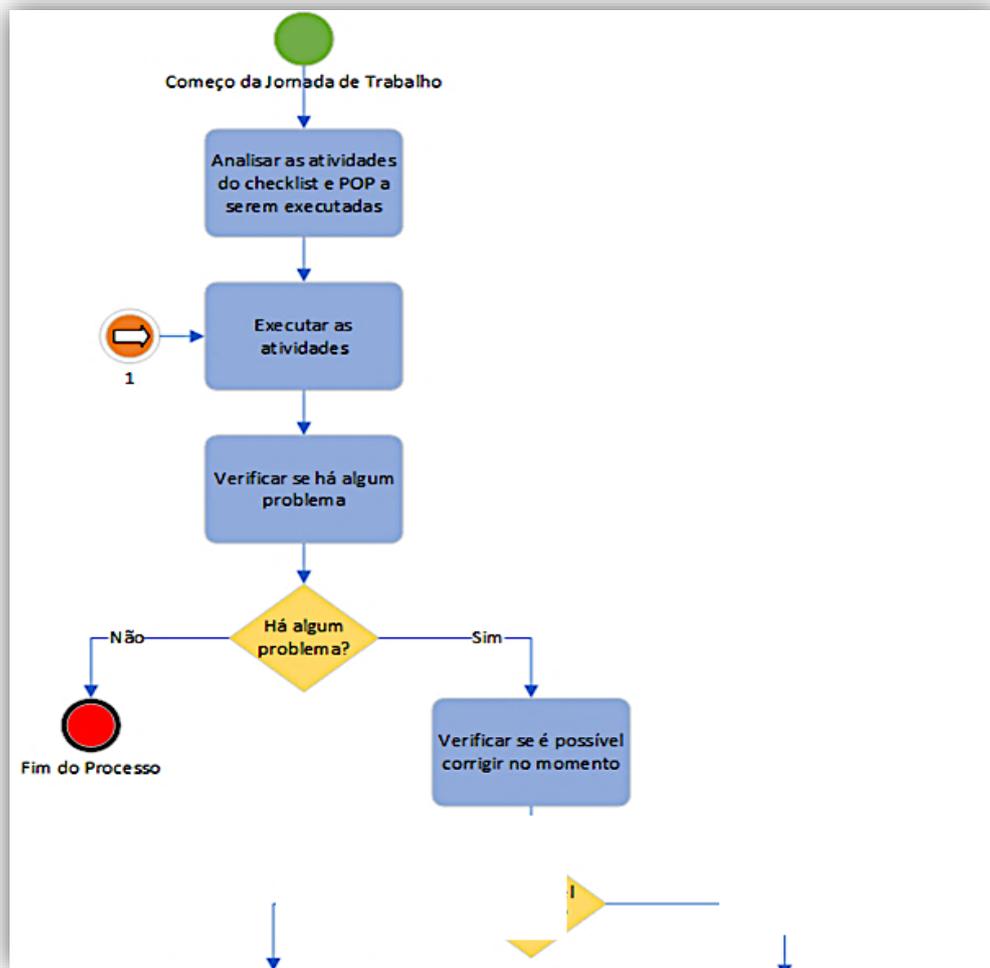
O POP desenvolvido tem o objetivo de facilitar a mudança de cultura do laboratório, sem necessitar que, diariamente, o técnico preencha uma planilha no Excel. O procedimento de inspeção diária deve ser feito antes e depois do uso do torno. Como os técnicos estão habituados a realizarem a manutenção corretiva, a implementação do plano de manutenção pode ser um processo difícil, portanto, o POP pode facilitar essa mudança.



O POP de manutenção diária do torno abrange o objetivo do plano de manutenção, aplicação do plano com suas devidas atividades, EPIs necessários, medidas de segurança e a lista com a descrição de dezessete atividades diárias a serem realizadas antes e depois do uso do torno.

Além disso, para garantir a boa execução do *checklist* e do POP de manutenção, desenvolveu-se um fluxograma de rotina diária, mostrado nas Figs. 3 e 4, que constitui uma ferramenta didática e de fácil acesso, para os técnicos do laboratório. O objetivo do fluxograma é mostrar como se deve desenvolver as atividades elencadas no *checklist* e no POP, Fig. 5, orientando a atuação desde a execução das atividades de inspeção até a volta da operação após uma interdição para manutenção. Para a elaboração do fluxograma, seguiu-se as regras da metodologia *Business Process Model and Notation* (BPMN).

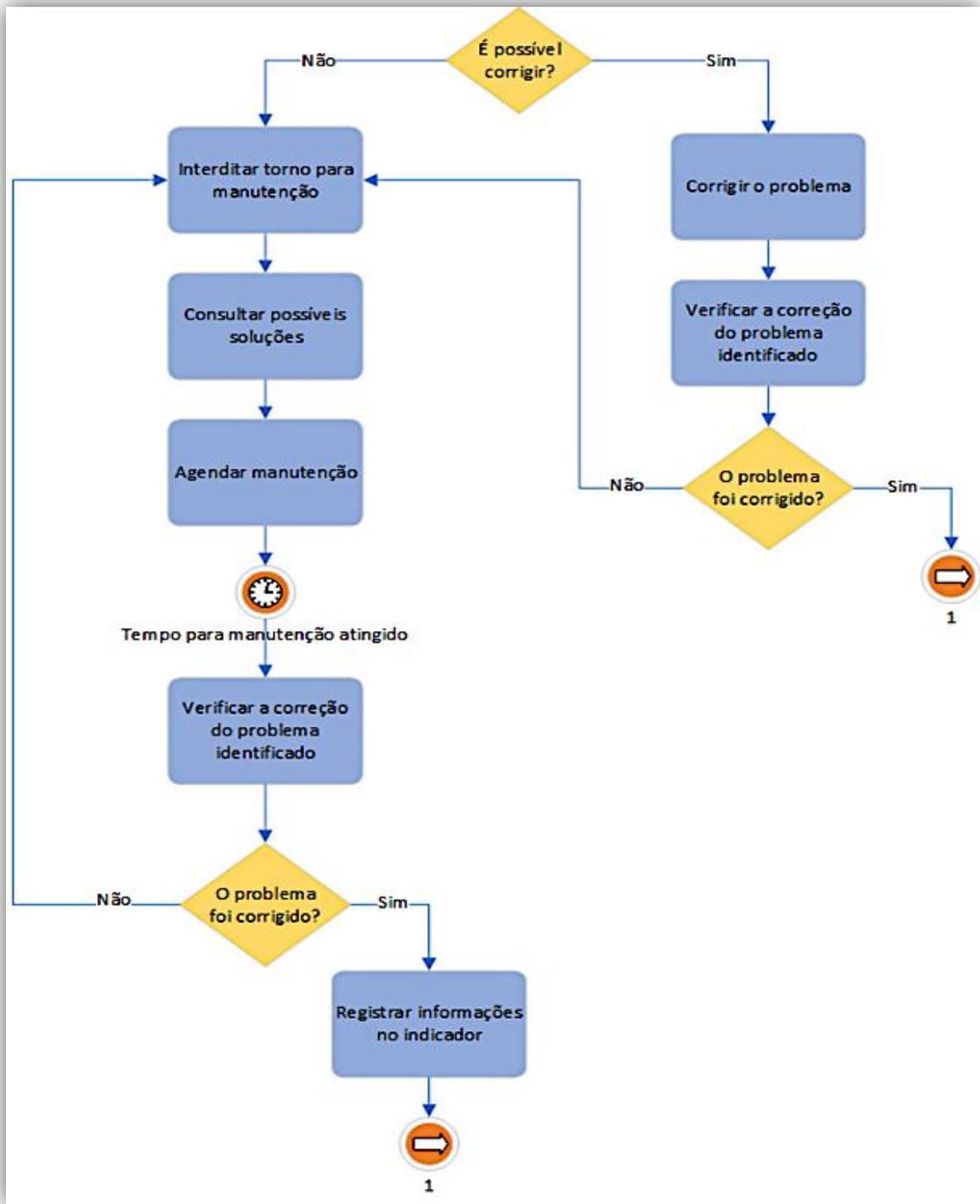
**Figura 3.** Fluxograma de execução do plano de manutenção, parte 1.



Fonte: Autores (2022).



Figura 4. Fluxograma de execução do plano de manutenção, parte 2.



Fonte: Autores (2022).



**Figura 5.** Procedimento Operacional Padrão (POP).

|  |   |
|--|---|
|   | <p><b>PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO (POP):</b><br/><b>Inspeção Diária Torno IMOR RN 400</b></p> |
| <p><b>OBJETIVO</b><br/>O objetivo desse POP é mostrar as atividades relacionadas na inspeção diária antes e depois do uso do Torno IMOR RN 400 que está localizado no SG 09 na Universidade de Brasília.</p> <p><b>APLICAÇÃO</b><br/>Este procedimento deve ser aplicado no SG 09.</p> <p><b>EPI'S NECESSÁRIOS</b><br/>- Jaleco;<br/>- Óculos de proteção;<br/>- Sapato fechado;<br/>- Protetor auricular.</p> <p><b>MEDIDAS DE SEGURANÇA</b><br/>- Cabelo preso;<br/>- Não usar manga comprida;<br/>- Não usar joias, bijuterias, relógio.</p> <p><b>FREQUÊNCIA E RESPONSABILIDADE</b><br/>A frequência desse trabalho é diária e deve ser feita pelos técnicos do laboratório.</p> <p><b>DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES A SEREM REALIZADAS DIARIAMENTE ANTES E DEPOIS DO USO DO MAQUINÁRIO:</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Verificar se a castanha está engrenada;</li><li>2. Verificar se o cabeçote móvel não está solto;</li><li>3. Verificar se o automático de rosca está acionado;</li><li>4. Verificar se os ruídos do motor estão anormais;</li><li>5. Verificar se o torno está funcionando sem ruídos estranhos;</li><li>6. Verificar vazamento de óleo no avental</li><li>7. Verificar funcionamento das alavancas (Automática e Rosca)</li><li>8. Verificar funcionamento das alavancas de automático e de rosca</li><li>9. Verificar folga e travamento do mangote e cabeçote</li><li>10. Verificar a lubrificação do cone;</li><li>11. Verificar vazamento de óleo na caixa;</li><li>12. verificar ruídos anormais</li><li>13. Verificar funcionamento da alavanca de acionamento nas posições: neutro, reverso e partida;</li><li>14. Verificar funcionamento das manivelas dos 3 carros;</li><li>15. Verificar funcionamento das alavancas de velocidade e avanço;</li><li>16. Limpeza geral do torno após o uso;</li><li>17. Lubrificar o barramento com óleo após a limpeza.</li></ol> |   |

Fonte: Autores (2022).



### 4.2.5. PLANO DE CONTROLE

Para que seja possível identificar a efetividade do plano de manutenção, necessitou-se do uso de indicadores para mensurar se houve melhoria no rendimento do torno (redução de falhas e maior tempo disponível).

Os indicadores empregados foram o Tempo Médio Entre Falhas, também conhecido pela sigla em inglês MTBF, que significa *Mean Time Between Failures*, o Tempo Médio para Reparos, do inglês *Mean Time to Repair* (MTTR) e a Disponibilidade. Para a execução destes indicadores, utilizou-se uma planilha do Excel otimizada com as fórmulas dos indicadores e os gráficos representando os resultados. Os gráficos servirão para analisar os resultados da manutenção preventiva de período a período e, portanto, concluir a eficácia da metodologia.

Visando a usabilidade da ferramenta, esta foi elaborada de modo que possa ser alimentada por vários períodos, considerando que cada período tem cerca de 1 semestre (maior prazo do checklist) e que haja, no máximo, 8 interrupções para correção de falhas. A planilha poderá ser utilizada até que seja feita a compra de um novo torno e inicie-se novamente o plano de manutenção.

O trabalho do técnico ou operador do torno será de preencher, durante o semestre, a quantidade de horas operadas pelo torno até as intervenções (MTBF) e a quantidade de horas em que o torno esteve interdito para cada interdição (MTTR). Testando a ferramenta e estimando valores na planilha, de acordo com a experiência do técnico responsável pelo torno, foi possível confirmar a sua aplicabilidade, podendo identificar o crescimento ou decréscimo na disponibilidade do torno. As Tabelas 2, 3 e 4 foram obtidas pela planilha desenvolvida e preenchimento de números estimados para simulação.

**Tabela 2.** Tabela para o indicador MTBF

| MTBF - TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS                           |                       |     |     |     |     |     |     |     |         |
|---|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
| $MTBF = \frac{\text{Tempo Operado}}{\text{Intervenções}}$ |                       |     |     |     |     |     |     |     |         |
| Períodos  | Tempo Operado (horas) |     |     |     |     |     |     |     | MTBF    |
|   | T1                    | T2  | T3  | T4  | T5  | T6  | T7  | T8  |         |
| Período 1   | 130                   | 145 | 120 | 124 | 152 | 300 | 500 | 120 | 198,875 |
| Período 2   | 496                   | 212 | 699 | 687 | 331 | 401 | 86  | 349 | 407,625 |
| Período 3   | 177                   | 105 | 639 | 588 | 627 | 334 | 383 | 437 | 411,25  |
| Período 4   | 396                   | 334 | 675 | 367 | 124 | 626 | 660 | 514 | 462     |
| Período 5   | 547                   | 251 | 475 | 510 | 313 | 314 | 205 | 622 | 404,625 |

Fonte: Autores (2022).

**Tabela 3.** Tabela para o indicador MTTR

| MTTR - TEMPO MÉDIO PARA REPAROS                               |                       |     |     |     |     |     |     |     |              |
|---|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|
| $MTTR = \frac{\text{Tempo Interditado}}{\text{Intervenções}}$ |                       |     |     |     |     |     |     |     |              |
| Períodos  | Tempo Operado (horas) |     |     |     |     |     |     |     | MTTR (horas) |
|   | T1                    | T2  | T3  | T4  | T5  | T6  | T7  | T8  |              |
| Período 1   | 50                    | 89  | 90  | 102 | 110 | 150 | 135 | 115 | 105,125      |
| Período 2   | 145                   | 109 | 132 | 120 | 41  | 124 | 33  | 79  | 97,875       |
| Período 3   | 89                    | 132 | 124 | 148 | 97  | 43  | 131 | 152 | 114,5        |
| Período 4   | 85                    | 140 | 83  | 51  | 33  | 158 | 125 | 63  | 92,25        |
| Período 5   | 74                    | 35  | 141 | 87  | 21  | 78  | 28  | 108 | 71,5         |

Fonte: Autores (2022).



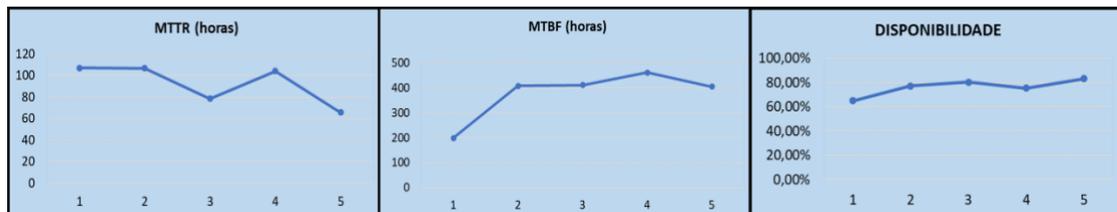
**Tabela 4.** Tabela para o indicador de Disponibilidade

| DISPONIBILIDADE DO TORNO                     |         |        |                 |
|--|---------|--------|-----------------|
| $Disponibilidade = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$ |         |        |                 |
| Período                                      | MTBF    | MTTR   | DISPONIBILIDADE |
| Período 1                                    | 198,875 | 107    | 65,02%          |
| Período 2                                    | 364,75  | 106,75 | 77,36%          |
| Período 3                                    | 323,375 | 78,5   | 80,47%          |
| Período 4                                    | 320,25  | 104,25 | 75,44%          |
| Período 5                                    | 328,5   | 65,75  | 83,32%          |

Fonte: Autores (2022).

A partir dos dados preenchidos, um gráfico foi gerado para cada indicador, conforme exposto na Fig. 6, para melhor visualização do desempenho destes ao longo do tempo.

**Figura 6.** Gráfico dos indicadores MTTR, MTBF, Disponibilidade



Fonte: Autores (2022).

Portanto, desta forma, será possível inferir possíveis mudanças no plano de manutenção visando um aumento na disponibilidade. Quanto mais períodos e mais dados forem coletados sobre o plano e suas mudanças, mais próximo estará da otimização deste.

## 5. CONCLUSÃO

Diversas Universidades brasileiras dependem de equipamentos antigos para o desenvolvimento de atividades de ensino e pesquisa. Portanto, é importante que estes sejam mantidos em funcionamento durante um longo horizonte de tempo. No Laboratório de usinagem da UnB, um torno fabricado no ano de 1960 é utilizado para essas atividades. Portanto, nota-se a importância de executar, de forma adequada, a sua manutenção.

O plano de manutenção proposto neste trabalho foi baseado na manutenção preventiva, tendo em vista, principalmente, a limitação do projeto quanto aos recursos financeiros para proposição da manutenção preditiva. Portanto, a escolha desse tipo de manutenção direcionou e delimitou o escopo do projeto, visando obter o melhor resultado.

Para elaboração do plano, foi realizada a descrição dos componentes do torno a serem verificados, sendo a caixa norton, a alavanca seletora de polias, a transmissão, o eixo do motor, a caixa de avanço e recâmbio, o cabeçote móvel, o conjunto de carros, o avental, a placa castanha (cabeçote fixo), o barramento, o mangote e o Motor elétrico. Com essa definição, as atividades a serem desenvolvidas para realização da manutenção foram definidas e estas constituem atividades de verificação, lubrificação, inspeção e limpeza. Para auxiliar



nesse processo, o POP, um *checklist* e um fluxograma foram construídos. Essas ferramentas tornarão o processo de implementação e execução do plano menos complexo.

Ressalta-se que o custo anual estimado para realização do plano de manutenção proposto é de R\$ 342,00, correspondentes à aquisição de óleos lubrificantes para os barramentos e à compra de estopa e pincel para remoção de resíduos e cavacos.

Além disso, indicadores de manutenção (MTBF, MTTR, Disponibilidade) serão analisados para verificação do desempenho do plano. Para tanto, tabelas e gráficos foram desenvolvidos. Assim, com a implementação do plano de manutenção, sugere-se também a otimização deste por meio de análise futura dos indicadores propostos nesse estudo.

Ressalta-se que, conforme análise bibliográfica realizada, muitas pesquisas publicadas na área ainda são desenvolvidas utilizando tornos antigos. Assim, o plano de manutenção proposto neste estudo pode ser replicado e adaptado pelos demais laboratórios de ensino e pesquisa.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a análise dos indicadores para identificar possíveis mudanças no plano de manutenção, a fim de obter-se melhores resultados até que se encontre o plano ideal. Além disso, apesar da pesquisa bibliográfica efetuada, não foi possível encontrar o manual do usuário oficial do modelo IMOR RN 400 devido este ser muito antigo. Sendo assim, como sugestão de análise futura, recomenda-se a busca ou compra de manuais de usuário deste modelo ou de modelos similares para revisão e refinamento do plano de manutenção proposto.

## REFERÊNCIAS

CAPES. GEOCAPES. (2021). Sistema de Informações Georreferenciadas: Plataforma de Acesso Aberto. Brasília: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Ministério da Educação.

Chin, H. H.; Varbanov, P. S.; Klemeš, J. J.; Benjamin, M. F.D.; Tan, R.R. (2020). Asset maintenance optimization approaches in the chemical and process industries – A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 164, 162-194. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.09.034>

Clarivate Analytics. (2017). Research in Brazil. *A report for CAPES by Clarivate Analytics*, 73 p.

CNC Machining Industry Trends 2019-3ERP. Recuperado de: <https://www.3erp.com/blog/cnc-machining-industry-trends-2019/>

Darestani, S. A., Ganji, M., & Imannezhad, R. (2020). What are the key determinants of maintenance performance? *Production*, 30, e20190155. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20190155>

De Jonge, B.; Scarf, P. A. (2020). A review on maintenance optimization. *European Journal of Operational Research*, 285(3), 805-824. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.047>

Flynn, B. B., Sakakibara, S., Schroeder, R. G., Bates, K. A., Flynn, J. (1990). Empirical research methods in operations management. *Journal of operations management*, 9, 250–284. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(90\)90098-X](https://doi.org/10.1016/0272-6963(90)90098-X)



- Florian, E.; Sgarbossa, F.; Zennaro, I. Machine learning-based predictive maintenance: A cost-oriented model for implementation. *International Journal of Production Economics*, 236, 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108114>
- Kardec, A. & Nascif, J. (2012) *Manutenção: Função Estratégica*. 4ª.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora.
- Kumar, U., Galar, D., Aditya, P., Stenstroöm, C. (2013). Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19, 233-277. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0029>
- McGraw-Hill Handbooks. (2008). *Maintenance Engineering Handbook*. 7ª ed. McGraw-Hill Companies. <https://doi.org/10.1036/0071546464>
- MCTIC. (2016). Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016-2022: sumário executivo. *Documento do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações*, 132 p.
- Nalbant, M., Gokkaya, H., Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials and Design*, 28, 1379–1385. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.008>.
- Onawumi, A.S.; Aremu, A.; Ajiboso, O.A.; Agboola, O.O.; Olayanju, T.M.A.; Osueke, C.O. (2021). Development of strategic maintenance prediction model for critical equipment maintenance. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2820-2827. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1163>
- Pascal, V.; Toufik, A.; Manuel, A.; Florent, D.; Frédéric, K. (2019). Improvement indicators for Total Productive Maintenance policy. *Control Engineering Practice*. 82, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.09.019>
- Pinto, G.; Silva, F.J.G.; Baptista, A.; Fernandes, N.O.; Casais, R.; Carvalho, C. (2020). TPM implementation and maintenance strategic plan – a case study. *Procedia Manufacturing*. 51, 1423-1430. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.198>
- Putri, N. T.; Taufik; Buana, F. S. (2020). Preventive Maintenance Scheduling by Modularity Design Applied to Limestone Crusher Machine. *Procedia Manufacturing*, 43, 682–687. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.123>
- Savsar, M. (2006). Effects of maintenance policies on the productivity of flexible manufacturing cells. *Omega*, 34(3), 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.10.010>
- Serge, M.; Patrick, T.; Duquenoy, F. (2016). An Overview of Linear, Air Bearing, and Piezo Stages in Three-Dimensional Microfabrication Using Two-photon Polymerization: Micro and Nano Technologies, *Motion Systems*, Cap. 6, 148-167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35321-2.00008-X>
- Sharifi, M.; Taghipour, S. (2021). Optimal production and maintenance scheduling for a degrading multi-failure modes single-machine production environment. *Applied Soft Computing*, 106, 107312. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107312>
- Smith, R.; Mobley, R. K. (2008). Measuring Mean Time between Failures in Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers. *MTBF User Guide*, Cap. 17, 283-284.
- Theissler, A; Pérez-Velázquez, J.; Kettelgerdes, M.; Elger, G. (2021). Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 215, 107864. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107864>



Thomas Publishing Company. (2020). *CNC Machining Projected to be \$100B Industry by 2025*. Recuperado de: <https://www.thomasnet.com/insights/cnc-machining-projected-to-be-100b-industry-by-2025/>

UNESCO. (2021). A corrida contra o tempo por um desenvolvimento mais inteligente; resumo executivo e cenário brasileiro. *Relatório de ciências da UNESCO*, 49 p.

Vitayasak, S.; Pongcharoen, P.; Hicks, C. (2019). Robust machine layout design under dynamic environment: Dynamic customer demand and machine maintenance. *Expert Systems with Applications: X*, 3, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.eswax.2019.100015>

Yan, R.; Dunnett, S.J.; Jackson, L.M. (2018). Novel methodology for optimising the design, operation and maintenance of a multi-AGV system. *Reliability Engineering and System Safety*, 178, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.06.003>

Zhang, W.; Yang, D.; Wang, H. (2019). Data-Driven Methods for Predictive Maintenance of Industrial Equipment: A Survey. *IEEE Systems Journal*, 13(3), 2213-2227. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2905565>

Zhang, Z.; Tang, Q. (2021). Integrating flexible preventive maintenance activities into two-stage assembly flow shop scheduling with multiple assembly machines. *Computers & Industrial Engineering*. 159, 107493. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107493>

---

