



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

Thaís Braga Baker

**Projeto de bancada de testes com princípios de gêmeo
digital**

Campinas
2023

Thaís Braga Baker

Projeto de bancada de testes com princípios de gêmeo digital

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Robert Eduardo Cooper Ordonez

Campinas
2023

*Não sei...
se a vida é curta
ou longa demais para nós.*

*Mas sei que nada do que vivemos
tem sentido,
se não tocarmos o coração das pessoas.*
(Cora Coralina)

Agradecimentos

Gostaria começar agradecendo aos meus pais, que me sustentaram financeiramente durante boa parte da minha graduação, mas principalmente me deram uma base sólida para crescer e aprender, firmando o alicerce espiritual que me sustenta diariamente.

Agradecer ao meu irmão, que compartilhou comigo boa parte dos desafios da vida, incluindo esta graduação em engenharia mecânica na Unicamp.

À toda minha família que sempre esteve me suportando em oração e acreditando em meu potencial. Em especial à minha prima Lilian e sua família que, pela proximidade geográfica, puderam me apoiar mais diretamente.

Aos amigos que me acompanharam durante a faculdade, em sala de aula, extra-curriculares, iniciação científica, estágio, e tantas outras atividades que me envolvi. Agradeço em especial à Alice Brun, que me deu apoio quando eu mais precisei e me proporcionou uma das melhores experiências da vida.

Agradeço também aos meus amigos da igreja, que de várias maneiras já contribuíram e ainda têm contribuído para a conclusão desse curso. Em especial à Daniele Kuchenbecker, sem a qual este seria, provavelmente, mais um trabalho inacabado.

Agradeço à Setup Automação, por ter acreditado nas habilidades conquistadas durante a graduação, mesmo sem ter o diploma para comprová-las, e por me desafiar diariamente com projetos ousados, como o que deu origem a este trabalho. Agradeço especialmente ao William Heinrich, por todo apoio, puxões de orelha e investimento feitos em mim. Agradeço também ao Gabriel Gama, que ajudou durante a escrita e na revisão deste trabalho.

Agradeço aos professores que fizeram parte da minha jornada acadêmica, contribuindo para minha formação em engenharia mecânica e deixando sua marca na vida de todos os estudantes que já passaram por essa instituição. Em especial aos professores doutores Alberto Serpa e Gregory Daniel, que em momentos distintos aceitaram serem meus orientadores em EM919 e me buscaram para que eu concluísse a graduação, mesmo não tendo atingido o objetivo àquela época, seus esforços não foram em vão. Agradeço também ao meu atual orientador, prof. dr. Robert Cooper, que aceitou me orientar mesmo já tendo fechado as orientações previstas para o semestre.

Agradeço também a todo o corpo de servidores da Unicamp, em específico aos servidores da Faculdade de Engenharia Mecânica, sem os quais não haveria estrutura para o funcionamento da universidade. Em especial à Ana Cristina Flosi da secretaria de graduação da engenharia mecânica, por todo amor e cuidado que tem para com os alunos.

Existem muitas outras pessoas e instituições às quais deveria agradecer por todas as experiências que vivi durante a faculdade. Porém o agradecimento mais importante é para com aquele sem o qual nada disso faria sentido. O único Deus, o Senhor do tempo, que determina e controla tudo que já existiu, existe e ainda virá a existir. Somente a Ele seja toda a glória!

Sumário

Resumo	6
Lista de Figuras	7
Lista de Tabelas	8
1 Introdução	9
2 Revisão bibliográfica	13
2.1 Manutenção preditiva e vida útil	13
2.2 Indústria 4.0 e Gêmeo digital	16
3 Desenvolvimento	19
3.1 Bancada	19
3.2 Vida útil	20
3.2.1 Terminal rotular	21
3.2.2 Rolamentos cônicos	23
3.2.3 Fuso de esferas	23
3.3 Gêmeo digital	24
4 Resultados	26
5 Conclusões	30
Referências bibliográficas	32
A Código em LabView	35

Resumo

Os gêmeos digitais são uma representação digital de um equipamento real e seu uso na indústria brasileira ainda é bem escasso. Como um primeiro passo para a introdução dessa nova tecnologia em um contexto industrial, esse trabalho propôs a utilização de conceitos de gêmeos digitais para a inclusão de um indicador de vida útil, voltado para a manutenção preventiva de uma bancada de testes. A vida útil dos componentes estruturais da bancada foi estudada e selecionou-se o fuso de esferas como o componente mais crítico. O indicador de vida útil do fuso de esferas foi então inserido na bancada e os valores acompanhados durante um período. Os resultados demonstraram a efetividade do indicador e novos alarmes de manutenção para bancada serão propostos utilizando esse indicador como base.

Palavras-chave: manutenção preditiva; gêmeo digital; vida útil.

Lista de Figuras

1.1	Foto da bancada de testes	11
3.1	Bancada de acionamento completa - vista lateral	19
3.2	Bancada de acionamento completa - vista superior	19
3.3	Conjunto avançado	20
3.4	Conjunto recuado	20
3.5	Diagrama de corpo livre da bancada	21
3.6	Diagrama de corpo livre do terminal rotular	22
3.7	Diagrama de corpo livre do par de rolamentos cônicos	23
3.8	Diagrama de corpo livre do conjunto castanha e fuso de esferas	24
4.1	Foto da contaminação por limalha de alumínio	26
4.2	Dados coletados da bancada em funcionamento com contaminação	27
4.3	Dados coletados da bancada em funcionamento com contaminação - foco em dois ciclos	27
4.4	Dados coletados da bancada em funcionamento sem contaminação	28
4.5	Dados coletados da bancada em funcionamento sem contaminação - foco em dois ciclos	28
A.1	Código em LabView	36

Lista de Tabelas

4.1	Dados de vida útil	29
4.2	Comparação de horas	29

Capítulo 1

Introdução

Desde a Idade da Pedra, o desenvolvimento de tecnologias faz parte da sociedade. Enquanto naquela época se criavam ferramentas feitas de pedra, as quais foram fundamentais para evolução nas técnicas de caça e surgimento da agricultura, em meados da segunda década do século XXI, iniciou-se o que é chamado de Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0. Os avanços tecnológicos ocorridos ao longo de milhões de anos foram responsáveis por transformar a forma de viver da humanidade. Uma vez que os desafios relacionados à sobrevivência foram destrinchados, o ser humano se propôs a endereçar questões mais complexas, levando ao desenvolvimento de máquinas e à produção em larga escala. A criação de computadores e a automação de processos acelerou ainda mais o progresso tecnológico e o crescimento das indústrias.

Um projeto de alta tecnologia desenvolvido pelo governo alemão desde 2011 (ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016), com o objetivo de levar sua produção à total independência da mão de obra humana, foi o que marcou o início da Quarta Revolução Industrial. Enquanto na Terceira Revolução Industrial iniciou-se o processo de automação, a partir Indústria 4.0 tornou-se possível a intercomunicação entre máquinas e dispositivos, viabilizando maior controle da produção e permitindo identificar oportunidades de redução de custos. Algumas das principais tecnologias desse período são: Internet das Coisas (do inglês Internet of Things) (IoT), Computação em Nuvem (do inglês Cloud Computing), Megadados (do inglês Big Data) e Inteligência Artificial (IA) (RIBEIRO; ABREU, 2020).

Também faz parte da Indústria 4.0 o conceito de Gêmeo Digital (do inglês Digital Twin). Conforme definição apresentada pela IBM (2020, tradução própria), “gêmeo digital é um modelo virtual projetado para refletir com precisão um objeto físico”. Esse modelo imita o com-

portamento de um objeto ou sistema real e pode ser alimentado com dados em tempo real, provenientes de sensores que medem variáveis físicas do sistema.

Quando aplicado a máquinas, por exemplo, o gêmeo digital torna possível monitorar o comportamento do sistema e prever o impacto nos componentes devido aos esforços realizados. Assim, é possível identificar problemas de performance ou comportamentos diferentes do esperado, que poderiam levar a um desgaste prematuro (LI et al., 2023). Além disso, o gêmeo digital permite a realização de manutenção preditiva, a qual otimiza o aproveitamento dos componentes, já que a recomendação de substituição será feita somente quando houver a necessidade real (LIU, H. et al., 2022b). Isso é um diferencial em relação à manutenção preventiva, que recomenda a troca em um período pré-estabelecido, sem levar em conta as condições reais de uso.

Diante dos benefícios proporcionados, a tecnologia de gêmeo digital tem sido adotada por empresas que desejam otimizar seus produtos, processos e sistemas através de um ambiente virtual que permita simular e prever situações antes que elas afetem o objeto real. De acordo com uma pesquisa realizada pelo Capgemini Research Institute (2023), 81% das empresas entrevistadas concordam que gêmeos digitais ajudam a melhorar a confiabilidade dos seus sistemas. A mesma pesquisa, publicada em 2023, indica um aumento de 40% de aumento no investimento dos setores de defesa e aeroespacial em tecnologia de gêmeo digital ao longo do ano do último ano.

As aplicações de gêmeo digital são inúmeras, desde sistemas mais simples, como a réplica de uma cafeteira em um aplicativo que indica o status do café preparado, até complexas plantas industriais e as máquinas que a compõe. Para o estudo desenvolvido neste trabalho, identificou-se a oportunidade de atuar na otimização de bancadas de testes, endereçando o seguinte questionamento: como prever possíveis falhas no comportamento do sistema de uma bancada de testes, para evitar a quebra de componentes e a consequente parada não planejada do equipamento?

A utilização de um gêmeo digital, neste caso, permite endereçar o monitoramento do comportamento do sistema e a identificação de eventuais falhas, que afetariam a vida útil dos componentes. Como o modelo virtual permite identificar o problema de forma preditiva, ou seja, antes que a quebra do componente de fato ocorra, torna-se possível fazer o planejamento da manutenção de forma planejada.

A bancada de testes utilizada nesse trabalho Figura 1.1, que será descrita em detalhes no Capítulo 3, foi desenvolvida para testar um atuador pneumático, cujo controle e leitura de dados é realizado por um servo-motor. Para transformar a força linear do atuador pneumático em torque rotativo do motor é utilizado um fuso de esferas, que foi identificado como o componente mais crítico da bancada. Isso se dá pelo fato de ele ser o principal elemento do conjunto para garantir o correto funcionamento do sistema, além de ser o item exposto aos maiores esforços e possuir um custo elevado.



Figura 1.1: Foto da bancada de testes

Assim, o objetivo geral deste trabalho é iniciar a implementação de um gêmeo digital para o fuso de esferas de uma bancada de testes, a fim de monitorar o impacto sobre sua vida útil, causado pelas forças que atuam sobre ele.

Para desenvolver o modelo, serão utilizados dados coletados durante os testes de torque e rotação instantâneos com modelos preditivos de falhas já consolidados no mercado, a fim de aumentar a acuracidade da predição de falha. Com informações de torque do sistema fornecidas ao modelo em tempo real, será possível identificar eventuais desvios nas condições do teste, que irão impactar imediatamente a vida útil calculada do equipamento.

Diante disso, este trabalho aborda os seguintes objetivos específicos:

- Definir o elemento mais crítico da bancada;
- Desenvolver o modelo virtual do fuso de esferas;
- Implementar o modelo desenvolvido em uma bancada de testes real.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Manutenção preditiva e vida útil

A manutenção é um conjunto de atividades planejadas e executadas com o objetivo de preservar a funcionalidade, confiabilidade e vida útil de equipamentos, máquinas ou sistemas. Ela abrange procedimentos preventivos, corretivos e preditivos, visando evitar falhas inesperadas, maximizar a eficiência operacional e reduzir custos associados a paradas não programadas. A importância da manutenção reside na sua capacidade de garantir a segurança, otimizar o desempenho dos ativos e aumentar a produtividade, impactando positivamente a rentabilidade de organizações em diversos setores, desde a indústria até serviços essenciais, como saúde e transporte. Uma estratégia eficaz de manutenção não apenas prolonga a vida útil dos equipamentos, mas também contribui para a sustentabilidade operacional e a satisfação dos clientes ao garantir a disponibilidade contínua dos serviços oferecidos.

A manutenção de equipamentos e sistemas é uma prática essencial para garantir a operacionalidade e prolongar a vida útil dos ativos. Existem três tipos principais de manutenção: corretiva, preventiva e preditiva. A manutenção corretiva intervém apenas após a ocorrência de uma falha, buscando restaurar o funcionamento normal do equipamento. Por outro lado, a manutenção preventiva é realizada de forma programada e regular, com o objetivo de evitar falhas imprevistas por meio de inspeções, substituições e ajustes periódicos. Já a manutenção preditiva é uma abordagem avançada que se baseia na monitorização contínua e na análise de dados para prever possíveis falhas antes que aconteçam, permitindo a realização de intervenções específicas no momento certo, minimizando custos e maximizando a eficiência operacional. Cada tipo de manutenção possui suas vantagens e desvantagens, sendo essencial

a adoção de estratégias combinadas para garantir a confiabilidade e a eficácia dos processos de manutenção em uma organização.

A manutenção corretiva é reativa e ocorre após a ocorrência de uma falha, visando restaurar o equipamento ao seu funcionamento normal. Apesar de necessária em situações emergenciais, ela pode acarretar paradas não programadas, impactando a produtividade e gerando custos adicionais.

A manutenção preventiva, por outro lado, é planejada e baseada no tempo ou no uso, realizada regularmente para evitar falhas. Ela envolve inspeções, lubrificação, substituição de peças e ajustes, prevenindo problemas potenciais antes que ocorram. Essa estratégia visa reduzir o desgaste e prolongar a vida útil dos equipamentos, contribuindo para a confiabilidade operacional.

A manutenção preditiva, por sua vez, utiliza dados e tecnologia para monitorar continuamente o estado dos equipamentos. Ela se baseia na análise de informações coletadas por sensores e sistemas de monitoramento para prever falhas e agendar intervenções no momento mais adequado (DUARTE, 2017). Essa abordagem busca maximizar a eficiência, reduzindo paradas não programadas e minimizando custos de manutenção, já que as intervenções são realizadas somente quando necessárias, otimizando recursos e aumentando a confiabilidade dos equipamentos.

A manutenção desempenha um papel crítico na gestão eficaz do ciclo de vida dos equipamentos, influenciando diretamente sua durabilidade e performance ao longo do tempo. O ciclo de vida de um equipamento refere-se ao conjunto de fases que ele atravessa desde sua concepção, fabricação, utilização, manutenção até sua retirada de serviço. Essas etapas podem incluir o projeto inicial, a produção, a instalação, a operação, a manutenção regular, as intervenções corretivas e, por fim, o descarte ou substituição do equipamento. A vida útil, por outro lado, é o período durante o qual o equipamento é funcional e pode desempenhar suas funções dentro dos parâmetros estabelecidos, sendo determinada pela combinação de fatores como qualidade do material, uso adequado e manutenção adequada (KARDEC, 2006; JARDINE; TSANG, 2013).

A manutenção está intrinsecamente ligada ao ciclo de vida e à vida útil do equipamento, impactando diretamente esses conceitos. Uma estratégia de manutenção adequada pode prolongar a vida útil, maximizando a eficiência operacional do equipamento ao longo de suas diferentes fases. As intervenções de manutenção preventiva e preditiva podem minimizar o desgaste, prevenir falhas e estender a funcionalidade do equipamento, aumentando assim sua

vida útil. Por outro lado, a falta de manutenção ou intervenções inadequadas podem encurtar a vida útil do equipamento, causando depreciação precoce, falhas frequentes e, consequentemente, a necessidade de substituição ou reparos dispendiosos.

As análises teóricas de vida útil têm evoluído ao longo do tempo devido às mudanças nos métodos de produção, avanços tecnológicos e uma compreensão mais profunda dos processos de depreciação e desgaste dos ativos. Inicialmente, as estimativas de vida útil eram mais estáticas e baseadas em dados históricos e expectativas genéricas, sem considerar variáveis específicas. Contudo, com a crescente sofisticação das técnicas de manutenção e análise de dados, as contas de vida útil tornaram-se mais dinâmicas e orientadas por dados em tempo real. A integração de sistemas de monitoramento, sensores e análises preditivas permitiu uma avaliação mais precisa e contínua da vida útil dos ativos, considerando fatores como condições operacionais, padrões de uso e degradação, resultando em previsões mais precisas e em estratégias de manutenção mais eficientes (DINTER; TEKINERDOGAN; CATAL, 2022).

Na indústria 4.0, a vida útil dos equipamentos está intimamente ligada à implementação da manutenção preditiva (DUARTE, 2017; ARROMBA et al., 2021; CORDEIRO; ORDÓÑEZ; FERRO, 2019). A capacidade de coletar e analisar dados em tempo real por meio de sensores e sistemas avançados permite prever com precisão o desgaste e as falhas potenciais dos ativos industriais. Ao adotar a manutenção preditiva, as organizações conseguem não apenas estender a vida útil dos equipamentos, mas também minimizar paradas não programadas, otimizar a eficiência operacional e reduzir custos de manutenção. Com algoritmos de machine learning e inteligência artificial, a manutenção preditiva na indústria 4.0 possibilita a identificação de padrões complexos nos dados, permitindo intervenções precisas no momento ideal, antes que problemas significativos ocorram, elevando a confiabilidade dos ativos e maximizando sua utilização ao longo do tempo.

Além disso, a integração da manutenção preditiva na indústria 4.0 facilita a transição de um modelo de manutenção reativa ou preventiva para uma abordagem mais proativa. Essa mudança de paradigma impulsiona a eficiência ao programar intervenções de manutenção com base em indicadores reais de degradação e desempenho dos equipamentos. Ao antecipar falhas potenciais e agir de maneira preventiva, as empresas podem estender a vida útil dos ativos, maximizando seu retorno sobre o investimento e promovendo a competitividade no ambiente industrial moderno.

2.2 Indústria 4.0 e Gêmeo digital

A Revolução Industrial, marcada pela Indústria 1.0, introduziu a mecanização através de máquinas a vapor, impulsionando a transição da produção manual para a industrialização em massa. Com a Indústria 2.0, veio a eletricidade e a linha de montagem, permitindo uma produção mais eficiente e padronizada, levando a uma maior disponibilidade de produtos. Posteriormente, a Indústria 3.0 trouxe a automação e a informatização, incorporando eletrônicos e computadores nas fábricas, resultando em uma produção mais precisa e flexível (PENG et al., 2022; LIU, H. et al., 2022a).

A Indústria 4.0, a revolução atual, representa a convergência de tecnologias digitais e físicas. Essa revolução combina a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, análise de dados e automação avançada. O objetivo é criar fábricas inteligentes e conectadas, onde máquinas, sistemas e produtos interagem em rede. Isso possibilita a tomada de decisões autônomas e a otimização de processos, impulsionando a eficiência, a personalização e a inovação na produção industrial.

Entre as evoluções das indústrias, houve uma constante busca por eficiência, aumento da produção e redução de custos. Cada fase introduziu tecnologias distintas para alcançar esses objetivos: desde a mecanização à automatização e integração dos sistemas com o advento da digitalização (FERSMAN, 2022). A Indústria 4.0 representa não apenas uma evolução tecnológica, mas uma mudança fundamental na forma como a produção é gerenciada, permitindo uma interconexão sem precedentes entre o mundo físico e o digital.

A Indústria 4.0 representa uma revolução significativa na forma como a produção é concebida e gerenciada. Sua importância transcende a mera evolução tecnológica, marcando uma mudança fundamental nos processos industriais. Ao incorporar tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, análise de dados e automação avançada, essa abordagem permite não apenas uma melhoria na eficiência operacional, mas também uma inovação substancial (FERSMAN, 2022). Essa inovação se manifesta na capacidade de tomar decisões baseadas em dados em tempo real, personalizar a produção de acordo com as demandas específicas do mercado e criar produtos e serviços mais inovadores.

A Indústria 4.0 não só promove maior eficiência e produtividade, mas também impulsiona a competitividade global das organizações, conferindo-lhes vantagem em um ambiente empresarial cada vez mais dinâmico e interconectado. Essa abordagem redefine não apenas os processos de produção, mas também os modelos de negócios, estimulando uma nova era de

excelência operacional e inovação industrial. Na vanguarda da revolução tecnológica, a Indústria 4.0 abrange nove áreas essenciais que remodelam os processos industriais. A Internet das Coisas (IoT) possibilita a interconexão de dispositivos para a troca instantânea de dados, viabilizando o controle remoto e monitoramento de sistemas. A Inteligência Artificial (IA) e o Aprendizado de Máquina (ML) capacitam sistemas a aprender com dados, automatizando processos e oferecendo análise preditiva. A análise de Big Data fornece insights valiosos para tomada de decisões estratégicas e otimização de processos (LIU, C. et al., 2020; BOFILL et al., 2023).

Além disso, a Manufatura Aditiva, também conhecida como impressão 3D, possibilita a fabricação camada por camada, permitindo a personalização e reduzindo desperdícios. A Robótica Avançada e a Automação introduzem sistemas colaborativos e automatizados, aprimorando eficiência e segurança. A Realidade Aumentada (RA) e Virtual (RV) oferecem ambientes simulados e informações sobrepostas, utilizados para treinamento e design de produtos. A tecnologia Blockchain garante segurança e transparência em cadeias de suprimentos, enquanto a Cibersegurança Industrial protege sistemas contra ameaças cibernéticas.

Por fim, os Sistemas de Simulação e os Gêmeos Digitais (réplicas digitais de sistemas físicos) permitem simulações virtuais, facilitando tomadas de decisão mais precisas. Essas nove áreas fundamentais formam a espinha dorsal da Indústria 4.0, catalisando inovação, eficiência e competitividade nas operações industriais modernas.

O gêmeo digital é uma representação virtual em tempo real de um objeto físico, processo ou sistema. Ele opera em diversos níveis de implementação, desde um modelo básico que reflete as características e comportamentos principais do objeto real até um nível avançado que replica detalhadamente todas as interações e dinâmicas do objeto físico. Essa representação digital permite a simulação, monitoramento, previsão de desempenho e testes de diferentes cenários, contribuindo para otimização de processos, tomada de decisões e manutenção preditiva em áreas como manufatura, saúde, transporte e outros setores industriais.

O conceito de gêmeo digital abrange diferentes níveis de implementação, cada um oferecendo uma representação virtual do objeto físico com variação em termos de detalhamento e complexidade. No nível básico, o gêmeo digital é uma simplificação que captura apenas as características principais do objeto real, fornecendo uma visão geral do sistema. Por outro lado, o nível intermediário aumenta o detalhamento, incorporando informações mais precisas e complexas, como dados de sensores e interações entre componentes. Já no nível avançado, o

gêmeo digital é altamente sofisticado, replicando de forma quase perfeita todas as propriedades e interações do objeto físico. Esse nível permite simulações detalhadas e precisas, sendo capaz de prever uma gama variada de condições e cenários possíveis. Cada nível oferece diferentes graus de profundidade e precisão na representação virtual do objeto físico, adaptando-se às necessidades específicas de diversas indústrias e aplicações.

O desenvolvimento de um gêmeo digital para uma bancada representa um avanço significativo na implementação dessa tecnologia em um contexto específico. Embora não seja uma replicação completa, esse gêmeo digital é capaz de capturar dados em tempo real, permitindo análises precisas e fornecendo ao usuário informações cruciais, como o tempo de vida do sistema. Essa capacidade não apenas oferece uma visão dinâmica do estado atual da bancada, mas também possibilita uma investigação mais aprofundada das variações abruptas nos dados, revelando padrões que podem indicar uma falha iminente. A informação resgatada pelos dados é fundamental para identificar potenciais problemas, permitindo intervenções proativas e ações corretivas antes que ocorra qualquer falha crítica no sistema.

Capítulo 3

Desenvolvimento

O estudo em questão desenvolveu um gêmeo digital de uma bancada de testes para monitorar as respostas do sistema testado e para acompanhar a vida útil de alguns componentes chaves da bancada.

3.1 Bancada

A bancada comporta cinco unidades de testes, cada uma composta por um servo-motor, um acoplamento elástico, um par de rolamentos cônicos, duas molas helicoidais, duas guias com rolamentos lineares, um fuso de esferas, um terminal rotular e um braço pivotado, conforme as figuras 3.1 e 3.2.

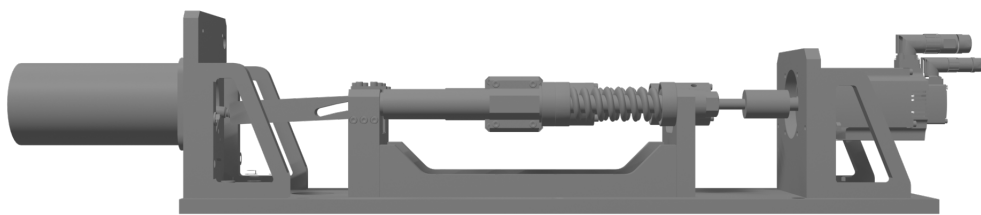


Figura 3.1: Bancada de acionamento completa - vista lateral

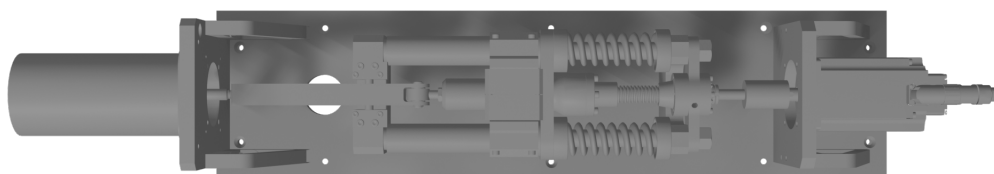


Figura 3.2: Bancada de acionamento completa - vista superior

A bancada funciona acionando pneumaticamente o sistema testado que empurra o braço pivotado com uma força constante, ao chegar no fim do curso do teste o ar é liberado e as molas retornam o sistema à posição original. O servo-motor controla o sistema no avanço, Figura 3.3, e recuo, Figura 3.4, de maneira a garantir que a curva de posição no tempo do equipamento testado seja equivalente à do equipamento em condições reais.

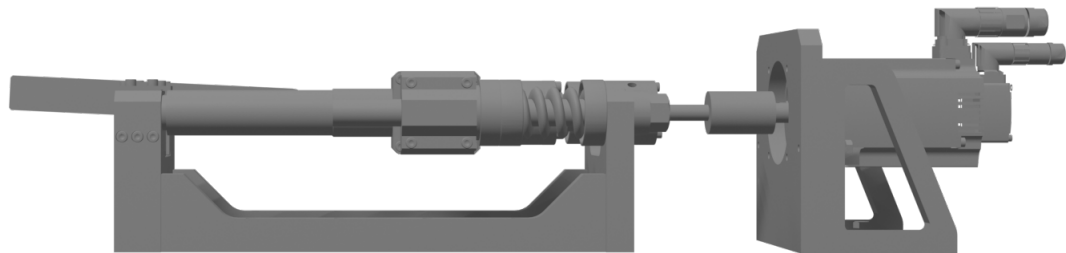


Figura 3.3: Conjunto avançado

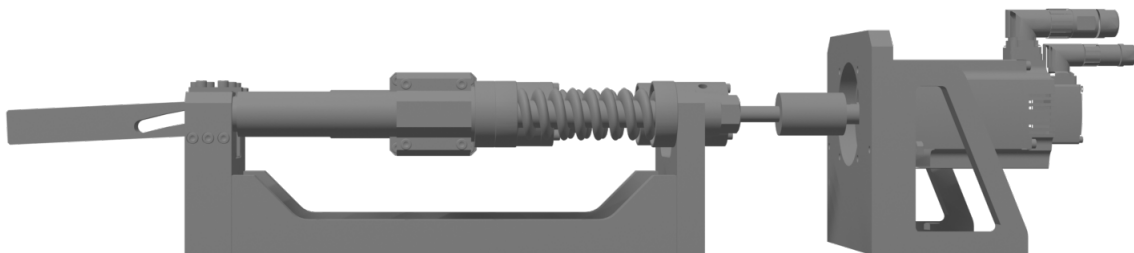


Figura 3.4: Conjunto recuado

3.2 Vida útil

Ao analisarmos as curvas de torque do servo-motor conseguimos medir dinamicamente a força real que o motor está aplicando no avanço e retorno. Somando essa força ao esforço medido da mola, temos a força exercida pelo sistema testado, que são os dados do teste. Estas informações são suficientes para alimentar o gêmeo digital. Ao mesmo tempo, fazendo um diagrama de corpo livre, como da Figura 3.5, conseguimos calcular a informação das cargas sentidas pelos componentes da bancada.

Utilizando um valor padrão de força de teste e torque do motor, somado à força que as molas exercem, descreve-se uma senoide que pode ser utilizada como um valor médio para avaliar as equações de vida útil de cada componente individual e assim discriminar o componente de menor vida, dado os esforços solicitados.

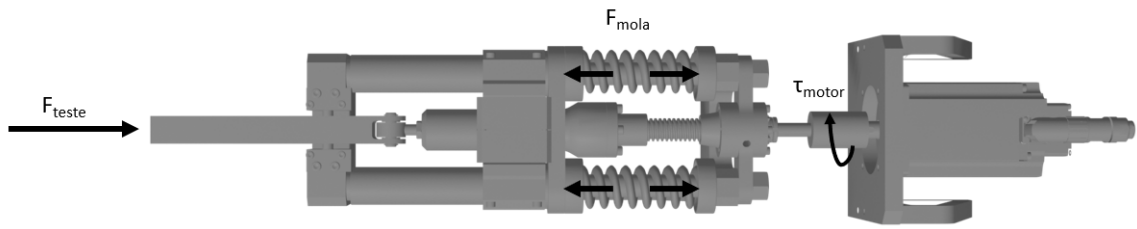


Figura 3.5: Diagrama de corpo livre da bancada

$$\begin{aligned}
 F_{resultante} &= F_{teste} - F_{mola} - F_{motor} \\
 &= F_{teste} - k_{constante_mola} \Delta l_{posicao} - \tau_{motor} \frac{2\pi}{L_{passo_fuso}}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Considerando que a força do teste no avanço é de $2200N$ constantes, pois está sendo aplicada por um acionamento pneumático, e que a força do motor mais a da mola apenas iguala esta força ao final do ciclo, podemos escrever a força resultante como uma senoide conforme a Equação 3.2 sabendo que a frequência de teste é $1Hz$.

$$\begin{aligned}
 F_{resultante} &= A \sin(2\pi ft) + C \\
 &= 2200 \sin(2\pi \cdot 1 \cdot t) + \frac{2200}{2} \\
 &= 2200 \sin(2\pi t) + 1100
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Ao realizar a análise da vida útil foram escolhidos os componentes estruturais expostos às maiores transferências de energias e à conversão de movimento linear/rotativo. Sendo estes: o terminal rotular; os rolamentos cônicos; e a castanha com o fuso de esferas.

3.2.1 Terminal rotular

As equações de vida útil para um terminal rotular (SKF GROUP, 2019; THK, 2023b) servem apenas de guia para a escolha do equipamento que melhor se adéque à função desejada. Estas levam em consideração vários fatores empíricos, como a a direção das forças, a temperatura, o escorregamento, o ângulo de oscilação, assim como fatores calculados como a carga aplicada e a velocidade média.

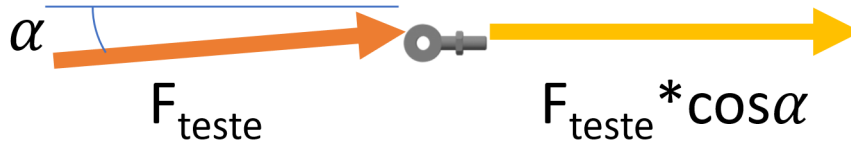


Figura 3.6: Diagrama de corpo livre do terminal rotular

$$G_h = b_{direcao_da_carga} b_{temperatura} b_{escorregamento} b_{angulo_de_oscilacao} \frac{5}{p_{carga_aplicada}^{0,6} \times v_{velocidade_media}^{1,6}} \quad (3.3)$$

Para o caso da bancada, $b_{direcao_da_carga} = 2$ pois a direção da carga é alternada, $b_{temperatura} = 1$ pois o sistema está em temperatura ambiente e a temperatura em serviço não deve passar dos 50°C , $b_{escorregamento} \approx 1,5$ pois o $d_{diâmetro_da_esfera} = 22,225\text{mm}$ para o terminal rotular selecionado, $b_{angulo_de_oscilacao} = 1$ pois o ângulo α máximo é em torno de 5° , $K_{fator_de_carga} = 50\text{N/mm}^2$ para o terminal rotular selecionado, $P_{carga_dinamica_equivalente} = 2,2\text{kN}$ pois é a maior força aplicada sobre o sistema, $C_{carga_dinamica_basica} = 12,2\text{kN}$ para o terminal rotular selecionado, $d_{diâmetro_da_esfera} = 22,225\text{mm}$ para o terminal rotular selecionado, $\beta_{meio_angulo_de_oscilacao} = \alpha/2 = 5/2 = 2,5^\circ$ e $t_{tempo_por_oscilacao} = 1\text{s}$ pois a frequência do teste é de 1Hz . Com estes dados podemos calcular a vida útil esperada do terminal rotular.

$$\begin{aligned} p_{carga_aplicada} &= K_{fator_de_carga} \frac{P_{carga_dinamica_equivalente}}{C_{carga_dinamica_basica}} \\ &= 50 \frac{2,2}{12,2} = 9,016\text{N/mm}^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

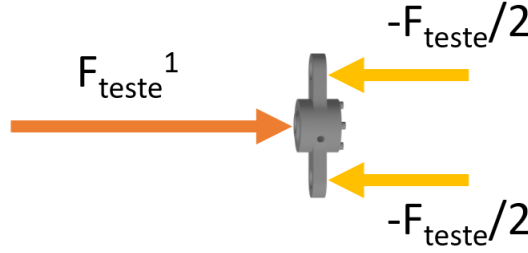
$$\begin{aligned} v_{velocidade_media} &= 8,73 \times 10^{-6} d_{diâmetro_da_esfera} \left(\frac{4\beta_{meio_angulo_de_oscilacao}}{t_{tempo_por_oscilacao}} \right) \\ &= 8,73 \times 10^{-6} 22,225 \left(\frac{4 \times 2,5}{1} \right) = 0,002 \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$G_h = 2 \times 1 \times 1,5 \times 1 \times \frac{5}{9,016^{0,6} \times 0,002^{1,6}} = 83.451\text{horas} \quad (3.6)$$

Portanto, a expectativa é que o terminal rotular funcione sem apresentar falhas por mais de 80 mil horas.

3.2.2 Rolamentos cônicos

As equações de vida útil para um rolamento (NORTON, 2013; BUDYNAS; NISBETT, 2008; TRIBOLOGISTS; (STLE), 2010; NSK BRASIL, 2020; TIMKEN, 2016; ZARETSKY, 2016; HAMROCK; ANDERSON, 1983) são definidas em termos de L_{10h} que é o tempo de vida em horas em que 10% dos rolamentos irão falhar para uma determinada carga conforme a Equação 3.7.



¹ Maior força axial exercida sobre os rolamentos quando $\alpha = 0^\circ$ e $F_{mola} = 0N$

Figura 3.7: Diagrama de corpo livre do par de rolamentos cônicos

$$L_{10h} = a_{material} \times a_{operacao} \times \frac{10^6}{60 \times n} \left(\frac{f_{temperatura} \times C_{carga_dinamica_basica}}{f_{operacao} \times F_{carga_aplicada}} \right)^p \quad (3.7)$$

Sabendo que neste sistema temos que a rotação é de $n \approx 900rpm$, que a carga máxima é de $F_{carga_aplicada} = 2200N$, que o fator de operação $f_{operacao} \approx 2$, que o fator de temperatura $f_{temperatura} = 1$, que o coeficiente de operação $a_{operacao} = 1$, que o coeficiente de material $a_{material} = 1$, que para rolamentos de roletes $p = 10/3$ e que para o rolamento escolhido a $C_{carga_dinamica_basica} = 21300N$, podemos calcular a vida útil dos rolamentos como na Equação 3.8

$$L_{10h} = 1 \times 1 \times \frac{10^6}{60 \times 900} \left(\frac{1 \times 21300}{2 \times 2200} \right)^{\frac{10}{3}} = 3.554horas \quad (3.8)$$

Portanto, a expectativa é que os rolamentos cônicos funcionem sem apresentar falhas por mais de 3 mil horas.

3.2.3 Fuso de esferas

As equações de vida útil para um fuso de esferas (ISO, 2006; NSK, 2009; THK, 2023a; HIWIN, 2018; KALATEC, 2019) levam em consideração a carga básica que o fuso aguenta, um fator de

carregamento que depende das velocidade de operação, a força linear exercida sobre a castanha, a velocidade angular do fuso e o tempo em que o conjunto esteve sob essas condições.

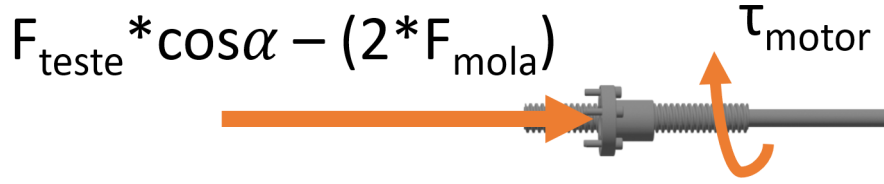


Figura 3.8: Diagrama de corpo livre do conjunto castanha e fuso de esferas

$$L_t = \left(\frac{C_a}{P_e \times f_w} \right)^3 \times 10^6 \frac{1}{60 \times n} \quad (3.9)$$

Sabendo que o fuso utilizado tem carga básica estática $C_a = 4904kg$ e fator de carregamento $f_w = 2$, que a carga média do sistema é de $P_e = 1100N$ e que a rotação média para esse teste é de $n \approx 900rpm$, podemos escrever a Equação 3.10 de acordo com a Equação 3.9.

$$L_t = \left(\frac{4904}{1100 \times 2} \right)^3 \times 10^6 \frac{1}{60 \times 900} = 205horas \quad (3.10)$$

Portanto, a expectativa é que o fuso de esferas funcione sem apresentar falhas por volta de 200 horas.

3.3 Gêmeo digital

Comparando os valores calculados de vida útil das seções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3 chegamos a conclusão que o componente mais crítico do sistema é a castanha com o fuso de esferas. A partir dessa análise, foi definido que o componente que seria acompanhado com o gêmeo digital seria o fuso de esferas, que utiliza as equações 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16 para prever a vida útil do fuso em tempo real.

$$P_e = \left(\frac{P_1^3 n_1 t_1 + P_2^3 n_2 t_2 + \dots + P_n^3 n_n t_n}{n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots + n_n t_n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.11)$$

$$t_{\%total} = \frac{t_{total}}{t_{total} + t_{amostra}} \quad (3.12)$$

$$t_{\%amostra} = \frac{t_{amostra}}{t_{total} + t_{amostra}} \quad (3.13)$$

$$P_{media_nova} = \sqrt[3]{\frac{P_{media}^3 n_{media} t_{\%total} + P_{amostra}^3 n_{amostra} t_{\%amostra}}{n_{media} t_{\%total} + n_{amostra} t_{\%amostra}}} \quad (3.14)$$

$$n_{media_nova} = \frac{n_{media} t_{\%total} + n_{amostra} t_{\%amostra}}{t_{\%total} + t_{\%amostra}} \quad (3.15)$$

O fuso utilizado neste projeto tem carga básica estática $C_a = 4904\text{kg}$ e fator de carregamento $f_w = 2$, assim podemos escrever a Equação 3.16 em função da carga P_{media_nova} e da rotação n_{media_nova} , que são as variáveis do teste.

$$L_{vida_util} = \left(\frac{4904}{2 \times P_{media_nova}} \right)^3 \times 10^6 \times \left(\frac{1}{60 \times n_{media_nova}} \right) \quad (3.16)$$

O código em LabView implementado na bancada pode ser encontrado no Capítulo A.

Capítulo 4

Resultados

O sistema esteve em funcionamento analisando em tempo real os dados de torque x rotação do servo-motor durante alguns meses. Neste meio tempo foi possível observar a quebra de alguns componentes devido a contaminação do sistema por limalhas de alumínio Figura 4.1, o que gerou um impacto direto nos gráficos de torque do sistema, que passou a ter de realizar mais força para gerar o mesmo deslocamento. Esse dado pode ser observado nos gráficos da figuras 4.2 e 4.3 que mostram picos de torque e rotação combinados, gerando um desgaste prematuro do fuso.

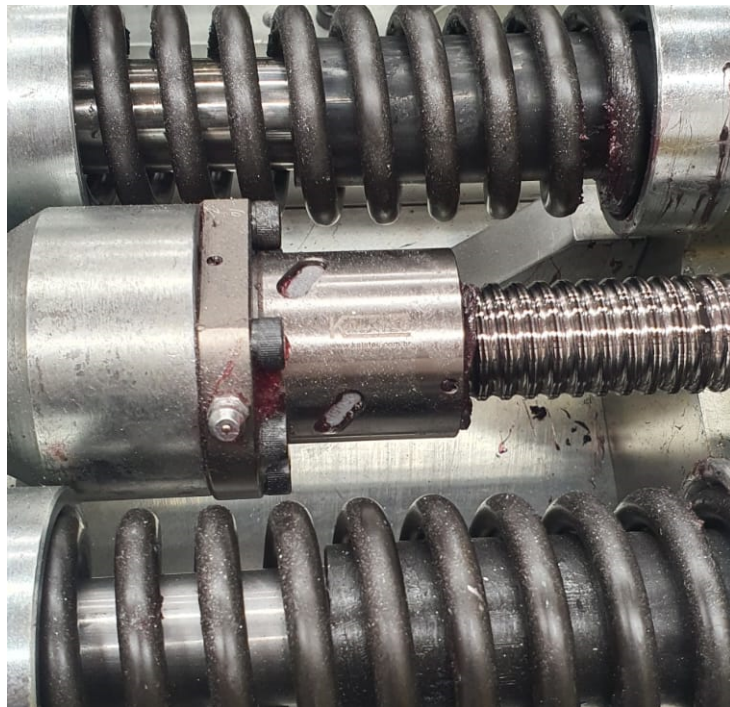


Figura 4.1: Foto da contaminação por limalha de alumínio

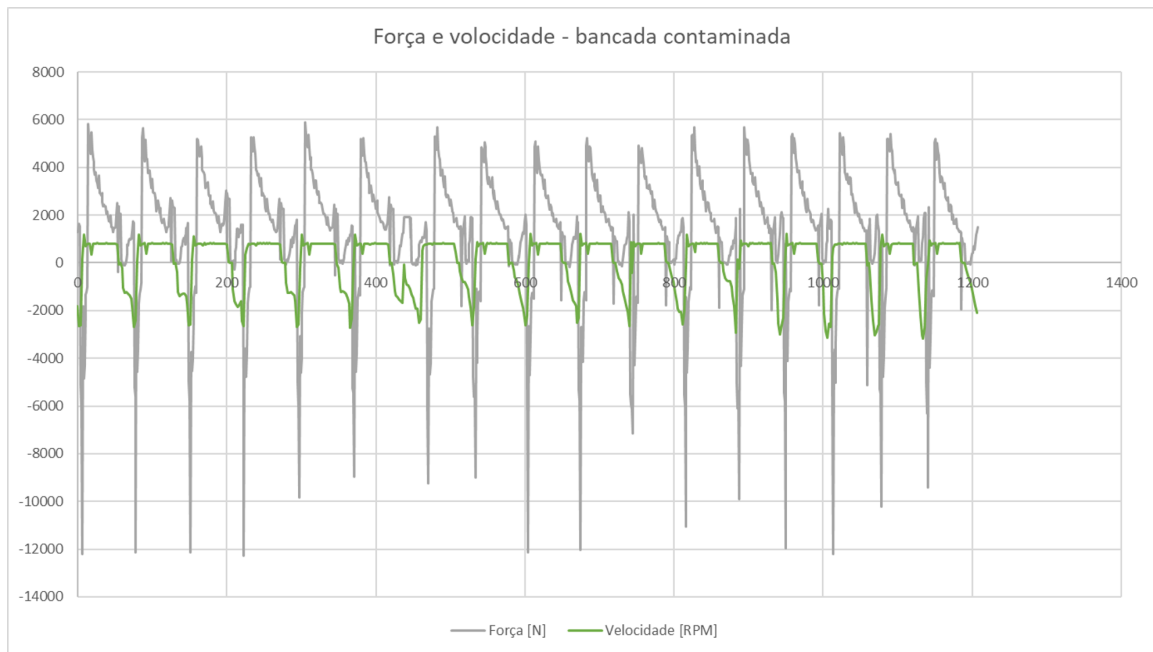


Figura 4.2: Dados coletados da bancada em funcionamento com contaminação

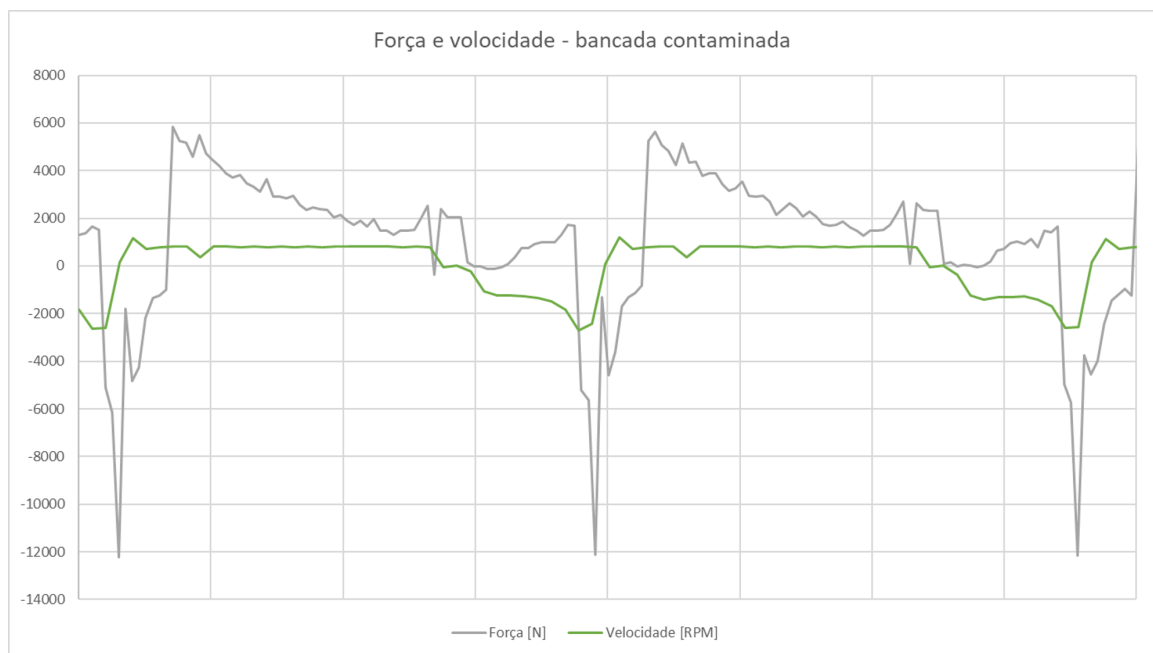


Figura 4.3: Dados coletados da bancada em funcionamento com contaminação - foco em dois ciclos

Após a quebra deste componente todos os elementos submetidos aos esforços foram trocados preventivamente para garantir que o equipamento em teste não seria afetado por alguma falha decorrente desse período em que a bancada rodou fora de especificação. Com a troca dos componentes o gráfico de esforços ficou como nas figuras 4.4 e 4.5, tendo picos desencontrados e com valores absolutos quase dez vezes menores.

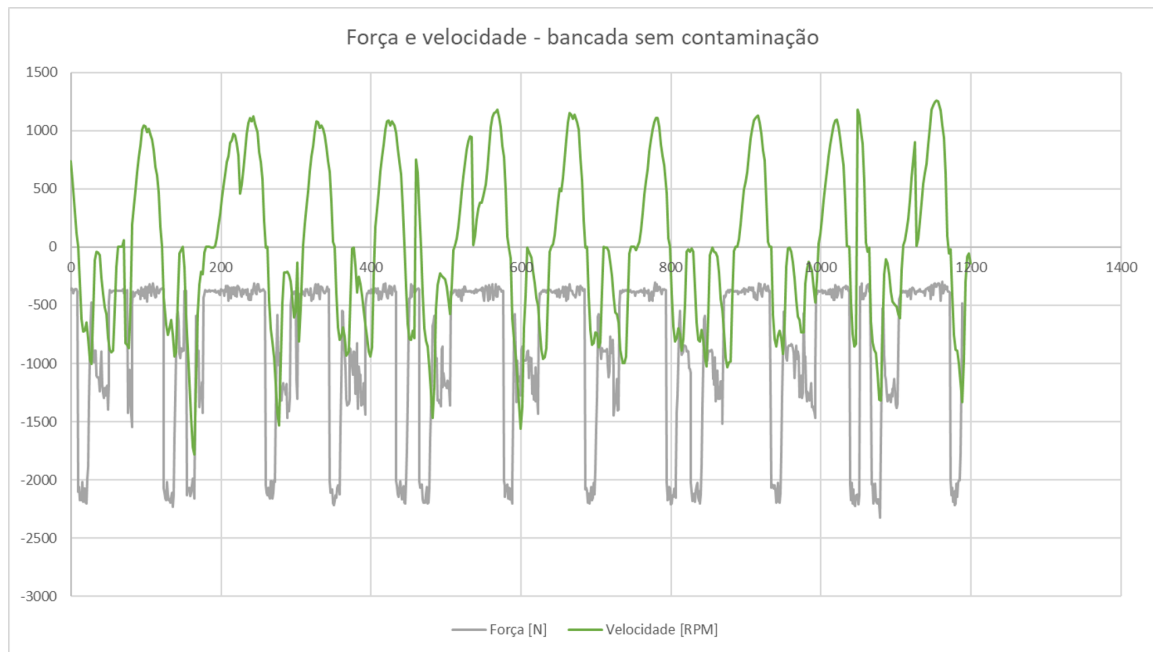


Figura 4.4: Dados coletados da bancada em funcionamento sem contaminação

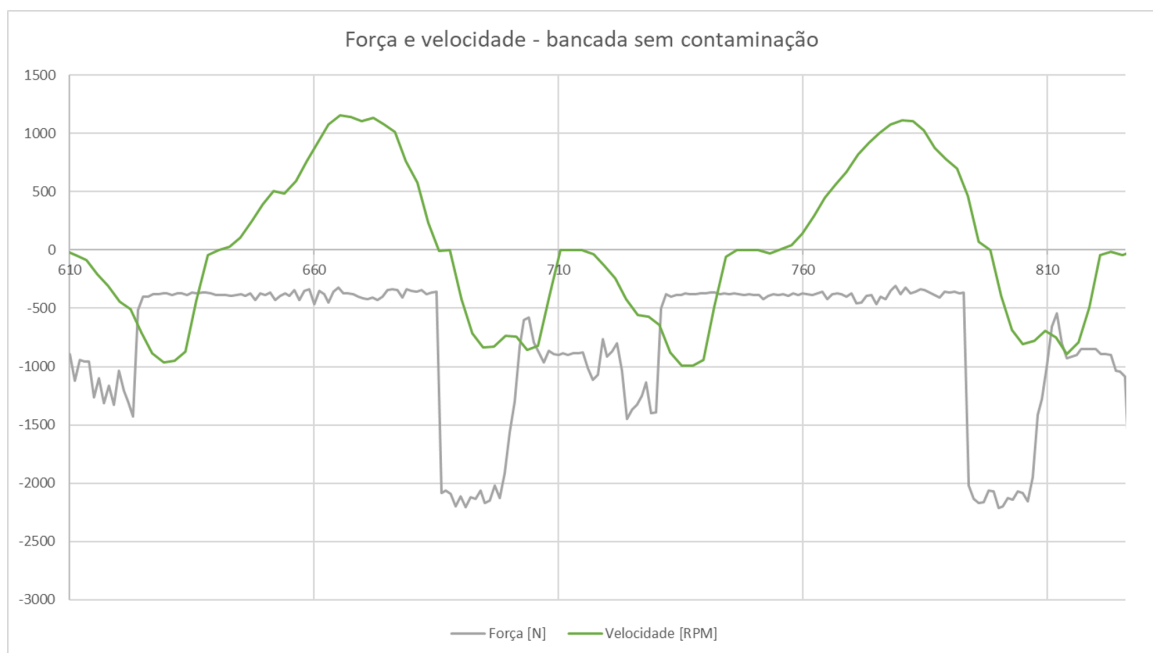


Figura 4.5: Dados coletados da bancada em funcionamento sem contaminação - foco em dois ciclos

Analisando os valores de vida útil calculados pelo código em duas datas (06/11/2023 e 23/11/2023), que constam na Tabela 4.1, e comparando com as horas efetivamente rodadas em cada unidade de teste chegamos em resultados extremamente próximos, conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.1: Dados de vida útil coletados nos dias 06/11/2023 e 23/11/2023

Unidade de teste	Vida útil [h] em 06/11/2023	Vida útil [h] em 23/11/2023	Diferença [h] da vida útil calculada
1	132909,899	132831,885	78,014
2	132922,897	132875,884	47,013
3	132917,897	132862,884	55,013
4	132920,897	132872,884	48,013
5	132912,897	132874,884	38,013

Tabela 4.2: Comparação entre horas de testes realizados e expectativa de vida útil calculada

Unidade de teste	Diferença [h] da vida útil calculada	Horas rodadas [h] entre os dias 06 e 23/11/2023	Diferença [h] entre horas reais e horas calculadas
1	78,014	83,235	5,222
2	47,013	49,415	2,403
3	55,013	48,092	-6,921
4	48,013	46,282	-1,731
5	38,013	45,867	7,854

A diferença de valores verificada se dá por pequenas variações nas condições do teste, podendo ter sofrido um esforço maior do que o histórico, diminuindo a vida útil mais rápido, ou sofrido um esforço menor do que o histórico, prolongando a vida útil. O que demonstra a utilidade do gêmeo digital para uma manutenção preditiva mais assertiva e eficaz.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho teve por objetivo otimizar a compreensão e a aplicação prática de gêmeo digital em uma bancada teste. Inicialmente, concentrou-se no desenvolvimento do modelo virtual do fuso de esferas, visando criar uma representação fidedigna e funcional desse componente. Em paralelo, uma modelagem matemática da vida útil do fuso foi elaborada, buscando uma compreensão mais profunda dos padrões de desgaste e durabilidade desse elemento dentro de seu contexto operacional.

Além disso, houve a implementação efetiva do modelo desenvolvido em uma bancada de testes real, possibilitando uma transição crucial do ambiente virtual para o físico. Isso permitiu não apenas validar a eficácia do modelo, mas também estabelecer um ambiente controlado para avaliar o desempenho do fuso de esferas em condições reais.

O sistema operou por vários meses, monitorando em tempo real os dados de torque e de rotação do servo-motor. Durante esse período, foram identificadas falhas em alguns componentes devido à contaminação do sistema por limalhas de alumínio. Essa contaminação teve um impacto direto nos gráficos de torque, exigindo mais força para obter o mesmo deslocamento. Os gráficos apresentados mostraram picos de torque e rotação combinados, sugerindo a influência da contaminação. Após a quebra desses componentes, todos os elementos sujeitos a esforços foram substituídos preventivamente para assegurar que o equipamento em teste não fosse prejudicado por falhas decorrentes do período em que a bancada operou fora das especificações. Após a substituição dos componentes, os gráficos de esforços apresentaram melhorias, reforçando uma possível influência da limalhas.

Olhando adiante, seria interessante induzir falhas deliberadas, como a falta de lubrificação, a fim de analisar a resposta do sistema. A coleta e compilação cuidadosa desses dados desempe-

nham um papel crucial, pois serão utilizados para a incorporação de alarmes específicos. Esses alertas estão intimamente ligados à manutenção do sistema, possibilitando uma vigilância contínua e proativa, bem como ao resultado dos equipamentos sob teste, oferecendo informações valiosas sobre seu desempenho em condições adversas. Esta abordagem não apenas fortalece a capacidade do sistema em lidar com falhas, mas também eleva sua eficiência ao possibilitar a detecção precoce de problemas potenciais. O refinamento contínuo e a adaptação com base nos dados obtidos permitirão não apenas corrigir questões imediatas, mas também estabelecer uma base sólida para a manutenção preditiva e aprimorada dos equipamentos, aumentando, assim, sua confiabilidade e longevidade operacional.

Referências bibliográficas

ARROMBA, I. F. et al. Industry 4.0 in the product development process: benefits, difficulties and its impact in marketing strategies and operations. **Journal of Business Industrial Marketing**, v. 36, p. 522–534, 3 mar. 2021. ISSN 0885-8624. DOI: 10.1108/JBIM-01-2020-0014.

BOFILL, J.; ABISADO, M.; VILLAYERDE, J.; SAMPEDRO, G. A. Exploring Digital Twin-Based Fault Monitoring: Challenges and Opportunities. **Sensors**, v. 23, p. 7087, 16 ago. 2023. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s23167087.

BUDYNAS, R.; NISBETT, K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 8. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2008. cap. 11. (McGraw-Hill series in mechanical engineering). ISBN 9780073121932. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=m5ZVAAAAMAAJ>>.

CAPGEMINI RESEARCH INSTITUTE. **Mirroring reality: Digital twins in aerospace and defense**. [S.l.], 2023.

CORDEIRO, G. A.; ORDÓÑEZ, R. E. C.; FERRO, R. Theoretical proposal of steps for the implementation of the Industry 4.0 concept. **Brazilian Journal of Operations Production Management**, v. 16, p. 166–179, 2 mai. 2019. ISSN 2237-8960. DOI: 10.14488/BJOPM.2019.v16.n2.a1.

DINTER, R. van; TEKINERDOGAN, B.; CATAL, C. Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 151, p. 107008, nov. 2022. ISSN 09505849. DOI: 10.1016/j.infsof.2022.107008.

DUARTE, A. Y. S. Proposta de integração entre ferramentas de avaliação de ciclo de vida do produto e Indústria 4.0 (Industrie 4.0): estudo de caso da indústria têxtil e de confecção brasileira, 2017.

FERSMAN, Z. L. . E. **Digital Twins: Basics and Applications**. Edição: Zhihan Lv e Elena Fersman. [S.l.]: Springer International Publishing, 2022. ISBN 978-3-031-11400-7. DOI: 10.1007/978-3-031-11401-4.

HAMROCK, B. J.; ANDERSON, W. J. **Rolling-Element Bearings**. [S.l.], jun. 1983. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19830018943/downloads/19830018943.pdf>>.

HIWIN. **Ball screws Technical Information**. S99TE21-1810. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://hiwin.us/wp-content/uploads/ballscrews.pdf>>.

IBM (Ed.). **What is a digital twin?** 2020. Disponível em: <<https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>>. Acesso em: 12 out. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 3408-5:2006 - Ball screws: Part 5: Static and dynamic axial load ratings and operational life**. 1. ed. [S.l.], jun. 2006. P. 14.

JARDINE, A. K.; TSANG, A. H. **Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications**. Second Edition. [S.l.]: CRC Press, 2013.

KALATEC. **1-9 Service Life Design**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://www.kalatec.com.br/wp-content/uploads/2019/08/2-Calculo_Vida_util_Fuso_esferas.pdf>.

KARDEC, J. N. A. **Manutenção Função Estratégica**. Terceira Edição. [S.l.]: Qualitymark, 2006. Unico.

LI, J. et al. A Digital Twin-Based State Monitoring Method of Gear Test Bench. **Applied Sciences**, MDPI, v. 13, n. 5, p. 3291, 2023.

LIU, C. et al. Domain Adaptation Digital Twin for Rolling Element Bearing Prognostics. **Annual Conference of the PHM Society**, v. 12, p. 10, 1 nov. 2020. ISSN 2325-0178. DOI: 10.36001/phmconf.2020.v12i1.1294.

LIU, H. et al. Digital Twin-Driven Machine Condition Monitoring: A Literature Review. **Journal of Sensors**, v. 2022, p. 1–13, jul. 2022. ISSN 1687-7268. DOI: 10.1155/2022/6129995.

LIU, H. et al. Digital twin-driven machine condition monitoring: A literature review. **Journal of Sensors**, Hindawi, v. 2022, 2022.

NORTON, R. **Projeto de Máquinas**. 4. ed. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. cap. 11. ISBN 9788582600238. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Hq85AgAAQBAJ>>.

NSK. **NSK Ball Screws for High-Load Drive**. CAT. No. E3238. [S.l.], 2009. Disponível em: <<https://www.nsk.com/common/data/ctrGpdf/precision/e3238e.pdf>>.

NSK BRASIL. **Vida Útil Nominal do Rolamento**. BT / 004. [S.l.], dez. 2020. Disponível em: <https://nsk.com.br/uploads/BT_VIDA_UTIL_NOMINAL_DO_ROLAMENTO.pdf>.

PENG, F. et al. Digital Twin for rolling bearings: A review of current simulation and PHM techniques. **Measurement**, v. 201, p. 111728, set. 2022. ISSN 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111728.

RIBEIRO, R. E. M.; ABREU, C. R. S. de. **Inovação em sistemas de produção na era da indústria 4.0**. 1. ed. Teresina: Independently published, 2020. P. 164.

ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A Complex View of Industry 4.0. **SAGE Open**, v. 6, n. 2, p. 2158244016653987, 2016. DOI: 10.1177/2158244016653987. eprint: <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/2158244016653987>>.

SKF GROUP. **SKF Explorer steel/steel plain bearings**. PUB BU/S9 15521/1 EN. [S.l.], set. 2019. Disponível em: <https://vehicleaftermarket.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d19680947297-SKF-Explorer-steel_steel-plain-bearings---15521_1-EN_tcm_12-483821.pdf>.

THK. **Ball Screw General Catalog**. 514-1E. [S.l.], 2023. Disponível em: <[https://tech.thk.com/en/products/tts_data_page.php?li=aHR0cHM6Ly90ZWNoLnRoay5jb20vZW4vcHJvZHVjdHMvcGRmX2Rvd25sb2FkLnBocD9maWxlPUVfMTVfQmFsbFNjcmV3LnBkZiZfZ2w9MSp4MmU0dHAqX2dhKk16TXhPVGMwT0RNMEqRTNNREkyTlRNd05EYy4qX2dhX0Y0MVY1OVJkOEYqTVRjd01qWTFNekEwTnk0eExqRXVNVGN3TWpZMU5UUXdNQzR3TGpBdU1BLi4=>](https://tech.thk.com/en/products/tts_data_page.php?li=aHR0cHM6Ly90ZWNoLnRoay5jb20vZW4vcHJvZHVjdHMvcGRmX2Rvd25sb2FkLnBocD9maWxlPUVfMTVfQmFsbFNjcmV3LnBkZiZfZ2w9MSp4MmU0dHAqX2dhKk16TXhPVGMwT0RNMEqRTNNREkyTlRNd05EYy4qX2dhX0Y0MVY1OVJkOEYqTVRjd01qWTFNekEwTnk0eExqRXVNVGN3TWpZMU5UUXdNQzR3TGpBdU1BLi4=)>.

THK. **Rod End General Catalog**. 514-1E. [S.l.], 2023. Disponível em: <[https://tech.thk.com/en/products/tts_data_page.php?li=aHR0cHM6Ly90ZWNoLnRoay5jb20vZW4vcHJvZHVjdHMvcGRmX2Rvd25sb2FkLnBocD9maWxlPUVfMjNfUm9kRW5kLnBkZiZfZ2w9MSoxbDQ3NGp5Kl9nYSpNek14T1RjME9ETTBmakUzTURJmk5UTXdORGMuKl9nYV9GNDFWNTlSSjhGKk1UY3dNalkxTXpBME55NHhMakF1TVRjd01qWTFNekEwTnk0d0xqQXVnQs4u=>](https://tech.thk.com/en/products/tts_data_page.php?li=aHR0cHM6Ly90ZWNoLnRoay5jb20vZW4vcHJvZHVjdHMvcGRmX2Rvd25sb2FkLnBocD9maWxlPUVfMjNfUm9kRW5kLnBkZiZfZ2w9MSoxbDQ3NGp5Kl9nYSpNek14T1RjME9ETTBmakUzTURJmk5UTXdORGMuKl9nYV9GNDFWNTlSSjhGKk1UY3dNalkxTXpBME55NHhMakF1TVRjd01qWTFNekEwTnk0d0xqQXVnQs4u=)>.

TIMKEN. **Timken Tapered Roller Bearing Catalog**. 11-22 Order No. 10481. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.timken.com/wp-content/uploads/2016/10/Timken-Tapered-Roller-Bearing-Catalog.pdf>>.

TRIBOLOGISTS, S. of; (STLE), L. E. ISO 281:2007 bearing-life standard—and the answer is? **Tribology and Lubrication Technology (TLT)**, p. 34–43, jul. 2010. Cover Story. Disponível em: <https://www.stle.org/images/pdf/STLE_ORG/BOK/LS/Bearings/ISO%20281_2007%20Bearing-Life%20Standard_And%20the%20Answer%20Is_tlt%20article_July10.pdf>.

ZARETSKY, E. V. **Rolling Bearing Life Prediction, Theory, and Application**. [S.l.], nov. 2016. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160013905/downloads/20160013905.pdf>>.

Apêndice A

Código em LabView

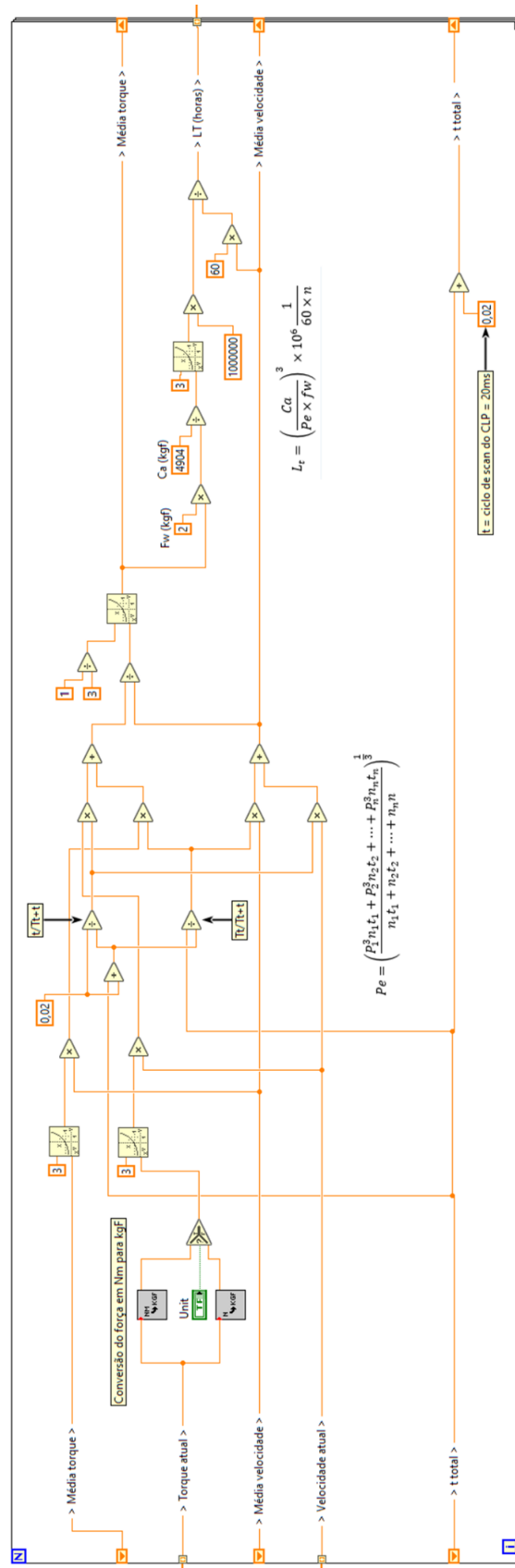


Figura A.1: Código em LabView para cálculo de vida útil do fuso de esferas