

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE METODOLOGIA DE  
MANUTENÇÃO PREDITIVA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

por

Carolina de Lima Pandolfo

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenharia Mecânica.

Porto Alegre, agosto de 2023

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Pandolfo, Carolina de Lima  
Análise de viabilidade para a implementação de metodologia de manutenção preditiva na indústria automotiva. / Carolina de Lima Pandolfo. -- 2023. 23 f.  
Orientador: Eduardo André Perondi.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Manutenção Preditiva. 2. Indústria Automotiva. 3. Análise de viabilidade. I. Perondi, Eduardo André, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Carolina de Lima Pandolfo

ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE METODOLOGIA DE  
MANUTENÇÃO PREDITIVA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRA MECÂNICA**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Eduardo André Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Eduardo André Perondi (Presidente)

Prof<sup>a</sup>. Simone Ramires

Prof. Liu Yesukai de Barros

Porto Alegre, agosto de 2023

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada família, ao meu namorado incrível e aos meus queridos amigos, cujo apoio e incentivo foram fundamentais para a concretização desta conquista. Seu amor, compreensão e encorajamento foram a força motriz que impulsionou meu caminho até aqui. Este trabalho é dedicado a vocês, que são a base sólida e o suporte incondicional que me impulsionam a alcançar meus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família e amigos por estarem ao meu lado durante toda essa jornada, compartilhando alegrias, superando desafios e celebrando cada etapa vencida. Além disso agradeço a todos os meus colegas de trabalho que me ajudaram com as informações e que se dispuseram do seu tempo. De modo geral, agradeço a todos que estiveram, mesmo que minimamente, envolvidos em mais uma das minhas ideias.

## APOIO FINANCEIRO

Agradeço à Empresa por fornecer recursos para a realização deste trabalho, sendo em horas trabalhadas ou em informação.

*“O fracasso é apenas uma oportunidade para  
recomeçar com mais inteligência e redobrada vontade”*

*Henry Ford*

Pandolfo, Carolina. **ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE METODOLOGIA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**. 2023. 23. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023

## RESUMO

Com o aumento da complexidade dos equipamentos industriais, a otimização da manutenção tem se tornado uma prática cada vez mais recorrente, já que uma pequena redução operacional pode resultar em ganhos expressivos de recursos como tempo e dinheiro. Neste contexto, o presente trabalho faz o estudo de um caso ocorrido em uma empresa com plantas em São Caetano do Sul-SP e em Gravataí-RS. Na unidade de São Caetano do Sul, foi prevista uma falha nas esteiras transportadoras da estufa da pintura por meio do acompanhamento dos sinais de intensidade de corrente elétrica. Tal sistema acionou um aviso aos operadores da manutenção que puderam intervir no sistema, identificando a falha antes dela de fato ocorrer, e corrigindo-a em um dia não produtivo. Na unidade de Gravataí, este sistema ainda não se faz presente, sendo o objetivo do trabalho analisar a viabilidade de implementação dessa tecnologia na referida unidade. A partir da análise dos custos envolvidos na troca dos equipamentos, chegou-se ao *payback* de 6 a 10 anos dependendo do cenário avaliado. Apesar de aparentar um longo período de tempo, a implementação desta nova tecnologia é compensada pelas vantagens, como melhores condições de segurança aos operadores e menor tempo de parada do processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Manutenção Preditiva, Indústria automotiva, análise de viabilidade.



Pandolfo, Carolina de Lima. **FEASIBILITY ANALYSIS FOR THE IMPLEMENTATION OF PREDICTIVE MAINTENANCE METHODOLOGY IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY.** 2023. 23. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## ABSTRACT

With the increasing complexity of industrial equipment, maintenance optimization has become a recurring practice, as even a small operational reduction can result in significant gains in resources such as time and money. In this context, this study examines a case that occurred in a company with plants in São Caetano do Sul-SP and Gravataí-RS. In the São Caetano do Sul unit, a failure in the painting oven's conveyor belts was predicted through monitoring of electrical current intensity signals. This system alerted maintenance operators, who were able to intervene in the system, identifying the failure before it occurred and correcting it on a non-productive day. This system is not yet present in the Gravataí unit, and the objective of the study is to analyze the feasibility of implementing this technology in that unit. Based on the analysis of the costs involved in equipment replacement, a payback period of 6 to 10 years was determined, depending on the evaluated scenario. Despite appearing to be a long period of time, the implementation of this new technology is offset by advantages such as improved safety conditions for operators and reduced process downtime.

**KEYWORDS:** Predictive Maintenance, Automotive Industry, Feasibility Analysis.

## NOMENCLATURA

### Abreviaturas e acrômimos

MTTF	Tempor médio entre falhas
SFC	Sistemas Ciber Físicos
CAD/CAM	Projeto e Manufatura Auxiliados por Computador
MES	Sistemas de Execução de Manufatura
SCADA	Sistemas de Controle e Aquisição de Dados
FFT	Transformada Rápida de Fourier
CDU	Classificação Universal Decimal
VFD	Inversor de Frequência Variável
CLP	Controle Logístico Programável
CPU	Unidade Central de Processamento
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e Custódia

## SUMÁRIO

NOMENCLATURA.....	10
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Objetivo .....	2
1.2.1. Objetivo geral.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	3
2.1. Tipos de manutenção .....	3
2.2. Fundamentos, Tecnologias e Benefícios da Manutenção Preditiva.....	3
2.3. Metodologia.....	5
3. CASO DE ESTUDO .....	6
3.1. Mecanismo.....	6
3.2. Identificação da falha.....	6
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	9
4.1. Processo atual de manutenção .....	9
4.2. Implantação do padrão global.....	11
5. CONCLUSÃO.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14

## **1. INTRODUÇÃO**

A manutenção é uma prática sistemática que visa prevenir falhas, corrigir problemas, realizar inspeções regulares e, em alguns casos, melhorar a eficiência operacional dos equipamentos (BORILDO, 2017). Em indústrias com processos elaborados, como a automotiva, a manutenção se torna cada vez mais importante por conta da quantidade de equipamentos, do número de etapas de cada processo de manufatura e dos custos atrelados a uma possível parada não planejada na produção.

Dentre as técnicas mais empregadas, pode-se citar a manutenção corretiva, a preventiva e a preditiva. Por exigirem menos investimento e planejamento, as duas primeiras são as mais utilizadas. Entretanto, a manutenção preditiva, uma vez implementada, induz geralmente um ganho significativo na produtividade do processo industrial (KUMAZAWA, 2012), pois, por prever a possibilidade de ocorrência de falhas, torna possível realizar a intervenção na planta de forma objetiva e programada em períodos não produtivos, como nos finais de semana.

Em uma planta de uma montadora automotiva, que por motivos legais não pode ser mencionada, localizada em Gravataí-RS, esse tipo de monitoramento de sinais para manutenção preditiva está em processo de implantação em algumas áreas produtivas. Entretanto, ainda não há previsão de instalação deste tipo de equipamento na área produtiva estudada neste trabalho, o transportador localizado dentro da estufa do elpo. Dessa forma, o principal foco do trabalho é a realização de uma avaliação da viabilidade técnica e econômica de aplicação dos métodos de manutenção preditiva na planta de Gravataí.

### **1.1. Motivação**

A presente pesquisa tem como principal motivação a necessidade de realização de estudo aprofundado das técnicas de manutenção preditiva para analisar sua viabilidade de implantação na planta de Gravataí, compreendendo a definição dos requisitos específicos para a implantação dessa metodologia na referida planta, explorando seus benefícios potenciais em termos de eficiência operacional, prolongamento da vida útil dos equipamentos e redução de custos de manutenção.

Ademais, para viabilizar a aplicação dessa estratégia de manutenção em uma planta já existente, verifica-se ser necessário realizar o levantamento detalhado dos custos envolvidos, gerando a necessidade de operacionalizar uma análise criteriosa desse aspecto para verificar se a adoção da manutenção preditiva é economicamente viável, resultando em um embasamento sólido para tomada de decisões estratégicas nesse sentido.

A pesquisa busca identificar os principais indicadores de retorno sobre o investimento, bem como analisar os benefícios e custos envolvidos na adoção dessa estratégia de manutenção. Como resultado, espera-se fornecer subsídios sólidos para a tomada de decisão e auxiliar a gestão da planta na melhoria dos seus processos de manutenção e na consequente maximização dos seus resultados.

## **1.2. Objetivo**

### **1.2.1. Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica e econômica da implantação de técnicas de manutenção preditiva na área da estufa de pintura na planta de Gravataí.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Identificar as principais falhas e desgastes que impactam a disponibilidade e a confiabilidade da estufa;
- Mapear as tecnologias e técnicas de monitoramento mais adequadas para implementação da manutenção preditiva nessa área;
- Realizar uma análise detalhada dos custos de implantação;
- Coletar e analisar dados históricos para estimar o potencial de redução de falhas e paradas não programadas;
- Avaliar a relação entre os custos de implantação e os benefícios esperados, por meio da análise de *payback*.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A manutenção é parte fundamental no processo de qualquer manufatura e, segundo MOBLEY (2002), os custos com manutenção podem representar de 15 a 60% dos custos dos bens de produção. Dessa forma, tornar a manutenção uma atividade mais efetiva e otimizada é um dos caminhos para reduzir custos e aumentar a margem de lucro.

Para identificar em quais partes do processo essa melhoria pode ser aplicada, primeiro é preciso conhecer adequadamente as principais técnicas de manutenção utilizadas na indústria.

### 2.1. Tipos de manutenção

De maneira abrangente, existem três tipos de manutenção que são aplicadas nas indústrias manufatureiras: manutenção corretiva, preventiva e preditiva. A escolha de qual delas utilizar envolve uma ampla gama de fatores, como tempo de utilização do equipamento, confiabilidade do sistema, necessidade de segurança, custo da parada do sistema, entre outros. NEPOMUCENO (2018) menciona que a Marinha Brasileira realizou um grande investimento na manutenção de seus navios, visando manter os navios em operação de maneira permanente por conta do alto custo que um navio parado representa. Por outro lado, a Aeronáutica Brasileira prioriza a segurança das aeronaves, refinando cada vez mais as suas técnicas de manutenção e controle de qualidade.

A manutenção corretiva é uma técnica reativa de manutenção que age após a falha do equipamento (MOBLEY, 2002), sendo esta a mais custosa de todas. Para que se realize o conserto do equipamento é geralmente preciso ter em estoque ou adquirir o mais rápido possível o componente a ser eventualmente substituído, o que leva a desperdícios de diversas formas: em estoque, em horas extras pagas à equipe de manutenção, em uma grande quantidade de tempo despendido em uma atividade não planejada, e em uma baixa disponibilidade produtiva. Por conta destes fatores, a manutenção corretiva é citada por MOBLEY (2002) como sendo uma abordagem de gestão “*no maintenance*”.

Já a manutenção preventiva tem o tempo como principal fator de decisão (NEPOMUCENO 2018). Com base nos dados históricos e nas informações fornecidas pelo fabricante, a manutenção é realizada durante uma parada programada. Entretanto, não é feita de uma maneira assertiva, pois leva geralmente em conta o Tempo Médio Entre Falhas (ou MTTF, do inglês *Mean Time To Failure*) do equipamento e não os sinais emitidos por ele de forma online.

A manutenção preditiva, por sua vez, leva em consideração os sinais de sensores emitidos pelas máquinas para se avaliar e programar o reparo ou substituição dos componentes antes que a falha tenha de fato ocorrido (NEPOMUCENO, 2018). Sendo uma técnica proativa, vários dos custos anteriormente citados são minimizados a medida em que a ação é tomada somente em casos em que há garantia da necessidade, sendo realizada em momentos oportunos, evitando uma parada inesperada na linha de produção.

### 2.2. Fundamentos, Tecnologias e Benefícios da Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva está intrinsecamente relacionada à Indústria 4.0, conceituada como uma nova era industrial marcada pela integração entre os sistemas de manufatura e a tecnologia da informação, formando os chamados Sistemas Ciber Físicos (SCF). Estas novas formas de tratar a informação buscam reduzir os tempos de setup, os custos relacionados a horas

de trabalho e material, além do tempo de processamento das informações, resultando em uma maior produtividade dos processos de manufatura (DALENOGARE et al., 2018).

É possível citar uma dezena de tecnologias que são amplamente ligadas aos conceitos da Indústria 4.0: Projeto e Manufatura Auxiliados por Computador (CAD/CAM); sistemas integrados de engenharia; automação digital com sensores; linhas flexíveis de manufatura; Sistemas de Execução de Manufatura (MES) e Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA) ; simulação/análise de modelos virtuais; coleção e análise de dados em big data; sistemas de produtos-serviços digitais; manufatura aditiva; e produtos armazenados em nuvem (DALENOGARE et al., 2018).

Relacionando estas tecnologias, a manutenção preditiva se vale da automação digital com sensores e da coleção e análise de dados em big data por coletar uma grande gama de dados adquiridos por sensores instalados nos equipamentos. Quando a amostra se torna grande o suficiente, é possível identificar automaticamente padrões de falha a partir de dados históricos, comparar o comportamento de sistemas espelhos, assim como comparar os sinais do equipamento tomando sinais previamente amostrados como base de comparação, indicando se algum parâmetro apresenta variações que podem evidenciar uma necessidade de intervenção.

Dentre estes parâmetros, os mais utilizados para monitoramento são: vibração, termografia, tribologia, inspeção visual, ultrassom e parâmetros elétricos (MOBLEY, 2002). Devido ao fato de a maioria das plantas industriais possuir sistemas eletromecânicos, a vibração é geralmente considerada o principal parâmetro de acompanhamento. Entretanto, ela monitora somente condições mecânicas dinâmicas do sistema, sem contabilizar outros parâmetros críticos para a confiabilidade e eficiência do mesmo.

Além disso, os dados de vibração podem apresentar limitações como, por exemplo, o regime do movimento. A maioria dos instrumentos baseados em microprocessadores é desenvolvida para lidar com dados em regime permanente, somente alguns têm a capacidade de adquirir os dados quando há mudanças bruscas na velocidade ou na carga. Por conta dos ruídos presentes neste sinal, é comum a utilização de filtros que podem distorcer o perfil de vibração do maquinário e levar a uma análise incorreta (MOBLEY, 2002).

É possível analisar a vibração tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. O segundo é amplamente utilizado, convertendo os dados do domínio do tempo através da Transformada Rápida de Fourier (FFT), de modo a facilitar a identificação das principais componentes do sinal da vibração. Entretanto, caso o movimento da máquina seja em baixa velocidade ou ela gere vibrações de baixa amplitude, os sinais do ruído do próprio sensor podem contaminar o sinal, deteriorando a relação sinal/ruído, de forma que a identificação do problema seja impossibilitada.

Juntamente ao monitoramento da vibração, outros parâmetros podem ser monitorados dependendo da aplicação e local de interesse, como o sinal de intensidade de corrente elétrica, por exemplo, o qual também pode ser analisado tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, sendo que, em baixas amplitudes de corrente, possui as mesmas limitações que os sinais de vibração.

### 2.3. Metodologia

O caso que baseia o presente trabalho ocorreu em uma planta industrial de um grupo automotivo localizada em São Caetano do Sul - SP. Durante um período de três dias, o sistema de monitoramento dos sinais de intensidade de corrente elétrica registrou um aumento contínuo na amplitude da corrente de alimentação do motor de tração de um sistema de transporte por esteira, resultando em um acréscimo de 16% na média móvel do valor da amplitude do sinal, de forma que o sistema de monitoramento emitiu o alerta preditivo à equipe de manutenção.

O referido motor faz parte do sistema de acionamento de um transportador localizado na estufa da área de pintura dos veículos. Tal mecanismo é composto por um motor controlado por meio de um inversor de frequência (ou VFD, do inglês *Variable Frequency Drive*), um redutor e um sistema de correntes de transmissão que conjuntamente realizam a movimentação da esteira da linha de produção.

A partir do alerta, a equipe de manutenção identificou que alguns dias antes havia sido realizado um ajuste incorreto dos parâmetros de lubrificação do mecanismo da esteira, o que aumentou o esforço do motor necessário à movimentação (torque) ocasionando uma consequente elevação da corrente elétrica consumida. Ao identificarem esta não conformidade, os técnicos ajustaram os parâmetros de lubrificação do sistema de maneira planejada, realizada em um dia não produtivo, evitando dessa forma a ocorrência de paradas emergenciais na produção.

Como os dados do caso de estudo (o da planta de São Caetano do Sul) disponibilizados para este trabalho consistem nos dados de corrente elétrica, a presente análise de viabilidade será baseada essencialmente nesse parâmetro, apesar de ser recomendado utilizar múltiplos parâmetros para se obter resultados assertivos.

Na planta de Gravataí, a manutenção é feita de maneira corretiva, no caso de haver uma falha repentina, e preventiva, realizada através de avaliações regulares executadas nos equipamentos. Esta se mostra a mais frequente dentre as ordens de serviço. Entretanto, a maioria foi realizada em horários produtivos, representando um custo extra à operação.

A hierarquia do setor de manutenção da pintura é composta pela gerência do departamento, pelo supervisor de manutenção, pelo líder de planejamento e desenvolvimento do controle da manutenção, pelo líder da área e pelo técnico da área. Além disso, o setor conta com os funcionários de manutenção que podem atuar em mais de uma área da pintura.

O técnico de cada área é responsável por realizar o *checklist* dos equipamentos da sua estação diariamente. Este *checklist* é feito com base nos históricos de manutenção de cada equipamento, ou seja, o técnico realiza a verificação dos componentes, se atentando aos que têm mais ocorrência de falha. Caso algum dos testes indique uma potencial falha, é aberta uma ordem de serviço para que seja feita a manutenção corretiva programada.

A partir destes dados, a avaliação de outros possíveis cenários se torna relevante para se ter a real noção do impacto da aplicação de técnicas preditivas de manutenção. De maneira geral, os dados históricos das ordens de serviço são um bom norteador para a definição da margem de falha, entretanto, somente os dados de 2022 foram disponibilizados para a confecção do presente trabalho. Assim, visando enxergar os possíveis cenários com prudência, mitigando os riscos, adota-se 20% como margem de falha no cálculo dos cenários pessimista e otimista, sendo essa a flutuação média do número de falhas de um mês para o outro.



### 3. CASO DE ESTUDO

#### 3.1. Mecanismo

Como mencionado, a falha foi identificada no sistema de transporte por correntes mecânicas que realizam a movimentação da esteira dos veículos dentro do ambiente da estufa da pintura. Tal sistema é composto por um inversor de frequência responsável por modular o sinal da intensidade de corrente elétrica, um motor, um redutor (Figura 1) e o sistema de correntes.

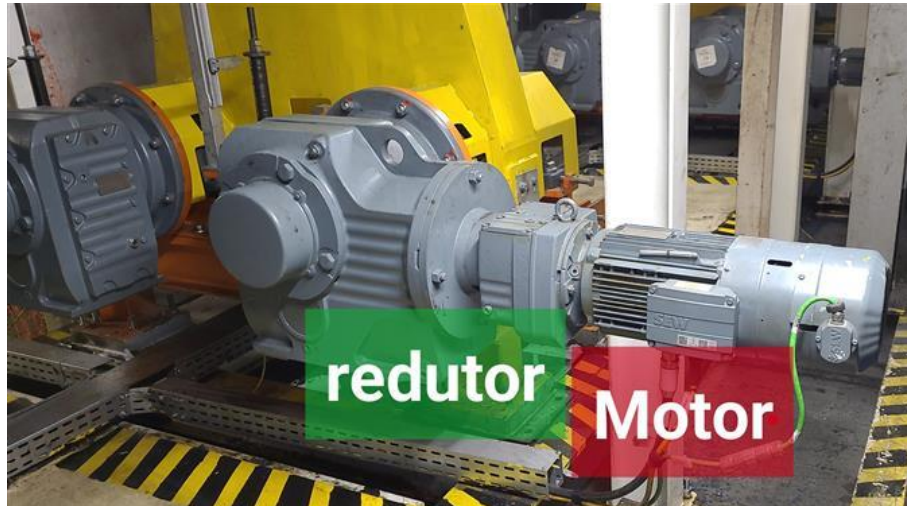


Figura 1: Motor e redutor do sistema de transportadores em cinza e o sistema de correntes que vão até a linha de produção dentro da estrutura em amarelo.

Fonte: Empresa confidencial.

#### 3.2. Identificação da falha

A empresa que cedeu os dados possui um sistema próprio de *machine learning* chamado de “InDepth”. De maneira cíclica, a partir de dados coletados na operação no formato XML, o sistema gera códigos de CLPs que são instalados no controlador. Este retorna o código na forma de Classificação Decimal Universal (CDU) que por sua vez gera o código em XML, recomeçando o ciclo, como demonstrado na Figura 2.

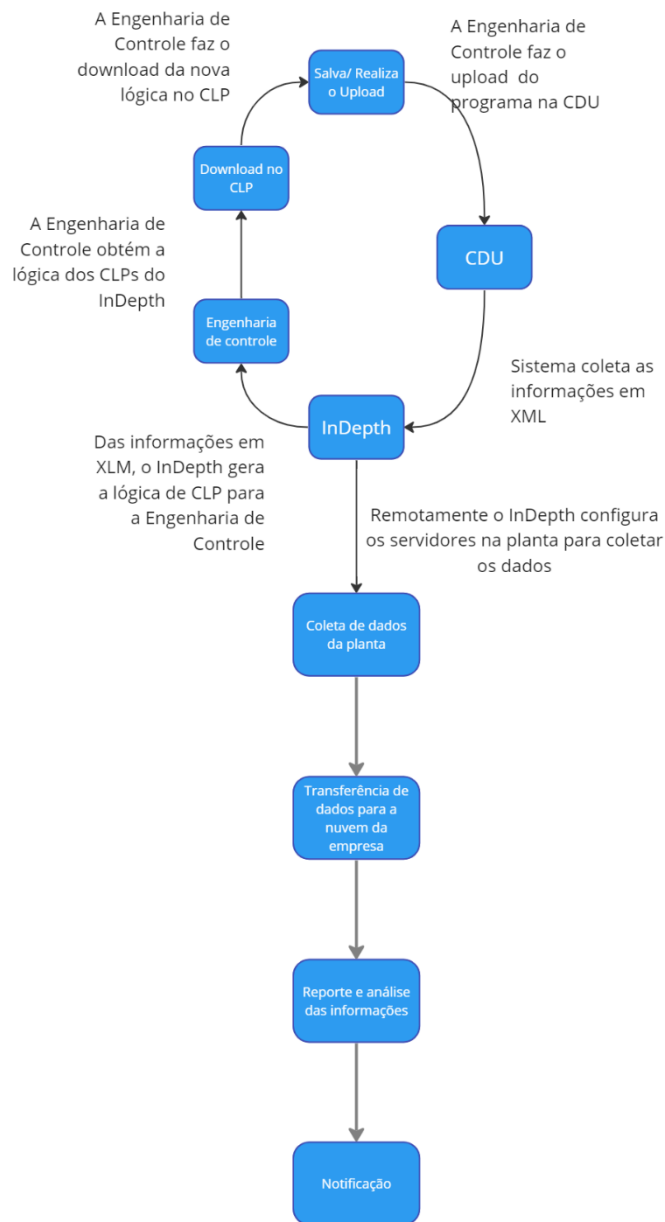


Figura 2: Fluxograma de funcionamento do software.

Fonte: Empresa confidencial.

Ao se auto verificar constantemente, o sistema armazena os seus dados na nuvem da empresa, possibilitando, além do acesso à informação de qualquer lugar, a geração de relatórios e análises, emitindo notificações caso necessário.

No caso da falha estudada, as informações de intensidade de corrente elétrica estavam sendo fornecidas pelo inversor de frequência que controla o motor das esteiras transportadoras. Como mostra a Figura 3, a intensidade de corrente média aumentou gradativamente até que, no dia 2 de março, mais da metade dos valores estão acima do limite precisamente recomendado, emitindo um alerta aos responsáveis pela tomada de decisão.

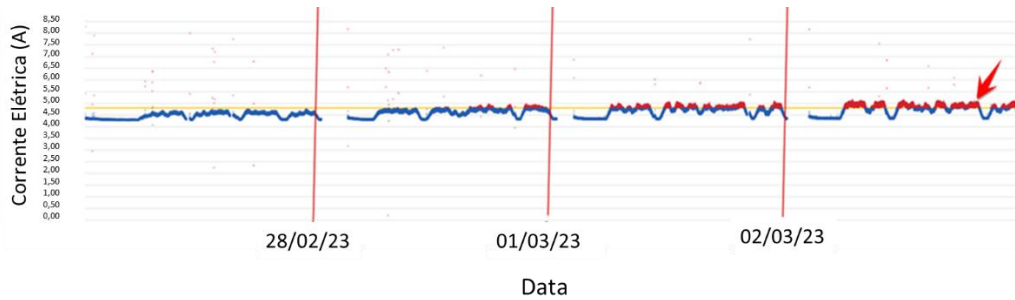


Figura 3: valores de intensidade de corrente elétrica captados pelo sistema InDepth indicando um aumento gradual durante três dias consecutivos.

Fonte: Empresa confidencial.

Em valores absolutos, essa variação representa um aumento de 0,7A (ou 16%) na intensidade de corrente elétrica. Após as análises de causa raiz terem sido feitas, chegou-se à conclusão que o aumento do torque exercido pelo sistema ocorreu por conta da redução dos parâmetros de lubrificação do sistema.

Este transportador possui uma unidade de lubrificação automática, na qual foram alterados os parâmetros de lubrificação aproximadamente uma semana antes do sistema emitir a notificação. A mudança nos parâmetros foi feita para reduzir a acumulação excessiva de óleo nas correntes do transportador e no piso. Entretanto, a quantidade ajustada não foi suficiente para lubrificar todo o perímetro da corrente, exigindo um maior esforço do motor e aumentando a corrente elétrica necessária para sua operação.

Identificada a falha, foi realizado o ajuste e os testes nos parâmetros de lubrificação no dia 4 de março (dia não produtivo) de modo a não comprometer a produção da fábrica, evitando uma parada estimada de 4h. A Figura 4 mostra que, após realizadas as manutenções, a intervenção já mostrou resultados efetivos no turno seguinte, uma vez que antes da adequação dos parâmetros a média da intensidade de corrente era 5A e depois passou a ser 4,2A.

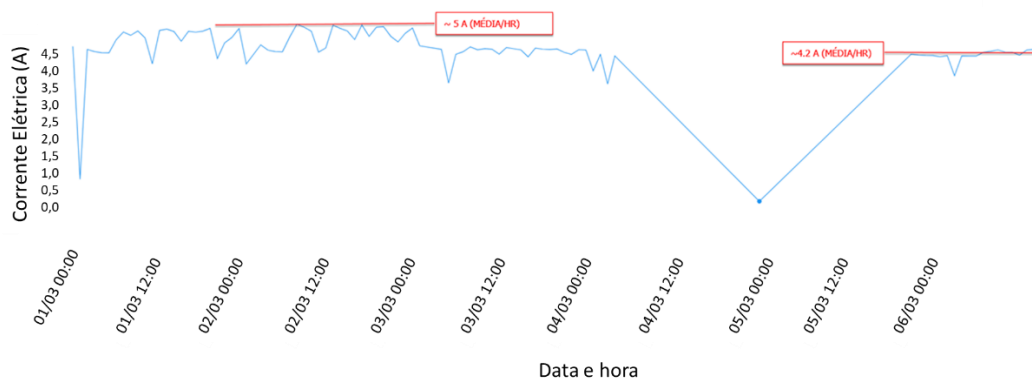


Figura 4: Valores de intensidade de corrente elétrica durante os dias 1 a 6 de março, comparando as médias dos valores antes e após a realização da atividade de manutenção.

Fonte: Empresa confidencial.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Processo atual de manutenção

A Tabela 1 foi montada a partir das ordens de serviço realizadas nas duas esteiras presentes na estufa de elpo no ano de 2022. A partir da análise das ordens de serviço, é evidente que a lubrificação é um parâmetro que deve ser controlado, já que das 43 ocorrências atendidas, 32 foram com o intuito de inspecionar a eficiência da lubrificação no sistema.

Tabela 1: dados das manutenções realizadas em ambas as esteiras das estufas do elpo

Tipo de falha	Elpo 1		Elpo 2	
	Transportador	Lubrificação	Transportador	Lubrificação
Horário produtivo	2	15	3	13
Horário não produtivo	3	2	3	2
Tempo total de manutenção (h)	12,90		15,10	

O impacto financeiro dessas atividades pode ser mensurado também a partir dos dados da Tabela 1. Considerando que a hora de trabalho de um funcionário do setor de manutenção seja R\$23,00 e que seja preciso dois operadores para se realizar a atividade, o custo destas manutenções em 2022 foi de R\$1288,00. Além disso, é preciso considerar o impacto financeiro relativo às 6 horas não produtivas decorrentes do aquecimento da estufa após ser feita a manutenção, que são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Impacto financeiro do reaquecimento da estufa elpo.

Custo Nm <sup>3</sup> gás	R\$ 4,16	
Consumo de gás por hora (Nm <sup>3</sup> ) da estufa elpo	300	
	Elpo 1	Elpo 2
Tempo de reaquecimento (h)	102	96
Custo	R\$ 127.296,00	R\$ 119.808,00
Custo total	R\$247.104,00	

As carrocerias que estão presentes dentro da estufa durante a falha são descartadas e devem ser, dessa forma, também contabilizadas nos custos. Cada estufa tem a capacidade para 6 carrocerias, sendo que cada carroceria tem o custo de R\$4500,00. Como a planta possui duas esteiras, não há a necessidade de o processo ser completamente interrompido, considerando no cálculo o correspondente a somente uma esteira parada por vez. Por fim, a Tabela 3 apresenta todos os custos por esteira que ao total somam mais de R\$300 mil ao ano.

Tabela 3: custos anuais de manutenção das esteiras.

Custos	Elpo 1	Elpo 2
Funcionários de manutenção	R\$ 728,00	R\$ 690,00
Reaquecimento	R\$ 127.296,00	R\$ 119.808,00
Carrocerias	R\$ 27.000,00	R\$ 27.000,00
Total	R\$ 155.024,00	R\$ 147.498,00
Total geral	R\$	302.522,00

Os cenários pessimista e otimista que foram calculados a partir da variação mensal do número de ordens de serviço em 2022 é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Detalhamento dos possíveis cenários de falha dos transportadores das estufas.

Cenário	Pessimista		Otimista	
	Elpo 1	Elpo 2	Elpo 1	Elpo 2
Estufa				
Falhas em horário produtivo	21	20	14	13
Tempo total de manutenção (h)	15:30	18:06	10:20	12:04
Tempo de reaquecimento (h)	126	120	84	78

Assim como no cenário realista, os custos de reaquecimento das estufas e das carrocerias descartadas também devem ser calculados para os cenários pessimista e otimista. Estes estão presentes na Tabela 5 e a Tabela 6 faz a comparação dos custos totais em ambos os cenários.

Tabela 5: Custos de reaquecimento das estufas nos cenários pessimista e otimista.

Custo Nm <sup>3</sup> gás	R\$4,16			
Consumo de gás por hora (Nm <sup>3</sup> ) da estufa elpo	300			
	Cenário Pessimista		Cenário Otimista	
	Elpo 1	Elpo 2	Elpo 1	Elpo 2
Tempo de reaquecimento (h)	126	120	84	78
Custo	R\$ 157.248,00	R\$ 149.760,00	R\$ 104.832,00	R\$ 97.344,00
Custo total	R\$	307.008,00	R\$	202.176,00

Tabela 6: Comparação dos custos totais dos cenários pessimista e otimista.

Cenário	Pessimista		Otimista	
	Elpo 1	Elpo 2	Elpo 1	Elpo 2
Funcionários de manutenção	R\$ 966,00	R\$ 920,00	R\$ 644,00	R\$ 598,00
Reaquecimento	R\$ 157.248,00	R\$ 149.760,00	R\$ 104.832,00	R\$ 97.344,00
Carrocerias	R\$ 27.000,00	R\$ 27.000,00	R\$ 27.000,00	R\$ 27.000,00
Total	R\$ 185.214,00	R\$ 177.680,00	R\$ 132.476,00	R\$ 124.942,00
Total geral	R\$ 362.894,00		R\$ 257.418,00	

#### 4.2. Implantação do padrão global

Para que se possa implementar a tecnologia que irá permitir a avaliação em tempo real dos parâmetros de interesse é preciso atualizar os equipamentos para que eles se conectem à rede Ethernet da empresa. Os equipamentos e serviços necessários segundo informações preliminares das equipes são dispostos na Tabela 7.

Tabela 7: Detalhamento dos custos para a implantação dos novos dispositivos.

Quantidade	Produto/Serviço	Valor unitário
24	Inversores de frequência Powerflex 755	R\$ 50.000,00
1	CPU Control Logics L83	R\$ 90.000,00
1	Integração da infraestrutura da rede	R\$ 600.000,00
Total		R\$ 1.890.000,00

Os custos relativos à aquisição de softwares e a manutenção destes não são considerados, já que eles são de propriedade da própria empresa. Somando todos os valores para se realizar o investimento, tem-se como resultado aproximadamente R\$1.9 milhões.

A partir dos dados analisados, é possível avaliar em quanto tempo o investimento justificará o seu valor. Para isso, é feito o cálculo de *payback* dos três cenários e exemplificado na Tabela 8.

O cálculo se dá por meio da Equação (1):

$$FC = I \times 1,12 + R \times 1,06 \quad (1)$$

Na qual, FC é o fluxo de caixa, I é o investimento inicial e R é a receita, que neste caso é o valor de manutenção a ser economizado por ano. Neste cálculo, o valor do investimento é corrigido em 12% ao ano, já que é um valor próximo à taxa SELIC atual, e o valor da receita é corrigido em 6% referente à inflação.

Tabela 8: Payback dos três cenários apresentados.

Ano	Cenário Pessimista			Cenário Realista			Cenário Otimista		
	Investimento	Receita	Fluxo de Caixa	Investimento	Receita	Fluxo de Caixa	Investimento	Receita	Fluxo de Caixa
1	-R\$ 1.890.000,00	R\$ 362.894,00	-R\$ 1.527.106,00	-R\$ 1.890.000,00	R\$ 302.522,00	-R\$ 1.587.478,00	-R\$ 1.890.000,00	R\$ 257.418,00	-R\$ 1.632.582,00
2	-R\$ 1.710.358,72	R\$ 384.667,64	-R\$ 1.325.691,08	-R\$ 1.777.975,36	R\$ 320.673,32	-R\$ 1.457.302,04	-R\$ 1.828.491,84	R\$ 272.863,08	-R\$ 1.555.628,76
3	-R\$ 1.484.774,01	R\$ 407.747,70	-R\$ 1.077.026,31	-R\$ 1.632.178,28	R\$ 339.913,72	-R\$ 1.292.264,57	-R\$ 1.742.304,21	R\$ 289.234,86	-R\$ 1.453.069,35
4	-R\$ 1.206.269,47	R\$ 432.212,56	-R\$ 774.056,91	-R\$ 1.447.336,31	R\$ 360.308,54	-R\$ 1.087.027,77	-R\$ 1.627.437,67	R\$ 306.588,96	-R\$ 1.320.848,71
5	-R\$ 866.943,74	R\$ 458.145,31	-R\$ 408.798,42	-R\$ 1.217.471,10	R\$ 381.927,05	-R\$ 835.544,05	-R\$ 1.479.350,56	R\$ 324.984,29	-R\$ 1.154.366,26
6	-R\$ 457.854,23	R\$ 485.634,03	R\$ 27.779,80	-R\$ 935.809,33	R\$ 404.842,68	-R\$ 530.966,66	-R\$ 1.292.890,21	R\$ 344.483,35	-R\$ 948.406,86
7		R\$ 514.772,07	R\$ 514.772,07	-R\$ 594.682,66	R\$ 429.133,24	-R\$ 165.549,42	-R\$ 1.062.215,69	R\$ 365.152,35	-R\$ 697.063,33
8		R\$ 545.658,40	R\$ 545.658,40	-R\$ 185.415,35	R\$ 454.881,23	R\$ 269.465,89	-R\$ 780.710,93	R\$ 387.061,49	-R\$ 393.649,44
9		R\$ 578.397,90	R\$ 578.397,90		R\$ 482.174,11	R\$ 482.174,11	-R\$ 440.887,37	R\$ 410.285,18	-R\$ 30.602,19
10		R\$ 613.101,78	R\$ 613.101,78		R\$ 511.104,55	R\$ 511.104,55	-R\$ 34.274,45	R\$ 434.902,29	R\$ 400.627,84
11		R\$ 649.887,88	R\$ 649.887,88		R\$ 541.770,83	R\$ 541.770,83		R\$ 460.996,43	R\$ 460.996,43

A Figura 5 foi feita a partir dos valores da Tabela 8, sendo possível identificar de uma melhor forma que o cenário pessimista (com maior número de manutenções por ano, em vermelho no Gráfico) tem o *payback* em 6 anos, já os cenários realista (em amarelo no Gráfico) e otimista (em verde no Gráfico) têm o *payback* em 8 e 10 anos, respectivamente.

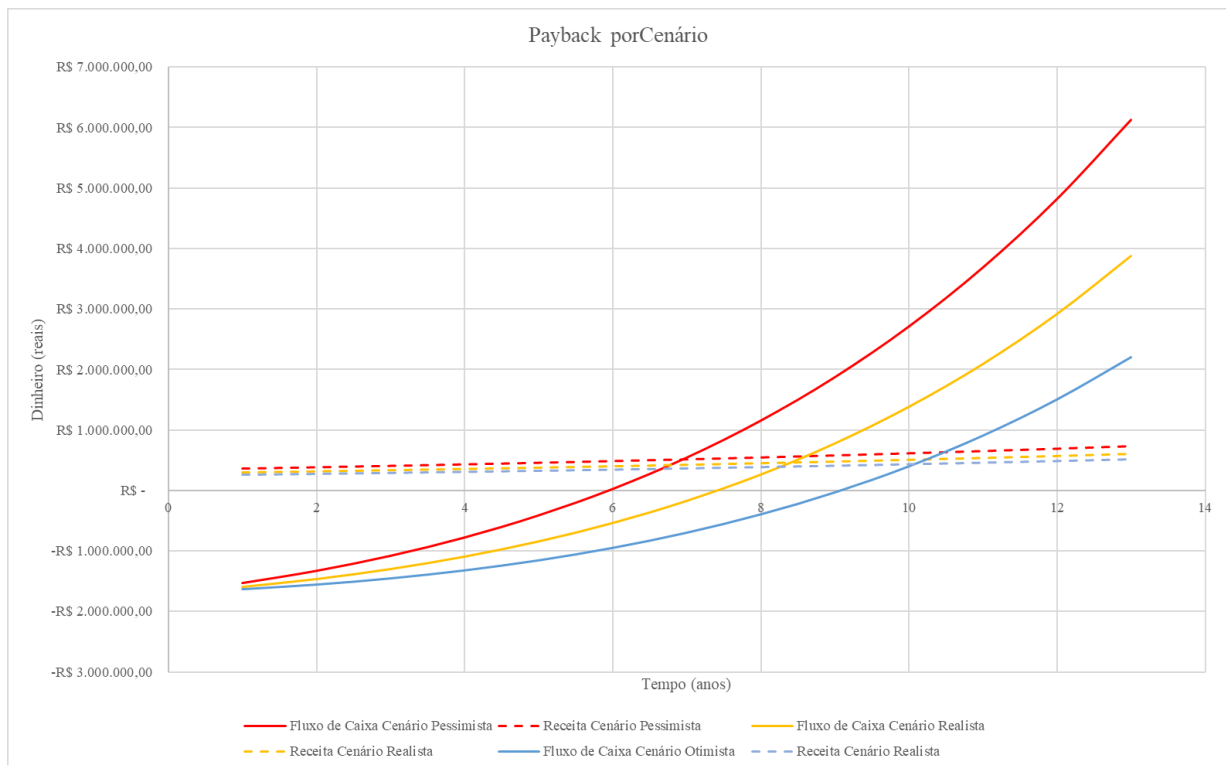


Figura 5: Fluxo de caixa versus receita de cada cenário para se identificar qual o tempo de *payback*.

Fonte: Empresa Confidencial.

## 5. CONCLUSÃO

Tendo em vista que as informações analisadas no presente trabalho fazem parte de um conjunto de ferramentas de auxílio à tomada de decisão, a implantação de técnicas de manutenção preditiva por meio da análise de corrente elétrica apresenta-se ser vantajosa. Embora seja importante ressaltar que o período de retorno do investimento (*payback*) seja de 6 a 10 anos dependendo do cenário, os benefícios superam essa limitação.

Implementações de equipamentos nesta escala, além de dados monetários, também levam em consideração a segurança e o bem-estar dos funcionários. Ao se instalarem os equipamentos necessários para que se possa verificar o bom funcionamento do motor em tempo real, caso um dos parâmetros indique falha, é possível verificar o problema em horários não produtivos, evitando que os funcionários sejam expostos a condições inseguras e desconfortáveis termicamente.

A manutenção preditiva por meio dos sinais de intensidade de corrente elétrica permite identificar falhas e desgastes em equipamentos antes que ocorram paradas não programadas. Isso resulta em uma redução significativa nos custos de manutenção corretiva e no aumento da disponibilidade dos equipamentos. Além disso, a capacidade de prever problemas potenciais permite um planejamento mais eficiente das atividades de manutenção, otimizando o uso de recursos e minimizando interrupções na produção.

Embora o *payback* calculado possa parecer longo, é importante considerar os benefícios a longo prazo que a manutenção preditiva oferece. A eliminação dos custos de manutenção corretiva, o aumento da disponibilidade dos equipamentos e a melhoria na eficiência operacional compensam o investimento inicial.

Portanto, a partir das informações apresentadas, recomenda-se a implementação da manutenção preditiva por meio dos sinais de intensidade de corrente elétrica como uma estratégia eficaz para melhorar a confiabilidade e a eficiência dos processos de manutenção na empresa analisada.



**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BORLIDO, D. J. A. Indústria 4.0: Aplicação a Sistemas de Manutenção. **repositorio-aberto.up.pt**, 30 jan. 2017.

DALENOGARE, L. S. et al. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, n. 1, p. 383–394, out. 2018.

KUMAZAWA, A. S. [UNESP. Estudo da viabilidade da aplicação de técnicas preditivas na manutenção de reatores batelada. **Aleph**, 2012.

MOBLEY, K., M. **An introduction to predictive maintenance**. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2002. v. 2nd ed

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva**. [s.l.] Blucher, 2018. v. 1