

# Otimização das Paragens Produtivas de uma Máquina de Injeção Através de Manutenção Preditiva

**Daniel Alexandre Martins Rebelo**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia e Gestão Industrial**

**Orientador: Professor Especialista Joaquim Augusto Gonçalves Moreira**

**Co-orientador: Professor João Pedro Neves da Costa**

**Júri:**

Presidente:

Susana Nicola de Araújo, Professora Adjunto, ISEP

Vogais:

José Manuel Torres Farinha, Professor Coordenador Principal, ISEC

Joaquim Augusto Gonçalves Moreira, Professor Adjunto Convidado, ISEP



# Resumo

Este projeto de mestrado foca-se na implementação de uma estratégia de manutenção preditiva aplicada na máquina de injeção ENGEL 1100 da Simoldes Plásticos, uma empresa do grupo Simoldes, com o objetivo de reduzir paragens produtivas não planeadas e otimizar a eficiência operacional. O projeto iniciou-se com uma revisão bibliográfica detalhada sobre os conceitos de manutenção preditiva e a sua importância na Indústria 4.0, incluindo uma análise das técnicas mais utilizadas, como a análise de vibrações e monitorização de parâmetros em tempo real.

A metodologia adotada foi a *Action Research*, que permitiu realizar um plano de ação baseado na identificação de componentes críticos, nomeadamente as resistências elétricas do bico de injeção e o acoplamento motor-bombas. Foram monitorizados sinais elétricos e implementados acelerómetros e sensores indutivos, conectados a uma ferramenta de diagnóstico avançada, que monitoriza continuamente a condição dos componentes. Os dados recolhidos são analisados em tempo real e o sistema foi integrado ao *software* de gestão da manutenção da empresa, através de uma aplicação de processamento de dados desenvolvida em linguagem *Python*, permitindo intervenções rápidas e precisas.

Os resultados obtidos mostram que a aplicação da manutenção preditiva na Simoldes Plásticos pode levar a uma redução significativa das paragens produtivas e dos custos associados, melhorando a fiabilidade e a longevidade dos equipamentos. O trabalho contribui para a modernização dos processos de manutenção na indústria automotiva, posicionando a Simoldes como uma empresa inovadora e competitiva, capaz de atender às exigências do mercado com eficiência e qualidade.

**Palavras-chave:** Manutenção Preditiva, Máquina de Injeção, Indicadores de Condição, Análise Vibrações, Python



# Abstract

This master's project focuses on the implementation of a predictive maintenance strategy applied to the ENGEL 1100 injection machine at Simoldes Plásticos, a Simoldes group company, with the aim of reducing unplanned production stoppages and optimizing operational efficiency. The project began with a detailed literature review on the concepts of predictive maintenance and its importance in Industry 4.0, including an analysis of the most commonly used techniques, such as vibration analysis and real-time parameter monitoring.

The methodology adopted was Action Research, which made it possible to create an action plan based on the identification of critical components, specifically the electrical resistors in the injection nozzle and the motor-pump coupling. Electrical signals were monitored and accelerometers and inductive sensors were implemented, connected to an advanced diagnostic tool that continuously monitors the condition of the components. The data collected is analyzed in real time and the system has been integrated with the company's maintenance management software through a data processing application developed in Python, allowing for quick and precise interventions.

The results obtained show that the application of predictive maintenance at Simoldes Plásticos can lead to a significant reduction in production stoppages and associated costs, improving the reliability and longevity of the equipment. The work contributes to the modernization of maintenance processes in the automotive industry, positioning Simoldes as an innovative and competitive company, capable of responding to market demands with efficiency and quality.

**Keywords:** Predictive Maintenance, Injection Molding Machine, Condition Indicators, Vibration Analysis, Python



# Agradecimentos

Chegar a este momento é o resultado de uma jornada que não teria sido possível sem o apoio e a dedicação de várias pessoas, às quais desejo expressar a minha mais profunda gratidão.

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram incondicionalmente, mesmo quando decidi voltar aos estudos mais tarde na vida. O vosso amor e incentivo foram essenciais para eu seguir este caminho.

À minha mulher, que é um dos pilares fundamentais da minha vida, obrigado por estares ao meu lado em todos os momentos, pelos sacrifícios feitos e pelo apoio constante que me deu forças para continuar. Este sucesso é tanto teu quanto meu.

Agradeço imensamente às minhas colegas de faculdade, verdadeiras guerreiras, pelo empenho e dedicação constantes. O vosso apoio e amizade foram fundamentais ao longo desta jornada.

Agradeço também a todos os docentes e orientadores que tiveram impacto direto neste trabalho, pelo conhecimento transmitido e pelo apoio contínuo durante esta jornada académica. Um especial agradecimento ao Professor Joaquim Moreira, pela sua inestimável orientação, paciência e dedicação, sempre disponível para me guiar com conselhos sábios e esclarecedores. Ao Professor João Costa um reconhecimento especial pelo seu apoio técnico fundamental e pela prontidão em partilhar o seu vasto conhecimento, que foi crucial para o desenvolvimento deste projeto. Agradeço ainda à Prof. Susana pelo seu contributo e disponibilidade ao longo deste processo, cujo apoio foi importante em momentos chave do projeto.

Agradeço profundamente ao Engenheiro Pedro Fonseca, da Simoldes, pelo seu incansável apoio e dedicação. A sua ajuda foi essencial na resolução de desafios críticos e na implementação bem-sucedida deste projeto. Sempre disponível, atento e preocupado em garantir tudo o que era necessário para o avanço do trabalho.

Um agradecimento especial ao Engenheiro Hugo Leal, da IFM, pelo valioso conhecimento transmitido e pelo suporte técnico fundamental, especialmente na área das vibrações.

A todos, o meu muito obrigado.



# Índice

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b> .....  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Problema de investigação, enquadramento e pertinência.....                       | 1         |
| 1.2      | Questão e objetivos de investigação.....   | 2         |
| 1.3      | Opções metodológicas.....  | 5         |
| 1.4      | Estrutura do documento .....   | 6         |
| <b>2</b> | <b>Revisão Bibliográfica</b> .....   | <b>9</b>  |
| 2.1      | Introdução à manutenção preditiva.....   | 9         |
| 2.1.1    | Conceitos básicos de manutenção preditiva.....                                   | 10        |
| 2.1.2    | Técnicas de manutenção preditiva.....  | 11        |
| 2.1.3    | Importância da manutenção preditiva na indústria .....                           | 12        |
| 2.1.4    | Identificação e comparação de diferentes estratégias de manutenção .....         | 13        |
| 2.1.5    | Análise de vibrações na manutenção preditiva .....                               | 16        |
| 2.2      | Indústria 4.0.....   | 17        |
| 2.2.1    | Tecnologia na indústria 4.0.....   | 17        |
| 2.2.2    | Princípios de implementação .....  | 18        |
| 2.3      | Interligação da Indústria 4.0 com a Manutenção Preditiva .....                   | 19        |
| 2.4      | Aplicações práticas de manutenção preditiva.....                                 | 20        |
| <b>3</b> | <b>Desenvolvimento</b> .....   | <b>27</b> |
| 3.1      | Diagnóstico .....  | 27        |
| 3.1.1    | Manutenção Preventiva na Simoldes Plásticos .....                                | 27        |
| 3.1.2    | Plano de manutenção ENGEL 1100 .....   | 28        |
| 3.1.3    | Análise ao atual plano de manutenção ENGEL 1100 .....                            | 28        |
| 3.2      | Plano de Ação.....   | 29        |
| 3.2.1    | Resistências elétricas.....  | 31        |
| 3.2.2    | Acoplamento motor-bombas .....   | 32        |
| 3.3      | Implementação .....  | 33        |
| 3.3.1    | Identificação específica dos recursos de <i>hardware</i> e <i>software</i> ..... | 33        |
| 3.3.2    | Aplicação dos recursos de <i>hardware</i> .....                                  | 37        |
| 3.3.3    | Definição de Indicadores.....  | 43        |
| 3.3.4    | Recolha de dados em tempo real .....   | 55        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.3.5    | Armazenamento dos dados provenientes dos indicadores .....                      | 56        |
| 3.4      | Avaliação e Monitorização .....   | 61        |
| 3.4.1    | Análise dos indicadores de condição .....                                       | 61        |
| 3.4.2    | Integração dos dados analisados com o <i>Software</i> de Gestão da Manutenção . | 67        |
| <b>4</b> | <b>Análise de Resultados.....</b>   | <b>71</b> |
| 4.1      | Resistências elétricas .....  | 71        |
| 4.2      | Acoplamento motor-bombas.....   | 74        |
| <b>5</b> | <b>Conclusão .....</b>  | <b>79</b> |
|          | <b>Referências .....</b>  | <b>83</b> |
|          | <b>Anexos .....</b>   | <b>87</b> |

# Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Gráfico <i>Gantt</i> , ilustrando o planeamento do projeto .....  | 3  |
| Figura 2 - Método <i>Action Research</i> e diretrizes para a sua aplicabilidade (Adaptado de Martins et al., 2020) .....                                     | 5  |
| Figura 3 - Evolução das atividades e métodos de manutenção (Adaptado de Achouch et al., 2022) .....  | 12 |
| Figura 4 - Intervalos de falhas potenciais nos intervalos de inspeção e momento de atuação da manutenção preditiva (Adaptado de Achouch et al., 2022) .....  | 13 |
| Figura 5 - Diferentes estratégias de manutenção (Adaptado de Hamasha et al., 2023) .....   | 14 |
| Figura 6 - Diferentes estratégias de manutenção (Adaptado de Ben-Daya et al., 2009) .....  | 14 |
| Figura 7 - Etapas da monitorização da condição do equipamento (Adaptado de Goyal & Pabla, 2016) .....  | 16 |
| Figura 8 - Componentes das tecnologias da Indústria 4.0 (Adaptado de Achouch et al., 2022) .....   | 18 |
| Figura 9 - Visão geral do modelo projetado para um sistema de deteção de falhas precoces (Adaptado de Dalzoc et al., 2020) .....                             | 19 |
| Figura 10 - Esquema utilizado na aquisição de dados, na máquina de injeção (Adaptado de Morgan & Chu, 2022) .....  | 20 |
| Figura 11 - Perfil de recolha dos dados, através do sistema de aquisição de dados (Adaptado de Morgan & Chu, 2022) .....                                     | 21 |
| Figura 12 - Indicador da condição do equipamento VS número de ciclos de funcionamento no período de abertura do molde (Adaptado de Morgan & Chu, 2022) ..... | 22 |
| Figura 13 - Componentes principais de uma máquina de injeção (Adaptado de Frumosu et al., 2020) .....  | 23 |
| Figura 14 - Agrupamento das 5 principais categorias para a característica nº 182 (Adaptado de Frumosu et al., 2020) .....                                    | 24 |
| Figura 15 - Estimativa da curva de sobrevivência de Kaplan-Meier utilizando apenas dados de moldes com desgaste (Adaptado de Frumosu et al., 2020) .....     | 24 |
| Figura 16 - Estimativa da curva de sobrevivência de Kaplan-Meier utilizando todos os dados de moldes (Adaptado de Frumosu et al., 2020) .....                | 25 |
| Figura 17 - Vista do utilizador quando consulta as ordens de trabalho no <i>software</i> de gestão da manutenção .....                                       | 28 |
| Figura 18 - Macro plano de ação .....  | 30 |
| Figura 19 - Requisitos necessários para o controlo do aquecimento da resistência .....   | 31 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 20 - Esquema da localização da informação sobre a alimentação elétrica e sobre o sinal elétrico do comando de aquecimento ..... | 32 |
| Figura 21 - Constituição do acoplamento motor-bombas.....  | 32 |
| Figura 22 - Esquema dos recursos de <i>hardware</i> necessários para o acoplamento motor-bombas .....                                  | 33 |
| Figura 23 - Especificação dos recursos de <i>hardware</i> e <i>software</i> .....  | 36 |
| Figura 24 - Esquema elétrico da instalação realizada para a monitorização da condição da resistência elétrica .....                    | 37 |
| Figura 25 - Relé DIA53S72420AF de monitorização de intensidade de corrente elétrica.....   | 38 |
| Figura 26 - Relé FA101+BS01-Q12, que controla o comando de aquecimento da resistência .  | 39 |
| Figura 27 - Esquema elétrico da instalação realizada para a monitorização da condição do acoplamento motor-bombas .....                | 40 |
| Figura 28 - Instalação dos acelerómetros A1, A2 e do sensor indutivo SI1 .....   | 41 |
| Figura 29 - Instalação das ferramentas de diagnóstico VSE002_1, VSE002_2 e da fonte de alimentação dedicada FA1 .....                  | 42 |
| Figura 30 - Especificação da implementação de recursos de <i>hardware</i> para a recolha de dados, no fluxo do plano de ação .....     | 43 |
| Figura 31 - Especificação da configuração dos indicadores de condição nas ferramentas de diagnóstico, no fluxo do plano de ação.....   | 44 |
| Figura 32 - Placa de especificações motor elétrico Baumuller .....   | 46 |
| Figura 33 - Diferentes tipos de dados obtidos de uma onda sinusoidal (Adaptado de Mobius Institute, 2020, p. 1-3).....                 | 47 |
| Figura 34 - Diferentes estados dos rolamentos (Adaptado de Mobius Institute, 2020, p. 13-5) .....                                      | 48 |
| Figura 35 - Diferentes técnicas para analisar vibração em rolamentos (Adaptado de Mobius Institute, 2020, p. 13-6).....                | 48 |
| Figura 36 - Dimensões para as equações das frequências de defeito (Adaptado de Mobius Institute, 2020, p. 13-14).....                  | 49 |
| Figura 37 - Aspeto visual dos indicadores definidos no <i>software</i> VES004 na ferramenta de diagnóstico VSE002_2 .....              | 54 |
| Figura 38 - Estrutura dos indicadores, organizados em nós, no servidor de OPC UA .....   | 55 |
| Figura 39 - Tabelas de armazenamento dos valores dos indicadores de condição, para o acoplamento motor-bombas .....                    | 57 |
| Figura 40 - Tabelas de armazenamento dos valores estatísticos diários, para o acoplamento motor-bombas .....                           | 58 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 41 - Especificação do armazenamento dos dados, no fluxo do plano de ação .....  | 60 |
| Figura 42 - Ajustamento das funções de tendência de acordo com os dados históricos .....                                     | 64 |
| Figura 43 - Especificação da análise dos indicadores de condição, no fluxo do plano de ação .....                            | 67 |
| Figura 44 - Visão dos interface dos pedidos de trabalho no <i>software</i> de gestão da manutenção .....                     | 68 |
| Figura 45 - Detalhes do pedido de trabalho no <i>software</i> de gestão da manutenção.....                                   | 69 |
| Figura 46 - Especificação da integração com SGM, no fluxo do plano de ação .....   | 70 |
| Figura 47 - Pedido em lista de espera, proveniente da anomalia no relé de comando -Q12 ....                                  | 72 |
| Figura 48 - Descrição do pedido, proveniente da anomalia no relé de comando -Q12.....  | 72 |
| Figura 49 - Pedido em lista de espera, proveniente da anomalia na resistência elétrica .....                                 | 73 |
| Figura 50 - Descrição do pedido, proveniente da anomalia na resistência elétrica .....                                       | 73 |
| Figura 51 - Ajustamento das funções de tendência de acordo com os dados históricos do indicador de condição S2_Bearings..... | 74 |
| Figura 52 - Função tendência que melhor se ajusta aos dados históricos do indicador de condição S2_Bearings .....            | 75 |
| Figura 53 - Pedido em lista de espera, proveniente da anomalia nos rolamentos da Bomba 1                                     | 76 |
| Figura 54 - Descrição do pedido, proveniente da anomalia nos rolamentos da Bomba 1 .....                                     | 76 |



# Lista de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Investimentos em licenças e equipamentos .....   | 35 |
| Tabela 2 – Diferentes cenários da monitorização da condição da resistência .....                                | 45 |
| Tabela 3 - Rácio entre a frequência de rotação e de alimentação .....   | 46 |
| Tabela 4 - Frequências de defeito dos rolamentos 6313 2ZRC3 e 6311 2ZRC3 .....                                  | 50 |
| Tabela 5 - Frequências de defeito dos rolamentos 6313 2Z/C3 e 6311 2Z/C3 .....                                  | 51 |
| Tabela 6 - Frequência de defeito do rolamento NUP 2208 ECP/C3 .....   | 52 |
| Tabela 7 - Visão Geral dos indicadores monitorizados .....  | 53 |
| Tabela 8 - Valores alarmes definidos para os indicadores de condição do acoplamento motor-bombas .....          | 62 |
| Tabela 9 - Cálculo da pontuação combinada .....   | 65 |
| Tabela 10 - Valores limites máximos definidos para os indicadores de condição do acoplamento motor-bombas ..... | 66 |



# Lista de Códigos

|  |    |
|--|----|
| Código 1 – Extrato de código da recolha de dados entre o <i>Python</i> e o servidor OPC UA, para o acelerómetro A1 ..... | 56 |
| Código 2 - Extrato de código do armazenamento de dados, na base de dados ManSimoldes, para o acelerómetro A1 .....       | 58 |
| Código 3 - Dicionário <i>Triggers</i> , que define os valores alarme no <i>script Python</i> .....                       | 62 |
| Código 4 - Dicionário <i>limit_values</i> , que define os valores limites máximos no <i>script Python</i> ...            | 66 |



# Acrónimos e Símbolos

## Lista de Acrónimos

|               |  |
|---------------|--|
| <b>API</b>    | <i>Application Programming Interface</i>                 |
| <b>aRMS</b>   | <i>Acceleration Root Mean Square</i>                     |
| <b>cREST</b>  | <i>Crest Factor</i>                                      |
| <b>EUA</b>    | Estados Unidos da América                                |
| <b>FPE</b>    | Frequência de Passagem das Esferas                       |
| <b>FPPE</b>   | Frequência de Passagem das Esferas na Pista Externa      |
| <b>FPPI</b>   | Frequência de Passagem das Esferas na Pista Interna      |
| <b>FFT</b>    | <i>Fast Fourier Transform</i>                            |
| <b>IoT</b>    | <i>Internet of Things</i>                                |
| <b>MSE</b>    | <i>Mean Squared Error</i>                                |
| <b>MTBF</b>   | <i>Mean Time Before Fail</i>                             |
| <b>MTTR</b>   | <i>Mean Time To Repair</i>                               |
| <b>OEE</b>    | <i>Overall Equipment Effectiveness</i>                   |
| <b>OPC UA</b> | <i>Open Platform Communications Unified Architecture</i> |
| <b>PGS</b>    | Prognóstico e Gestão da Saúde                            |
| <b>RMS</b>    | <i>Root Mean Square</i>                                  |
| <b>SGM</b>    | Software de Gestão da Manutenção                         |
| <b>SQL</b>    | <i>Structured Query Language</i>                         |
| <b>vRMS</b>   | <i>Velocity Root Mean Square</i>                         |

## Lista de Símbolos

|             |                    |
|-------------|--------------------|
| $\emptyset$ | Ângulo de Contacto |
|-------------|--------------------|



# 1 Introdução

Neste capítulo inicial, numa primeira fase, realiza-se uma breve descrição à manutenção preditiva e à importância do tema na Simoldes, enquanto fornecedora da indústria automóvel na garantia do cumprimento dos requisitos de entrega de produtos com qualidade. De seguida faz-se uma abordagem à entropia que as avarias inesperadas causam em todo o sistema produtivo, bem como breve narrativa do contexto do projeto. Logo após, realiza-se o enquadramento da investigação, a sua pertinência e os objetivos da mesma. Por último, anuncia-se a metodologia utilizada e a estrutura do documento.

## 1.1 Problema de investigação, enquadramento e pertinência

A Simoldes Plásticos é uma empresa do grupo Simoldes, fundada em 1981, que produz componentes em plásticos, em grande parte para a indústria automóvel, mas também para outros setores da indústria, tais como, armazenamento e controle de pressão de líquidos e gases, capacetes de bicicleta, armamento e equipamentos de caça, utensílios de cozinha e acessórios. Este trabalho é realizado na área da manutenção preditiva, com o objetivo de reduzir as paragens dos equipamentos e, em consequência, minimizar os custos das paragens e assegurar a continuidade da produção.

Desde longa data que a Simoldes faz uma aposta contínua na tecnologia aplicada aos seus processos e equipamentos. Nesta dimensão, pretende-se obter valores estáveis e seguros para as diferentes variáveis em diferentes operações, para que seja possível maximizar a eficiência produtiva (Simoldes, sem data). Neste contexto, o âmbito deste projeto, justifica-se pela necessidade de controlar variáveis relacionadas com as paragens dos equipamentos e com o tempo de disponibilidade dos mesmos. Na Simoldes, as paragens não planeadas causam entropia produtiva, porque originam impactos financeiros e operacionais. Os impactos operacionais ocorrem em diferentes áreas, como no planeamento, na logística interna e externa, na manutenção e em todos os equipamentos agregados à máquina de injeção, a jusante do processo.

A nível mundial as paragens não planeadas provocam elevados prejuízos às empresas. Um caso específico é o anunciado pelo autor Lyat (Lyat, 2022), na revista *Fortune*, que refere que as 500 maiores empresas dos EUA (Estados Unidos da América), perdem cerca de 864 bilhões de

dólares por ano, devido às paragens produtivas não planeadas. Estas paragens representam 8% das receitas anuais destas empresas. Além disso, grandes empresas podem perder até 323 horas de produção anuais, o que resulta num custo de 532 000 dólares por ano, ou seja, 172 milhões de dólares anuais.

A implementação do projeto na sua formulação, requer uma estratégia de manutenção preditiva, a aplicar na máquina de injeção ENGEL 1100, devendo-se ter em consideração as particularidades específicas deste equipamento, que precisam de ser aprofundadas e estudadas, para que seja possível integrar a tecnologia disponível no mercado e realizar uma análise de dados, que apoie a tomada de decisão.

## **1.2 Questão e objetivos de investigação**

Atendendo à descrição do problema referido no Capítulo 1.1, este trabalho pretende dar resposta à seguinte questão de investigação: Como reduzir as paragens produtivas da máquina ENGEL 1100 através da realização de manutenção preditiva?

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é reduzir as paragens produtivas não planeadas, através da aplicabilidade de uma estratégia de manutenção preditiva, na máquina de injeção ENGEL 1100, na empresa Simoldes Plásticos, tendo como objetivos específicos, os seguintes tópicos:

- Incrementar o conhecimento sobre a manutenção preditiva;
- Aprofundar o conhecimento do modo de funcionamento da máquina de injeção e principais componentes críticos;
- Realizar um estudo e avaliação das necessidades tecnológicas para implementação de manutenção preditiva;
- Propor uma solução com base no estado da arte relativo à tecnologia disponível no mercado;
- Analisar e tratar os dados de funcionamento do equipamento;
- Implementar a solução proposta.

Este projeto será desenvolvido em várias fases, de acordo com os objetivos específicos, conforme o planeamento representado na Figura 1.

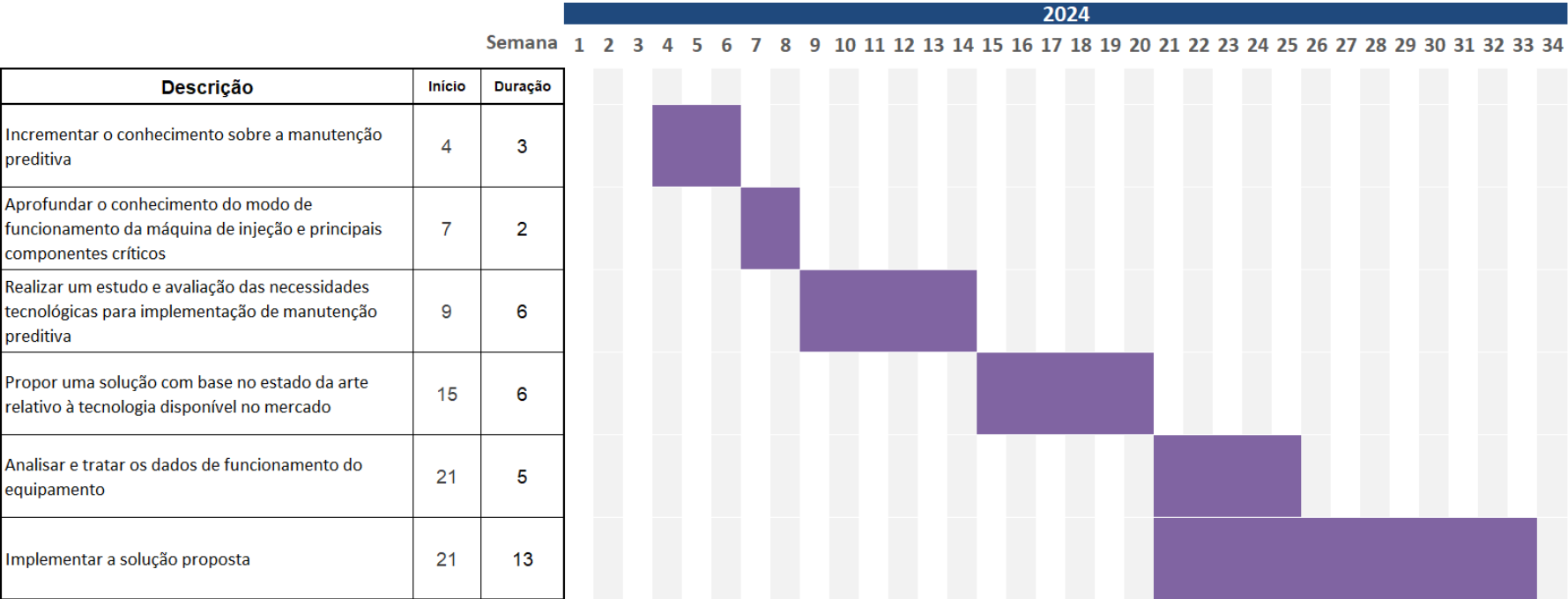


Figura 1 - Gráfico Gantt, ilustrando o planeamento do projeto

Na fase inicial, o projeto inicia-se pelo aprofundamento e incremento sobre a manutenção preditiva. Para o efeito será realizada uma revisão bibliográfica sobre a mesma, abordando-se a sua relevância no contexto da Indústria 4.0 e as tecnologias associadas, como sensores de vibração e ferramentas de diagnóstico avançadas. Esta fase terá uma duração de três semanas e iniciará-se na quarta semana de 2024.

Posteriormente, existirá uma análise detalhada da máquina de injeção ENGEL 1100, com o objetivo de aprofundar o conhecimento do modo de funcionamento da máquina e identificar os principais componentes críticos. Esta fase vai iniciar-se logo após a conclusão da fase anterior, terá uma duração de duas semanas e deverá estar concluída no final da semana oito.

De seguida, realizar-se-á um estudo e avaliação das necessidades tecnológicas do projeto. O principal objetivo deste estudo será identificar as necessidades de *hardware* e *software*, para que seja possível recolher informação em tempo real dos componentes críticos da máquina de injeção. Esta fase está planeada iniciar na semana nove, terá uma duração de seis semanas e terminará na semana catorze.

Logo após, será proposta uma solução com base no estado da arte relativo à tecnologia disponível no mercado. Esta fase, vai iniciar-se na semana quinze, terá uma duração de seis semanas e terminará na semana vinte. O principal foco desta fase estará na conciliação de todo o conhecimento adquirido, dos recursos necessários e das condições internas disponíveis.

Na sequência do planeamento, a fase de analisar e tratar os dados de funcionamento do equipamento deverá iniciar-se na semana vinte e um, terá uma duração de cinco semanas e terminará na semana vinte e seis. Ao mesmo tempo a fase de implementação da solução proposta deverá ser iniciada, dado que estas duas fases estão interligadas, devido à necessidade de dados provenientes da máquina de injeção.

Por fim, a fase de implementação da solução será iniciada na semana 21, terá uma duração de treze semanas e terminará na semana trinta e quatro. Nesta fase toda a solução proposta será implementada, de forma que seja possível otimizar as paragens produtivas da máquina de injeção ENGEL 1100, através da aplicabilidade de técnicas de manutenção preditiva.

### 1.3 Opções metodológicas

A escolha da metodologia para a realização deste trabalho tem em conta os objetivos gerais da investigação e as ações necessárias para os atingir. A metodologia adotada para a realização desta investigação é *Action Research*, devido a este método ser apropriado para resolver problemas práticos e reais nas organizações, nos quais os investigadores estão diretamente envolvidos na resolução dos problemas. A intervenção é realizada com base na teoria, que é validada com base nas ações práticas implementadas para a resolução do problema com qual a organização se confronta (Eden & Ackermann, 2018). A Figura 2 demonstra a metodologia *Action Research*.

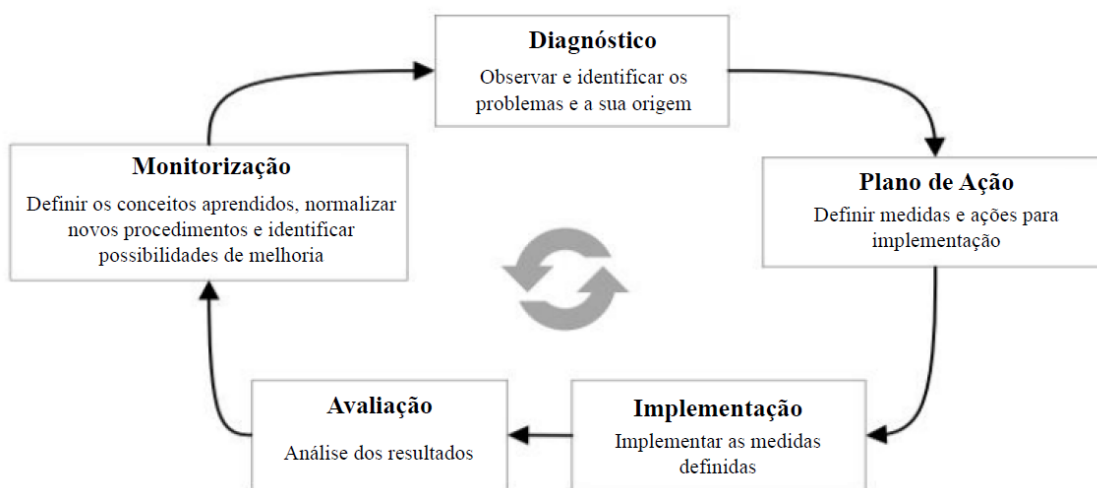


Figura 2 - Método *Action Research* e diretrizes para a sua aplicabilidade (Adaptado de Martins et al., 2020)

Segundo os autores Hamasha et al. (Hamasha et al., 2023), a realização de manutenção preditiva pode assumir duas perspetivas, sendo estas, a manutenção preditiva com base na condição ou a manutenção preditiva centrada na fiabilidade. O presente trabalho tem como princípio a perspetiva da manutenção preditiva com base na condição, dado que um dos principais requisitos do projeto é identificar e prever falhas iminentes, através da monitorização de parâmetros de componentes críticos.

Seguindo a metodologia adotada, o plano de ação, numa fase inicial, começa na identificação interna de pontos críticos que condicionam o funcionamento da máquina de injeção e que provocam entropia produtiva. Internamente, em conjunto com o responsável de manutenção da Simoldes Plásticos, identificou-se dois pontos críticos, sendo estes, as resistências do bico de injeção e o acoplamento motor-bombas.

De seguida, na implementação, seguiu-se a abordagem referida pelos autores Rousopoulou et al. (Rousopoulou et al., 2020), que consiste na construção de uma solução para a deteção de anomalias em tempo real. Numa fase inicial da implementação, identificou-se os recursos de *hardware* e *software* necessários, de seguida implementaram-se os recursos de *hardware*, definiram-se indicadores e o método de recolha dos dados em tempo real.

Na fase de avaliação verificam-se as ações e valores limites que identificam se o equipamento necessita de uma avaliação cuidada e se os valores recolhidos em tempo real ultrapassam os definidos para o bom funcionamento dos componentes. Nesta fase a informação é analisada e os técnicos de manutenção têm conhecimento da anomalia verificada, através da integração realizada com o *software* de gestão da manutenção.

Por último, a fase de monitorização garante a viabilidade de todo o fluxo deste projeto, de forma a que os indicadores de condição do equipamento sejam continuamente ajustados, através dos dados históricos recolhidos.

A escolha deste princípio de investigação deve-se aos factos anunciados pelo autor Mobley (Mobley, 2002), que após uma pesquisa realizada em 500 fábricas, verificou que a implementação de manutenção preditiva através da monitorização das condições dos equipamentos, reflete melhorias significativas na fiabilidade e disponibilidade destes. Na mesma linha de ação, o autor anuncia que a monitorização regular da condição das máquinas e dos sistemas, reduz em média 55% o número de falhas catastróficas e inesperadas de uma máquina.

## 1.4 Estrutura do documento

Este documento está organizado em vários capítulos, de modo a apresentar de forma clara o desenvolvimento deste projeto, que consiste na otimização das paragens produtivas de uma máquina de injeção através de manutenção preditiva.

O capítulo 1 apresenta a introdução do tema, que contextualiza a importância da manutenção preditiva na indústria, com foco no contexto da indústria 4.0. Este capítulo também descreve a questão e objetivos de investigação e a metodologia utilizada.

No capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica, onde se explora os diferentes tipos de manutenção com foco na manutenção preditiva e as técnicas utilizadas, bem como a integração das tecnologias da indústria 4.0 para suportar estas metodologias. Este capítulo é essencial para o desenvolvimento teórico deste projeto.

O capítulo 3 foca-se no desenvolvimento do projeto e inicia com o diagnóstico do atual plano de manutenção preventivo da máquina de injeção. Logo após, é realizada a identificação dos componentes críticos da máquina, para se identificar o foco da implementação das técnicas de manutenção preditiva. De seguida, realiza-se o plano de ação que consiste na esquematização da estratégia a seguir. Posteriormente, realiza-se a implementação que aborda a identificação específica dos recursos de *hardware* e *software*, a aplicação dos mesmos, a definição de indicadores de condição para os componentes críticos, a recolha de dados em tempo real e o armazenamento dos mesmos. Por último, realiza-se a avaliação e monitorização dos indicadores de condição, na qual é realizada uma análise e em caso de se verificar uma anomalia, a informação é integrada com o *software* de gestão da manutenção da empresa.

No capítulo 4 apresenta-se os resultados obtidos com a implementação da estratégia de manutenção preditiva, através da análise da sua eficácia na deteção de falhas e na redução das paragens produtivas não planeadas.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais, realizada uma reflexão sobre os principais resultados do projeto e propõem-se sugestões de melhoria para se incluírem no projeto num futuro próximo.



## 2 Revisão Bibliográfica

O propósito deste capítulo, numa fase inicial, começa através da realização de uma introdução à manutenção preditiva, onde se aborda os conceitos básicos, técnicas, a importância e identificação dos diferentes tipos de manutenção. Numa segunda fase, expõe-se o conceito da indústria 4.0, onde se aborda a tecnologia e os princípios de implementação. De seguida, refere-se a importância da indústria 4.0 e a interligação interna com a manutenção preditiva. Por último, realiza-se o levantamento de diversas aplicações práticas de manutenção preditiva, de forma que seja possível compreender os resultados e dificuldades na área em questão.

### 2.1 Introdução à manutenção preditiva

A manutenção preditiva surge da necessidade de controlar o estado de ativos produtivos, que precisam de correções ou verificações regulares (Khazaelpour & Zolfane, 2024). Segundo os autores Kamariotis et al. (Kamariotis et al., 2024), a manutenção preditiva é uma estratégia de monitorização, que permite realizar estimativas da vida útil restante, com base na avaliação de alguns parâmetros. Este tipo de manutenção permite o planeamento de ações de manutenção por meio da análise contínua.

O OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), é utilizado pela sociedade e permite medir e avaliar a eficiência dos equipamentos, mas a avaliação do indicador depende do estudo das suas componentes individuais. O autor ainda refere que para ser possível compreender e melhorar o indicador, é necessário analisar as diferentes áreas que o influenciam, sendo uma delas a área da manutenção (Ylipää et al., 2017). Especificamente na área de manutenção os indicadores MTBF (*Mean Time Before Fail*) e o MTTR (*Mean Time To Repair*) são indicadores de grande importância e existe necessidade de serem analisados, dado que permitem refletir o desempenho do sistema produtivo (Alavian et al., 2019).

Ao longo dos anos existiu uma evolução considerável e visível na área tecnológica, como anuncia Sakurai & Zuchi (2018, p. 481) “Com o passar dos anos e face às constantes inovações tecnológicas a indústria passou por importantes e profundas mudanças, todas serviram para mudar de forma considerável o desenvolvimento de uma sociedade, que hoje assiste a uma transformação tecnológica sem precedentes e precisa a todo custo adaptar-se a essa realidade”. A tecnologia está presente em todo lado, faz parte do dia a dia e permite-nos evoluir.

A indústria 4.0, que caracteriza a era que vivemos, tem como princípios a capacidade de operação em tempo real, a informação disponível, os sistemas conectados e a modularidade, que permitem a interligação da tecnologia com outras áreas (Sakurai & Zuchi, 2018). A integração da área da manutenção com a tecnologia 4.0 é um fator bastante importante, isto porque conforme os autores Marques & Brito (2019, p. 8914) “A área de manutenção, como função estratégica das organizações, impacta diretamente os resultados operacionais e com isso a rentabilidade das empresas”. Os projetos de manutenção preditiva são um complemento estratégico para melhorar resultados, reduzir os tempos de paragens e, por último, obter equipamentos com maior vida útil (Marques & Brito, 2019).

### **2.1.1 Conceitos básicos de manutenção preditiva**

A manutenção preditiva para ser aplicada tem de seguir um conjunto de etapas indispensáveis ao seu sucesso, sendo estas: recolha e processamento de dados, construção de indicadores, deteção e localização antecipada de anomalias, previsão e prognóstico da saúde do equipamento e o desenvolvimento de ações corretivas quando detetadas situações não regulares (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019).

A recolha de dados é a técnica utilizada para a monitorização do estado de degradação dos componentes do sistema, através da utilização de sensores. Para a recolha de dados é necessário um equipamento de transmissão e armazenamento de dados. Após a recolha é necessário efetuar o processamento dos dados, para que seja possível interpretar sinais (tempos, frequências, vibrações, etc.) transmitidos dos sensores e construir indicadores. A construção de indicadores permite o acompanhamento da função dos componentes e controlar o momento em que surge a incapacidade do componente desempenhar a sua função (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019). A eficiência das empresas transformadoras depende do desempenho e fiabilidade das suas instalações produtivas. Para que isso aconteça é necessário um acompanhamento e implementação de indicadores que sejam elementos importantes no desempenho da manutenção (Muchiri et al, 2011).

A deteção e localização antecipada de perdas de função, num âmbito de dados, são normalmente refletidas em registos que apresentam comportamentos que não se enquadram com as características das medições anteriormente realizadas. A deteção da perda de função em certas situações ocorre de forma não supervisionada, o que torna amplamente atrativo para a realização de manutenção. Referentemente aos registos das medições, os registos regulares podem ser considerados como representantes do processo sem anomalias, o que pode ser usado numa situação de referência para definir uma situação de anomalia. (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019).

A previsão e o prognóstico da saúde do equipamento permitem dar suporte à decisão baseada numa condição, tendo como pilar estrutural a monitorização dos componentes (Simeón, 2008). Segundo os autores Lughofer e Sayed-Mouchaweh (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019), o modelo de previsão deve ser capaz de fornecer uma previsão fiável e o tempo de reação longo o suficiente para que seja possível realizar as intervenções necessárias, antes que o componente se degrade completamente.

Mais tarde, os autores Lee et al. (Lee et al., 2020), também abordam a manutenção preditiva como uma parte integral do prognóstico e gestão da saúde de um sistema. O PGS (prognóstico e gestão da saúde) é um método que permite garantir disponibilidade dos equipamentos,

através da avaliação da degradação e previsão do prognóstico dos equipamentos, permitindo obter alertas sobre falhas e economizar custos. A implementação de PGS aborda algumas etapas, tais como: a identificação de componentes críticos e a recolha de dados. Na área da manutenção preditiva, uma das estratégias para a recolha de dados é a análise de vibrações, através da aplicação de vários sensores, de forma que a conjugação de dados de diferentes fontes, possa ser útil para alcançar resultados mais precisos e fiáveis.

Nos últimos 10 anos, já existiram aplicações de PGS na indústria automotiva que obtiveram bons resultados (Lee et al. 2020). Sendo assim, para reduzir o tempo de inatividade e os custos de manutenção, a monitorização das condições de funcionamento do equipamento e a previsão de falha, são fatores importantes para prever a falha antes que ela aconteça. Esta monitorização é realizada através da formulação de uma estratégia de manutenção preditiva (Li & Wang & He, 2016).

### **2.1.2 Técnicas de manutenção preditiva**

Segundo o autor Mobley (Mobley, 2002), existe uma diversidade de tecnologias que podem ser usadas para a realização de manutenção preditiva. De todas as técnicas, a monitorização de vibrações, por norma, é o componente principal de um programa de manutenção preditiva. No entanto, a monitorização de vibração não fornece todos os dados necessários para um programa de manutenção preditiva eficiente. Esta técnica é limitada à monitorização da condição mecânica e não inclui outros parâmetros críticos e necessários para garantir a fiabilidade do equipamento. Outras técnicas de que fazem parte de um programa de manutenção preditiva são:

- Termografia: Técnica utilizada para monitorizar a emissão de energia infravermelha, que permite identificar anomalias térmicas. A radiação infravermelha permite identificar a temperatura da superfície. Existem três tipos de instrumentos que podem ser utilizados para realizar esta técnica de manutenção preditiva, sendo estas: termómetros infravermelhos, *scanners* de linha e imagens infravermelhas;
- Análise do óleo lubrificante: Esta técnica baseia-se na análise do estado do óleo lubrificante utilizado nos equipamentos. As análises fornecem informação quantitativa dos elementos químicos de forma individual, onde são identificados os aditivos e contaminantes contidos no óleo. Uma análise desta permite identificar padrões de desgaste de componentes e fornecer informação sobre falhas funcionais;
- Parâmetros do processo: Esta técnica consiste numa rotina de monitorização dos parâmetros do processo em componentes críticos. Por exemplo, considerando que um processo tem uma bomba que é considerada um equipamento crítico. Neste processo verificamos que a técnica de monitorização de vibração fornece informação sobre a condição mecânica e a técnica de termografia fornece a informação sobre a temperatura do motor e do rolamento. No entanto, nenhum deles fornece qualquer indicação sobre a eficiência operacional da bomba. Esta monitorização pode ser realizada de forma manual ou com o suporte de microprocessadores;

- Inspeção visual: A inspeção visual regular aos equipamentos é uma técnica indispensável para detetar possíveis problemas, que não seriam detetadas por outras técnicas de manutenção preditiva;
- Monitorização ultrassónica: Esta técnica é muito semelhante à monitorização de vibrações, no entanto, a análise é realizada às altas frequências, ou seja, aos ultrassons produzidos pelo sistema. Por exemplo, um vazamento de gás através de um orifício restrito provoca uma subscrição de alta frequência que facilmente é detetada por esta técnica.

### 2.1.3 Importância da manutenção preditiva na indústria

A área da manutenção sofreu uma evolução gradual ao longo dos anos. Em primeiro lugar, surgiu a manutenção corretiva, como resposta às paragens e numa altura que não se controlava nem se monitorizavam as avarias. De seguida, existiu uma evolução para a manutenção preventiva, que consiste no prolongamento da vida útil do equipamento através de intervenções periódicas. Mais tarde, surgiu o conceito de manutenção preditiva, com o objetivo de melhorar o desempenho e eficiência do processo de fabrico (Achouch et al., 2022). A Figura 3 demonstra o limite temporal das atividades e métodos de manutenção.

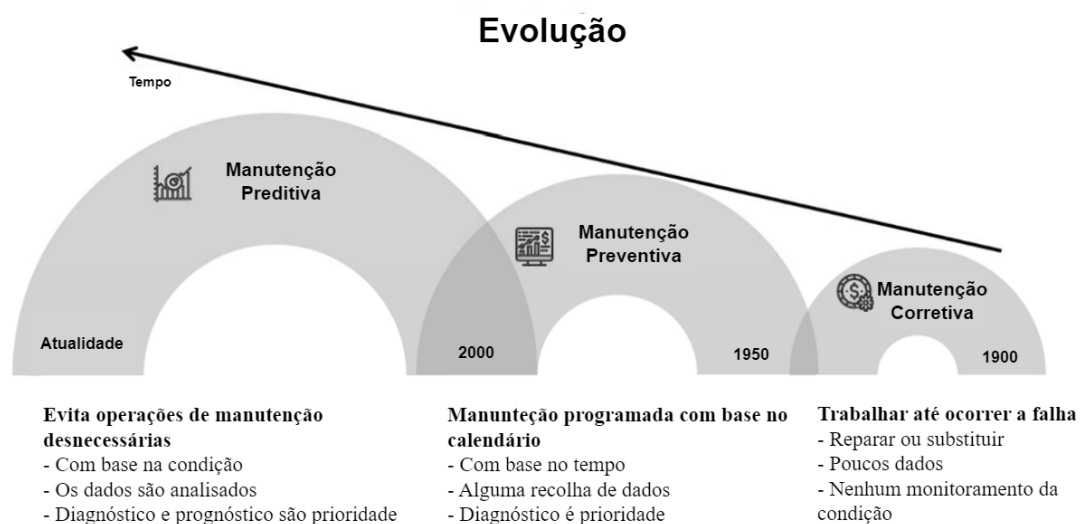


Figura 3 - Evolução das atividades e métodos de manutenção (Adaptado de Achouch et al., 2022)

Segundo os autores Achouch et al. (Achouch et al., 2022, p. 5), a manutenção preditiva implica “uma diminuição do tempo de paragem e do número de paragens desnecessárias, acompanhada de uma redução dos custos de reparação, oferecendo a possibilidade de intervenções através da previsão de falhas”. A manutenção preditiva oferece uma vida útil e prolongada aos equipamentos, garantindo uma maior fiabilidade do equipamento, bem como soluções mais ecológicas e rentáveis.

A Figura 4 representa o diagrama de intervalos de inspeção e o momento de atuação da manutenção preditiva.

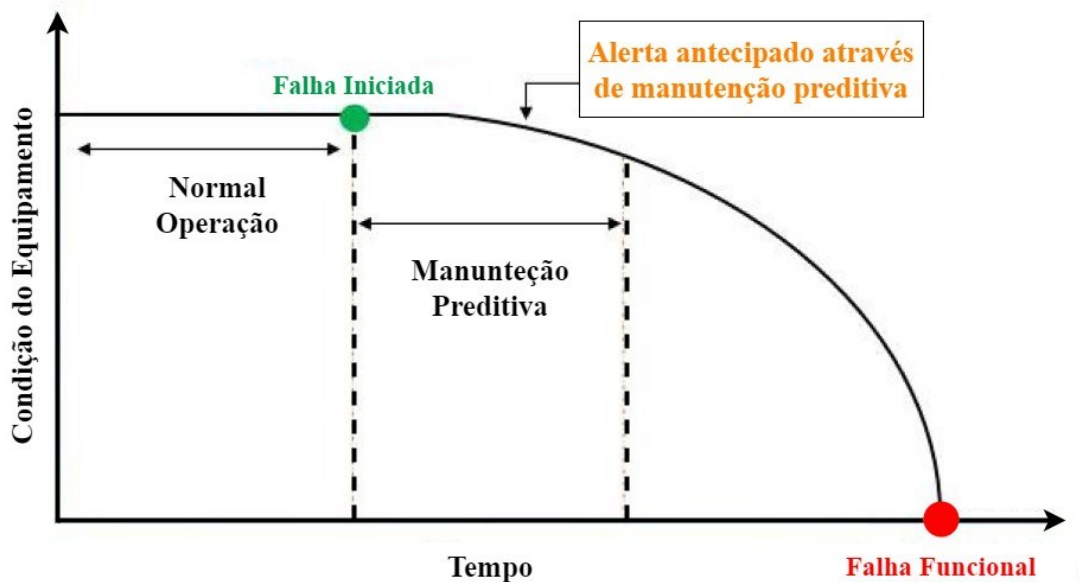


Figura 4 - Intervalos de falhas potenciais nos intervalos de inspeção e momento de atuação da manutenção preditiva (Adaptado de Achouch et al., 2022)

#### 2.1.4 Identificação e comparação de diferentes estratégias de manutenção

Os diferentes tipos de manutenção estão diretamente relacionados com diferentes estratégias de manutenção. Existem várias estratégias de manutenção disponíveis, incluído a não planeada e a planeada. A estratégia de manutenção não planeada tem como objetivo identificar os problemas nos equipamentos/sistemas/ferramentas, de seguida corrigi-los e, por fim, devolvê-los à sua função. Por outro lado, a estratégia de manutenção planeada tem como objetivo manter o estado de disponibilidade dos equipamentos, antes que eles falhem, com o objetivo de prolongar o tempo de atividade e produção (Hamasha et al., 2023).

A Figura 5 mostra a estrutura relacional entre os diferentes tipos de manutenção, segundo os autores (Mohammad et al., 2023).

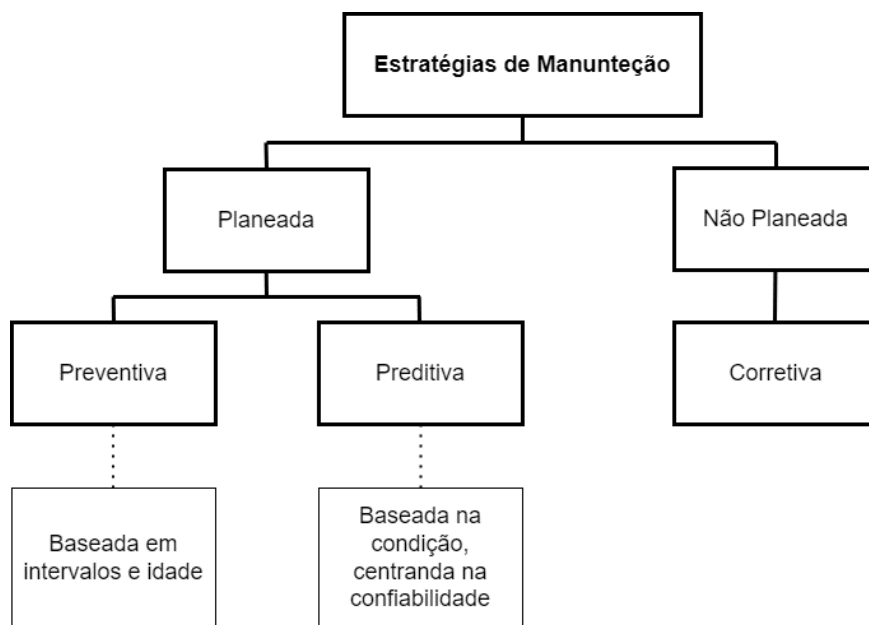


Figura 5 - Diferentes estratégias de manutenção (Adaptado de Hamasha et al., 2023)

Em complemento, outra abordagem mais aprofundada é anunciada por Ben-Daya (Ben-Daya et al., 2009), que classifica a manutenção também em duas vertentes, sendo estas: a planeada e a não planeada. A Figura 6 demonstra visualmente a abordagem do autor.

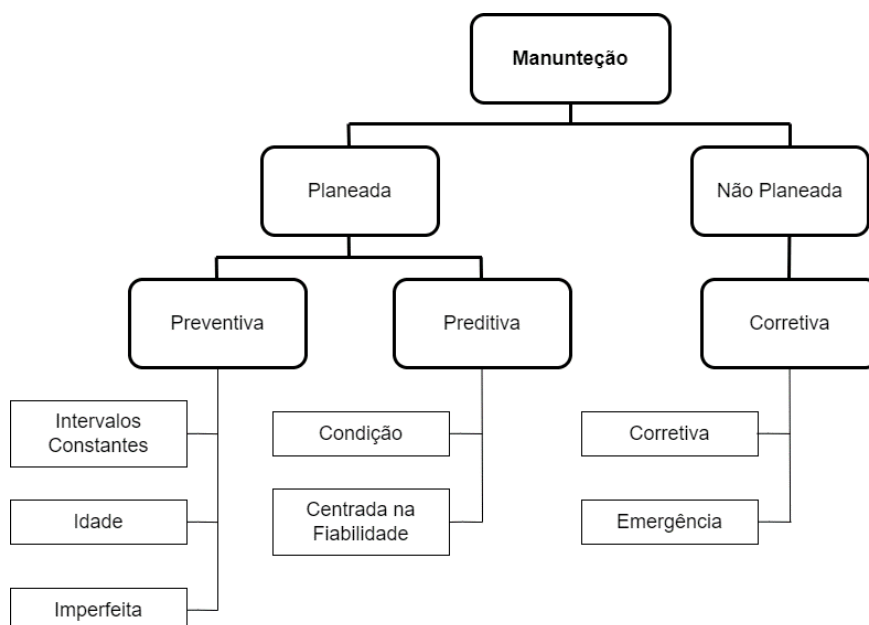


Figura 6 - Diferentes estratégias de manutenção (Adaptado de Ben-Daya et al., 2009)

A manutenção corretiva é definida como a atividade realizada após a falha ser verificada. Este tipo de manutenção é apropriada em ambiente onde a dependência dos equipamentos é mínima. Também pode ser apropriada para ambientes industriais em que a falha de

equipamentos não é prejudicial, ou seja, não existe consequências sérias que afetem a produção.

A manutenção corretiva é definida segundo duas técnicas:

- Manutenção corretiva do equipamento: A manutenção é realizada após a ocorrência de uma falha, o objetivo é retomar o bom funcionamento do equipamento, para que ele possa desempenhar a sua função;
- Manutenção de emergência: Definida como a atividade que se deve realizar imediatamente para evitar consequências graves. Por norma, são aplicadas restrições às frequências das manutenções, de forma que seja possível otimizar custos.

A manutenção preventiva é uma estratégia organizada para efetuar manutenção em intervalos pré-definidos, para reduzir a probabilidade de falha ou degradação do estado funcional. Este tipo de manutenção pode seguir três estratégias (Ben-Daya et al., 2009):

- Manutenção baseada em intervalos constantes: A manutenção é realizada em intervalos de tempo fixos. Os intervalos são definidos de forma que exista um equilíbrio entre risco de falha e os custos de manutenção;
- Manutenção baseada na idade: Tem como estratégia a utilização de manutenção preventiva após o equipamento atingir uma idade específica. Se o equipamento falhar antes da idade específica são realizadas ações de manutenção;
- Manutenção imperfeita: Tem como base as duas técnicas referidas anteriormente, parte-se do princípio que o equipamento é repostado ao seu estado original através da realização de uma manutenção preventiva. No entanto, pode acontecer que o equipamento apresente uma incerteza do seu estado atual, dado que pode não estar como originalmente, o que leva a uma incerteza na programação das atividades futuras.

Por último, a manutenção preditiva e as suas estratégias são anunciadas segundo Ben-Daya (Ben-Daya et al., 2009), como uma manutenção realizada de forma adaptativa, conforme a condição do equipamento. Este tipo de manutenção segue duas estratégias, sendo estas:

- Manutenção baseada na condição: Segue como base numa estratégia de observação do estado dos componentes do equipamento. Um caso prático é a monitorização das vibrações, uma vez que os dados recolhidos refletem o estado atual do componente. Esta estratégia permite a visualização da falha iminente e a previsão da mesma;
- Manutenção centrada na fiabilidade: É o tipo de manutenção que consiste em realizar estimativas para a realização de manutenção de um equipamento. O objetivo é minimizar os custos e o tempo de inatividade, mas ao mesmo tempo não considera a possibilidade de falha. Para a realização deste tipo de manutenção é necessário realizar duas tarefas. A primeira tarefa é analisar e categorizar os modos de falha do equipamento e a segunda tarefa é a classificação das consequências de cada modo de falha identificado. Isto é necessário para que os algoritmos consigam conceder prioridade na lógica de decisão.

### 2.1.5 Análise de vibrações na manutenção preditiva

A avaliação do estado de um componente, principalmente em operações de equipamentos, quando estes estão em funcionamento, por norma, é realizado através de métodos vibroacústicos. Estes métodos têm com princípio de funcionamento a análise da vibração em postos específicos, sendo estes normalmente localizados junto a rolamentos. Existem diferentes origens para as vibrações, sendo que podem ser classificadas como vibrações estruturais causadas pelas cinemáticas, vibrações tecnológicas causadas pelas imperfeições de fabrico do equipamento e, por último, as vibrações operacionais causadas pela degradação dos componentes do equipamento (Sokolski, 2023). As vibrações operacionais, são as vibrações mais importantes para este projeto, dado que sinalizam com antecedência suficiente a iminência da falha no componente do equipamento.

A vibração é uma grandeza considerada valiosa na avaliação do estado das unidades de operação. Os dados obtidos através desta grandeza desempenham um papel importante na manutenção de máquinas modernas. Uma desvantagem do método vibroacústivo são as interferências causadas por outras fontes de vibração e ruído. Esta desvantagem está diretamente relacionada com as diferentes componentes dos equipamentos, que são constituídas por rolamentos, transmissões ou motores que emitem diferentes sinais e podem influenciar os resultados (Sokolski, 2023).

A monitorização da condição do equipamento, através da análise de vibrações é uma vertente que permite aumentar a segurança estrutural e reduzir custos de manutenção. Esta monitorização consiste em três etapas principais, sendo estas, a monitorização do sinal, processamento do sinal e interpretação dos dados (Goyal & Pabla, 2016). A Figura 7 demonstra esquematicamente esta lógica.

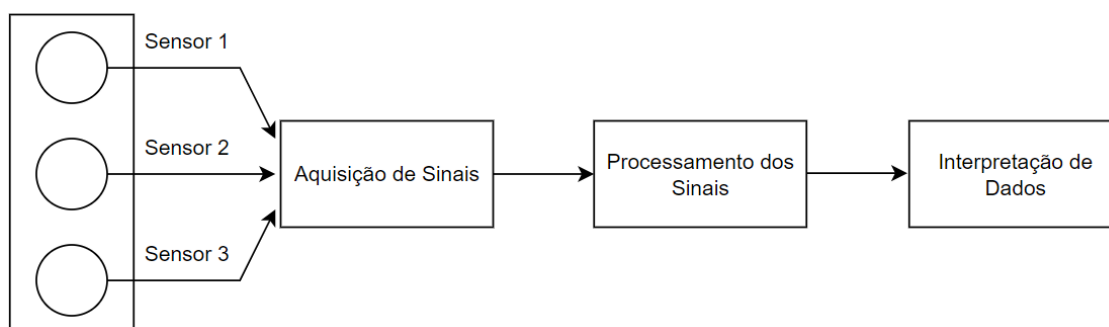


Figura 7 - Etapas da monitorização da condição do equipamento (Adaptado de Goyal & Pabla, 2016)

Segundo os autores Goyal & Pabla (Goyal & Pabla, 2016) os métodos para a monitorização da condição podem ser divididos em dois tipos, sendo estes os métodos baseados em modelos e os métodos baseados em características. O método baseado em modelos consiste na procura de um modelo para prever potenciais erros de operação. Por outro lado, o método baseado nas características, consiste na extração das características do sinal e na tomada de decisões provenientes desse sinal. A prática deste método pode ser realizada através da aquisição de dados de diferentes domínios, tais como:

- Domínio de tempo (médias, desvio-padrão, amplitude, valor eficaz, etc);
- Domínio da frequência (frequências, energia em diferentes bandas de frequência);

- Domínio espacial;
- Domínio tempo-frequência (distribuição tempo-frequência).

A aceleração e velocidade são dados adquiridos nas técnicas de análise de vibração no domínio do tempo. O indicador *Root Mean Square* (RMS) e o *Crest Factor*, têm sido aplicados para o diagnóstico de rolamento e engrenagens. O valor do RMS é uma mais-valia na deteção de desequilíbrios em máquinas com movimentos rotativos, no entanto, não permite detetar problemas em estados iniciais (Vishwakarma et al., 2017).

O autor Vishwakarma, (Vishwakarma et al., 2017), identifica que o indicador *Crest Factor* é a relação entre o valor de pico do sinal de entrada e o valor RMS. O valor de pico é o valor máximo do sinal recolhido num intervalo de tempo especificado (Večeř et al., 2005). Esta relação elevada representa as roturas de dentes de engrenagens ou pistas de rolamentos danificadas (Vishwakarma et al., 2017).

No domínio de tempo-frequência, uma das técnicas utilizadas é a *Fast Fourier Transform* (FFT), para o diagnóstico de avarias em equipamentos. A transformada de Fourier é uma representação no domínio da frequência que estima a força de diferentes componentes da frequência de um sinal ao longo do tempo. A FFT é utilizada em diversas vertentes, por exemplo na identificação de danos em tubagens, em modelos de pontes realizados à escala e sujeitos a testes de impacto ou na visualização do comportamento de estruturas em treliças sujeitas a sismos (Goyal & Pabla, 2016).

## 2.2 Indústria 4.0

Segundo a literatura, na visão dos autores Wang et al. (Wang et al., 2016, p. 261) “a Indústria 4.0 é um termo coletivo para tecnologias e conceitos de organização da cadeia de valor”. As fábricas inteligentes da indústria 4.0 monitorizam processos físicos, tomam decisões descentralizadas, comunicam e cooperam com os seres humanos em tempo real. Durante a abordagem deste capítulo, vão ser referenciadas as tecnologias da indústria 4.0, assim como os seus princípios de implementação.

### 2.2.1 Tecnologia na indústria 4.0

O caminho da indústria 4.0 é a comunicação entre computadores e equipamentos industriais, de forma que seja possível tomar decisões sem a intervenção humana. A interligação entre sistemas ciberfísicos, *Internet of Things* (IoT) e outros sistemas, torna a indústria 4.0 possível e o conceito de fábrica inteligente uma realidade próxima. Suportar tecnologicamente os equipamentos permite a comunicação entre máquinas e a recolha de dados. Com isto, as fábricas tornam-se mais eficientes, mais produtivas e originam menos resíduos (Achouch et al., 2022).

Os sensores tornaram-se compactos, altamente portáteis e com capacidades de conexão a dispositivos de difícil acesso. Desta forma, os dispositivos tornam-se acessíveis à extração de

dados e os sensores desempenharam um papel fundamental no início da automação e no desenvolvimento da indústria (Javaid et al., 2021).

Em síntese, a tecnologia permite às empresas obterem uma capacidade de resposta mais rápida às mudanças do mercado, oferecendo produtos mais personalizados. A grande recolha de dados permite em tempo real monitorizar o estado dos equipamentos, como por exemplo a localização de fugas e o controlo da velocidade de funcionamento (Achouch et al., 2022).

### 2.2.2 Princípios de implementação

A implementação da indústria 4.0 necessita de tecnologias multidisciplinares. Estas tecnologias devem comunicar automaticamente entre si e com outros sistemas através da *internet*. Segundo aos autores Achouch et al. (Achouch et al., 2022), os componentes necessários para a indústria 4.0 estão demonstrados na Figura 8.

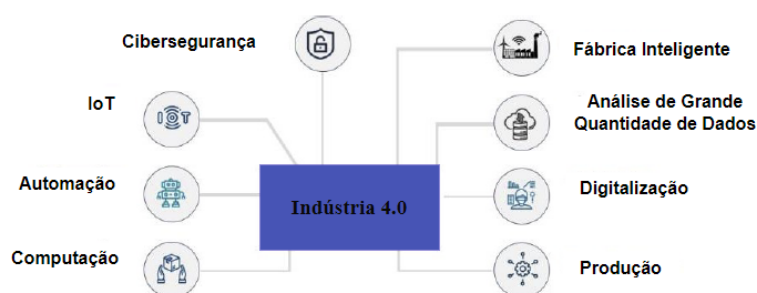


Figura 8 - Componentes das tecnologias da Indústria 4.0 (Adaptado de Achouch et al., 2022)

A componente do IoT permite que os objetos comuniquem e interajam entre si, de forma a facilitar a troca de informação e o cumprimento dos objetivos comuns. O IoT pode ser considerado como a rede onde os sistemas de cibersegurança cooperam entre si, através de endereços únicos (Wang et al., 2016).

Segundo os autores Javaid et al. (Javaid et al., 2022) a inclusão da automação na indústria permitiu a conectividade, abriu disponibilidade para melhorar a robótica e facilitou a conectividade com os equipamentos, originando produtos melhores e mais eficientes.

A capacidade de computação, na indústria 4.0, é um recurso valioso para a execução de tarefas de comutação intensiva, como por exemplo, as tarefas de suporte à decisão. Atualmente, as plataformas na nuvem fornecem capacidade de computação e armazenamento virtual de uma forma flexível, no entanto, limitado. Contudo, deve-se ter em consideração que a maioria dos processos industriais têm requisitos de resposta e desempenho rigorosos e, por este fator, o poder computacional exclusivo nas plataformas externas pode não ser uma solução viável (Siqueira & Davis, 2022).

Referente à análise de grande quantidade de dados, os autores Achouch et al., (Achouch et al., 2022, p. 261), enunciam na sua obra que “*Big data* em tempo real não é apenas um processo para armazenar uma enorme quantidade de dados numa base de dados ou armazém. A mineração de dados permite analisar e descobrir padrões, regras e conhecimento de *big data* recolhidos de diversas fontes. Assim, pode-se tomar a decisão certa na hora certa e no lugar certo”. Ou seja, além da capacidade necessária para a recolha de dados, ainda é necessária a capacidade de análise, para que seja

possível extrair conhecimento. Na mesma linha de pensamento, verifica-se que a automação e a digitalização de processos é uma realidade que vem evoluindo ao longo dos anos, e segundo os autores Lee et al. (Lee et al., 2019, p. 328) “Digitalização e Indústria 4.0 são termos que representam uma suposta mudança radical disponível para as indústrias na melhoria dos resultados dos negócios. A digitalização tem sido um tema recorrente da terceira revolução industrial, coincidindo com a maior disponibilidade da computação digital na década de 1950”. Os autores ainda reforçam que a digitalização é uma filosofia e a tecnologia indispensável no suporte à mudança industrial.

### 2.3 Interligação da Indústria 4.0 com a Manutenção Preditiva

A quarta revolução industrial, também conhecida pela indústria 4.0, concentrou-se no desenvolvimento digital dos processos físicos e na obtenção do estado dos processos físicos. O equipamento de produção pode apresentar sinais precoces de que algo está errado e que uma avaria pode acontecer em breve. Esses sinais podem ser detetados por modelos preditivos que observam os desvios das condições normais de produção. Através da tecnologia, a área da manutenção obtém informação sobre o melhor momento para realizar manutenção, conseguindo realizar intervenções reativas e planeadas. Os equipamentos conectados, independente da sua localização, fornecem dados para a manutenção preditiva. O objetivo é recolher uma variedade de sinais *online* ou *offline* do equipamento, para ser possível trabalhar com modelos que possam detetar falhas ou anomalias precoces (Dalzochio et al., 2020).

A Figura 9 apresenta um modelo projetado para detetar falhas precoces. Este modelo é composto por duas camadas, a primeira camada, designada por física, onde estão os sensores que monitorizam o comportamento das máquinas e equipamentos. A segunda camada é designada por virtual, onde os dados recolhidos pelos sensores são armazenados e processados para alimentar modelos e fornecer estimativas da vida útil da máquina ou componente.

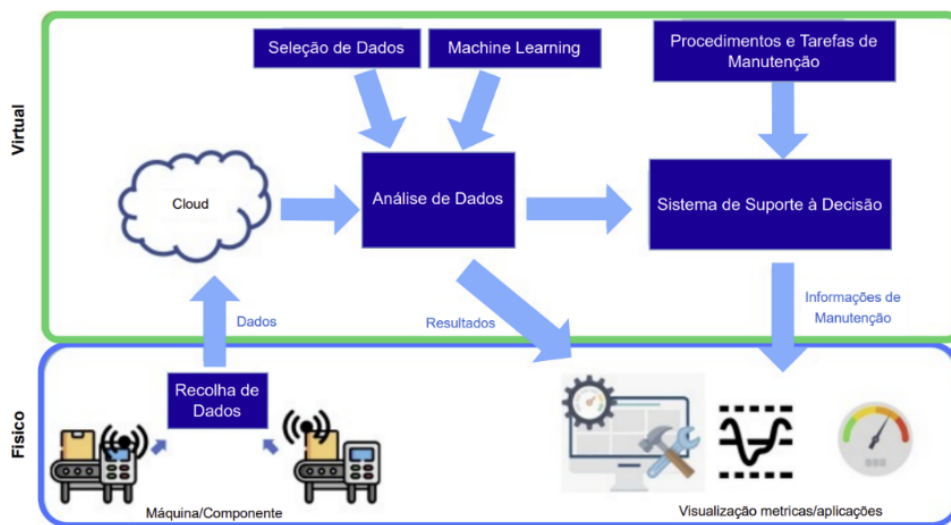


Figura 9 - Visão geral do modelo projetado para um sistema de deteção de falhas precoces (Adaptado de Dalzoc et al., 2020)

Segundo os autores Compare et al. (Compare et al., 2020) recolher, armazenar e analisar uma grande quantidade de dados, proporciona um custo que aumenta com o aumento da proporção dos dados. O objetivo final da digitalização deve ser a aquisição de dados inteligentes e não uma grande quantidade de dados (*Big Data*). Para demonstrar este fator, os autores anunciam uma breve experiência relativa à aquisição de dados de vibração de um rolamento. Devido a questões de armazenamento nos servidores, apenas foram guardados duas características, a aceleração média quadrática e a vibração de pico a pico. Estas duas características, referidas anteriormente, provaram ser suficientes para a identificação de falhas abruptas. No entanto é necessário ter cuidado na utilização de dados, que refletem janelas temporais longas, dado que o equipamento/componente pode estar sujeito a velocidades variáveis e cargas de trabalho diferentes, aos quais os sinais de vibração são sensíveis.

## 2.4 Aplicações práticas de manutenção preditiva

Os autores Morgan e Chu (Morgan & Chu, 2022) realizaram o desenvolvimento de um indicador, com base na análise de vibrações, para monitorizarem o estado de lubrificação de uma máquina de injeção. Nesse estudo foi utilizado o IMC CRONOflex como sistema para a aquisição de dados, sendo este modular e capaz de realizar o registo simultâneo de sinais analógicos e digitais. Foram instalados um acelerómetro e um extensómetro para a recolha de dados de vibração e de deformações. A Figura 10 demonstra o esquema utilizado na aquisição de dados.

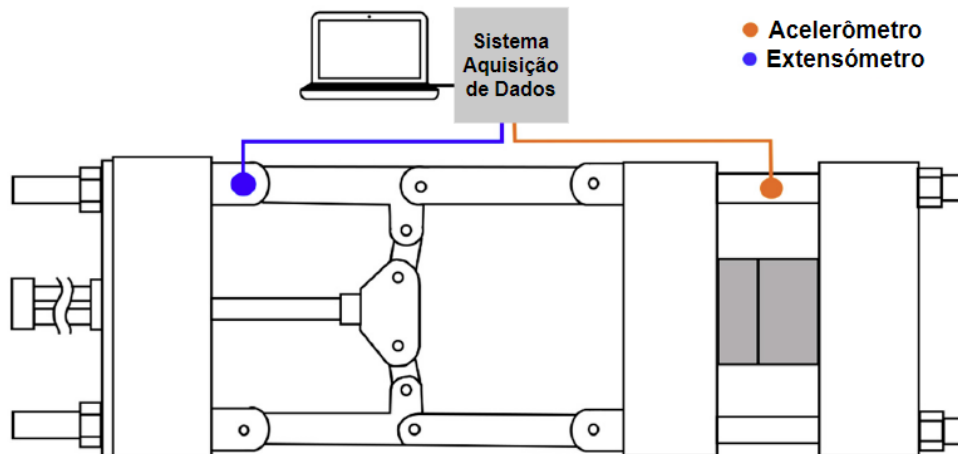


Figura 10 - Esquema utilizado na aquisição de dados, na máquina de injeção (Adaptado de Morgan & Chu, 2022)

O sistema de aquisição de dados é composto pelo caminho laranja, que representa as alterações de tensão ao longo da guia de ligação e o caminho azul que representa as vibrações recolhidas pelo acelerómetro (Morgan & Chu, 2022). Os sinais recolhidos pelo sistema de aquisição de dados são observáveis na Figura 11.

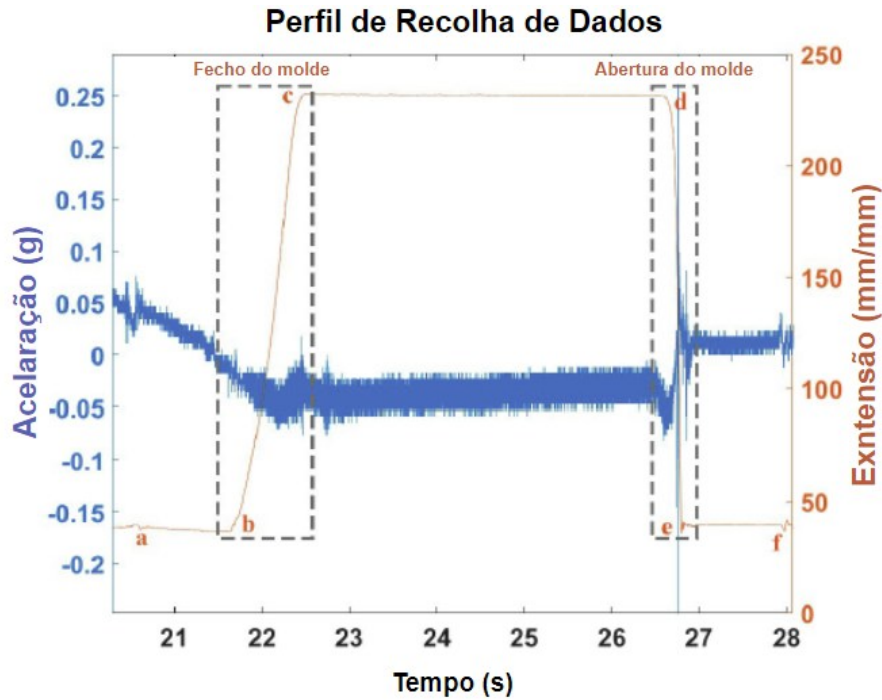


Figura 11 - Perfil de recolha dos dados, através do sistema de aquisição de dados (Adaptado de Morgan & Chu, 2022)

Após a análise e tratamento de dados, verifica-se que a abordagem que permitiu estimar o ponto exato de lubrificação, foi através da utilização do espectro de resposta ao choque e da aceleração máxima transmitida. Sendo assim, um valor de energia singular foi calculado e utilizado como indicador de condição para classificar a máquina de injeção. O desenvolvimento do indicador teve em consideração operações algébricas entre a fórmula da energia cinética, a energia potencial elástica e a energia mecânica (Morgan & Chu, 2022). A fórmula do indicador é demonstrada na Equação 1:

$$E = HI_{SRS} = \sum_{m=1}^{m=n} \frac{1}{2} m(x_{max})^2 \quad (1)$$

, onde  $HI_{SRS}$  é o índice representativo do estado de lubrificação do sistema e  $x_{max}$  a velocidade máxima.

A Figura 12, demonstra a tendência obtida através da análise do indicador de condição  $HI_{SRS}$  durante o período de abertura do molde.

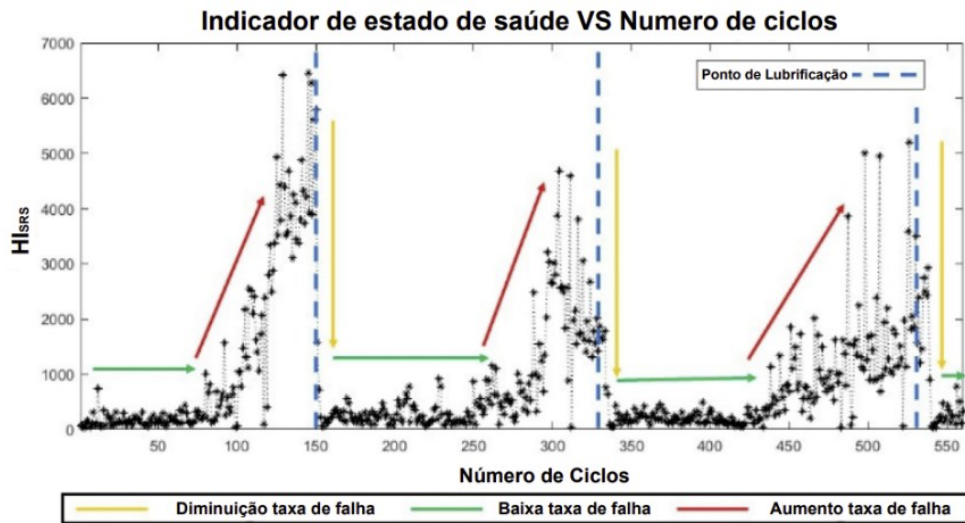


Figura 12 - Indicador da condição do equipamento VS número de ciclos de funcionamento no período de abertura do molde (Adaptado de Morgan & Chu, 2022)

Os resultados do indicador da condição estão de acordo com três fases, sendo a primeira fase composta pela diminuição da taxa de falha, através da lubrificação recente da alavanca articulada. De seguida, a segunda fase, é definida por uma baixa taxa de falha, à medida que o número de injeções é incrementado e, por último, após decorridos um número de ciclos considerável, existe um aumento na taxa de falha. Dado este fator, conclui-se que é necessário lubrificar a alavanca articulada para evitar a sua falha. (Morgan & Chu, 2022).

Os autores Morgan e Chu, (Morgan & Chu, 2022), em nota conclusiva referem que o estudo permitiu identificar informações pertinentes no momento de desaperto da alavanca e não no de aperto, através dos dados recolhidos quando a máquina executava o movimento para abrir o molde. O estudo permitiu verificar que o algoritmo de resposta estrutural utilizado superou os algoritmos do domínio de tempo e da frequência, na análise de vibrações transitórias, sempre que o número de ciclos era incrementado e a lubrificação da máquina se desgastava.

Outra perspetiva, na área da manutenção preditiva, é a anunciada pelos autores Frumosu et al. (Frumosu et al., 2020), que desenvolveram um caso de estudo sobre a previsão de desgaste de moldes, com base na condição do molde. Numa primeira fase os autores realizam o levantamento do processo de moldagem por injeção, de forma a identificar as diferentes etapas do processo de injeção.

A Figura 13 demonstra uma máquina de injeção de plástico e os componentes principais.

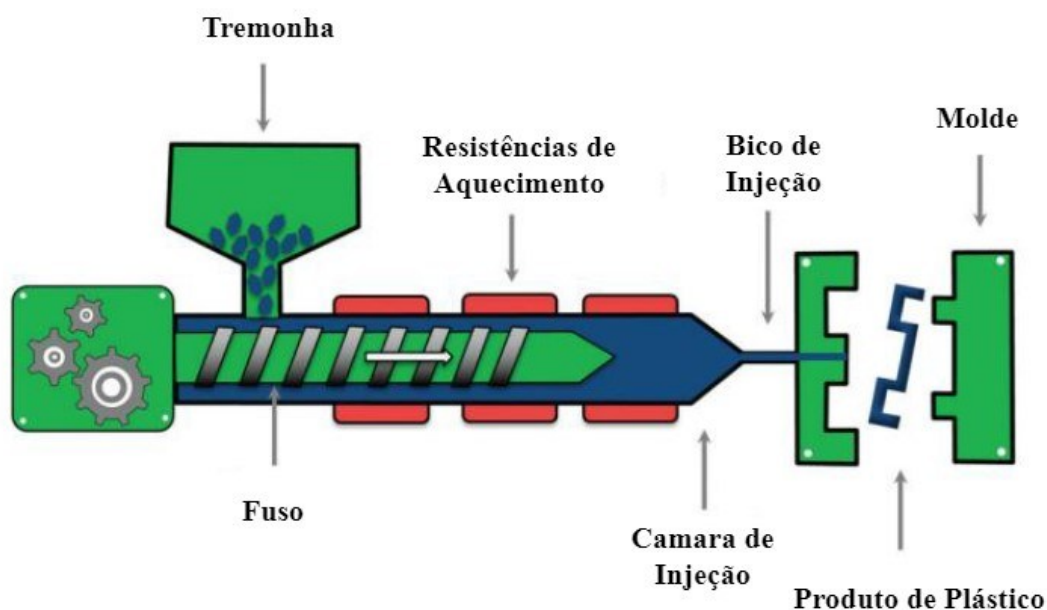


Figura 13 - Componentes principais de uma máquina de injeção (Adaptado de Frumosu et al., 2020)

Na segunda fase do caso de estudo, realizaram uma descrição dos dados fornecidos pelo parceiro do projeto. Os dados fornecidos refletiam uma situação real, de vários moldes utilizados em produção. De seguida, das 900 observações contidas nos dados, existiam mais de 200 características classificatórias. Foi necessário classificar as características e identificar a mais importante, através do modelo *Random Forest* (Frumosu et al., 2020). Este modelo é definido segundo o autor Breiman, da seguinte forma: “O *Random Forest* é um classificador constituído por um conjunto de classificadores estruturados em árvore  $\{h(x, k), k=1, \dots\}$  em que os  $\{k\}$  são vetores aleatórios independentes e identicamente distribuídos e cada árvore dá um voto unitário para a classe mais popular na entrada  $x$ ” (Breiman, 2001, p. 6).

Os autores Frumosu et al. (Frumosu et al., 2020), após a identificação da característica mais importante (característica nº 182), realizaram um estudo para o agrupamento da característica nº 182, com base em cinco categorias, recorrendo ao método de *Clustering*, conforme demonstrado na Figura 14.

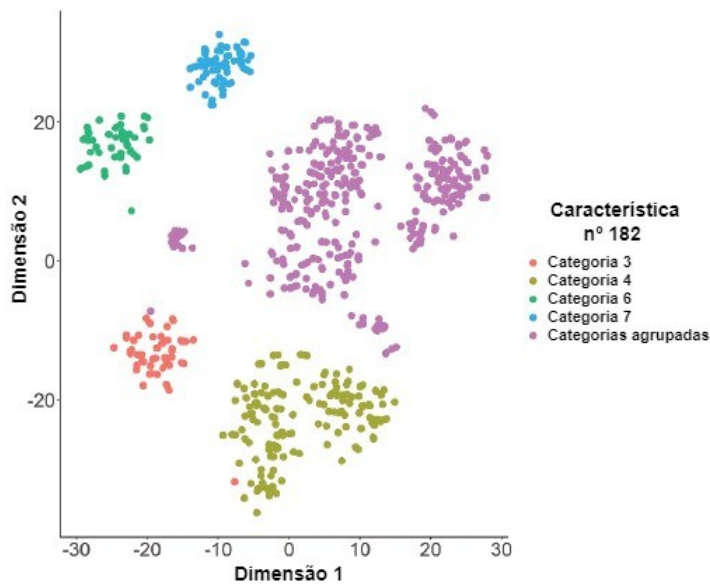


Figura 14 - Agrupamento das 5 principais categorias para a característica nº 182 (Adaptado de Frumosu et al., 2020)

De seguida, foram realizadas as curvas de sobrevivência para cada categoria, através do estimador de *Kaplan-Meier*, sendo este baseado na função de sobrevivência a partir de dados de vida, que neste caso é a característica nº 182 (Frumosu et al., 2020).

Os autores realizaram duas análises às curvas de sobrevivência, sendo a primeira com os dados de moldes que já apresentavam desgaste (Figura 15) e a segunda com todos os dados (Figura 16).

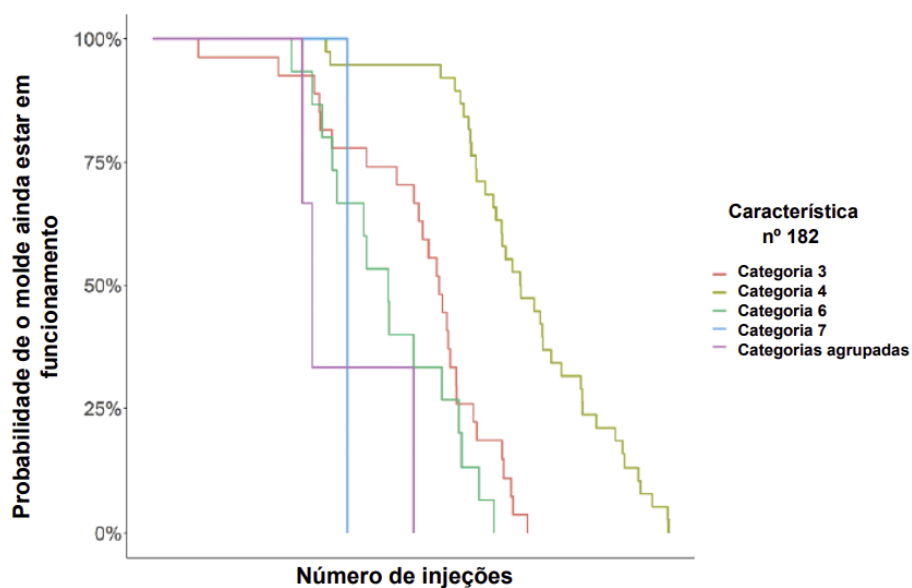


Figura 15 - Estimativa da curva de sobrevivência de Kaplan-Meier utilizando apenas dados de moldes com desgaste (Adaptado de Frumosu et al., 2020)

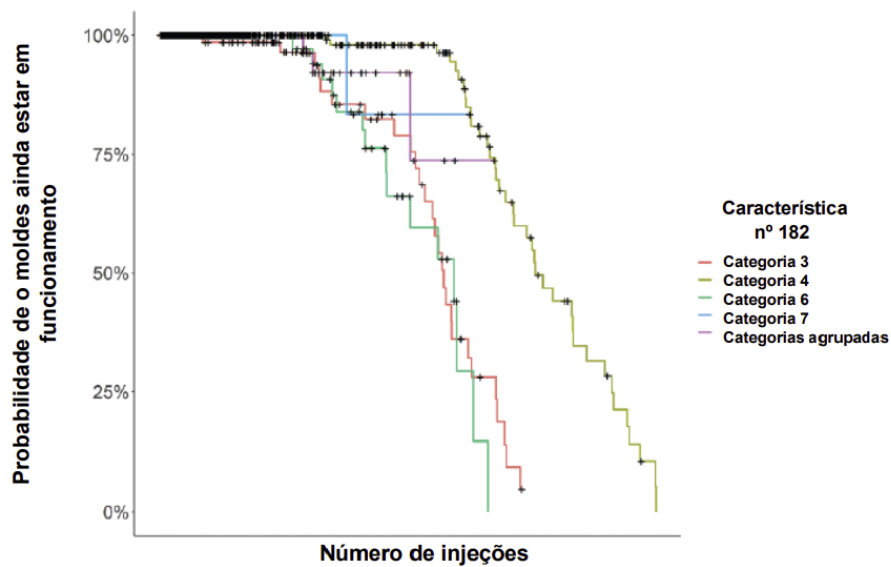


Figura 16 - Estimativa da curva de sobrevivência de Kaplan-Meier utilizando todos os dados de moldes (Adaptado de Frumosu et al., 2020)

Com base nesta informação é possível realizar a monitorização em tempo real dos moldes em produção, face ao número de injeções que o molde tem, através da informação recolhida (proporção de moldes desgastados com o mesmo número de injeções). Em complemento, para que a informação fosse acessível, foi desenvolvido um *dashboard* para realizar o acompanhamento do estado atual dos moldes. Como trabalhos futuros, os autores referem que é importante incorporar todos os dados disponíveis no modelo *Radom Forest* para ser possível obter uma melhor previsão na curva de sobrevivência. Os autores ainda anunciam que a gestão de dados deve ser uma questão importante, devido à necessidade de explorar a frequência de atualização dos dados de treino no modelo e, por fim, de quantos dados devem ser incluídos no conjunto de treino (Frumosu et al., 2020).



## 3 Desenvolvimento

No desenvolvimento deste projeto aborda-se o método *Action Research*, com capítulos dedicados ao diagnóstico, implementação, avaliação e monitorização. No capítulo de diagnóstico realiza-se o levantamento das necessidades de manutenção preditiva na máquina de injeção destacada para este projeto. De seguida, no capítulo do plano de ação constrói-se o macro plano de ação deste projeto, de forma a garantir o seguimento de todas as ações necessárias na implementação e avaliação. Após o desenvolvimento do plano de ação, segue-se o capítulo da implementação onde se realiza a identificação específica dos recursos de *hardware* e *software* e a identificação dos indicadores de condição. No capítulo da avaliação e monitorização, realiza-se a avaliação dos dados recolhidos em tempo real, através da monitorização continua dos indicadores e da evolução da tendência ao longo do tempo.

### 3.1 Diagnóstico

Neste capítulo é apresentado o método de trabalho utilizado pela equipa de manutenção da Simoldes Plásticos, através da utilização do *software* de gestão da manutenção, onde é realizada toda a gestão e registo das tarefas de manutenção realizadas pelos técnicos. De seguida, são identificadas as tarefas que serão removidas futuramente do plano de manutenção da máquina de injeção, dado que estas vão ser realizadas conforme a condição do equipamento, através do controlo em tempo real do seu estado.

#### 3.1.1 Manutenção Preventiva na Simoldes Plásticos

Desde 2005 a Simoldes Plásticos, através do *software* de gestão da manutenção, faz a gestão preventiva dos seus equipamentos. Esta gestão é realizada de acordo com os diversos planos de manutenção definidos para os diferentes tipos de equipamento. O seguimento do plano de manutenção é realizado pelo supervisor de manutenção, que posteriormente distribui o trabalho pelos seus técnicos.

As tarefas de manutenção preventiva sistemáticas são realizadas de acordo com uma periodicidade, que neste caso pode ser temporal (dias, semanas, meses), número de horas ou

número de injeções. Por outro lado, as tarefas de manutenção preventiva condicional, corretiva ou melhoria são um evento único e registado no *software* de gestão da manutenção, para que seja possível agregar e futuramente consultar todo o histórico de intervenções no equipamento. A Figura 17 demonstra a vista do técnico, quando consulta as diferentes ordens de trabalho no *software* de gestão da manutenção.

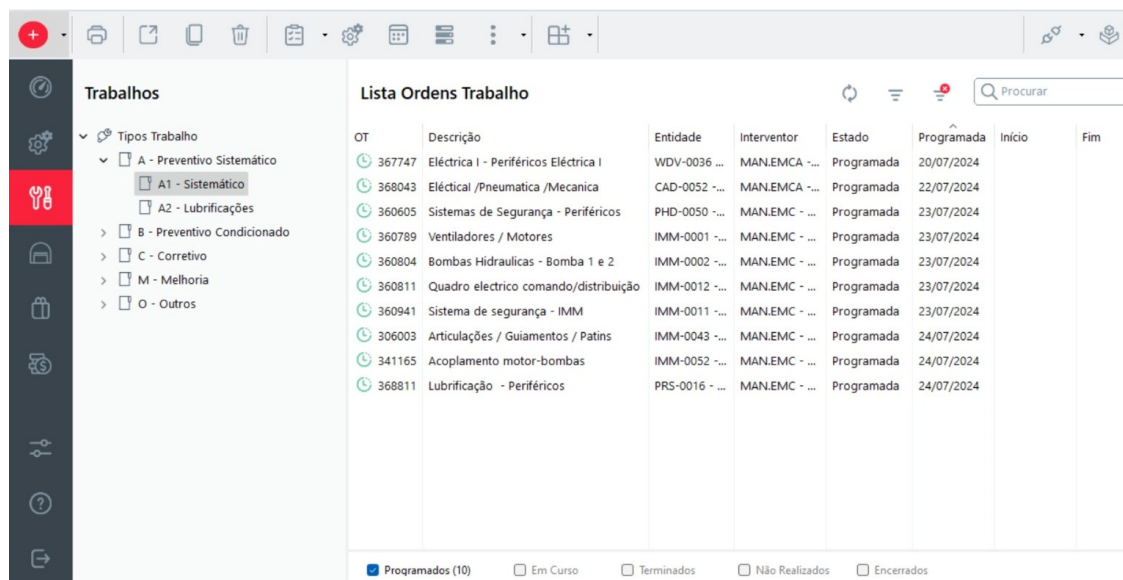


Figura 17 - Vista do utilizador quando consulta as ordens de trabalho no *software* de gestão da manutenção

### 3.1.2 Plano de manutenção ENGEL 1100

O equipamento em estudo, a máquina de injeção ENGEL 1100, tem um plano de manutenção definido por diversas tarefas preventivas sistemáticas. Estas tarefas são expostas na forma de ordens de trabalho. Para cada ordem de trabalho, o técnico responsável consulta as tarefas a realizar, de seguida executa as mesmas e, por fim, regista o trabalho realizado no *software* de gestão da manutenção.

O Anexo 1 representa todas as tarefas e as respetivas periodicidades associadas ao plano de manutenção do equipamento em estudo.

O plano de manutenção da ENGEL 1100 consiste em 22 tarefas de manutenção. As diversas tarefas estão agrupadas por periodicidade. Ou seja, todas as que têm a mesma periodicidade estão incluídas na mesma ordem de trabalho. Neste caso, o equipamento tem seis ordens de trabalho que garantem o momento certo para a realização da manutenção, de acordo com a periodicidade.

### 3.1.3 Análise ao atual plano de manutenção ENGEL 1100

A análise ao plano de manutenção surge da necessidade de reduzir as paragens produtivas não planeadas e, ao mesmo tempo, remover tarefas de manutenção preventivas sistemáticas que possam ser funcionalmente acompanhadas. Desta forma, além de uma melhor análise do

estado do componente, permite que os técnicos de manutenção atuem apenas quando é necessário, permitindo que estes estejam aptos para outras tarefas.

Ao longo da análise foram identificadas três tarefas de manutenção preventivas sistemáticas. Nestas tarefas pretendeu-se atuar, desenvolver um método de trabalho e colocar em prática a manutenção preditiva, através do controlo da condição do equipamento. As tarefas sinalizadas são as seguintes:

- Medir os consumos das resistências de aquecimento;
- Verificar o estado da estrela flexível no acoplamento da bomba;
- Verificar o estado das bombas e substituir os vedantes, em caso de necessidade.

Além dos tópicos identificados anteriormente, foi proposto analisar o desfasamento das fases do motor elétrico, dado que é um problema que ultimamente se verifica com alguma recorrência e por tal razão, é um ponto importante a ser incluído e monitorizado.

## 3.2 Plano de Ação

O plano de ação consiste em esquematizar uma estratégia, realizar o levantamento dos recursos e dos equipamentos necessários, para que seja possível adquirir e armazenar dados, detetar anomalias e, por fim, comunicar automaticamente com o *software* de gestão da manutenção. Em suma, é a realização de um pedido de trabalho à equipa de manutenção, caso alguma anomalia seja verificada.

Durante a estruturação do plano de ação realizou-se o levantamento tecnológico necessário para garantir que, de forma generalizada, os recursos de *hardware* (físicos) e *software* (virtuais) eram identificados e mais tarde adquiridos no mercado.

Para a monitorização do consumo das resistências elétricas verificou-se que era necessário medir, em tempo real, o consumo de corrente das resistências. Além disso, para garantir que as resistências apresentavam um problema funcional, tornou-se necessário controlar se a máquina de injeção estava a dar indicação para a resistência aquecer. Ao monitorizar essas duas vertentes do domínio elétrico, foi possível concluir sobre o estado das resistências e atuar em caso de anomalia. A nível de *hardware* foi necessário um dispositivo de medição de intensidade de corrente e uma ferramenta de diagnóstico para conseguir recolher e aceder aos dois sinais. Na vertente de *software* foi necessário um servidor, para monitorizar os sinais e comunicar com o *software* de gestão da manutenção (SGM), para que a informação fosse transmitida aos técnicos de manutenção.

A verificação do estado da estrela flexível do acoplamento entre o motor elétrico e as bombas hidráulicas, a monitorização do estado das bombas hidráulicas e o desfasamento de fases do motor elétrico eram tarefas de manutenção que faziam parte do acoplamento motor-bombas. Devido a esse fator, o levantamento dos recursos de *hardware* e *software* foi realizado em conjunto. A estratégia para monitorizar em tempo real e prever a realização das tarefas de manutenção, referidas anteriormente, realizou-se através da análise de vibrações.

A nível de *hardware* necessitou-se de sensores para recolher dados sobre a vibração, a velocidade e, por último, uma ferramenta de diagnóstico para agregar e permitir o acesso aos sinais dos sensores. Na vertente de *software* foi necessário um servidor para o armazenamento e a análise dos dados recolhidos, de forma a ser possível comunicar com o SGM e informar os técnicos que está iminente uma falha no acoplamento motor-bombas.

Na monitorização do estado das resistências elétricas e do acoplamento motor-bombas, existem recursos que são comuns, como por exemplo a ferramenta de diagnóstico, o servidor e aplicação que processa os dados em tempo real. Sendo assim, a Figura 18 demonstra, de forma macro, o plano de ação que se seguiu para reduzir o número de paragens produtivas não planeadas, através da aplicação de uma estratégia de manutenção preditiva. A cor laranja identificou os recursos utilizados na análise do desempenho das resistências elétricas, a cor azul os recursos utilizados na monitorização do estado do acoplamento motor-bombas e a cor preta os recursos utilizados em comum nas duas vertentes.

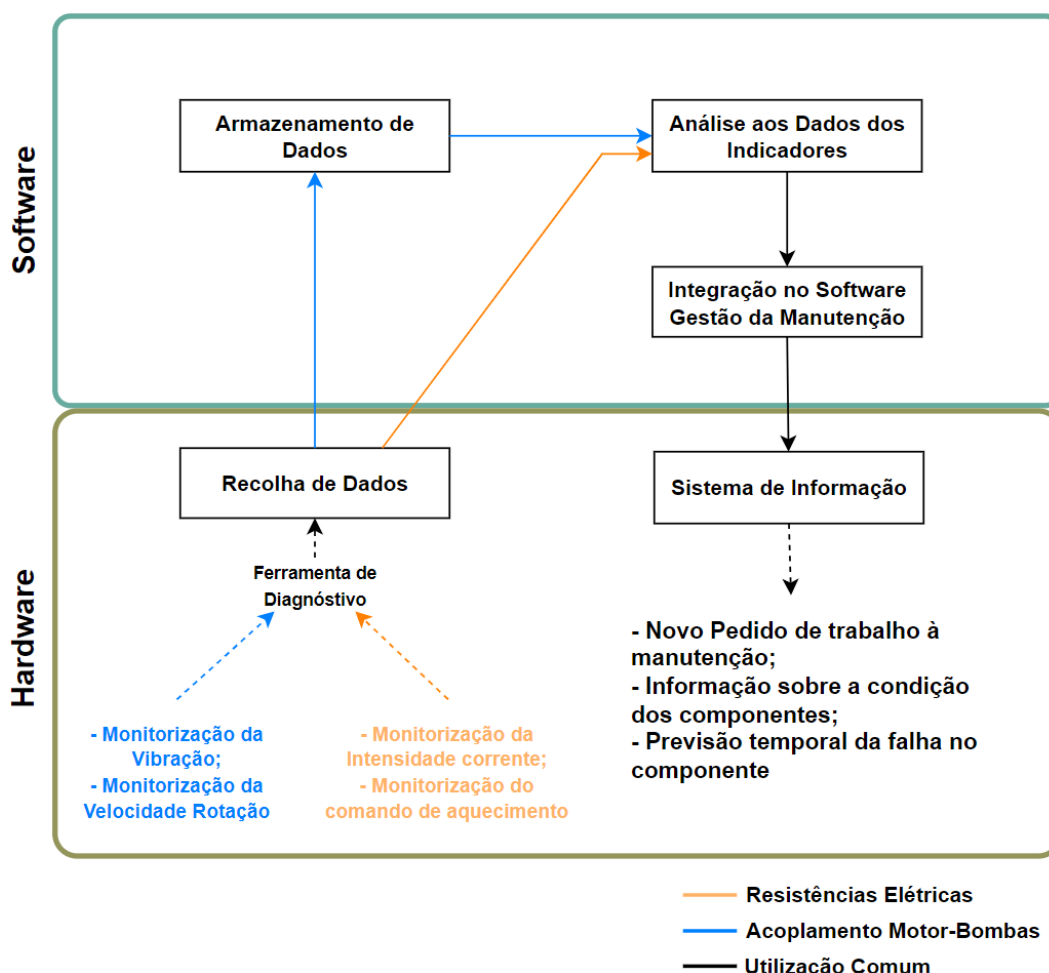


Figura 18 - Macro plano de ação

Após a definição do macro plano, foi necessário atuar, definir, analisar e estudar o melhor método para implementação para cada vertente identificada.

### 3.2.1 Resistências elétricas

A resistência de aquecimento é um dispositivo que converte energia elétrica em calor, através do princípio de Joule (Signed, 2023). Existem vários fatores que podem contribuir para que uma resistência se danifique, nomeadamente excesso de tensão, excesso de corrente, desaperto de contactos elétricos ou desgaste natural.

No caso em estudo a resistência elétrica pode assumir duas vertentes para não funcionar. A primeira vertente é a falha funcional devido a uma anomalia na resistência. A segunda vertente é a falha de comunicação entre a máquina de injeção e a resistência, isto porque existe relé de comando, que controla o sinal de aquecimento. Para este projeto foi importante monitorizar as duas vertentes, dado que o técnico de manutenção necessita de saber qual das vertentes está a causar a falha. A Figura 19 demonstra os dois requisitos necessários para que a resistência desempenhe a sua função na máquina de injeção em estudo.

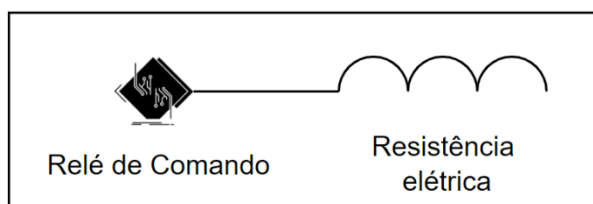


Figura 19 - Requisitos necessários para o controlo do aquecimento da resistência

De forma a monitorizar o consumo da resistência foi necessário utilizar um relé de monitorização de fases. Este relé permite identificar a presença ou ausência de fases elétricas. Quando a resistência de aquecimento não aquecer, significa que deixa de existir corrente elétrica na mesma, indicando que a resistência apresenta uma anomalia funcional. Desta forma, utilizou-se um relé de monitorização para controlar a intensidade de corrente no fio da alimentação elétrica da resistência, a fim de identificar se a resistência apresenta uma anomalia funcional.

Para monitorizar o relé de comando do aquecimento da resistência foi necessário identificar fisicamente na máquina de injeção o relé que realiza esse comando e monitorizar esse sinal elétrico.

Desta forma ao monitorizar o consumo de corrente na resistência e no relé que comanda a ordem de aquecimento foi possível concluir sobre o desempenho da resistência e atuar apenas quando existe uma anomalia.

A Figura 20 demonstra esquematicamente o local onde foi necessário recolher a informação sobre a alimentação elétrica da resistência (através da utilização do relé de monitorização) e sobre o sinal elétrico do comando de aquecimento.

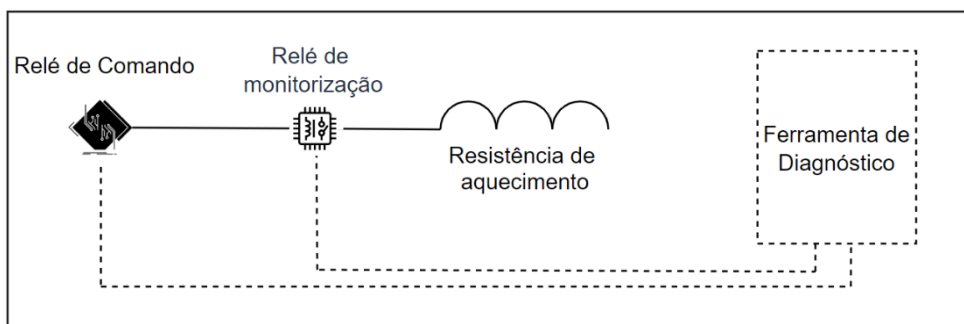


Figura 20 - Esquema da localização da informação sobre a alimentação elétrica e sobre o sinal elétrico do comando de aquecimento

### 3.2.2 Acoplamento motor-bombas

Numa primeira fase, no acoplamento motor-bombas realizou-se o levantamento do espaço físico onde estão localizados o motor elétrico e as bombas hidráulicas. Após visualização da estrutura verificou-se que a máquina é constituída por um motor elétrico e três bombas hidráulicas que trabalham em série. A Figura 21, demonstra esquematicamente a constituição do acoplamento motor-bombas.

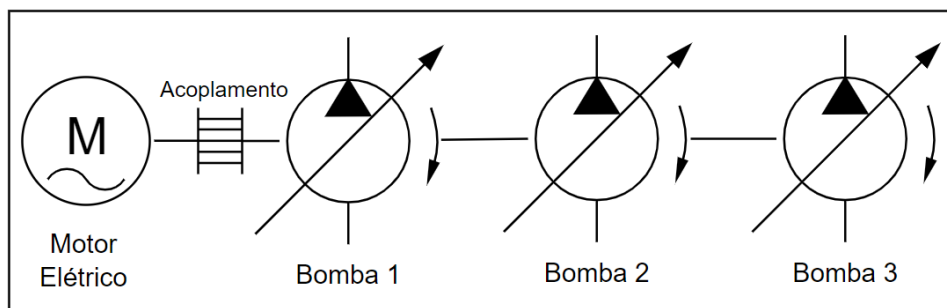


Figura 21 - Constituição do acoplamento motor-bombas

Após o levantamento dos componentes que necessitam de ser monitorizados foi necessário enquadrar e definir um método para recolher dados, de forma a verificar o estado dos componentes através de sensores.

Nesse sentido, de forma a conhecer-se a condição do motor elétrico e das bombas hidráulicas, monitorizou-se o estado dos rolamentos através da vibração, dado que uma grande parte dos problemas estão relacionados com estes componentes mecânicos (Sokolski, 2023). Para a monitorização da vibração é necessário instalar sensores, em sítios estratégicos, junto dos rolamentos de cada componente, com o objetivo de captar informações da vibração.

No entanto, devido ao motor elétrico ser de velocidade variável foi de extrema importância perceber a que velocidade os rolamentos operam. Desta forma, foi necessário adicionar um sensor indutivo, no acoplamento entre veio do motor elétrico e o veio das bombas, de modo a que fosse possível extrair a velocidade de rotação. A velocidade de rotação foi extraída através da contagem do número de dentes de aço que constitui o acoplamento. O acoplamento é constituído por 8 dentes de aço intercalados com a estrela flexível de plástico. O sensor indutivo

deteta o sinal ON/OFF 8 vezes e através dessa associação foi possível concluir que existiu 1 rotação.

Por último, foi necessário que todos os sensores estivessem conectados a uma ferramenta de diagnóstico que possibilitasse aceder aos dados recolhidos pelos sensores. A Figura 22 demonstra esquematicamente os recursos de *hardware* necessários para a recolha de informação de cada componente.

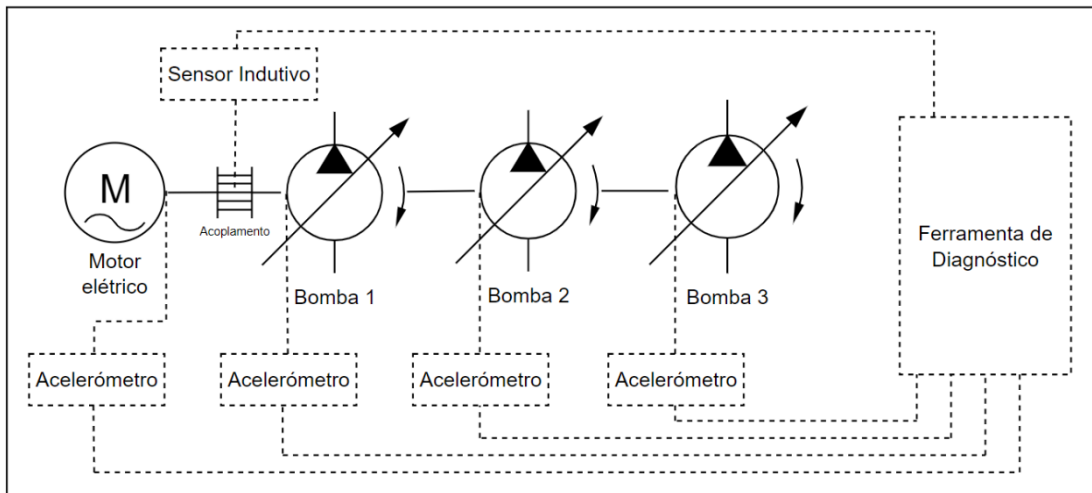


Figura 22 - Esquema dos recursos de *hardware* necessários para o acoplamento motor-bombas

Em síntese, a nível de recursos de *hardware*, para a aquisição dos dados do acoplamento motor-bombas, são necessários três acelerómetros, um sensor indutivo e uma ferramenta de diagnóstico, para a amplificação e acesso aos dados recolhidos pelos sensores.

### 3.3 Implementação

A implementação deste projeto requereu a utilização de recursos existentes no mercado. Na vertente de recursos de *hardware* necessitou-se de sensores de vibração (acelerómetros), sensores indutivos, um relé de monitorização de corrente elétrica e ainda duas ferramentas de diagnóstico para analisar a informação recolhida e garantir a comunicação entre os demais processos. Na vertente de recursos de *software* foi necessário um servidor com aplicações dedicadas ao armazenamento e análise dos dados recolhidos, a utilização de um protocolo de comunicação que permita a troca de informação, uma base de dados e uma aplicação para o processamento os dados e interligação com o software de gestão da manutenção. Desta forma, foi necessário efetuar o levantamento de todas as necessidades tecnológicas.

#### 3.3.1 Identificação específica dos recursos de *hardware* e *software*

Na identificação dos recursos de *hardware*, nomeadamente nas ações relacionadas com as resistências elétricas foi necessário proceder à escolha de um relé de monitorização de fases elétricas e uma ferramenta de diagnóstico com capacidade de interpretar sinais de corrente. O

relé escolhido foi o DIA53S72420A, do fabricante Carlo Gavazzi, devido à disponibilidade interna, isto porque é um relé já utilizado na Simoldes Plásticos em diversas aplicações. A ficha técnica do relé pode ser consultada no Anexo 2.

Na interpretação dos sinais elétricos foi necessário identificar uma ferramenta de diagnóstico capaz de ler informação dos sinais de intensidade de corrente e, ao mesmo tempo, que fosse comum a todas as necessidades do projeto.

Sendo assim, após a análise do mercado e das diversas tecnologias existentes, a ferramenta de diagnóstico escolhida foi a eletrônica de diagnóstico VSE002, da empresa IFM, dado que permite integrar informação sobre a existência de consumo de corrente por parte das resistências, o que permite analisar a sua condição. Acresce que a ferramenta escolhida também permite a análise da condição do acoplamento motor-bombas, dado que permite conectar acelerómetros, especificamente desenvolvidos para a análise de vibrações, conectar sensores indutivos para a medição da velocidade de rotação do eixo e ainda permite uma comunicação para o exterior, através do protocolo *Open Platform Communications Unified Architecture* (OPC UA). Por último, a ferramenta ainda apresentava versatilidade e flexibilidade em termos de entradas e saídas. A sua capacidade de processar diferentes tipos de sinais e juntamente com a sua robustez de operar em ambientes industriais exigentes, complementam esta escolha central para implementação deste projeto. A ficha técnica da ferramenta de diagnóstico pode ser consultada no Anexo 3.

O protocolo OPC UA é o padrão de comunicação que permite a troca de dados entre sistemas industriais em ambientes de automação e controlo. Este padrão é uma especificação desenvolvida para facilitar a comunicação entre diferentes dispositivos e sistemas em diversos setores industriais e apresenta diversas vantagens, nomeadamente flexibilidade, estrutura em árvore, aberto e com grande aplicação já no mercado, o que permite que grande parte dos produtos e ferramentas suportem esta estrutura (Gruner et al., 2015).

Desta forma, no plano de ação relacionado com o acoplamento motor-bombas foi definida a utilização de quatro acelerómetros VSA001 da IFM, utilizados para a medição das vibrações no motor elétrico e nas três bombas hidráulicas, uma vez que são compatíveis com a ferramenta de diagnóstico identificada anteriormente. A ficha técnica deste sensor pode ser consultada no Anexo 4.

O sensor indutivo escolhido para controlar a velocidade de rotação é o KJ4-M12MN170-DPS-V2-X0006, da empresa PULSOTRONIC, dado que é um sensor já utilizado na Simoldes Plásticos em outras aplicações e estruturalmente apresenta o comprimento adequado para a instalação. A frequência de comutação do sensor também é um tópico importante, isto porque o sensor necessita ter capacidade de comutação na frequência de trabalho do eixo rotativo. A ficha técnica do sensor indutivo pode ser consultada no Anexo 5. Todos os componentes foram escolhidos e validados de acordo com as características da máquina de injeção ENGEL 1100 e com a frequência de trabalho da mesma.

No que se refere à identificação dos recursos de *software*, para que a comunicação pudesse ser realizada, foi necessário contratualizar a licença básica do servidor VSE OPC UA. Esta licença permite que o protocolo OPC UA seja aplicado à ferramenta de diagnóstico VSE002. Desta forma foi possível garantir que os dados processados e recolhidos seguissem a estrutura padronizada que o protocolo OPC UA define. Além da licença identificada anteriormente, ainda foi necessária a licença para a conexão com a eletrônica do tipo VSE, isto porque a ferramenta

de diagnóstico necessita de uma *interface* preparada para realizar a comunicação de transferência de dados para o exterior.

Além das licenças, também foi necessário um servidor e uma aplicação de processamento de dados dedicada a este projeto, para que a recolha, o armazenamento, a análise e a comunicação dos dados com o SGM seja contínua.

A Tabela 1, identifica todos as licenças e equipamentos necessários à implementação deste projeto.

Tabela 1 - Investimentos em licenças e equipamentos

| Descrição   | Código Comercial          | Quantidade | Valor Unitário | Valor      |
|---|---------------------------|------------|----------------|------------|
| Relé de monitorização                                       | DIA53S72420AF             | 1          | 93.65 €        | 93.65 €    |
| Ferramenta de diagnóstico                                   | VSE002                    | 2          | 650.00 €       | 1 300.00 € |
| Acelerómetro  | VSA001                    | 3          | 207.00 €       | 621.00 €   |
| Sensor indutivo   | KJ4-M12MN170-DPS-V2-X0006 | 1          | 122.53 €       | 122.53 €   |
| Licença básica do servidor VSE OPC UA                       | VOS050                    | 1          | 268.50 €       | 268.50 €   |
| Licença para conexão com ferramenta de diagnóstico tipo VSE | VOD001                    | 1          | 13.40 €        | 13.40 €    |

O total de investimento necessário em licenças e equipamentos associados à implementação deste projeto foi de 2 419.08€<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Valor válidos em setembro de 2024. Este valor total não inclui o valor monetário da mão de obra dedicada na instalação, cabos de conexão e acessórios.

Os recursos identificados são utilizados ao longo deste projeto, em diferentes fases do plano de ação. Em complemento, a Figura 23 demonstra a presença destes recursos, nas diferentes fases centrais.

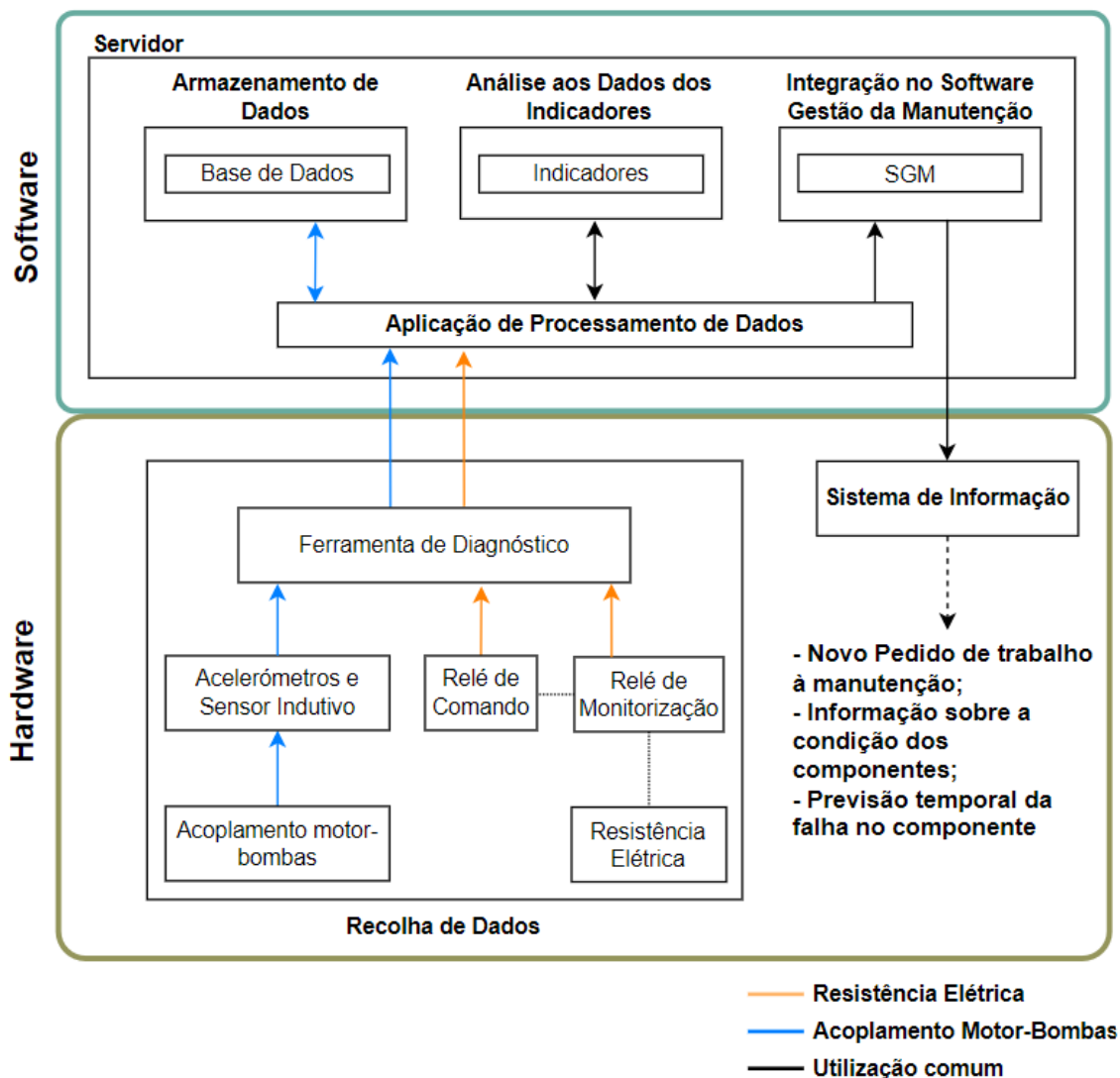
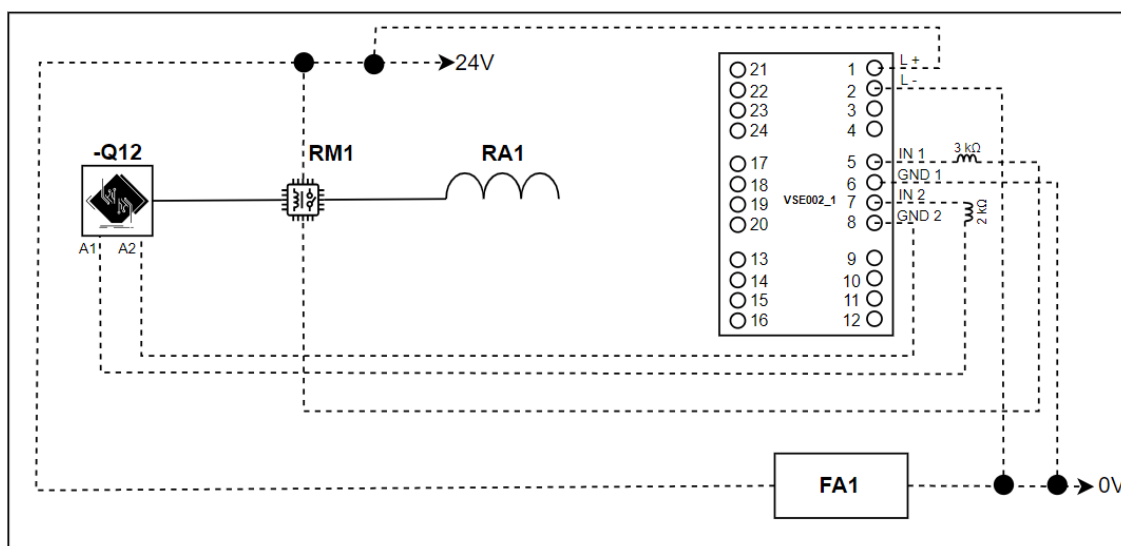


Figura 23 - Especificação dos recursos de *hardware* e *software*

### 3.3.2 Aplicação dos recursos de *hardware*

#### Implementação dos recursos de *hardware* para a monitorização da condição das resistências elétricas

Para aplicação dos recursos de hardware, identificados para a monitorização da condição das resistências elétricas, foi necessário definir todo o esquema elétrico e efetuar a montagem dos recursos na máquina de injeção. A Figura 24, demonstra o esquema elétrico da instalação realizada.



#### Legenda:

- FA1 - Fonte de alimentação dedicada (230VAC para 24VAC)
- Q12 - Relé FA101+BS01-Q12 que comanda o aquecimento da resistência
- RM1 - Relé de monitorização de fases DIA53S72420A
- RA1 - Resistência de aquecimento do bico de injeção
- VSE002\_1 - Ferramenta de diagnóstico VSE002

Figura 24 - Esquema elétrico da instalação realizada para a monitorização da condição da resistência elétrica

No esquema elétrico é possível verificar que é recolhido o sinal do relé -Q12 que comanda o aquecimento das resistências. Sempre que a máquina de injeção emite o sinal para aquecimento das resistências, a entrada IN2 da ferramenta de diagnóstico VSE002\_1 vai receber esse sinal elétrico.

O relé RM1 está a monitorizar o estado das fases do fio elétrico que conduz a corrente elétrica para a resistência. O relé tem o interruptor normalmente aberto, mas quando deteta intensidade de corrente o interruptor fecha. Desta forma, com o interruptor fechado a entrada IN1 da ferramenta de diagnóstico VSE002\_1 vai receber corrente elétrica proveniente da fonte de alimentação dedicada (FA1), o que permite identificar que a resistência não apresenta nenhuma anomalia, dado que está a consumir energia elétrica e a convertê-la em calor.

Assim, de forma a salvaguardar o bom funcionamento da ferramenta de diagnóstico, os dois sinais elétricos recolhidos nas entradas IN1 e IN2 devem garantir que estão entre 0 e 20mA.

Nesse sentido, foram instaladas duas resistências, uma de 2kΩ e outra de 3kΩ, para salvaguardar a ferramenta de diagnóstico e manter o sinal elétrico na faixa ideal de entrada.

O esquema elétrico do relé -Q12 não foi contemplado no esquema elétrico demonstrado anteriormente, mas pode ser consultado no Anexo 6. A câmara de injeção é constituída por um conjunto de resistências, mas neste projeto apenas se monitorizou a resistência localizada no bico de injeção. No futuro, após as conclusões deste projeto e no caso de uma avaliação positiva, pretende-se expandir o procedimento às restantes resistências de aquecimento.

A Figura 25 demonstra o relé de monitorização de fases que está a monitorizar a presença de intensidade de corrente no fio elétrico que alimenta a resistência elétrica.



Figura 25 - Relé DIA53S72420AF de monitorização de intensidade de corrente elétrica

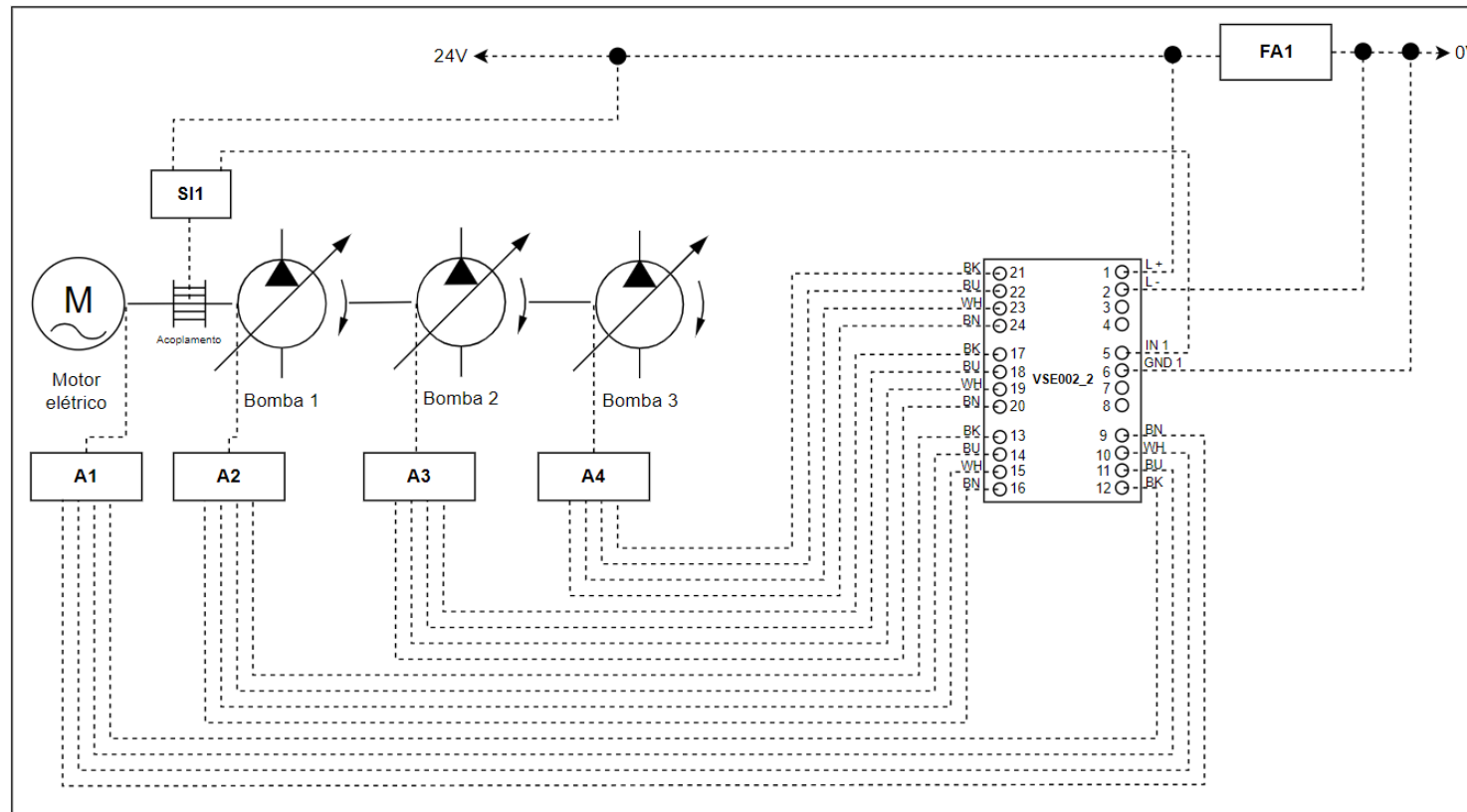
A Figura 26 demonstra o relé de controlo que envia o comando de aquecimento da resistência elétrica.



Figura 26 - Relé FA101+BS01-Q12, que controla o comando de aquecimento da resistência

### **Implementação dos recursos de *hardware* para a monitorização da condição do acoplamento motor-bombas**

Na aplicação dos recursos de *hardware* identificados e dedicados para a monitorização da condição do acoplamento motor-bombas foi necessário esquematizar eletricamente as ligações dos acelerómetros e do sensor indutivo. O esquema elétrico das ligações realizadas está representado na Figura 27.



- Legenda:**
- FA1** - Fonte de alimentação dedicada (230VAC para 24VAC)
  - SI1** - Sensor indutivo KJ4-M12MN170-DPS-V2-X0006
  - A1** - Acelerômetro VSA001 número 1
  - A2** - Acelerômetro VSA001 número 2
  - A3** - Acelerômetro VSA001 número 3
  - A4** - Acelerômetro VSA001 número 4
  - VSE002\_2** - Ferramenta de diagnóstico VSE002

Figura 27 - Esquema elétrico da instalação realizada para a monitorização da condição do acoplamento motor-bombas

No esquema elétrico apresentado anteriormente pode-se verificar que os quatro acelerómetros VSA001 foram conectados à ferramenta de diagnóstico VSE002\_2. Os acelerómetros são compatíveis com a ferramenta de diagnóstico, logo a sua ligação foi direta, segundo as indicações do fabricante. Para o sensor indutivo KJ4-M12MN170-DPS-V2-X0006, a recolha de informação do sensor realizou-se através da entrada IN1. Esta entrada recolhe um sinal digital que pode ser do tipo pulso. O sensor foi alimentado pela fonte de alimentação FA1 e ao detetar um componente de aço do acoplamento, o sinal elétrico foi lido pela ferramenta de diagnóstico.

Na Figura 28 é possível visualizar as ligações dos acelerómetros A1, A2 e do sensor indutivo SI1, no acoplamento motor-bombas da máquina de injeção.



Figura 28 - Instalação dos acelerómetros A1, A2 e do sensor indutivo SI1

No quadro elétrico da máquina de injeção instalou-se a fonte de alimentação (FA1) e as ferramentas de diagnóstico VSE002\_1 e VSE002\_2. Para o acesso remoto, foi conectado um cabo de rede a cada ferramenta.

A Figura 29 demonstra a instalação das ferramentas de diagnóstico e da fonte de alimentação.



Figura 29 - Instalação das ferramentas de diagnóstico VSE002\_1, VSE002\_2 e da fonte de alimentação dedicada FA1

No seguimento do planeamento realizado, a Figura 30 demonstra a inclusão dos recursos de *hardware* implementados no plano de ação.

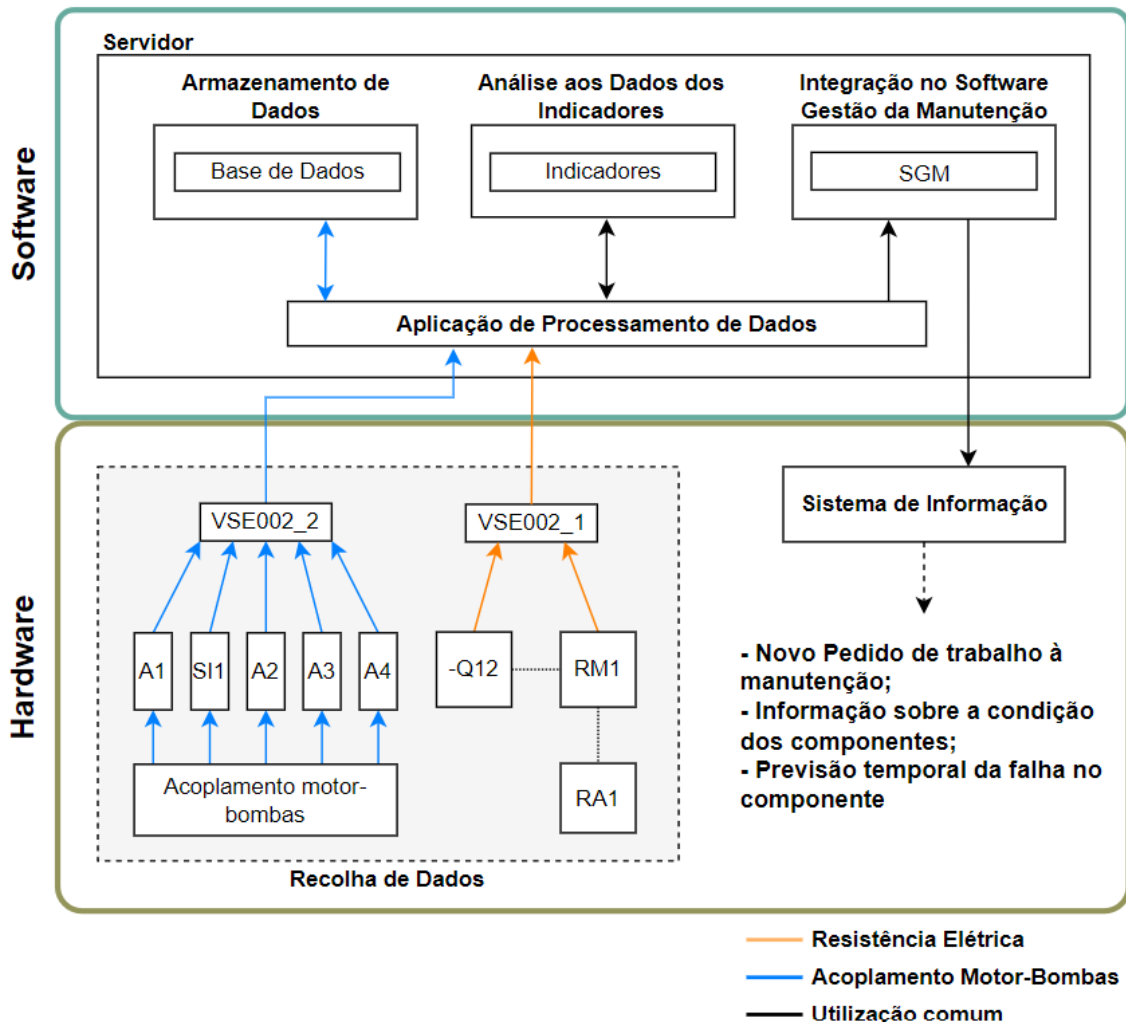


Figura 30 - Especificação da implementação de recursos de *hardware* para a recolha de dados, no fluxo do plano de ação

### 3.3.3 Definição de Indicadores

Para a avaliação dos dados recolhidos pelos sensores foi necessário configurar e definir indicadores, nas ferramentas de diagnóstico VSE002. Estes indicadores resultam do processamento dos dados realizado pela ferramenta, de acordo com a configuração realizada. A configuração dos indicadores foi realizada no *software* VES004, dado que este foi desenvolvido pela IFM para a parametrização das ferramentas de diagnóstico. A ficha técnica do *software* encontra-se no Anexo 11. A definição e configuração dos indicadores ocorreu apenas numa fase inicial. Após a parametrização concluída os dados recolhidos foram armazenados.

A Figura 31 especifica a configuração dos indicadores no fluxo do plano de ação.

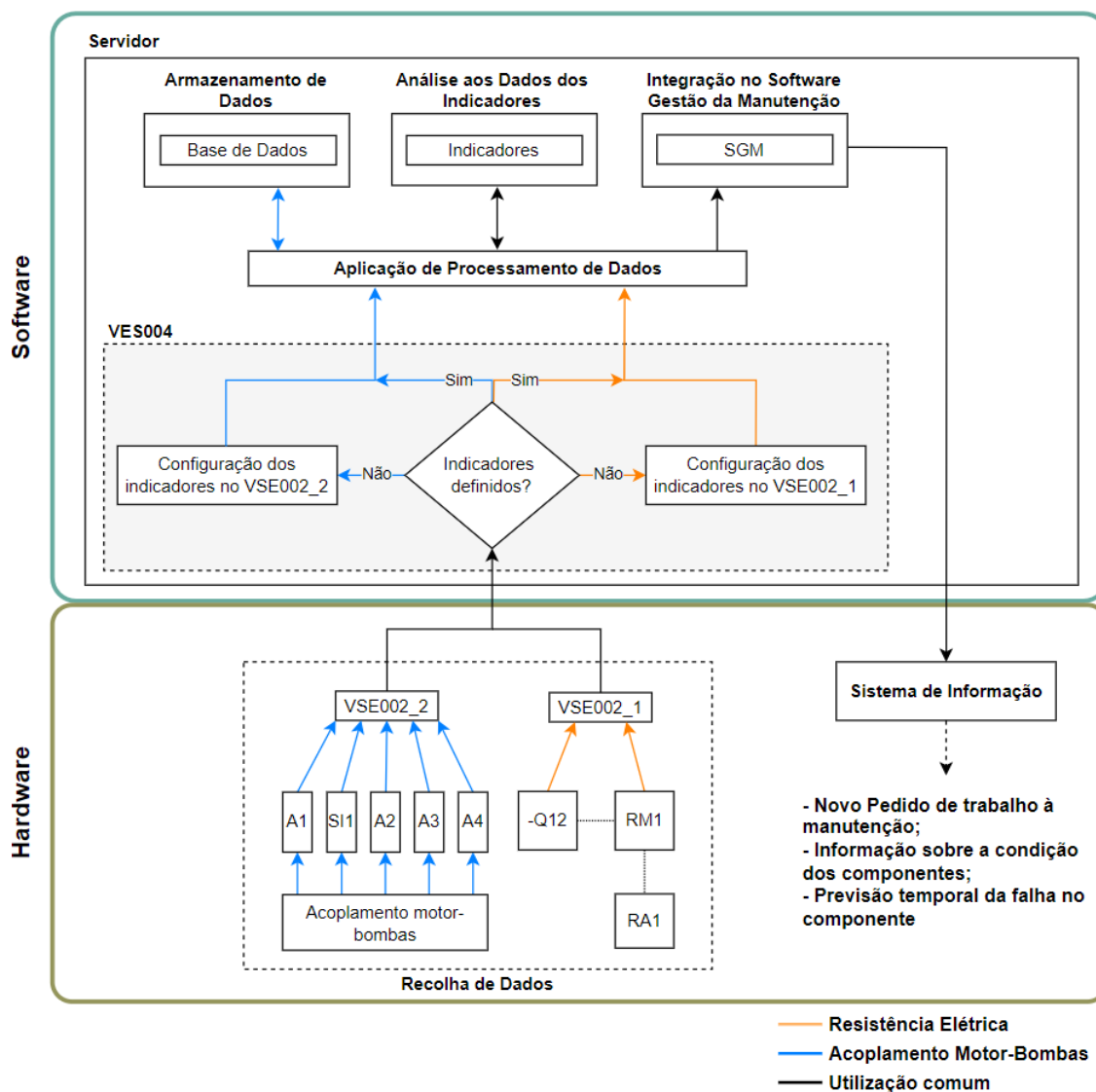


Figura 31 - Especificação da configuração dos indicadores de condição nas ferramentas de diagnóstico, no fluxo do plano de ação.

### **Indicador de condição da resistência elétrica do bico de injeção**

O indicador que define a condição da resistência elétrica foi desenvolvido através da leitura de sinais elétricos. A recolha destes sinais foi um ponto importante na definição deste indicador. Os sinais elétricos estão a ser recebidos nas entradas IN1 e IN2 da ferramenta de diagnóstico VSE002\_1. Estas entradas têm capacidade para ler sinais analógicos em corrente de 0/4..20 mA e sinais de pulso.

A entrada IN1 recolhe a intensidade de corrente que alimenta a resistência de aquecimento, enquanto a IN2 recolhe o sinal que a máquina de injeção emite para a resistência aquecer. O sinal recolhido pela entrada IN2 é proveniente da do relé de controlo do comando de aquecimento da resistência, sendo este comando designado por -Q12.

A análise destes dois sinais permitiu concluir diferentes cenários. Estes cenários são demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Diferentes cenários da monitorização da condição da resistência

| Entrada IN1 | Entrada IN2 | Condição               |
|-------------|-------------|------------------------|
| ON          | ON          | Funcional              |
| ON          | OFF         | Anomalia em -Q12       |
| OFF         | ON          | Anomalia em RA1        |
| OFF         | OFF         | Funcional <sup>2</sup> |

### **Indicador de condição dos problemas elétricos no motor elétrico**

O motor elétrico DS2-160MO54W-35-5-AO é um motor síncrono, refrigerado a água, da marca Baumuller. Este motor é o coração do conjunto de bombas, dado que é o responsável por transportar movimento ao eixo rotativo comum a todas as bombas. Com o objetivo de monitorizar o desempenho do motor analisaram-se os problemas elétricos e o estado dos rolamentos.

A causa de problemas elétricos no motor abrange um grande conjunto de fatores. A análise da vibração do motor permite identificar problemas elétricos. Isto deve-se ao facto da atração magnética entre o estator e o rotor variar ao dobro da frequência da rede elétrica. Este fenómeno de variação designa-se por magnetostricção (Mobius Institute, 2020, p. 14-7).

A análise dos dados de vibração à frequência da rede elétrica e a duas vezes esta permite identificar vários problemas elétricos no motor, como por exemplo, problemas no estator, rotores excêntricos, deformação térmica do rotor, barras do rotor fissuradas, enrolamentos do estator soltos, problemas de laminação e ligações soltas (Mobius Institute, 2020, p. 14-11 a 14-23).

Segundo o operador de rede de distribuição de energia em Portugal, a frequência utilizada na transmissão e distribuição é de 50Hz (E-REDES, 2024).

Como o motor elétrico é síncrono, a velocidade do rotor é constante e sincronizada com a frequência de alimentação. O motor elétrico para alterar a sua velocidade de rotação varia a frequência elétrica de alimentação, com auxílio de um variador de frequência. Desta forma, o motor elétrico vai ser alimentado a uma frequência diferente da frequência da rede, para ser possível variar a sua velocidade de rotação. Para a monitorização da frequência de alimentação do motor foi necessário verificar o rácio entre frequência de alimentação do motor e a rotação.

O motor elétrico na sua placa de especificações identifica que para uma rotação nominal de 3500 rpm apresenta uma frequência nominal de alimentação de 175Hz, conforme demonstrado na Figura 32. Através do sensor indutivo (SI1) foi possível identificar a velocidade de rotação do motor elétrico e, desta forma, determinar a frequência de alimentação do motor.

---

<sup>2</sup> IN1 sem sinal e IN2 sem sinal, significa que a resistência está em boa condição de funcionamento. Neste momento o processo não necessita de aquecimento.



Figura 32 - Placa de especificações motor elétrico Baumüller

Sendo assim, o rácio entre a frequência de rotação e a frequência de alimentação é de 3, conforme demonstrado na Tabela 3. Isto significa que a frequência de alimentação do motor é 3 vezes superior à de rotação.

Tabela 3 - Rácio entre a frequência de rotação e de alimentação

| Rotação Nominal<br>(rpm) | Frequência<br>Elétrica (Hz) - FE | Frequência<br>Rotação Nominal<br>(Hz) - FR | Rácio (FE/FR) |
|--------------------------|----------------------------------|--|---------------|
| 3500                     | 175                              | 58.333                                     | 3             |

Portanto, a análise dos problemas elétricos tem de ocorrer a 3 e a 6 vezes a frequência de rotação, para que a monitorização dos problemas elétricos ocorra à frequência da alimentação e a duas vezes esta.

O acelerómetro VSA001 (A1) deteta a vibração do motor elétrico. O seu sinal poderá seguir o padrão de uma onda do tipo sinusoidal, mas muitas vezes este padrão não se verifica. No entanto, a modo de simplificar a interpretação, assume-se que os dados de vibração seguem uma onda sinusoidal.

Da onda do sinal recolhido pelo sensor consegue-se obter diferentes tipos de dados, nomeadamente, RMS (*Root Mean Square*), Média (*Average*), Pico (*Peak*) e Pico-a-Pico (*Peak-to-Peak*) (Mobius Institute, 2020, p. 1-3).

A Figura 33 exemplifica os diferentes tipos de dados que podem ser obtidos através da análise de uma onda sinusoidal.

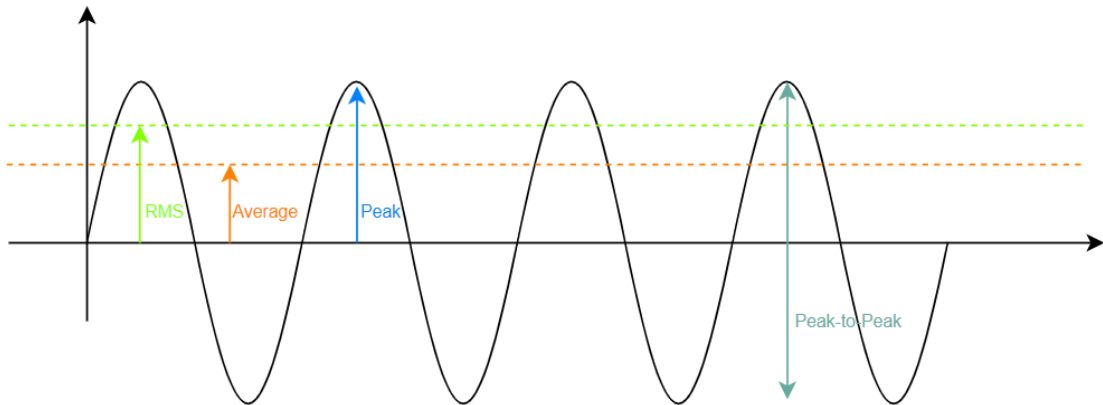


Figura 33 - Diferentes tipos de dados obtidos de uma onda sinusoidal (Adaptado de Mobius Institute, 2020, p. 1-3)

O valor de RMS descreve a quantidade média de energia contida no sinal de vibração. Por outro lado, o valor do *Peak* representa o valor positivo mais elevado e, por último, o valor do *Peak-to-Peak* representa o valor do sinal entre os dois extremos da onda (Mobius Institute, 2020, p. 1-4).

Para o indicador de problemas elétricos analisa-se o sinal RMS recolhido pelo sensor. Este sinal pode ser registado em diferentes unidades, sendo estas, aceleração, deslocamento e velocidade (Mobius Institute, 2020, p. 1-26). Nesse sentido, a ferramenta de diagnóstico VSE002\_2 foi configurada para recolher, através do acelerómetro A1, o valor do RMS na unidade de aceleração sendo designada por aRMS.

Com o objetivo de monitorizar os problemas elétricos de uma forma geral foi necessário definir o indicador de problemas elétricos numa única variável. Sendo assim, foi realizada a soma do valor de aRMS a 3 e a 6 vezes a frequência de rotação do motor. Este valor é analisado e quando incrementa significa que existe um problema elétrico.

Salienta-se que no âmbito deste projeto o importante foi identificar a baixa de desempenho do indicador de problemas elétricos. Após a sua identificação, a intervenção dos técnicos de manutenção tem como objetivo a reparação de todos os pontos anómalos que condicionam o funcionamento do motor elétrico.

### **Indicador de condição dos rolamentos do motor elétrico**

Na vertente da condição mecânica do motor elétrico, monitorizou-se a condição dos rolamentos do motor. Com essa finalidade, foi necessário definir um indicador para o estado de desempenho dos rolamentos.

O estado de desempenho dos rolamentos ocorre devido a vários fatores, sendo estes, fadiga, lubrificação, contaminação, manipulação e instalação deficiente (Mobius Institute, 2020, p. 13-3 a 13-4). No entanto, durante a sua vida útil estes podem assumir diferentes estados de degradação.

A Figura 34 esquematiza os diferentes estados de degradação dos rolamentos ao longo da sua vida útil.

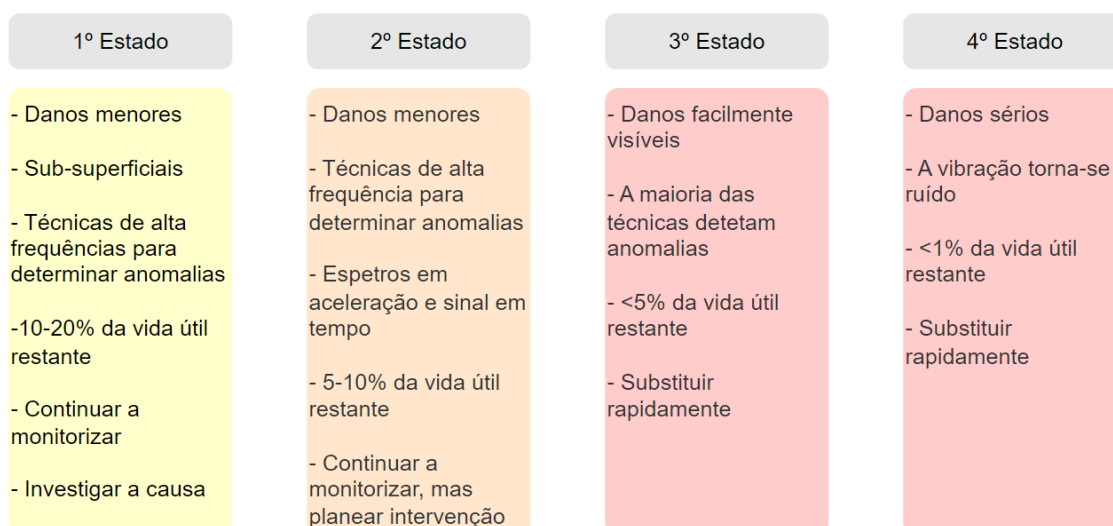


Figura 34 - Diferentes estados dos rolamentos (Adaptado de Mobius Institute, 2020, p. 13-5)

A natureza da vibração pode influenciar os diferentes estados do rolamento e nem sempre estes seguem a abordagem identificada nos quatro estados. Um rolamento pode progredir rapidamente entre os diferentes estados, enquanto outro pode permanecer no mesmo durante bastante tempo (Mobius Institute, 2020, p. 13-5).

A vibração pode ser detetada utilizando diferentes técnicas, dependendo da frequência da vibração, encontrando-se as mesmas representadas na Figura 35.

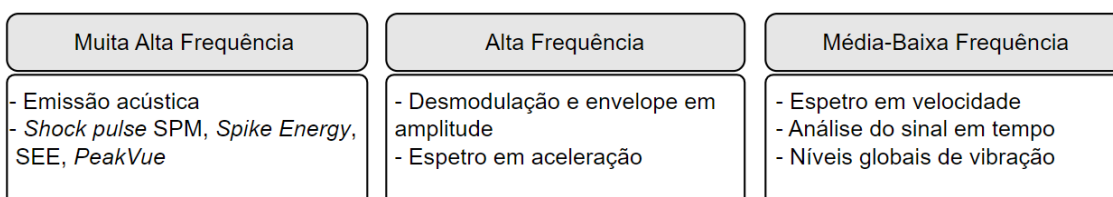


Figura 35 - Diferentes técnicas para analisar vibração em rolamentos (Adaptado de Mobius Institute, 2020, p. 13-6)

À medida que o rolamento apresenta uma anomalia, a vibração emitida inicialmente é alta e permite detetar o desgaste do rolamento numa fase inicial. Com o desenvolvimento da anomalia a frequência de vibração baixa, mas as altas frequências ainda são emitidas, contudo nessa fase o rolamento também emite frequências mais baixas. Com o aumento da anomalia no rolamento, a amplitude é maior e as frequências de vibração mais baixas (Mobius Institute, 2020, p. 13-7).

Para construção do indicador que avalia a condição dos rolamentos considerou-se atuar no segundo estado de degradação. O rolamento neste estado apresenta danos menores e superficiais, vibração de elevada frequência e contínua, mas também com a presença de frequências mais baixas, que são possíveis de verificar no espetro do rolamento. (Mobius Institute, 2020, p. 13-9).

Devido ao rolamento apresentar geometria, os fabricantes de rolamentos, normalmente identificam as frequências de defeito dos rolamentos. As frequências de defeito de um rolamento referem-se às frequências específicas do espectro de vibrações que estão associadas aos defeitos dos componentes internos de um rolamento. As frequências importantes de monitorizar são:

- Frequência de passagem de esferas na pista externa: Frequência que uma esfera ou rolo produz ao passar na pista externa do rolamento. Se existir uma anomalia na pista externa, espera-se observar um aumento do sinal de vibração recolhido nesta frequência;
- Frequência de passagem de esferas na pista interior: Frequência que uma esfera ou rolo produz ao passar na pista interna do rolamento. Se existir uma anomalia na pista interna, espera-se observar um aumento do sinal de vibração recolhido nesta frequência;
- Frequência de passagem de esferas: Frequência da rotação dos elementos rolantes em torno do seu próprio eixo. Se existir uma anomalia nos elementos rolantes, espera-se observar um aumento do sinal da vibração recolhido nesta frequência. A anomalia do elemento rolante pode atingir a pista externa e interna do rolamento (Mobius Institute, 2020, p. 13-13 e 13-14).

Todas estas frequências podem ser calculadas através de fórmulas teóricas, com o conhecimento do número total de esferas, bem como do diâmetro das esferas e do diâmetro primitivo do rolamento. A Figura 36 demonstra as variáveis necessárias para o cálculo das frequências de defeito.

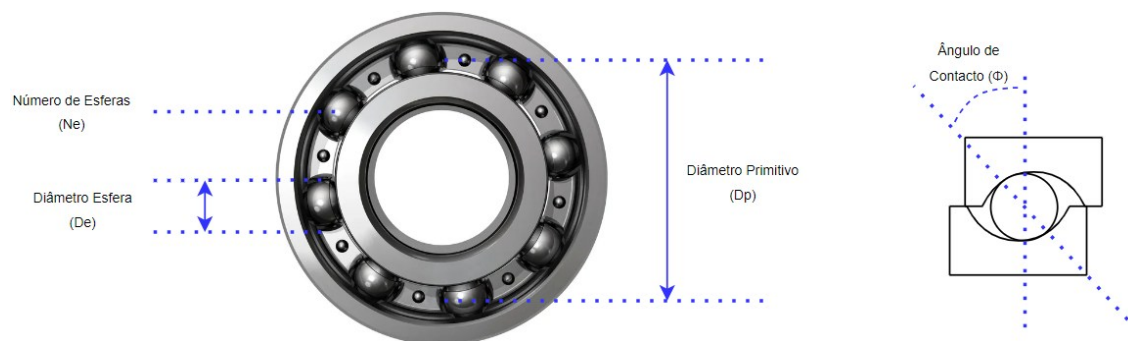


Figura 36 - Dimensões para as equações das frequências de defeito (Adaptado de Mobius Institute, 2020, p. 13-14)

Segundo Mobius Institute (2020, p. 13-15 a 13-16), para calcular as frequências é importante ter a informação exata da velocidade de funcionamento do rolamento, de forma que seja possível normalizar os dados e identificar a correta frequência de defeito. Desta forma, as equações que definem o cálculo das frequências estão em ordem à velocidade de rotação, sendo estas:

Frequência de passagem de esferas na pista externa (FPPE), Equação 2:

$$FPPE = \frac{\left[ \frac{N_e}{2} \left[ 1 - \left( \frac{D_e}{D_p} \right) \cos \phi \right] \right] RPM}{60} \quad (2)$$

,onde  $N_e$  é o número total de esferas,  $D_e$  o diâmetro das esferas,  $D_p$  o diâmetro primitivo,  $\phi$  o ângulo de contacto e  $RPM$  as rotações por minuto.

Frequência de passagem de esferas na pista interna (FPPI), Equação 3:

$$FPPI = \frac{\left[ \frac{N_e}{2} \left[ 1 + \left( \frac{D_e}{D_p} \right) \cos \phi \right] \right] RPM}{60} \quad (3)$$

Frequência de passagem das esferas (FPE), Equação 4:

$$FPE = \frac{\left[ \frac{D_p}{2D_e} \left[ 1 - \left( \frac{D_e}{D_p} \right)^2 \cos \phi^2 \right] \right] RPM}{60} \quad (4)$$

Por outro lado, para analisar as frequências de defeito dos rolamentos é necessário transformar os dados de vibração, do domínio do tempo para o domínio da frequência, através da utilização da transformada rápida de Fourier, designada por FFT (*Fast Fourier Transform*) (Goyal & Pabla, 2016). A ferramenta de diagnóstico VSE002, permite realizar a transformada rápida de Fourier internamente, no entanto é necessário identificar os rolamentos que fazem parte integrante do motor elétrico.

Para a identificação dos rolamentos do motor elétrico foi necessário consultar a ficha técnica do mesmo. A ficha técnica informa que os rolamentos utilizados são o 6313 2ZRC3 (lado da saída do eixo) e o 6311 2ZRC3 (lado oposto à saída do eixo). A identificação dos rolamentos presentes na ficha técnica do motor, estão disponíveis no Anexo 7.

Após a identificação dos rolamentos, foi necessário recolher a informação sobre as frequências de defeito. No entanto, os rolamentos são produzidos pela FAG, empresa do grupo Grupo Schaeffler, que não disponibiliza livremente as frequências de defeito no seu catálogo de produtos. Desta forma, foram calculadas as frequências de defeito, demonstradas na Tabela 4, segundo as fórmulas descritas nas equações 2, 3 e 4.

Tabela 4 - Frequências de defeito dos rolamentos 6313 2ZRC3 e 6311 2ZRC3

| Rolamento  | FPPE (Hz)   | FPPI (Hz)   | FPE (Hz)    |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| 6313 2ZRC3 | 0.052 x RPM | 0.081 x RPM | 0.037 x RPM |
| 6311 2ZRC3 | 0.051 x RPM | 0.083 x RPM | 0.032 x RPM |

Para comparar os valores calculados foi necessário ir ao mercado e identificar rolamentos idênticos, através de um fabricante que disponibiliza as frequências de defeito dos rolamentos. Sendo assim, após uma análise, verificou-se que existem dois rolamentos com as mesmas características técnicas, produzidos pelo fabricante SKF.

Estes rolamentos contêm proteções laterais (2Z) e a mesma classe de folga (C3) dos rolamentos que fazem parte integrante do motor elétrico. Os rolamentos identificados são o 6313-2Z/C3 e o 6311-2Z/C3. As frequências de defeito, que o fabricante identifica para os rolamentos 6313-2Z/C3 e o 6311-2Z/C3 encontram-se demonstradas na Tabela 5.

Tabela 5 - Frequências de defeito dos rolamentos 6313 2Z/C3 e 6311 2Z/C3

| Rolamento  | FPPE (Hz)   | FPPI (Hz)   | FPE (Hz)    |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| 6313-2Z/C3 | 0.051 x RPM | 0.082 x RPM | 0.068 x RPM |
| 6311-2Z/C3 | 0.051 x RPM | 0.082 x RPM | 0.067 x RPM |

As frequências calculadas (Tabela 4) e as frequências de defeito identificadas pela SKF (Tabela 5) são iguais para a frequência de passagem na pista externa e interna, mas diferem na frequência de passagem das esferas. Desta forma, tendo em consideração que a SKF calcula as frequências com base em testes realizados fisicamente no rolamento, as frequências que vão ser utilizadas para configurar o indicador da condição dos rolamentos, são as anunciadas pelo fabricante SKF e identificadas na Tabela 5.

A unidade de aceleração é amplamente utilizada na análise de dados de rolamentos e engrenagens. A aceleração é sensível a fenômenos que provocam altas frequências, como por exemplo choques e fricções, que numa fase inicial ocorrem em rolamentos (Mobius Institute, 2020, p. 1-30).

Deste modo, para constituir o indicador de desempenho do motor elétrico, a ferramenta de diagnóstico VSE002\_2 foi configurada para analisar a informação do aRMS relativa ao acelerómetro A1, nas faixas de frequência de defeito identificadas, com +/- 3% desvio e segundo a velocidade de rotação fornecida pelo sensor indutivo SI1. Este indicador foi constituído pelo somatório do valor do aRMS, nas três faixas de frequência de defeito monitorizadas.

### **Indicador de condição dos rolamentos da bomba 1 e 2**

A bomba 1 e 2 na sua constituição são muito semelhantes e, devido a este fator, a definição dos indicadores realizou-se em conjunto. O fabricante das bombas é a Rexroth, empresa que pertence ao grupo Bosch. A bomba 1 é a AH A4VSO 71 DFEH/10R-VZB25K99-S2332 e a bomba 2 é a AH A4F O 56/10R-VZB25K99-S2196.

Para a identificação dos rolamentos foi necessário pedir especificações técnicas das bombas ao fabricante. No entanto, a única especificação fornecida foi a lista de peças de reposição para cada uma das bombas. A lista de peças de reposição da bomba 1 está disponível no Anexo 8 e a da bomba 2 no Anexo 9.

Ao analisar a lista de peças verificou-se que as duas bombas usam a mesma referência de rolamentos, ou seja, a R902574255 e a R902574254. Tendo em conta estas duas referências, apenas foi possível identificar que a referência R902574255 é um rolamento A-RNU 38.74X48X18.5 e a referência R902574254 é um rolamento A-NUP 40X80X23. Desta forma, foi necessário verificar rolamentos no mercado com as mesmas especificações dos originais e, ao mesmo tempo, que fosse possível aceder às frequências de defeito.

A SKF tem no mercado um rolamento que cumpre com as características do rolamento com a referência R902574254, sendo este o NUP 2208 ECP/C3 40X80X23. Para a referência R902574255 não foi identificado no mercado um rolamento semelhante.

Tabela 6 - Frequência de defeito do rolamento NUP 2208 ECP/C3

| Rolamento          | FPPE (Hz)   | FPPI (Hz)   | FPE (Hz)    |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| NUP 2208<br>ECP/C3 | 0.095 x RPM | 0.138 x RPM | 0.089 x RPM |

A configuração do indicador de condição dos rolamentos da bomba 1, realizou-se através da ferramenta de diagnóstico VSE002\_2 com uma particularidade distinta entre os diferentes rolamentos. Para o rolamento com a referência R902574254, a análise da informação realizou-se através dos dados recolhidos pelo acelerómetro A2 nas frequências de defeito identificadas na Tabela 6, dado que são as frequências de defeito identificadas para o rolamento. Por outro lado, o rolamento com a referência R902574255 devido à inexistência de informação sobre as frequências de defeito, monitorizou-se o valor do aRMS, através do acelerómetro A2, em toda a sua faixa de frequência.

Na bomba 2 o indicador de condição dos rolamentos segue a mesma lógica. O rolamento com a referência R902574254 foi configurado na ferramenta de diagnóstico VSE002\_2, para analisar a informação do aRMS recolhida pelo acelerómetro A3, nas frequências de defeito identificadas na Tabela 6. Para o rolamento com a referência R902574255, monitorizou-se o valor do aRMS, obtido através do acelerómetro A3 em toda a faixa de frequência.

### **Indicador de condição dos rolamentos da bomba 3**

A bomba 3 também foi desenvolvida pela empresa Rexroth. A bomba é a SYDFEE-3X/045R-VRB22U00S0479-A2A0FLX-022. Para a monitorização da condição bomba monitorizou-se o estado dos rolamentos.

Para a identificação dos rolamentos da bomba foi necessário pedir especificações ao fabricante. No entanto, a única especificação fornecida pelo fabricante foi a lista de peças de reposição. A lista de peças de reposição da bomba 3 está disponível no Anexo 10. Ao analisar a lista de peças de reposição verificou-se que não existe nenhuma especificação sobre os rolamentos da bomba e, dado este fator, não foi possível analisar o aRMS, nas frequências de defeito dos rolamentos.

Sendo assim, analisou-se o aRMS, em toda a faixa de frequência. Para a monitorização do estado de desempenho da bomba 3, a ferramenta de diagnóstico VSE002\_2 foi configurada para analisar a informação do aRMS, através do acelerómetro A4.

### **Indicador de condição geral das bombas**

Na bomba 1 monitorizou-se o desequilíbrio no veio das bombas, isto porque é a primeira bomba a receber o movimento rotativo fornecido pelo motor, através do veio de transmissão de movimento.

Na vibração, a velocidade permite identificar componentes que estão sujeitos a elevados níveis de vibração e que podem ser danificados pela fadiga. Esta unidade é amplamente utilizada para a monitorização de desequilíbrios e desalinhamentos (Mobius Institute, 2020, p. 1-29).

Nesse sentido, para a monitorização da condição geral das bombas, a ferramenta de diagnóstico VSE002\_2 foi configurada de modo a analisar a informação do RMS, na unidade de velocidade, sendo designado por vRMS, através do acelerómetro A2.

### **Indicador de segurança do equipamento**

A bomba 3 devido a estar na extremidade do acoplamento de bombas, foi escolhida para a recolha de dados que define do indicador de segurança. Este indicador de segurança tem como objetivo recolher a informação do vRMS entre 10Hz e 1500Hz. Tal informação permite identificar qualquer fenómeno que esteja a decorrer no acoplamento motor-bombas ou na máquina de injeção, com o objetivo de identificar rapidamente que o equipamento necessita de parar.

Em suma, a Tabela 7 representa esquematicamente a visão geral dos indicadores monitorizados. Foram identificados os componentes, os locais de recolha de dados, os indicadores de condição definidos e as unidades em que foram realizadas as recolhas de dados.

Tabela 7 - Visão Geral dos indicadores monitorizados

| Componente               | Local de Recolha         | Sensor                | Indicador de Condição | Unidade de Medição  |            |                   |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------|-------------------|
| Resistência Aquecimento  | Resistência Bico Injeção | -                     | Estado da Resistência | Sinal elétrico (mA) |            |                   |
| Acoplamento motor-bombas | Motor elétrico           | A1                    | Problemas elétricos   | aRMS                |            |                   |
|                          |                          |                       | Rolamentos            | aRMS                |            |                   |
|                          |                          |                       | Rolamentos            | aRMS                |            |                   |
|                          | Bomba 1                  | A2                    | Condição Geral        | vRMS                |            |                   |
|                          |                          |                       | Bomba 2               | A3                  | Rolamentos | aRMS              |
|                          |                          |                       |                       |                     | Rolamentos | aRMS <sup>3</sup> |
| Bomba 3                  | A4                       | Segurança Equipamento | vRMS                  |                     |            |                   |

<sup>3</sup> O indicador de condição referente aos rolamentos da Bomba 3 realiza-se através da análise do aRMS na sua faixa de frequência total.

A Figura 37 demonstra o aspeto visual dos indicadores definidos no *software* VES004 na ferramenta de diagnóstico VSE002\_2, para o motor elétrico e as bombas.

| Nome                           | Valor      |
|--------------------------------|------------|
| SE01_Motor_aRMS_01             | 0,016 g    |
| SE03_Pump2_aRMS_09             | 0,016 g    |
| SE01_Motor_aPeak_02            | 0,049 g    |
| SE02_Pump1_Bearings_07         | 0,028 g    |
| SE02_Pump1_GeneralCondition_08 | 0,396 mm/s |
| SE01_Motor_Bearings_03         | 0,029 g    |
| SE01_Motor_ElectricProblems_04 | 0,001 g    |
| SE03_Pump2_aPeak_10            | 0,053 g    |
| SE02_Pump1_aRMS_05             | 0,014 g    |
| SE03_Pump2_Bearings_11         | 0,029 g    |
| SE02_Pump1_aPeak_06            | 0,049 g    |
| SE04_Pump3_aRMS_12             | 0,015 g    |
| SE04_Pump3_aPeak_13            | 0,050 g    |
| SE04_Pump3_vRMS_14             | 0,156 mm/s |

Figura 37 - Aspeto visual dos indicadores definidos no *software* VES004 na ferramenta de diagnóstico VSE002\_2

### **Indicador do fator de crista**

Para o motor elétrico, bomba 1, 2, e 3, recolhe-se isoladamente o valor do aRMS e do aPEAK, dado que são valores pertinentes que podem ser utilizados futuramente em análises específicas, caso necessitem de serem realizadas.

Com a recolha destes dois valores foi possível calcular o fator de crista. Designado por cREST (*Crest Factor*), é a razão entre o aPeak e o aRMS. Este indicador permite identificar a relação entre os picos mais altos e o valor médio de vibração. Um fator de crista baixo significa que o equipamento está em operação de uma maneira uniforme, sem grandes desvios do padrão de vibração. Por outro lado, um fator de crista elevado significa que existem picos de vibração muito altos em relação ao valor médio da vibração (Mobius Institute, 2020, p. 1-42).

O indicador cREST é calculado internamente na aplicação de processamento de dados, através da Equação 5. Esta aplicação é o elemento central de toda a avaliação e monitorização dos indicadores de condição definidos, para todos os componentes. Todos os indicadores, com exceção do cREST, foram configurados no VES004.

$$cRest = \frac{aPeak}{aRMS} \quad (5)$$

, onde aPeak é o valor positivo mais elevado e aRMS a quantidade média de energia contida no sinal de vibração.

### 3.3.4 Recolha de dados em tempo real

A aquisição dos dados em tempo real realiza-se através da aplicação de processamento de dados e o servidor OPC UA. A aplicação de processamento de dados foi desenvolvida em linguagem *Python*, através da construção de um *script* que está disponível no Anexo 12. Esta escolha deveu-se ao facto de ser uma linguagem de código aberto, fonte partilhada, simples, executável em diferentes plataformas, orientada por objetos e extensível. Esta linguagem permite abordar temas como o *BigData*, a inteligência artificial e análise de dados. Além disso, existe um grande conjunto de bibliotecas desenvolvidas pela comunidade que podem ser utilizadas livremente (Rawat, 2020).

O servidor OPC UA permite que os indicadores definidos nas ferramentas de diagnóstico VSE002\_1 e VSE002\_2 estejam organizados segundo uma estrutura de nós e também disponíveis para consulta e leitura. A Figura 38, demonstra a organização dos indicadores na estrutura de OPC UA.

| Data Access View |             |  |              |             |          |
|------------------|-------------|--|--------------|-------------|----------|
| #                | Server      | Node Id  | Display Name | Value       | Datatype |
| 1                | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.249:3321.Inputs.Analogue.Input01.Value | Value        | -2492.71    | Float    |
| 2                | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.249:3321.Inputs.Analogue.Input02.Value | Value        | -2497.91    | Float    |
| 3                | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object01.Value        | Value        | 0.158089    | Float    |
| 4                | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object02.Value        | Value        | 0.602601    | Float    |
| 5                | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object03.Value        | Value        | 0.2836      | Float    |
| 6                | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object04.Value        | Value        | 0.00613048  | Float    |
| 7                | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object05.Value        | Value        | 0.147237    | Float    |
| 8                | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object06.Value        | Value        | 0.700154    | Float    |
| 9                | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object07.Value        | Value        | 0.268153    | Float    |
| 10               | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object08.Value        | Value        | 0.000251249 | Float    |
| 11               | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object09.Value        | Value        | 0.153207    | Float    |
| 12               | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object10.Value        | Value        | 0.667439    | Float    |
| 13               | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object11.Value        | Value        | 0.287776    | Float    |
| 14               | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object12.Value        | Value        | 0.146027    | Float    |
| 15               | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object13.Value        | Value        | 0.726582    | Float    |
| 16               | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object14.Value        | Value        | 0.000174573 | Float    |
| 17               | @EN1100V_SP | NS3 String ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Inputs.Analogue.Input01.Value | Value        | 0           | Float    |

Figura 38 - Estrutura dos indicadores, organizados em nós, no servidor de OPC UA

O valor do indicador ao estar identificado com ID de um nó, passou a ser possível referenciar que aquele ID específico é o ponto de referência para a recolha de dados em tempo real.

Em *Python*, a biblioteca “opcua” permite a conexão com o servidor OPC UA e a recolha dos valores dos indicadores de condição definidos. O *script*, numa fase inicial acede ao servidor de OPC UA, de seguida lê dos dados e depois armazena os valores dos indicadores num dicionário designado por “data”.

O Código 1, demonstra um breve exemplo da lógica utilizada na recolha da informação dos indicadores do motor elétrico e da velocidade de rotação. A recolha de dados para os restantes indicadores segue a mesma lógica.

```
from opcua import Client

# Acesso ao servidor OPC UA
serve_url = "opc.tcp://172.30.1.195:32210/UA/VSE/Server"
client = Client(serve_url)
client.connect()

# Recolha dos dados do Servidor de OPC UA
data = {
    "S1_aRMS":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object01.Value").
get_value(),
    "S1_aPEAK":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object02.Value").
get_value(),
    "S1_Bearings":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object03.Value").
get_value(),
    "S1_Electric_Problems":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object04.Value").
get_value(),
    "IN1_Rotation_Speed":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Inputs.Analogue.Input01.V
alue").get_value(),
}

# Cálculo do cREST
data["S1_cREST"] = data["S1_aPEAK"] / data["S1_aRMS"]

client.disconnect()
```

Código 1 – Extrato de código da recolha de dados entre o *Python* e o servidor OPC UA, para o acelerómetro A1

### 3.3.5 Armazenamento dos dados provenientes dos indicadores

Os dados recolhidos pelos sensores são processados pelas ferramentas de diagnóstico e a informação dos indicadores necessita de ser armazenada. Apenas são armazenadas os dados provenientes dos sensores instalados no acoplamento motor-bombas. Por outro lado, os dados recolhidos na monitorização da resistência elétrica, devido a serem do domínio elétrico, são processado em tempo real, sem necessidade de serem armazenado.

O armazenamento dos dados realizou-se numa base de dados SQL (*Structured Query Language*). O Microsoft SQL Server foi o sistema utilizado para a gestão da base de dados. A principal linguagem de consulta é a *Transact-SQL*, uma implementação da norma ANSI/ISO *Structured Query Language* usada pela Microsoft. Este sistema apresenta boa capacidade de resposta, boa média de utilização do CPU e de memória (Bassil, 2012).

A gestão do SQL server é realizada através do *SQL Server Manangement Studio (SSMS)*. Este *software* é uma ferramenta que permite criar, configurar, administrar e monitorizar instâncias de dados em SQL. Para o armazenamento dos dados recolhidos criou-se uma base de dados designada por ManSimoldes que contêm 8 tabelas.

### **Armazenamento dos indicadores de condição do acoplamento motor-bombas**

O armazenamento dos indicadores provenientes da ferramenta de diagnóstico realizou-se em quatro tabelas, uma para o motor elétrico e uma para cada uma das bombas em análise, conforme demonstrado na Figura 39.

| S1_Electric_Motor    | S2_Pump1             | S3_Pump2           | S4_Pump3           |
|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| ID                   | ID                   | ID                 | ID                 |
| S1_aRMS              | S2_aRMS              | S3_aRMS            | S4_aRMS            |
| S1_aPEAK             | S2_aPEAK             | S3_aPEAK           | S4_aPEAK           |
| S1_cREST             | S2_cREST             | S3_cREST           | S4_cREST           |
| S1_Bearings          | S2_Bearings          | S3_Bearings        | S4_vRMS            |
| S1_Electric_Problems | S2_General_Condition | IN1_Rotation_Speed | IN1_Rotation_Speed |
| IN1_Rotation_Speed   | IN1_Rotation_Speed   | Date               | Date               |
| Date                 | Date                 |                    |                    |

Figura 39 - Tabelas de armazenamento dos valores dos indicadores de condição, para o acoplamento motor-bombas

O armazenamento dos dados decorre através do *script*, com a utilização da biblioteca “pyodbc”. O *script* realiza a conexão à base de dados SQL e depois através da função “def insert\_data”, armazena todos os dados que estão contidos no dicionário “data”.

O Código 2, demonstra um breve exemplo de como foi realizado o armazenamento dos dados recolhidos para o motor elétrico. Para os restantes indicadores referentes às bombas, o armazenamento dos dados, nas correspondentes tabelas, segue a mesma lógica.

```
import pyodbc

db_connection_string = (
    r"DRIVER={SQL Server};"
    r"SERVER=SPMANTMP\SQLEXPRESS;"
    r"DATABASE=ManSimoldes;"
    r"Trusted_Connection=yes"
)

# Função para arredondar valores para 6 casas decimais
def round_value(value):
    return round(value, 6) if isinstance(value, float) else value

# Função para inserir dados na base de dados ManSimoldes
def insert_data(cursor, table, data):
    placeholders = ", ".join(["?"] * len(data))
    columns = ", ".join(data.keys())
    data_rounded = {key: round_value(value) for key, value in data.items()}
    sql = f"INSERT INTO {table} ({columns}) VALUES ({placeholders})"
    cursor.execute(sql, list(data_rounded.values()))
    connection.commit()
```

```

connection = pyodbc.connect(db_connection_string)
cursor = connection.cursor()

table = "S1_Electric_Motor"
insert_data(cursor, table, data)

connection.close()

```

Código 2 - Extrato de código do armazenamento de dados, na base de dados ManSimoldes, para o acelerómetro A1

Existem algumas particularidades, demonstradas no *script* presente no Anexo 12, que foram consideradas, de forma a garantir que os dados armazenados são coerentes, nomeadamente:

- O armazenamento de dados ocorre apenas quando a rotação do veio é superior a 750 rpm, de forma a garantir que não existem dados quando a máquina de injeção está parada ou numa troca de ferramenta. Os dados originados numa troca de ferramenta, devido à sua natureza de valores, não refletem o normal funcionamento do equipamento;
- Não são registadas entradas duplicadas na base de dados, isto porque deve existir uma alteração dos valores em pelo menos uma variável dos indicadores, para existir uma nova entrada de informação na tabela de dados.

### **Armazenamento de dados Estatísticos do acoplamento motor-bombas**

O armazenamento de um grande conjunto de dados necessita de um processamento prévio para ser possível identificar padrões e tendências, com o objetivo de antecipar futuros comportamentos ou resultados. Desta forma, foram criadas quatro tabelas estatísticas que armazenam o comportamento diário do motor elétrico e das bombas.

A estatística diária realiza-se com auxílio do *script*, através das funções “*def calculate\_statistics*” e “*def process\_table*”, disponíveis no Anexo 12. O *script* foi programado para todos os dias à meia-noite, realizar uma análise aos registos armazenados durante o dia anterior, para cada componente que está a ser monitorizado. A Figura 40, demonstra as quatro tabelas estatísticas.

| S1 Statistics                  | S2 Statistics                  | S3 Statistics         | S4 Statistics     |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Date                           | Date                           | Date                  | Date              |
| S1_aRMS_Max                    | S2_aRMS_Max                    | S3_aRMS_Max           | S4_aRMS_Max       |
| S1_aRMS_Avg                    | S2_aRMS_Avg                    | S3_aRMS_Avg           | S4_aRMS_Avg       |
| S1_aRMS_Avg_Upper              | S2_aRMS_Avg_Upper              | S3_aRMS_Avg_Upper     | S4_aRMS_Avg_Upper |
| S1_Bearings_Max                | S2_Bearings_Max                | S3_Bearings_Max       | S4_vRMS_Max       |
| S1_Bearings_Avg                | S2_Bearings_Avg                | S3_Bearings_Avg       | S4_vRMS_Avg       |
| S1_Bearings_Avg_Upper          | S2_Bearings_Avg_Upper          | S3_Bearings_Avg_Upper | S4_vRMS_Avg_Upper |
| S1_Electric_Problems_Max       | S2_General_Condition_Max       |                       |                   |
| S1_Electric_Problems_Avg       | S2_General_Condition_Avg       |                       |                   |
| S1_Electric_Problems_Avg_Upper | S2_General_Condition_Avg_Upper |                       |                   |

Figura 40 - Tabelas de armazenamento dos valores estatísticos diários, para o acoplamento motor-bombas

Nas tabelas de estatística, para cada um dos indicadores de condição definidos e para o aRMS, é armazenado o valor máximo (Max), a média (Avg) e a média elevada (Avg\_Upper). A média elevada neste contexto é a média de 10% dos registos com valores mais elevados. Por exemplo, se num dia forem registados 100 valores, na tabela de estatística, o valor da média elevada é a média dos 10 valores mais altos, de forma espelhar se o máximo é constituído por um valor casual ou se existe um conjunto de valores muito próximos do máximo.

A Figura 41 especifica o fluxo que foi definido para o armazenamento de dados.

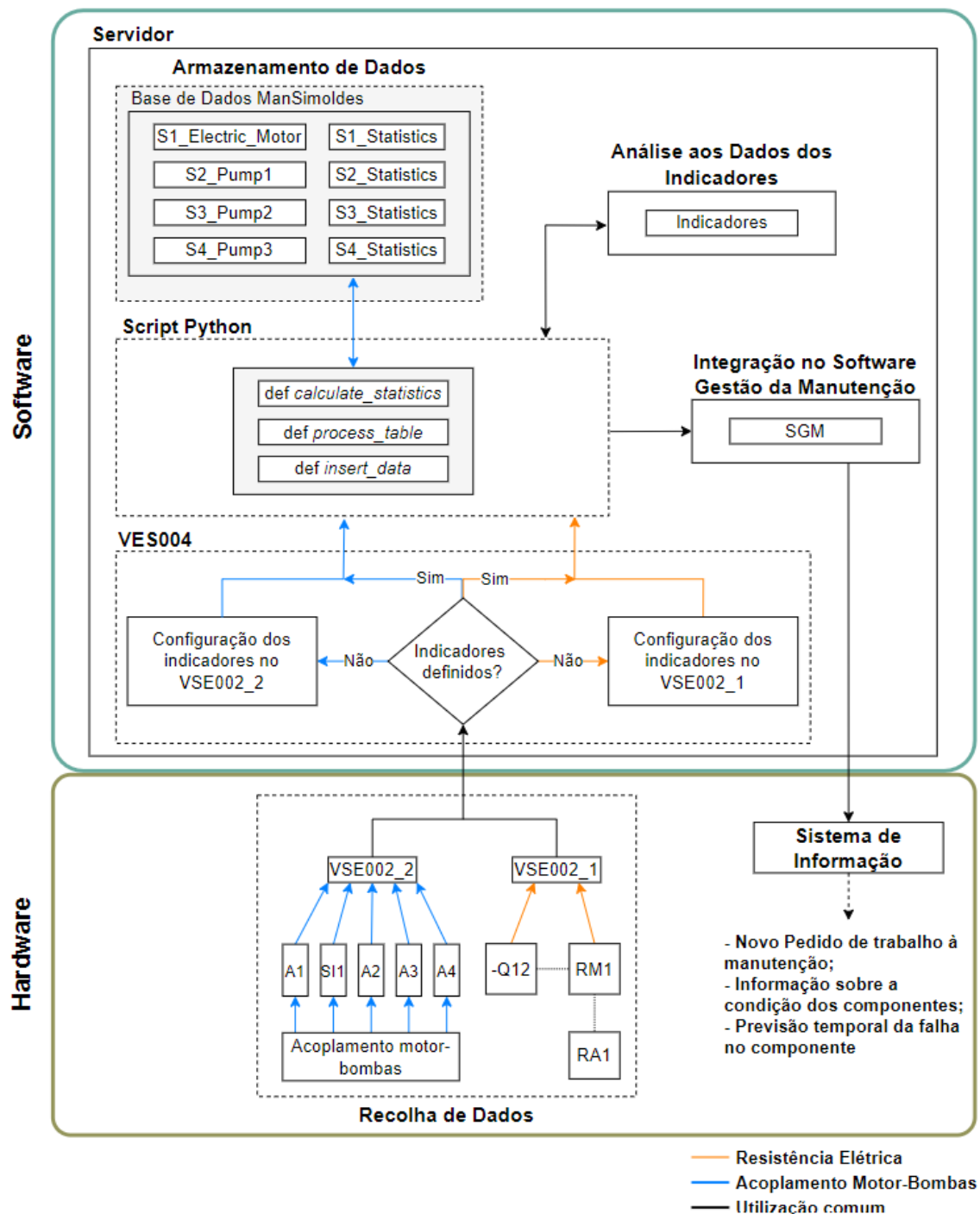


Figura 41 - Especificação do armazenamento dos dados, no fluxo do plano de ação

## 3.4 Avaliação e Monitorização

A avaliação e monitorização deste projeto realiza-se em tempo real de acordo com os dados recolhidos. Na fase de avaliação o principal objetivo é interpretar as informações dos indicadores, de forma a verificar se os componentes apresentam bom desempenho. Na fase de monitorização garante-se a exequibilidade de todo o fluxo deste projeto, para que os indicadores sejam continuamente ajustados, através dos dados históricos recolhidos.

### 3.4.1 Análise dos indicadores de condição

A análise aos indicadores de condição dos componentes dividiu-se em duas vertentes, sendo estas a vertente relacionada com as resistências elétricas e a vertente relacionada com o acoplamento motor-bombas. Sendo estas diferentes, são abordados conceitos diferentes na análise aos indicadores, dado que a complexidade é diferente entre as duas.

#### **Análise dos indicadores das resistências elétricas**

A análise ao indicador das resistências elétricas, baseia-se na análise de sinais elétricos, que originam diferentes cenários, conforme identificados na Tabela 2. Para que o processo de aquecimento decorra é necessário que o relé de comando -Q12 envie o sinal para aquecimento e, ao mesmo tempo, a resistência esteja em bom estado funcional, para conseguir transformar energia elétrica em calor.

Nesse sentido, a análise do estado da resistência depende de duas condições, nomeadamente:

- Se o sinal do relé de comando -Q12 for superior a 0mA e ao mesmo tempo o consumo da resistência for nulo (0mA), significa que a resistência apresenta uma anomalia e não está a transformar energia elétrica em calor. A equipa de manutenção necessita de realizar a troca da resistência.
- Se o sinal do relé de comando -Q12 for nulo (0mA) e ao mesmo tempo o consumo da resistência elétrica for superior a 0mA, significa que a resistência está a transformar energia elétrica em calor, mas está a atuar num momento em que não é necessário. A equipa de manutenção necessita de verificar o relé de comando -Q12 e verificar a causa raiz do problema.

Desta forma, após a identificação dos cenários que comprometem o bom desempenho da resistência elétrica e através da avaliação dos dados em tempo real, é possível obter conclusões sobre o estado de saúde da resistência elétrica.

#### **Análise dos indicadores do acoplamento motor-bombas**

A análise dos indicadores de condição para o acoplamento motor-bombas decorre da comparação entre um valor alarme de referência e o valor atual que está a ser recolhido em tempo real, para cada um dos indicadores definidos. Neste projeto foram definidos valores de alarme para cada um dos indicadores.

Para que a análise decorresse foi necessário que o respetivo valor alarme fosse ultrapassado pelo menos três vezes, durante o mesmo dia, de forma a garantir que o valor recolhido representa uma alteração significativa e não seja um evento único ou numa fase inicial. Neste projeto os valores alarmes definidos estão demonstrados na Tabela 8. Estes valores foram definidos após a observação dos dados recolhidos e de acordo com a grandeza nominal de cada indicador.

Tabela 8 - Valores alarmes definidos para os indicadores de condição do acoplamento motor-bombas

| Sensor | Local de Recolha | Indicador de Condição | Valor Alarme |
|--------|------------------|-----------------------|--------------|
| A1     | Motor Elétrico   | Problemas Elétricos   | 1            |
|        |                  | Rolamentos            | 2            |
| A2     | Bomba 1          | Rolamentos            | 5            |
|        |                  | Condição Geral        | 0.01         |
| A3     | Bomba 2          | Rolamentos            | 5            |
| A4     | Bomba3           | Rolamentos            | 30           |
|        |                  | Segurança Equipamento | 0.05         |

Os valores alarme dependem das condições de operação que influenciam diretamente o equipamento. A definição dos valores alarme necessitou de uma análise prévia aos dados recolhidos, de forma que fosse perceptível os valores de funcionamento normais do equipamento. Após a visualização desses valores e com base na experiência, definiu-se os valores alarme de cada indicador. Os valores alarme podem sofrer alterações ao longo do tempo, conforme a experiência adquirida sobre o equipamento e as suas condições de operação. O Código 3 demonstra o dicionário “triggers”. Neste dicionário definiu-se os valores alarme para cada um dos indicadores, contidos no *script* identificado no Anexo 12.

```
triggers = {
    "S1_Electric_Problems": 1,
    "S1_Bearings": 2,
    "S2_Bearings": 5,
    "S2_General_Condition": 0.01,
    "S3_Bearings": 5,
    "S4_aRMS": 30,
    "S4_vRMS_Safety_Indicator": 0.05
}
```

Código 3 - Dicionário *Triggers*, que define os valores alarme no *script* Python

Sempre que um dos valores alarme for ultrapassado três vezes no mesmo dia, realiza-se uma análise dos dados estatísticos desse indicador, com o objetivo de verificar a tendência dos dados estatísticos.

A análise de tendência realizou-se com o auxílio das funções “*def trend\_function*” e “*def fit\_model*”, disponíveis no *script* identificado no Anexo 12. Estas funções são responsáveis por recolher todo o histórico estatístico e, com base nesse histórico, modelar um conjunto de funções de tendência. As funções de tendência abordadas neste projeto são: linear, exponencial, logarítmica e polinomial (grau 2, 3 e 4), representadas nas seguintes equações.

Função Linear, Equação 5:

$$y = mx + b \quad (5)$$

,onde  $y$  é a variável dependente,  $x$  a variável independente,  $m$  a inclinação da reta e  $b$  o coeficiente linear.

Função Exponencial, Equação 6:

$$y = ab^x \quad (6)$$

,onde  $y$  é a variável dependente,  $x$  a variável independente,  $a$  o valor inicial e  $b$  a base exponencial.

Função logarítmica, Equação 7:

$$y = \log_b(x) \quad (7)$$

,onde  $y$  é a variável dependente,  $x$  a variável independente e  $b$  a base logarítmica (com  $b > 0$  e  $b \neq 1$ ).

Função polinomial grau 2, Equação 8:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (8)$$

,onde  $y$  é a variável dependente,  $x$  a variável independente,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes (com  $a \neq 0$ ).

Função polinomial grau 3, Equação 9:

$$: y = ax^3 + bx^2 + cx + d \tag{9}$$

,onde  $y$  é a variável dependente,  $x$  a variável independente,  $a, b, c$  e  $d$  são constantes (com  $a \neq 0$ ).

Função polinomial grau 4, Equação 10:

$$y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \tag{10}$$

,onde  $y$  é a variável dependente,  $x$  a variável independente,  $a, b, c, d$  e  $e$  são constantes (com  $a \neq 0$ ).

A Figura 42, a título de demonstração, permite visualizar o ajustamento das funções tendência de acordo com os dados históricos simulados para um intervalo de três anos. As funções de tendência de grau 3 e 4 não são demonstradas, dado que assumem a mesma curva representativa da função polinomial de grau 2.

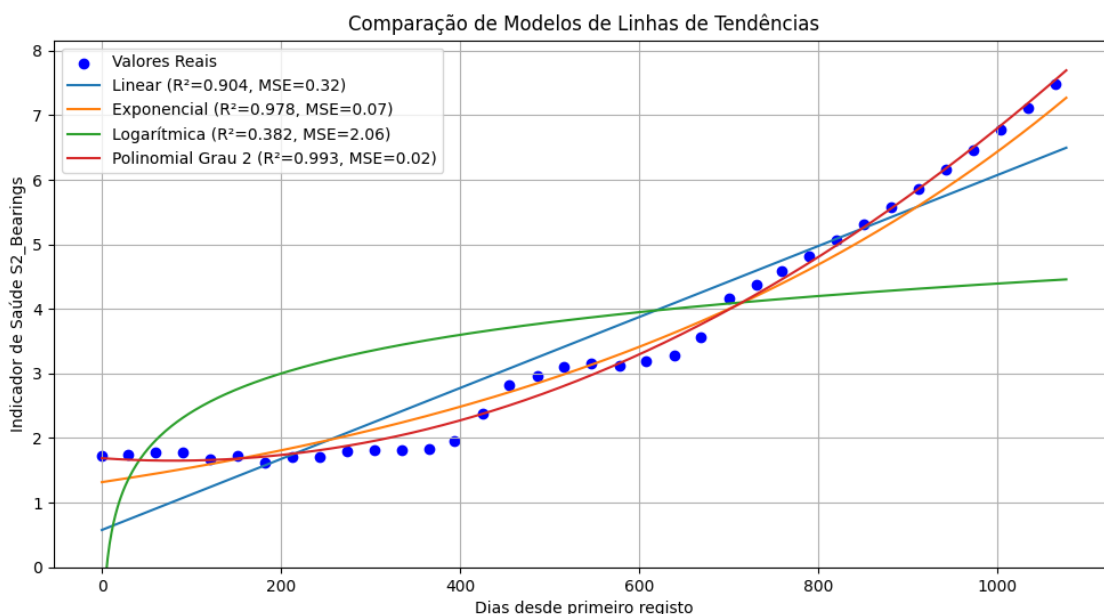


Figura 42 - Ajustamento das funções de tendência de acordo com os dados históricos

Após todas as funções tendências ajustadas calculou-se o modelo que melhor se ajusta aos dados históricos através dos cálculos dos indicadores R-Quadrado ( $R^2$ ) e o Erro Quadrático Médio (MSE - *Mean Squared Error*). A escolha da melhor função tendência realizou-se de acordo com uma pontuação combinada.

A pontuação combinada consiste na normalização dos indicadores, de forma a que possam ser combinados e a melhor função de tendência selecionada. As Equações 11 e 12 demonstram a

normalização do indicador  $R^2$  e do MSE. A Equação 13, demonstra a equação que define a pontuação combinada para cada um dos modelos.

$$\text{Normalização } R^2_i = \frac{R^2_i - \text{Mínimo } R^2}{\text{Máximo } R^2 - \text{Mínimo } R^2} \quad (11)$$

$$\text{Normalização } MSE_i = \frac{\text{Máximo } MSE - MSE_i}{\text{Máximo } MSE - \text{Mínimo } MSE} \quad (12)$$

$$\text{Pontuação Combinada}_i = \text{Normalização } R^2_i + \text{Normalização } MSE_i \quad (13)$$

, onde  $i$  é o modelo da função tendência,  $\text{Máximo } R^2$  o máximo valor de R-Quadrado,  $\text{Mínimo } R^2$  o mínimo valor de R-Quadrado,  $\text{Máximo } MSE$  é o máximo valor do Erro Quadrado Médio e o  $\text{Mínimo } MSE$  é o mínimo valor do Erro Quadrado Médio, de todos os modelos de tendência ajustados aos dados históricos.

Para os dados da Figura 42 verificou-se que o modelo que apresenta maior  $R^2$  e menor MSE é o modelo Polinomial Grau 2, conforme demonstrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Cálculo da pontuação combinada

| Modelo $i$           | $R^2_i$ | $MSE_i$ | $Norm. R^2_i$ | $Norm. MSE_i$ | $Pontuação Combinada_i$ |
|----------------------|---------|---------|---------------|---------------|-------------------------|
| Linear               | 0.904   | 0.32    | 0.854         | 0.853         | 1.707                   |
| Exponencial          | 0.978   | 0.07    | 0.975         | 0.975         | 1.95                    |
| Logarítmica          | 0.382   | 2.06    | 0             | 0             | 0                       |
| Polinomial<br>Grau 2 | 0.993   | 0.02    | 1             | 1             | 2                       |

Após a seleção da função de tendência que melhor se ajustava aos dados históricos, utilizou-se a função de tendência para prever o mês e ano em que o equipamento ultrapassa o valor limite máximo definido para o indicador, evitando que o equipamento entre em falha. Esta previsão tornou-se importante para os técnicos de manutenção avaliarem a tendência do indicador de condição e planejar a ação de manutenção.

Os valores limite que foram definidos para este projeto estão demonstrados na Tabela 10. Estes valores foram definidos segundo um valor teórico estimado, de acordo com a ordem de grandeza dos mesmos. A correta definição destes valores carece da análise ao conjunto de dados reais de funcionamento do equipamento, com o objetivo de identificar um valor para o qual o equipamento estará em risco de falha. Este valor tem que ser refinado e reajustado sempre que necessário, à medida que o conhecimento do equipamento se torna mais maduro ou com base na experiência de funcionamento do equipamento.

Tabela 10 - Valores limites máximos definidos para os indicadores de condição do acoplamento motor-bombas

| Sensor | Local de Recolha | Indicador de Condição | Valor Limite |
|--------|------------------|-----------------------|--------------|
| A1     | Motor Elétrico   | Problemas Elétricos   | 2            |
|        |                  | Rolamentos            | 30           |
| A2     | Bomba 1          | Rolamentos            | 30           |
|        |                  | Condição Geral        | 0.05         |
| A3     | Bomba 2          | Rolamentos            | 30           |
| A4     | Bomba3           | Rolamentos            | 180          |
|        |                  | Segurança Equipamento | 0.1          |

O Código 4 demonstra o dicionário “*limit\_values*”. Neste dicionário define-se os valores limites máximos para cada um dos indicadores, contidos *script* identificado no Anexo 12.

```
limit_values = {
    "S1_Electric_Problems": 2,
    "S1_Bearings": 30,
    "S2_Bearings": 30,
    "S2_General_Condition": 0.05,
    "S3_Bearings": 30,
    "S4_aRMS": 180,
    "S4_vRMS_Safety_Indicator": 0.1
}
```

Código 4 - Dicionário *limit\_values*, que define os valores limites máximos no *script Python*

Deste modo, a análise dos indicadores relacionados com o acoplamento motor-bombas realizou-se de forma contínua, entre a verificação constante dos valores reais com os valores alarme. Se algum dos valores alarme for excedido, é iniciada uma análise de tendência, com o objetivo de prever quando o valor limite é ultrapassado, com o auxílio da melhor função tendência que se ajusta aos dados históricos.

A Figura 43 demonstra o fluxo que foi definido para a análise dos indicadores de condição.

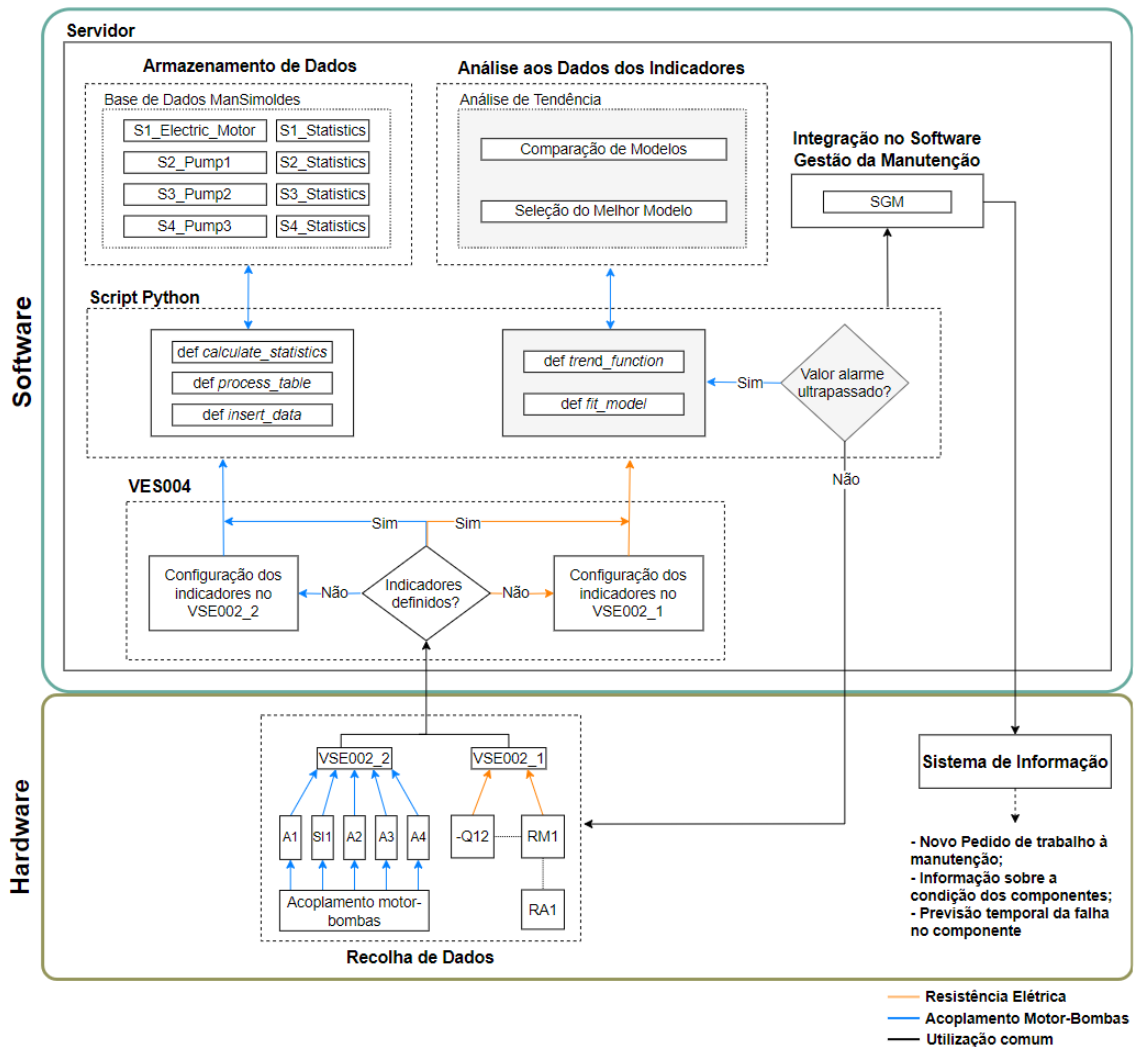


Figura 43 - Especificação da análise dos indicadores de condição, no fluxo do plano de ação

### 3.4.2 Integração dos dados analisados com o *Software* de Gestão da Manutenção

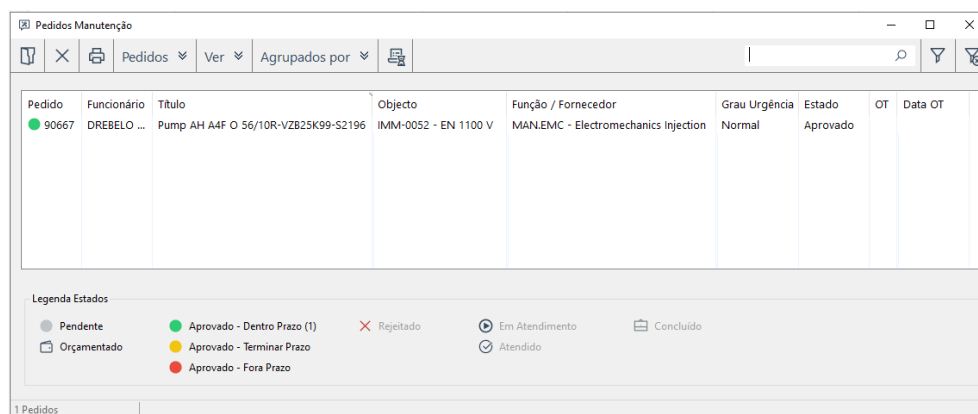
No caso de existir uma baixa de desempenho, num dos indicadores de condição é realizada uma integração com o SGM. Esta integração tem como objetivo transmitir a informação do indicador e a previsão realizada à equipa de manutenção, dado que o SGM é a plataforma de trabalho de toda a equipa. Desta forma é aberto um pedido de trabalho referente ao indicador que está com baixo desempenho, permitindo à equipa de manutenção atuar segundo a condição do equipamento.

A integração é realizada através de uma API (*Application Programming Interface*). Esta interface garante que todos os campos de informação estão identificados e que a comunicação entre o *script Python* e o SGM ocorre de forma simples e precisa.

Assim, sempre que é necessário realizar um pedido de trabalho à manutenção, o *script* identificado no Anexo 12 utiliza a função “*def create\_maintenance\_request*” e a função “*def get\_access\_token*”. Estas duas funções trabalham em conjunto, com o objetivo de integrar a informação com o *software* de gestão da manutenção.

Numa primeira fase a função “*def get\_access\_token*” garante a autenticação do utilizador para acesso ao SGM e, de seguida, a função “*def create\_maintenance\_request*” garante que o pedido de manutenção é realizado no *software*.

No SGM o técnico visualiza o pedido de trabalho realizado conforme demonstrado na Figura 44.



The screenshot shows a web application window titled "Pedidos Manutenção". It features a table with the following columns: Pedido, Funcionário, Título, Objecto, Função / Fornecedor, Grau Urgência, Estado, OT, and Data OT. A single record is displayed with a green status indicator. Below the table is a legend titled "Legenda Estados" with icons and labels for various states: Pendente (grey circle), Orçamentado (calendar icon), Aprovado - Dentro Prazo (1) (green circle), Aprovado - Terminar Prazo (yellow circle), Aprovado - Fora Prazo (red circle), Rejeitado (red X), Em Atendimento (blue circle with arrow), and Concluído (calendar icon).

| Pedido | Funcionário | Título                              | Objecto              | Função / Fornecedor                  | Grau Urgência | Estado   | OT | Data OT |
|--------|-------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------|----------|----|---------|
| 90667  | DREBELO ... | Pump AH A4F O 56/10R-VZB25K99-S2196 | IMM-0052 - EN 1100 V | MAN.EMC - Electromechanics Injection | Normal        | Aprovado |    |         |

Legenda Estados

- Pendente
- Orçamentado
- Aprovado - Dentro Prazo (1)
- Aprovado - Terminar Prazo
- Aprovado - Fora Prazo
- Rejeitado
- Em Atendimento
- Atendido
- Concluído

1 Pedidos

Figura 44 - Visão do interface dos pedidos de trabalho no *software* de gestão da manutenção

O técnico de manutenção ao consultar o pedido de manutenção acede às informações necessárias para conseguir identificar o indicador em baixo desempenho e realizar tarefas de manutenção. Desta forma, o pedido de manutenção identifica o equipamento, o componente, o indicador e o valor da previsão.

A Figura 45, a título de exemplo, demonstra a informação que o pedido fornece ao técnico de manutenção.

The screenshot shows a software window titled "Pedido" (Request). It contains the following information:

- Título Pedido:** Pump AH A4FO 56/10R-VZB25K99-S2196
- N.º Pedido:** 90667
- Data Pedido:** 8/13/2024
- Grau Urgência:** 11:44
- Normal (48H)**
- Estado:** Aprovado
- Data Conclusão:** [Empty field]
- Funcionário:** DREBELO - Daniel Alexandre Martins Rebelo
- Aprovado Por:** DREBELO - Daniel Alexandre Martins Rebelo
- Grau Satisfação:** [Empty field]

Below the form, there are tabs for "Pedido", "Orçamento", "Ordens Trabalho", and "Mensagens". The "Mensagens" tab is active, showing a message box with the following text:

New work request created automatically because the value of 5 set for the health indicator S2\_Bearings has been exceeded.  
The forecast for the S2\_Bearings value to reach the limit value of 30 on average is 10/2024

At the bottom of the window, there are navigation buttons (back, forward, search), a page indicator "1 / 1", and action buttons "OK", "Cancelar", and "Aplicar".

Figura 45 - Detalhes do pedido de trabalho no *software* de gestão da manutenção

O valor da previsão fornece ao técnico de manutenção uma indicação sobre o tempo que dispõe para realizar o planeamento da ação de manutenção, evitando que o valor limite definido seja ultrapassado e o equipamento entre numa possível paragem produtiva não planeada.

A Figura 46 demonstra a integração da informação no SGM, no fluxo do plano de ação. Desta forma conclui-se a especificação de todas as fases centrais abordadas neste projeto.

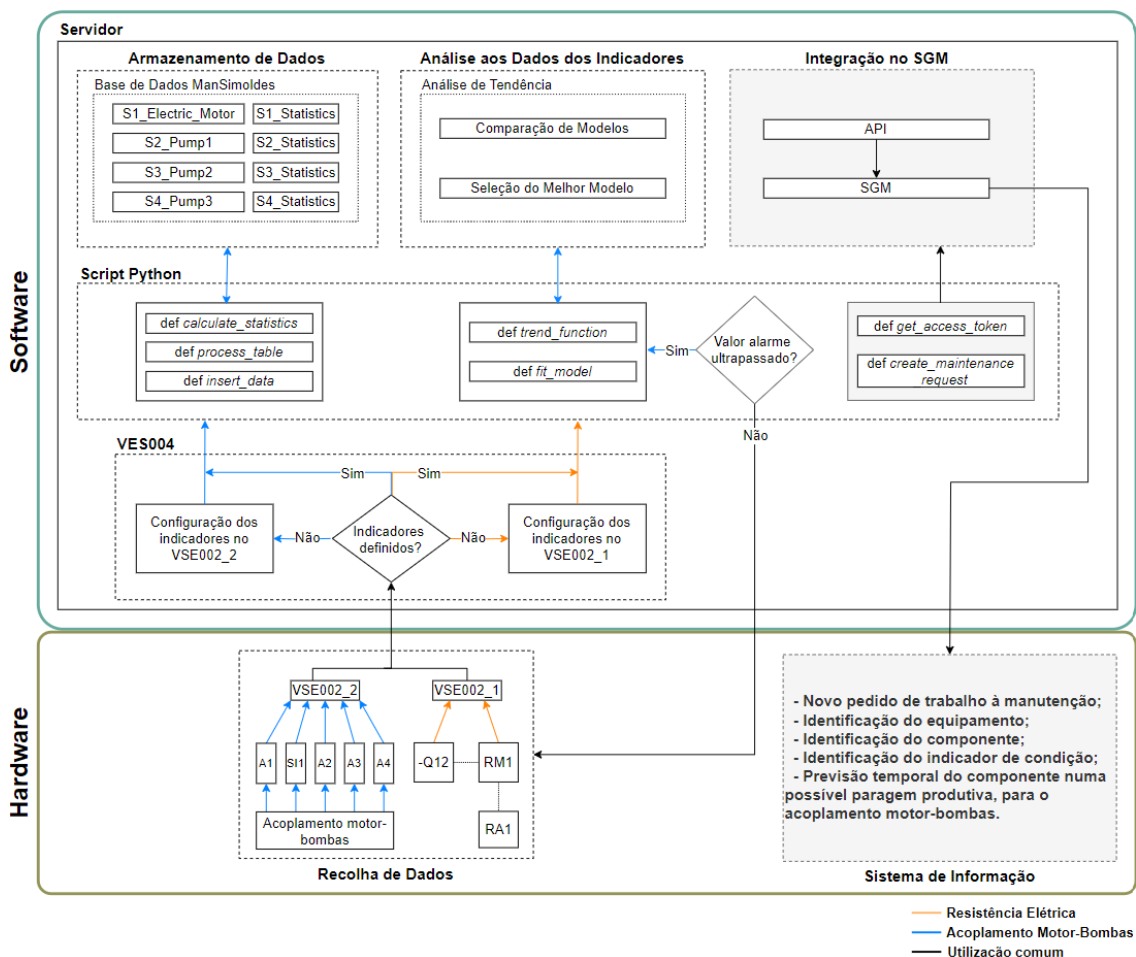


Figura 46 - Especificação da integração com SGM, no fluxo do plano de ação

## 4 Análise de Resultados

A análise dos resultados provenientes da solução implementada, realizou-se através de um conjunto de anomalias forçadas. Tal razão deveu-se ao facto da máquina de injeção ENGEL 1100 ter estado num período de interrupção produtiva, devido ao período de férias, que ocorreu nos períodos de julho, agosto e inícios de setembro. Assim, de modo a permitir a continuidade deste projeto, a análise de resultados foi realizada através da aquisição de dados em tempo real, mas com os dados provenientes de um ambiente simulado.

No referido ambiente simulado realizou-se a recolha de sinais elétricos e de vibração, tendo em consideração o padrão típico de um equipamento em falha. Relativamente aos dados de vibração, estes inicialmente apresentaram algumas oscilações mínimas referentes ao processo de produção, mas ao longo do tempo os valores de vibração aumentaram, apresentando valores mais elevados. Por fim, já num momento próximo do final de vida útil do componente, os valores foram cada vez mais altos seguindo um padrão exponencial.

### 4.1 Resistências elétricas

Com o objetivo de verificar-se a validade das medidas implementadas para garantir a operacionalidade das resistências elétricas, foram simuladas falhas elétricas no relé do comando -Q12 e na alimentação da resistência elétrica.

Inicialmente, simulou-se uma falha de sinal elétrico proveniente do relé de comando do aquecimento (-Q12). Desta forma, o *script* verificou que não existia sinal do relé -Q12 e, ao mesmo tempo, existia sinal elétrico na alimentação da resistência. Sendo assim a condição de falha foi estabelecida e automaticamente foi despoletada a ação para a abertura de um pedido de manutenção no *software* de gestão da manutenção. Assim, a equipa de manutenção foi informada que o relé de comando -Q12 estava com uma anomalia.

A Figura 47 e Figura 48, demonstram o pedido de manutenção realizado no SGM.

| Pedido | Funcionário | Título             | Objecto              | Função / Fornecedor               | Grau Urgência | OT | Data OT |
|--------|-------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------|----|---------|
| 90671  | DREBELO ... | -Q12 Circuit Board | IMM-0052 - EN 1100 V | MAN.EMC - Electromechanics Inj... | Normal        |    |         |

**Legenda Estados**

- Pendente
- Aprovado - Dentro Prazo (1)
- Rejeitado
- Em Atendimento
- Concluído
- Orçamentado
- Aprovado - Terminar Prazo
- Atendido
- Aprovado - Fora Prazo

Figura 47 - Pedido em lista de espera, proveniente da anomalia no relé de comando -Q12

**Pedido**

Título Pedido: -Q12 Circuit Board

N.º Pedido: 90671    Data Pedido: 8/30/2024    Grau Urgência: Normal (48H)    Estado: Aprovado    Data Conclusão:

Funcionário: DREBELO - Daniel Alexandre Martins Rebelo    Aprovado Por: DREBELO - Daniel Alexandre Martins Rebelo    Grau Satisfação:

Orçamento       

Pedido    Orçamento    Ordens Trabalho    Mensagens

Descrição    Destino    Diagnóstico    Documentos

New work request created automatically. The heating command has failed.  
The resistor is heating but the -Q12 circuit board is not sending a heating signal.

1 / 1           

Figura 48 - Descrição do pedido, proveniente da anomalia no relé de comando -Q12

De seguida simulou-se uma falha no sinal elétrico da alimentação da resistência elétrica. O *script* verificou que não existe alimentação elétrica na resistência e, ao mesmo tempo o relé de comando -Q12 emitiu sinal para que o aquecimento decorresse. Assim, foi verificada uma anomalia na resistência elétrica, dado que não existiu consumo de energia elétrica quando efetivamente deveria existir. Sendo assim, a condição de falha foi estabelecida e

automaticamente foi realizado um pedido de manutenção. A Figura 49 e Figura 50, demonstram o pedido de manutenção realizado no SGM.

| Pedido | Funcionário   | Título                      | Objecto              | Função / Fornecedor                  | Grau Urgência | OT | Data OT |
|--------|---------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------|----|---------|
| 90672  | DREBELO - ... | Injection Nozzle Resistance | IMM-0052 - EN 1100 V | MAN.EMC - Electromechanics Injection | Normal        |    |         |

Legenda Estados

- Pendente
- Orçamentado
- Aprovado - Dentro Prazo (1)
- Aprovado - Terminar Prazo
- Aprovado - Fora Prazo
- Rejeitado
- Em Atendimento
- Atendido
- Concluído

1 Pedidos

Figura 49 - Pedido em lista de espera, proveniente da anomalia na resistência elétrica

Título Pedido: Injection Nozzle Resistance

N.º Pedido: 90672 Data Pedido: 8/30/2024 00:00 Grau Urgência: Normal (48H) Estado: Aprovado Data Conclusão:

Funcionário: DREBELO - Daniel Alexandre Martins Rebelo Aprovado Por: DREBELO - Daniel Alexandre Martins Rebelo Grau Satisfação:

Orçamento

Pedido Orçamento Ordens Trabalho Mensagens

Descrição Destino Diagnóstico Documentos

New work request created automatically. The resistance of the injection nozzle is not working properly.

The -Q12 circuit board is sending the heating command, but the resistor is not heating correctly.

1 / 1

Figura 50 - Descrição do pedido, proveniente da anomalia na resistência elétrica

Dos quatro cenários identificados na Tabela 2 foram testados os dois cenários que identificam uma anomalia na resistência elétrica. Em suma, o projeto na vertente das resistências elétricas,

responde às necessidades identificadas para a monitorização do estado das resistências e na intervenção da equipa e manutenção segundo a condição das resistências elétricas.

## 4.2 Acoplamento motor-bombas

Para a análise dos resultados no acoplamento motor-bombas simulou-se para cada indicador armazenado na base de dados, cerca de 28 000 dados diários, durante 36 dias. Dos 28 000 dados diários registados foram realizados 36 registos estatísticos, nas tabelas de estatística diária, referente a esses dados.

No início da monitorização definiu-se o valor alarme de  $5\text{m/s}^2$  e um valor limite máximo de  $10\text{m/s}^2$  para o indicador S2\_Bearings. Ao longo da monitorização do indicado no trigésimo sexto dia, o valor do indicador ultrapassou 3 vezes o valor alarme definido. Sendo assim, verificou-se que a condição para a avaliação do estado dos rolamentos da bomba 1 (AH A4VSO 71 DFEH/10R-VZB25K99-S2332) foi abrangida.

De seguida iniciou-se a análise de tendência dos dados armazenados na tabela estatística S2\_Statistics. Esta análise incidiu na comparação dos modelos de linhas de tendência e na seleção da função tendência que melhor se ajustava aos dados históricos estatísticos do indicador. A Figura 51, demonstra a análise realizada. Os valores reais representados na figura, estão disponíveis no Anexo 13, na variável S2\_Bearings\_Avg.

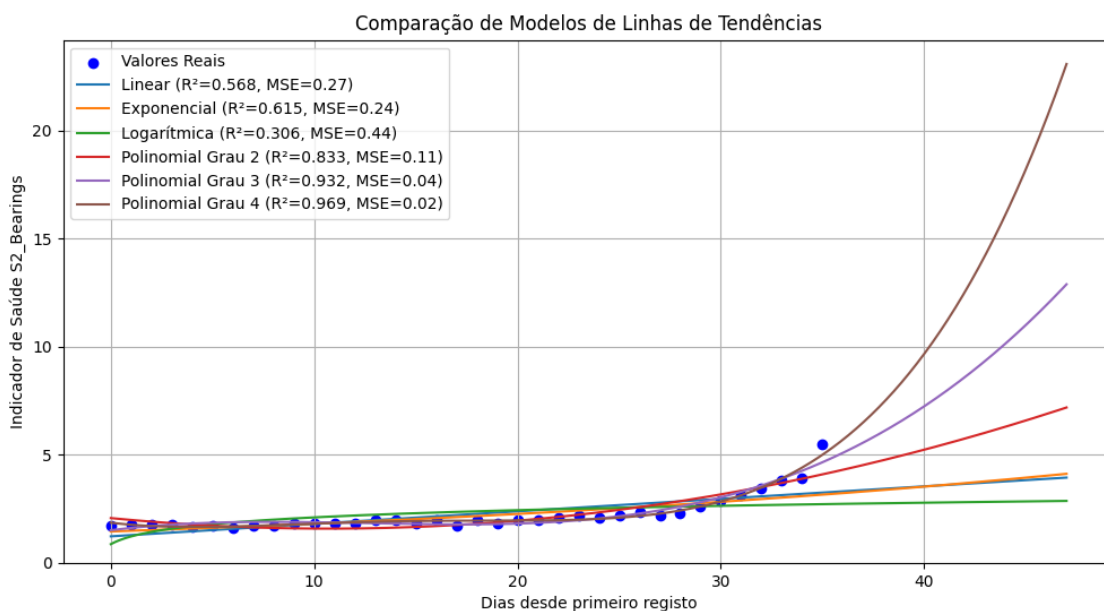


Figura 51 - Ajustamento das funções de tendência de acordo com os dados históricos do indicador de condição S2\_Bearings

Após a análise de dados, a função que melhor se ajustou aos dados históricos foi a função polinomial de grau 4. Desta forma, através da função de tendência, foi possível prever o mês e ano em que o valor do indicador S2\_Bearings atinge o valor limite.

A Figura 52 demonstra a função tendência que melhor se ajustou ao indicador de condição, o valor alarme e o valor limite máximo.

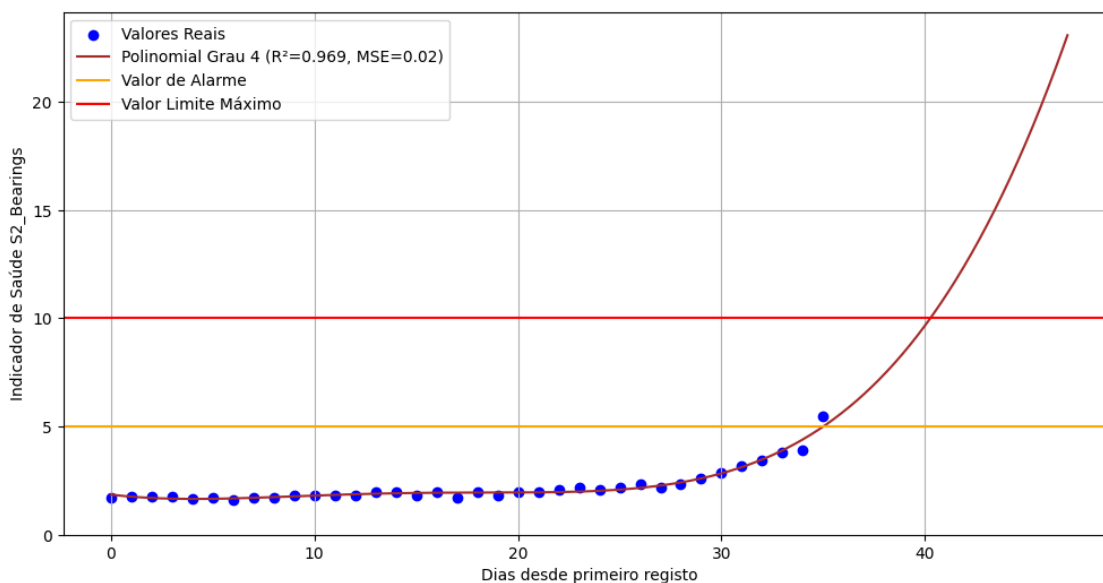


Figura 52 - Função tendência que melhor se ajusta aos dados históricos do indicador de condição S2\_Bearings

Verificou-se que a estimativa para o valor do indicador S2\_Bearings atingir o limite máximo definido era, sensivelmente, no quadragésimo primeiro dia após o primeiro registo, conforme demonstrado na interseção da função tendência com o valor limite máximo (Figura 52).

O primeiro registo na base de dados é referente ao dia 27 de julho de 2024. Sendo assim, após quarenta e um dias a função tendência prevê que no início de setembro de 2024 o valor limite máximo será ultrapassado.

Após a previsão realizada a informação temporal da previsão, o componente e toda a informação do indicador foi enviada para o SGM, através da abertura de um novo pedido de manutenção.

Na Figura 53 e Figura 54 é possível verificar o pedido de manutenção realizado com o número 90669.

| Pedido | Funcionário   | Título                                       | Objecto              | Função / Fornecedor                  | Grau Urgência | OT | Data OT |
|--------|---------------|--|----------------------|--------------------------------------|---------------|----|---------|
| 90669  | DREBELO - ... | Pump 1 - AH A4VSO 71 DFEH/10R-VZB25K99-S2332 | IMM-0052 - EN 1100 V | MAN.EMC - Electromechanics Injection | Normal        |    |         |

Legenda Estados

- Pendente
- Orçamentado
- Aprovado - Dentro Prazo (1)
- Aprovado - Terminar Prazo
- Aprovado - Fora Prazo
- Rejeitado
- Em Atendimento
- Atendido
- Concluído

Figura 53 - Pedido em lista de espera, proveniente da anomalia nos rolamentos da Bomba 1

Título Pedido: Pump 1 - AH A4VSO 71 DFEH/10R-VZB25K99-S2332

N.º Pedido: 90690    Data Pedido: 8/31/2024    16:25    Grau Urgência: Normal (48H)    Estado: Aprovado    Data Conclusão:

Funcionário: DREBELO - Daniel Alexandre Martins Rebelo    Aprovado Por: DREBELO - Daniel Alexandre Martins Rebelo    Grau Satisfação:

Orçamento       

Pedido    Orçamento    Ordens Trabalho    Mensagens

Descrição    Destino    Diagnóstico    Documentos

New work request created automatically because the trigger value (5m/s) set for the health indicator S2\_Bearings has been exceeded.

The bearings in Pump 1 - AH A4VSO 71 DFEH/10R-VZB25K99-S2332 are starting to degrade.

The average value of S2\_Bearings is expected to reach the maximum degradation limit value (30m/s) in 09/2024.

OK    Cancelar    Aplicar

Figura 54 - Descrição do pedido, proveniente da anomalia nos rolamentos da Bomba 1

A partir do momento que o pedido de manutenção fica registado no SGM, a equipa de manutenção faz o seguimento deste pedido.

Após ser atendido, este sai da lista de pedidos e passa ao estado de atendido, quando existe uma ordem de trabalho que lhe seja associada e sirva de comprovativo para a resposta dada pelos técnicos ao problema. Desta forma, verificou-se que todo o fluxo de avaliação e

monitorização do indicador foi realizado com sucesso. Para os restantes indicadores foram realizados vários testes e todo o fluxo corresponde exatamente ao que era pretendido.

Após o processo de avaliação e monitorização de um indicador decorrer, o *script* continua a monitorizar todos os indicadores. No entanto, para o indicador avaliado, o valor alarme e o valor limite máximo são incrementados, segundo uma percentagem definida na parametrização do *script*. Sendo assim, existe uma contínua monitorização dos indicadores que permite o acompanhamento e ajustamento do *script* aos dados recolhidos, armazenados e avaliados.

Em suma, verificou-se que todos os procedimentos implementados neste projeto, para a otimização das paragens produtivas através de do controlo da condição dos componentes críticos, estão operacionais e o fluxo está a decorrer conforme planeado e implementado, sendo possível controlar o estado dos componentes e atuar segundo a condição dos mesmos.



## 5 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo principal a implementação de uma estratégia de manutenção preditiva na máquina de injeção ENGEL 1100 da Simoldes Plásticos, com o objetivo de reduzir as paragens produtivas não planeadas e, conseqüentemente, otimizar a eficiência operacional da empresa. Ao longo deste projeto, foram abordados vários aspetos críticos, desde a revisão bibliográfica sobre a manutenção preditiva até à aplicação prática da metodologia *Action Research* no ambiente industrial da Simoldes Plásticos.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica que abordou os diferentes tipos de manutenção, com especial foco na manutenção preditiva, bem como na relevância da análise de vibrações e a integração dessas técnicas com os conceitos da Indústria 4.0. Esta base teórica foi importante para fundamentar as decisões tomadas ao longo do projeto, especialmente na escolha das tecnologias e metodologias a serem aplicadas.

Em seguida, a realização do diagnóstico inicial permitiu identificar os componentes críticos da máquina de injeção ENGEL 1100, nomeadamente as resistências elétricas e o acoplamento motor-bombas, que se mostraram fundamentais para a continuidade produtiva e que não sendo monitorizados adequadamente, poderiam causar paragens não planeadas significativas. O plano de ação, num momento inicial, foi desenvolvido de forma macro. Desta forma, identificaram-se as diferentes fases que necessitavam de uma análise específica e também os recursos de *hardware* e *software*. Ao longo deste projeto o plano de ação foi desmultiplicado e cada fase foi sendo especificada.

A fase de implementação envolveu a escolha e instalação de acelerómetros e sensores indutivos, bem como a configuração de uma ferramenta de diagnóstico avançada (VSE002), que foi programada para monitorizar em tempo real os indicadores de condição definidos. Esses indicadores foram cuidadosamente configurados para capturar dados relevantes sobre o estado dos componentes críticos, permitindo o acompanhamento e deteção precoce de anomalias e, numa fase posterior, a intervenção por parte da equipa de manutenção.

Os resultados alcançados demonstram que o sistema de manutenção preditiva implementado é eficaz na deteção de falhas iminentes, permitindo uma resposta rápida e proativa por parte da equipa de manutenção. A integração dos indicadores com o *software* de gestão da manutenção (através da API) mostrou-se uma solução robusta para assegurar que a informação

chegue diretamente à equipa de manutenção, facilitando as tomadas de decisões e o início das operações.

Para responder à questão de investigação, “Como reduzir as paragens produtivas da máquina ENGEL 1100 através da realização de manutenção preditiva?”, este trabalho comprovou que a implementação da estratégia de manutenção preditiva foi fundamental para alcançar esse objetivo. Através da monitorização contínua dos componentes críticos, como as resistências elétricas e o acoplamento motor-bombas, foi possível detetar falhas iminentes com antecedência, permitindo à equipa de manutenção intervir de forma proativa. A integração das tecnologias de diagnóstico e o uso da ferramenta VSE002 foram essenciais para garantir que os dados críticos fossem analisados em tempo real, possibilitando uma gestão mais eficiente e reduzindo significativamente as paragens não planeadas da máquina.

Com a monitorização do estado das resistências e do acoplamento motor-bombas é necessário estruturar novamente o plano de manutenção preventiva sistemática da máquina de injeção ENGEL 1100. A condição dos componentes que atualmente é monitorizada permite que as tarefas referentes a estes componentes sejam removidas do plano de manutenção preventiva, dado que neste momento a equipa de manutenção realiza as tarefas de manutenção de acordo com a condição dos componentes. Desta forma, os custos de manutenção são reduzidos e a disponibilidade dos técnicos para realizarem outras tarefas de manutenção aumenta.

No entanto, como em qualquer projeto, surgiram desafios que merecem uma reflexão crítica. Um dos aspetos positivos foi a capacidade do sistema prever o momento em que os componentes estavam prestes a falhar, o que é um grande avanço em termos de eficiência operacional e redução de custos. Por outro lado, o fato dos testes terem sido realizados em um ambiente simulado, devido à baixa produtividade durante o período de implementação, levanta a necessidade de validar os resultados em condições reais e sustentáveis de operação. Esta limitação impede uma avaliação completa da eficácia do sistema em situações de produção contínua.

Além disso, devido à complexidade do sistema produtivo, são necessários ajustes finos nos valores alarme e nos valores limite dos indicadores. Este projeto exige um acompanhamento inicial na fase de implementação. A personalização do sistema para diferentes condições de operação também pode ser vista como uma área que requer uma inicial monitorização contínua, para garantir que o sistema continua a fornecer resultados precisos e relevantes.

Com base na experiência adquirida e nos resultados obtidos, é possível identificar várias áreas de investigação e desenvolvimento que podem ser exploradas em trabalhos futuros. Em primeiro lugar, deverá existir a validação do sistema em condições reais de operação, para assegurar que os resultados simulados correspondem ao desempenho real num ambiente produtivo. A expansão da aplicação do sistema para outros equipamentos críticos na Simoldes Plásticos poderia também ser considerada, aumentando assim a abrangência e o impacto da manutenção preditiva na empresa.

Outra área promissora seria a utilização de *Big Data* para a identificação de padrões que não são evidentes numa análise de tendência. A identificação de padrões necessita de uma monitorização contínua de dados reais durante alguns anos, para ser possível verificar a instabilidade do equipamento ao longo do tempo, no qual a duração deste projeto não permitiu o abranger dessa vertente.

Por fim, o desenvolvimento de *interfaces* mais intuitivas e a melhoria da integração entre os diferentes sistemas de gestão utilizados na Simoldes Plásticos poderiam simplificar o uso do sistema por parte dos técnicos de manutenção, reduzindo a curva de aprendizagem e aumentando a eficiência operacional.

Em conclusão, este projeto demonstra a viabilidade e a importância da manutenção preditiva como uma ferramenta estratégica para a indústria automotiva. Embora os resultados obtidos num ambiente simulado sejam promissores, a transição para testes em condições reais será crucial para validar plenamente a eficácia do sistema. As sugestões para trabalhos futuros oferecem um caminho claro para a evolução e melhoria contínua deste projeto, com o potencial de tornar a Simoldes Plásticos ainda mais competitiva no mercado global.



# Referências

- (Achouch et al., 2022) Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Sattarpanah Karganroudi, S., Dhouib, R., Ibrahim, H., & Adda, M. (2022). On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges. *Applied Sciences*, 12(16), Artigo 16. <https://doi.org/10.3390/app12168081>
- (Alavian et al., 2019) Alavian, P., Eun, Y., Liu, K., Meerkov, S. M., & Zhang, L. (2019). The  $(\alpha, \beta)$ -Precise Estimates of MTBF and MTTR: Definitions, Calculations, and Induced Effect on Machine Efficiency Evaluation \*\*This work was supported by the DGIST R&D Program of the Ministry of Science, ICT and Future Planning (18-EE-01). *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1004–1009. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.326>
- (Bassil, 2012) Bassil, Y. (2012). A Comparative Study on the Performance of the Top DBMS Systems (arXiv:1205.2889). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1205.2889>
- (Ben-Daya et al., 2009) Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., Raouf, A., Knezevic, J., & Ait-Kadi, D. (Eds.). (2009). *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-472-0>
- (Breiman, 2001) Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- (Compare et al., 2020) Compare, M., Baraldi, P., & Zio, E. (2020). Challenges to IoT-Enabled Predictive Maintenance for Industry 4.0. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(5), 4585–4597. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2957029>
- (Dalzochio et al., 2020) Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., & Barbosa, J. (2020). Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges. *Computers in Industry*, 123, 103298. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103298>
- (Eden & Ackermann, 2018) Eden, C., & Ackermann, F. (2018). Theory into practice, practice to theory: Action research in method development. *European Journal of Operational Research*, 271(3), 1145–1155. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.061>
- (Frumosu et al., 2020) Frumosu, F., Ronsch, G., & Kulahci, M. (2020). Full article: Mould wear-out prediction in the plastic injection moulding industry: A case study. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0951192X.2020.1829062>
- (Goyal & Pabla, 2016) Goyal, D., & Pabla, B. S. (2016). The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23, 585-594.
- (Gruner et al., 2015) Grüner, S., Pfrommer, J., & Palm, F. (2015). A RESTful extension of OPC UA. 2015 IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS), 1–4. <https://doi.org/10.1109/WFCS.2015.7160557>
- (Hamasha et al., 2023) Hamasha, M. M., Bani-Irshid, A. H., Al Mashaqbeh, S., Shwaheen, G., Al Qadri, L., Shbool, M., Muathen, D., Ababneh, M., Harfoush, S., Albedoor, Q., & Al-Bashir, A. (2023). Strategical selection of maintenance type under different conditions. *Scientific Reports*, 13(1), Artigo 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5>

- (Lyat, 2022) Lyat Avidor Peleg. (2022, janeiro 5). Downtime Cost in Process Manufacturing. Precognize. <https://precog.co/blog/downtime-cost-process-manufacturing/>
- (Javaid et al., 2021) Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., & Suman, R. (2021). Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sensors International*, 2, 100110. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100110>
- (Javaid et al., 2022) Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 203–217. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.01.008>
- (Kamariotis et al., 2024) Kamariotis, A., Tatsis, K., Chatzi, E., Goebel, K., & Straub, D. (2024). A metric for assessing and optimizing data-driven prognostic algorithms for predictive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 242, 109723. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109723>
- (Khazaelpour & Zolfane, 2024) Khazaelpour, P., & Zolfani, S. H. (2024). FUCOM-optimization based predictive maintenance strategy using expert elicitation and Artificial Neural Network. *Expert Systems with Applications*, 238, 121322. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121322>
- (Lee et al., 2019) Lee, J., Cameron, I., & Hassall, M. (2019). Improving process safety: What roles for Digitalization and Industry 4.0? *Process Safety and Environmental Protection*, 132, 325–339. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.021>
- (Lee et al., 2020) Lee, J., Ni, J., Singh, J., Jiang, B., Azamfar, M., & Feng, J. (2020). Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(110805). <https://doi.org/10.1115/1.4047856>
- (Li & Wang & He, 2016) Li, Z., Wang, K., & He, Y. (2016). Industry 4.0—Potentials for Predictive Maintenance. 42–46. <https://doi.org/10.2991/iwama-16.2016.8>
- (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019) Lughofer, E., & Sayed-Mouchaweh, M. (2019). Prologue: Predictive Maintenance in Dynamic Systems | SpringerLink. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-05645-2\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-05645-2_1)
- (Marques & Brito, 2019) Marques, A. C., & Brito, J. N. (2019). Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos / Importance of predictive maintenance to reduce maintenance costs and increase equipment life. *Brazilian Journal of Development*, 5(7), 8913–8923. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n7-095>
- (Martins et al., 2020) Martins, R., Pereira, M. T., Ferreira, L. P., Sá, J. C., & Silva, F. J. G. (2020). Warehouse operations logistics improvement in a cork stopper factory. *Procedia Manufacturing*, 51, 1723–1729. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.240>
- (Mobius Institute, 2020) Mobius Institute. (2020). *Análise de Vibrações—Categoria II*
- (Moblely, 2002) Mobley, R. K. (2002). 6—Predictive Maintenance Techniques. Em R. K. Mobley (Ed.), *An Introduction to Predictive Maintenance (Second Edition)* (pp. 99–113). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075067531-4/50006-3>

- (Morgan & Chu, 2022) Morgan, W. J., & Chu, H.-Y. (2022). Development of a Reliable Vibration Based Health Indicator for Monitoring the Lubricating Condition of the Toggle Clamping System of a Plastic Injection Molding Machine. *Applied Sciences*, 12(1), Artigo 1. <https://doi.org/10.3390/app12010196>
- (Muchiri et al, 2011) Muchiri, P., Pintelon, L., Gelders, L., & Martin, H. (2011). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.039>
- (E-REDES, 2024) Quais os limites estabelecidos pela legislação nacional? | E-REDES. (sem data). Obtido 9 de julho de 2024, de <https://www.e-redes.pt/pt-pt/quais-os-limites-estabelecidos-pela-legislacao-nacional>
- (Rawat, 2020) Rawat, A. (2020). A Review on Python Programming. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 3(12), Artigo 12.
- (Rousopoulou et al., 2020) Rousopoulou, V., Nizamis, A., Vafeiadis, T., Ioannidis, D., & Tzovaras, D. (2020). Predictive Maintenance for Injection Molding Machines Enabled by Cognitive Analytics for Industry 4.0. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 3. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frai.2020.578152>
- (Sakurai & Zuchi, 2018) Sakurai, R., & Zuchi, J. D. (2018). As revoluções industriais até a indústria 4.0. *Revista Interface Tecnológica*. 15(2), 480–491.
- (Simeón, 2008) Simeón, E. J. A. (2008). UMA METODOLOGIA PARA O PROGNÓSTICO DE CONFIABILIDADE DE MÁQUINAS USANDO ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.
- (Simoldes, 2023) SIMOLDES 4.0. Simoldes. Obtido 15 de dezembro de 2023, de <https://www.simoldes.com/innovation-tools/simoldes-4-0/>
- (Siqueira & Davis, 2022) Siqueira, F., & Davis, J. G. (2022). Service Computing for Industry 4.0: State of the Art, Challenges, and Research Opportunities. *ACM Computing Surveys*, 54(9), 1–38. <https://doi.org/10.1145/3478680>
- (Signed, sem data) Signed. O que é o Efeito Joule | Glossário. Goldenergy. Obtido 25 de julho de 2024, de <https://goldenergy.pt/glossario/efeito-joule/>
- (Sokolski, 2023) Sokolski, P. (2023). Assessment of Suitability for Long-Term Operation of a Bucket Elevator: A Case Study. *Energies*, 16(23), Artigo 23. <https://doi.org/10.3390/en16237852>
- (Večeř et al., 2005) Večeř, P., Kreidl, M., & Šmíd, R. (2005). Condition Indicators for Gearbox Condition Monitoring Systems. *Acta Polytechnica*, 45(6), Artigo 6. <https://doi.org/10.14311/782>
- (Vishwakarma et al., 2017) Vishwakarma, M., Purohit, R., Harshlata, V., & Rajput, P. (2017). Vibration Analysis & Condition Monitoring for Rotating Machines: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2, Part A), 2659–2664. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.140>
- (Wang et al., 2016) Wang, K., Wang, Y., Strandhagen, J. O., & Yu, T. (2016). *Advanced Manufacturing and Automation V*. WIT Press.
- (Ylipää, et al., 2017) Ylipää, T., Skoogh, A., Bokrantz, J., & Gopalakrishnan, M. (2017). Identification of maintenance improvement potential using OEE assessment. *International Journal of Productivity and Performance*

Management, 66(1), 126–143. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-01-2016-0028>

# Anexos

## Anexo 1 – Plano de Manutenção ENGEL 1100

| Título Tarefa                        | Descrição Tarefa  | Periodicidade (Semanas) |
|--------------------------------------|---|-------------------------|
| Quadro elétrico comando/distribuição | - Limpeza geral e substituição de filtros de ar   | 13                      |
| Sistema de segurança                 | - Testar individualmente todas as emergências (botoneiras e porta traseira)<br>- Testar estrado de segurança (se aplicável)<br>- Testar borrachas anti impacto porta operador<br>- Testar proteção da unidade de injeção<br>- Testar disparo do diferencial   | 13                      |
| Bico Injeção                         | Verificar centragem do bico (OK=1 / NOK=-1)   | 13                      |
| Ventiladores / Motores               | - Verificar estado e funcionamento de todos os ventiladores (armário elétrico, comando, bombas)<br>- Limpar grelhas de ventilação dos motores elétricos (se aplicável)  | 13                      |
| Lubrificação                         | - Atestar lubrificante nos patins (unidade injeção, cilindro injeção, tremonha, unidade fecho)<br>- Atestar lubrificante (rotulas, hastes cilindros carro e fecho, motor) quando aplicável.<br>- Atestar lubrificante no rolete de apoio unidade injeção, guia de deslizamento da unidade fecho<br>- Lubrificadores Perma, verificar e substituir se necessário (quando aplicável)<br>- Atestar lubrificante nos movimentos (rolos doseadores de cola, sem fim do movimento vertical, Chumaceiras movimento vertical) quando aplicável. | 13                      |
| Variador Elétrico de Velocidade      | - Limpeza do quadro elétrico e sistema de refrigeração  | 13                      |

---

|  |  |     |
|--|--|-----|
| Resistências de Aquecimento                            | - Medir consumo resistências (com pinça amperimétrica);<br>- Verificar estado cabos e aperto   | 26  |
| Fluxómetro   | - Limpeza geral do fluxómetro  | 26  |
| Acoplamento motor-bombas                               | - Verificar estado estrela flexível/Verificar fixação bomba  | 26  |
| Filtro Y Água<br>Permutador Óleo e entrada de material | - Desmontagem e limpeza do filtro  | 26  |
| Quadro Elétrico -<br>Limpeza e verificação             | - Aspirar e limpar quadro elétrico, verificar fichas e conectores  | 52  |
| Ligações Elétricas -<br>Termografia                    | - Realizar a análise termográfica aos motores elétricos/ligações elétricas, conforme a ficha de instrução em anexo, nos documentos da ordem de trabalho. | 52  |
| Variador Elétrico de<br>Velocidade                     | - Verificar funcionamento ventiladores dos variadores (parte de potência)  | 52  |
| Filtros de óleo  | - Substituição dos Filtros   | 52  |
| Articulações /<br>Guiamentos / Patins                  | - Verificar estado / folgas  | 52  |
| Pratos   | - Verificar estado geral das roscas  | 52  |
| Óleo Hidráulico -<br>Recolha                           | - Mandar analisar óleo   | 52  |
| Óleo Hidráulico -<br>Resultado                         | - Resultado da análise (OK=1 / ATENÇÃO=-1 / NOK=-2)  | 52  |
| Nivelamento /<br>Paralelismo                           | - Verificar 1º Nivelamento e 2º Paralelismo  | 104 |

---

---

|                                 |   |     |
|---------------------------------|---|-----|
| Variador de velocidade elétrico | - Medir consumo do motor em vazio e registar (OK se <=2A)       | 156 |
| Motor Hidráulico Plastificação  | - Mudança Óleo Chumaceira Axial ALPHASYN HTX 460 ou equivalente | 260 |
| Bombas Hidráulicas              | - Verificar estado bombas. Substituir vedantes se necessário.   | 260 |

---

# Anexo 2 – Ficha Técnica Relé DIA53S72420AF

## Monitoring Relays 1-Phase AC Over Current Type DIA53



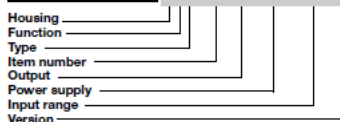
- 2-wire connection
- Self-powered
- Input ranges: 2 - 20 AAC, 5 - 50 AAC or 10 - 100 AAC
- Knob-adjustable set-point
- Output: Normally open, 100 mA
- LED indication for output ON
- For mounting on DIN-rail in accordance with DIN/EN 50 022
- 17.5 mm DIN-rail housing (DIN 43880)

### Product Description

Small current monitoring relay with built-in current transformer with adjustable set-point and integrated solid state output. Self-powered and 2-wire connection for easy use.

12 mm hole for insulated current carrying wire makes it suitable for most applications. For mounting on DIN-rail, 17.5 mm wide housing suitable both for back and front panel mounting.

### Ordering Key **DIA 53 S 724 20A F**



### Type Selection

| Input current | Reaction time | Type no.          |
|---------------|---------------|-------------------|
| 2 - 20 AAC    | Standard      | DIA53 S724 20A    |
| 5 - 50 AAC    | Standard      | DIA53 S724 50A    |
| 10 - 100 AAC  | Standard      | DIA53 S724 100A   |
| 2 - 20 AAC    | Fast          | DIA53 S724 20A F  |
| 5 - 50 AAC    | Fast          | DIA53 S724 50A F  |
| 10 - 100 AAC  | Fast          | DIA53 S724 100A F |

### Output Specifications

|                                |                            |
|--------------------------------|----------------------------|
| Output                         | NPN-PNP open collector, NO |
| Output current                 |                            |
| Maximum load current           | 100 mA                     |
| Leakage current                | ≤ 100 µA                   |
| Max. voltage                   | 40 VDC                     |
| Voltage drop (U <sub>d</sub> ) | < 2.5 VDC                  |

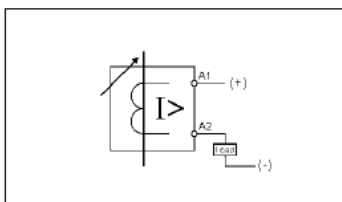
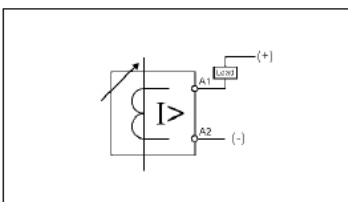
### Input Specifications

|                                  | DIA53 S 724 20A    | DIA53 S 724 50A    | DIA53 S 724 100A     |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Current range                    | 2 - 20 AAC @ 50 Hz | 5 - 50 AAC @ 50 Hz | 10 - 100 AAC @ 50 Hz |
| Max. current (continuously)      | 40 AAC             | 100 AAC            | 150 AAC              |
| Max. overload current (t = 30 s) | 200 AAC            | 200 AAC            | 200 AAC              |

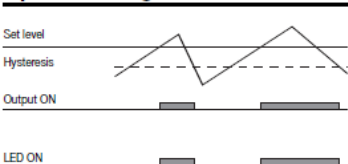
### General Specifications

|                                     |   |                                      |  |
|-------------------------------------|---|--------------------------------------|--|
| Reaction time<br>DIA53              | < 300 ms<br>(input signal variation from -20% to +20% of set value) | Weight                               | 80 g   |
| DIA53...F                           | < 50 ms<br>(input signal variation from -20% to +20% of set value)  | Screw terminals<br>Tightening torque | Max. 0.5 Nm<br>acc. to IEC 60947                       |
| Repeatability                       | 0.5 %   | Housing<br>Dimensions<br>Material    | 17.5 x 81 x 67.2 mm<br>PA66 or Noryl                   |
| Hysteresis<br>(Differential travel) | 7 - 13% of setpoint   | Product standard                     | EN 60255-6   |
| Frequency range                     | 45 - 400 Hz   | Approval                             | UL, CSA  |
| Temperature variation               | ±0.20%/°C of setpoint   | CE Marking                           | L.V. Directive 2006/95/EC<br>EMC Directive 2004/108/EC |
| Environment<br>Degree of protection | IP 20   | EMC<br>Immunity                      | According to EN 60255-26<br>According to EN 61000-6-2  |
| Pollution degree                    | 3   | Emissions                            | According to EN 60255-26<br>According to EN 61000-6-3  |
| Operating temperature               | -20 to +60°C  |                                      |  |

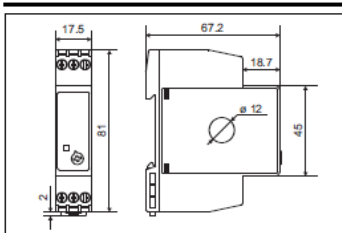
### Wiring Diagrams



### Operation Diagram



### Dimensions

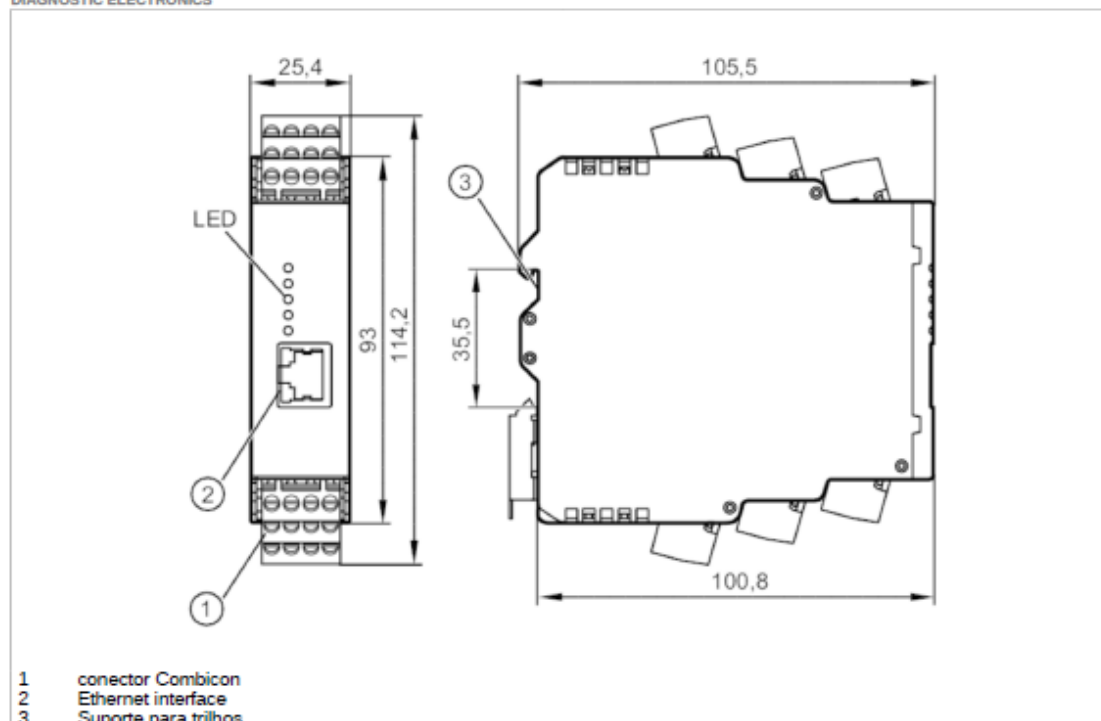


## Anexo 3 – Ficha Técnica VSE002

### VSE002

Eletrónica diagnóstica para sensor diagnóstico de vibração

DIAGNOSTIC ELECTRONICS



| Características do produto                |   |
|---|---|
| Escala de frequência [Hz]                 | 0,1...12000   |
| Interface de comunicação                  | Ethernet  |
| Aplicação                                 |   |
| Formato                                   | pode ser parametrizado pelo software de PC VES004   |
| Aplicação                                 | monitoramento de vibração contínuo  |
| Dados elétricos                           |   |
| Tolerância da tensão de funcionamento [%] | 20  |
| Tensão de funcionamento [V]               | 24 DC; (na utilização da entrada IEPE: 24 V + 20%; IEPE = Integrated Electronics Piezo Electric)  |
| Consumo de corrente [mA]                  | 200; ((24 V DC))  |
| Classe de proteção                        | III   |
| Entradas/saídas                           |   |
| Quantidade total de entradas e saídas     | 8; (configurável)   |
| Quantidade de entradas e saídas           | Quantidade de entradas analógicas: 2; Quantidade de entradas dinâmicas: 4; Quantidade de saídas digitais: 2; Quantidade de saídas analógicas: 1 |
| Entradas                                  |   |
| Quantidade total de entradas              | 6   |

## VSE002



### Eletrônica diagnóstica para sensor diagnóstico de vibração

#### DIAGNOSTIC ELECTRONICS

|   |                  |  |
|---|------------------|--|
| Quantidade de entradas analógicas                         |                  | 2  |
| Entrada analógica (corrente) [mA]                         |                  | 4...20   |
| Resolução da entrada analógica                            |                  | 12   |
| Quantidade de entradas dinâmicas                          |                  | 4  |
| Entrada dinâmica - sinal                                  |                  | 0...10 mA / IEPE / 4...20 mA                             |
| Entrada dinâmica - resolução [bit]                        |                  | 16   |
| Entrada dinâmica - faixa de frequência [Hz]               |                  | 0,1...12000  |
| Entrada dinâmica - taxa de sampling [kSamples]            |                  | 100  |
| <b>Saídas</b>   |                  |  |
| Quantidade total de saídas                                |                  | 2  |
| Sinal de saída  |                  | sinal de comutação; sinal analógico                      |
| Conexão elétrica  |                  | PNP  |
| Quantidade de saídas digitais                             |                  | 2; (configurável)  |
| Função de saída   |                  | normalmente aberto/normalmente fechado; (parametrizável) |
| Queda de tensão máx. da saída de comutação DC [V]         |                  | 2  |
| Corrente nominal permanente da saída de comutação DC [mA] |                  | 100  |
| Quantidade de saídas analógicas                           |                  | 1; (configurável)  |
| Corrente da saída analógica [mA]                          |                  | 4...20   |
| Carga máx. [Ω]  |                  | 500  |
| Proteção contra curto-circuito                            |                  | sim  |
| Tipo de proteção contra curto-circuito                    |                  | por impulso  |
| Proteção contra sobrecarga                                |                  | sim  |
| <b>Faixa de medição / de ajuste</b>                       |                  |  |
| Escala de frequência [Hz]                                 |                  | 0,1...12000  |
| <b>Interfaces</b>   |                  |  |
| Interface de comunicação                                  |                  | Ethernet   |
| Taxa de transmissão                                       |                  | 10 MBaud; 100 MBaud                                      |
| Protocolo   |                  | TCP/IP   |
| <b>Condições de funcionamento</b>                         |                  |  |
| Temperatura ambiente [°C]                                 |                  | 0...70   |
| Temperatura de armazenamento [°C]                         |                  | 0...70   |
| Proteção  |                  | IP 20  |
| <b>Testes/aprovações</b>                                  |                  |  |
| CEM   | EN IEC 61000-6-2 |  |
|   | EN IEC 61000-6-4 |  |
| MTTF [anos]   |                  | 101  |

## VSE002



### Eletrônica diagnóstica para sensor diagnóstico de vibração

DIAGNOSTIC ELECTRONICS  
Aprovação UL

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Ta                    | 70 °C                                     |
| Enclosure type        | Type 1                                    |
| tensão de alimentação | Limited Voltage/Current (Marking Class 2) |

| Dados mecânicos             |  |
|-----------------------------|--|
| Peso [g]                    | 323,1  |
| Invólucro                   | carcaça plástica   |
| Tipo de montagem            | trilho: (TH35/EN60715)                                     |
| Dimensões [mm]              | 100 x 25,4 x 103,4   |
| Materiais                   | PA   |
| Memória de dados            |  |
| Memória histórica           | sim  |
| Memória de dados armazenada | sim  |
| Versão da memória de dados  | memória cíclica; FIFO                                      |
| Clock de tempo real (RTC)   | sim  |
| Local de armazenamento      | interna  |
| Intervalo de armazenamento  | min. 1 min   |
| Tamanho da memória          | 881664 registros   |
| Acessórios                  |  |
| Acessórios (opcional)       | cabo patch de Ethernet cruzado para a conexão direta ao PC |
| Notas                       |  |
| Quantidade da embalagem     | 1 peças  |

## VSE002



### Eletrônica diagnóstica para sensor diagnóstico de vibração

DIAGNOSTIC ELECTRONICS  
Aprovação UL

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Ta                    | 70 °C                                     |
| Enclosure type        | Type 1                                    |
| tensão de alimentação | Limited Voltage/Current (Marking Class 2) |

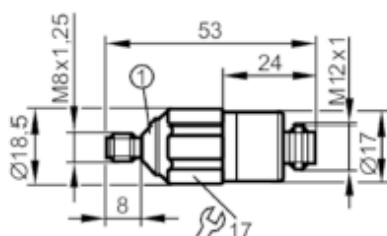
| Dados mecânicos             |  |
|-----------------------------|--|
| Peso [g]                    | 323,1  |
| Invólucro                   | carcaça plástica   |
| Tipo de montagem            | trilho: (TH35/EN60715)                                     |
| Dimensões [mm]              | 100 x 25,4 x 103,4   |
| Materiais                   | PA   |
| Memória de dados            |  |
| Memória histórica           | sim  |
| Memória de dados armazenada | sim  |
| Versão da memória de dados  | memória cíclica; FIFO                                      |
| Clock de tempo real (RTC)   | sim  |
| Local de armazenamento      | interna  |
| Intervalo de armazenamento  | min. 1 min   |
| Tamanho da memória          | 881664 registros   |
| Acessórios                  |  |
| Acessórios (opcional)       | cabo patch de Ethernet cruzado para a conexão direta ao PC |
| Notas                       |  |
| Quantidade da embalagem     | 1 peças  |

## Anexo 4 – Ficha Técnica Acelerómetro VSA001

### VSA001

Sensor de aceleração

VIBRATION SENSOR



1 ângulo do cone = 90°



| Características do produto             |        |   |
|--|--------|---|
| Intervalo de medição de vibração       | [g]    | -25...25  |
| Escala de frequência                   | [Hz]   | 1...6000  |
| Princípio de medição                   |        | capacitivo  |
| Aplicação                              |        |   |
| Formato                                |        | para ligação à electrónica de diagnóstico externa VSE |
| Aplicação                              |        | deteção da vibração                                   |
| Dados elétricos                        |        |   |
| Tensão de funcionamento                | [V]    | 7,2...10,8 DC   |
| Consumo de corrente                    | [mA]   | < 15  |
| Resistência de isolamento mín.         | [MΩ]   | 100; (500 V DC)                                       |
| Classe de proteção                     |        | III   |
| Proteção contra inversão de polaridade |        | sim   |
| Modelo do sensor                       |        | Sistema microeletromecânico (MEMS)                    |
| Saídas                                 |        |   |
| Corrente da saída analógica            | [mA]   | 0...10  |
| Carga máx.                             | [Ω]    | 300   |
| Faixa de medição / de ajuste           |        |   |
| Intervalo de medição de vibração       | [g]    | -25...25  |
| Escala de frequência                   | [Hz]   | 1...6000  |
| Princípio de medição                   |        | capacitivo  |
| Sensibilidade                          | [μA/g] | 142   |
| Número de eixos de medição             |        | 1   |
| Precisão/desvios                       |        |   |
| Desvio de linearidade                  |        | 0,2 %   |
| Condições de funcionamento             |        |   |
| Temperatura ambiente                   | [°C]   | -30...125   |

# VSA001



## Sensor de aceleração

VIBRATION SENSOR

|                                   |                      |
|-----------------------------------|----------------------|
| Nota sobre a temperatura ambiente | cULus: < 85 °C       |
| Temperatura de armazenamento [°C] | -30...125            |
| Proteção                          | IP 67; IP 68; IP 69K |

| Testes/aprovações       |                   |                          |
|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| CEM                     | EN 61000-6-2      |                          |
|                         | EN 61000-6-3      |                          |
| Resistência a choques   | DIN EN 60068-2-27 | 50 g 11 ms<br>500 g 1 ms |
| Resistência a vibrações | DIN EN 60068-2-6  | 20 g / 10 ... 2000 Hz    |
| MTTF [anos]             |                   | 1701                     |

| Dados mecânicos                    |  |   |
|------------------------------------|--|---|
| Peso [g]                           |  | 50  |
| Tipo de montagem                   |  | M8 x 1,25                                 |
| Materiais                          |  | invólucro: 1.4404 (aço inoxidável / 316L) |
| Binário de aperto [Nm]             |  | 8   |
| Mechanische Überlastfestigkeit [g] |  | 500                                       |

| Acessórios       |  |                      |
|------------------|--|----------------------|
| Itens fornecidos |  | Anilha plana, cônico |

| Notas                   |  |         |
|-------------------------|--|---------|
| Quantidade da embalagem |  | 1 peças |

### conexão elétrica

Conexão: 1 x M12; codificação: A; Comprimento máximo do cabo: 250 m



|   |           |
|---|-----------|
| 1 | L+ (+9 V) |
| 2 | I out     |
| 3 | GND       |
| 4 | Test      |

# Anexo 5 – Ficha Técnica Sensor Indutivo J4-M12MN170-DPS-V2-X0006



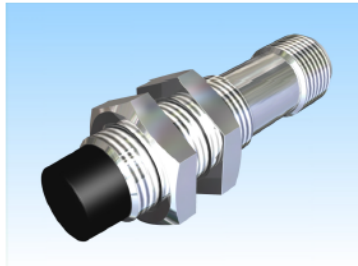
**KJ4-M12MN170-DPS-V2-X0006**

Pulsotronic GmbH & Co. KG Neue Schichtstraße 14b 09368 Niederdorf Deutschland +49 (0)37206 930-200

[Article Page](#)

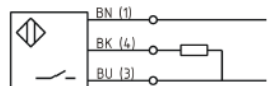
Product Description

inductive sensor DC



Name  
Order number  
Matchcode  
Switching distance  
Mounting  
  
Switch type  
  
Signal Type  
Connection  
Connection diagramm

KJ4-M12MN170-DPS-V2-X0006  
08317624236  
9962-4236  
4 mm  
  
 non shielded  
  
 N.O.  
DC PNP  
connector M12



fine-pitch thread M12 x 170

Dimension (in mm)  
Technical Specification  
Special features  
Operating voltage  
Max. ripple  
Voltage drop  
Max. load current  
No load current  
Leakage current  
Switching frequency  
Switching hysteresis  
Operating temperature  
Temperature drift  
Repeat accuracy  
Time delay  
Short-circuit proof  
Overload protection  
Reverse voltage protection  
Protection category  
EMC-level  
Housing material  
Material active face

housing extra large 170mm  
10 - 30 VDC  
≤ 10 %  
2,4 V  
200 mA  
≤ 13 mA  
≤ 10 µA  
800 Hz  
≤ 15 %  
-25 ° C to 70 ° C  
≤ 10 %  
≤ 5 %  
300 ms  
yes  
yes  
yes  
IP67  
DIN EN 60947-5-2: 2008  
Brass, nickel plated  
Pocan KU 2-7503/1 + Batch RAL 9004LS



**KJ4-M12MN170-DPS-V2-X0006**

Pulsotronic GmbH & Co. KG Neue Schichtstraße 14b 09368 Niederdorf Deutschland +49 (0)37206 930-200

Utilisation category  
Contact material  
Contact surface material  
Contact holder  
Termination  
FIT / MTF acc. SIEMENS 29500

DC 13  
Cu  
NiAu  
Makrolon 2405 schwarz  
Connector M12 4pin  
47,46 / 2405y



## Anexo 7 – Rolamentos do motor elétrico DS2-160MO54W-35-5-AO

### Three-phase synchronous motors DS2-100-200

#### 2.5. Bearings and shaft load

All machines are equipped with rolling-contact bearings. Normally, the non-locating bearing (ball bearing) is intended for the drive end and the locating bearing (ball bearing) for the non-drive end. Machines with roller bearings at the drive end are available for applications where increased radial forces can occur, for instance when using pulleys. Please specify radial forces in your order.

Bearing assignment Standard:

| Size | Ventilated |            | Water-cooled |            |
|------|------------|------------|--------------|------------|
|      | D-side     | N-side     | D-side       | N-side     |
| 100  | 6209 2ZRC3 | 6209 2ZRC3 | 6209 2ZRC3   | 6306 2ZRC3 |
| 132  | 6212 2ZRC3 | 6212 2ZRC3 | 6312 2ZRC3   | 6310 2ZRC3 |
| 160  | 6313 2ZRC3 | 6311 2ZRC3 | 6313 2ZRC3   | 6311 2ZRC3 |
| 200  | 6315 2ZRC3 | 6313 2ZRC3 | 6315 2ZRC3   | 6313 2ZRC3 |

## Anexo 8 – Lista Peças Reposição Bomba 1 - AH A4VSO 71 DFEH /10R-VZB25K99 -S2332



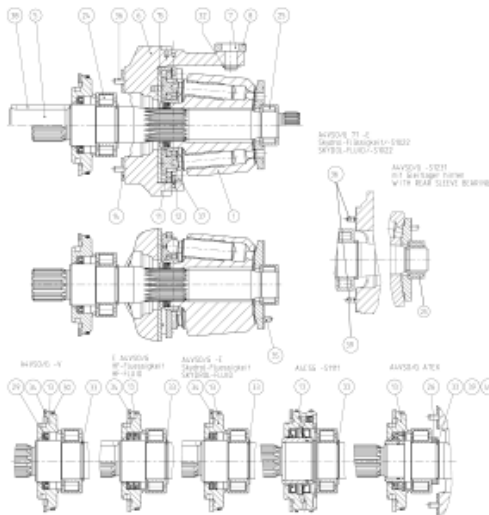
### Lista de peças de reposição

Número do material: R902553001  
 Desenho: RA94587187  
 Designação: CONJUNTO ROTATIVO

Bosch Rexroth AG  
 Service Hydraulics  
 Glockeraustrasse 4  
 89275 Elchingen  
 Germany  
 +49 (0)7308/82-2126

Versão: 06/2024

Data: 18.06.2024  
 Folha: 6



L = Módulo      D = Elemento de vedação

#### Aviso de segurança:

A montagem, comissionamento e operação, desmontagem, manutenção (incluindo serviços e reparos) requerem conhecimentos básicos de mecânica/elétrica/hidráulica/pneumática, assim como conhecimento dos termos técnicos associados. Para garantir a segurança operacional, estas atividades só podem ser realizadas por um especialista apropriado ou por uma pessoa instruída sob a direção de um especialista. Um especialista é alguém que, com base em seu treinamento técnico, conhecimento e experiência, bem como seu conhecimento dos regulamentos pertinentes, é capaz de avaliar o trabalho a ele designado, reconhecer possíveis perigos e tomar as medidas de segurança adequadas. Um funcionário qualificado deve cumprir os regulamentos técnicos pertinentes. As regulamentações de aplicação geral, estatutárias e outras regulamentações obrigatórias da legislação europeia ou nacional, bem como as regulamentações sobre prevenção de acidentes e proteção ambiental aplicáveis no país devem ser observadas. Os dados fornecidos são apenas para fins de descrição do produto. Uma declaração sobre uma determinada condição ou adequação para uma determinada aplicação não pode ser derivada de nossos dados. As informações não liberam o usuário de suas próprias avaliações e testes. Deve-se observar que nossos produtos estão sujeitos a um processo natural de desgaste e envelhecimento.  
 © Todos os direitos são reservados pela Bosch Rexroth AG, bem como os direitos de propriedade industrial das aplicações, incluindo os direitos de disposição, como os direitos de cópia e de transmissão.

Firmensitz / Headquarters: Stuttgart, Registrierung / Registration: Amtsgericht Stuttgart HRB 23192  
 Vorstand / Executive Board: Dr. Steffen Haack (Vorsitzender / President), Roland Bitteneuer, Thomas Fechner, Holger von Hebel, Reinhard Schäfer  
 Vorsitzender des Aufsichtsrats / Chairman of the Supervisory Board: Dr. Markus Forschner

**Lista de peças de reposição**

Número do material: R902553001  
 Desenho: RA94587187  
 Designação: CONJUNTO ROTATIVO

Bosch Rexroth AG  
 Service Hydraulics  
 Glockeraustrasse 4  
 89275 Elchingen  
 Germany  
 +49 (0)7308/82-2126

Versão: 06/2024

Data: 18.06.2024

Folha: 4

| Pos. | Número do material | Designação              | Quantidade |   |
|------|--------------------|-------------------------|------------|---|
| 1    | R902580090         | CONJUNTO ROTATIVO       | 1 ST       | L |
| 5    | R902409126         | EIXO ACIONADOR          | 1 ST       |   |
| 6    | R902551534         | DISCO BASCULANTE        | 1 ST       |   |
| 7    | R910755419         | PINO DE ARRASTO         | 1 ST       |   |
| 8    | R910923648         | ANEL TRAVA              | 1 ST       |   |
| 11   | R910765236         | SEGMENTO DISTANCIADOR   | 2 ST       |   |
| 12   | R902573709         | SEGMENTO SEXTAVADO      | 2 ST       |   |
| 13   | R910902360         | FLANGE DE VEDACAO       | 1 ST       |   |
| 14   | R902550538         | PISTA DE ROLAMENTO      | 2 ST       |   |
| 15   | R910781576         | ARRUELA DESLIZANTE      | 1 ST       |   |
| 24   | R902574254         | ROLAMENTO ROLO CILIND   | 1 ST       |   |
| 25   | R902574255         | ROLAMENTO ROLO CILIND   | 1 ST       |   |
| 29   | R902580449         | JOGO DE ANEL DE VEDAÇÃO | 1 ST       | D |

L = Módulo      D = Elemento de vedação

**Aviso de segurança:**

A montagem, comissionamento e operação, desmontagem, manutenção (incluindo serviços e reparos) requerem conhecimentos básicos de mecânica/elétrica/hidráulica/pneumática, assim como conhecimento dos termos técnicos associados. Para garantir a segurança operacional, estas atividades só podem ser realizadas por um especialista apropriado ou por uma pessoa instruída sob a direção de um especialista. Um especialista é alguém que, com base em seu treinamento técnico, conhecimento e experiência, bem como seu conhecimento dos regulamentos pertinentes, é capaz de avaliar o trabalho a ele designado, reconhecer possíveis perigos e tomar as medidas de segurança adequadas. Um funcionário qualificado deve cumprir os regulamentos técnicos pertinentes. As regulamentações de aplicação geral, estatutárias e outras regulamentações obrigatórias da legislação europeia ou nacional, bem como as regulamentações sobre prevenção de acidentes e proteção ambiental aplicáveis no país devem ser observadas. Os dados fornecidos são apenas para fins de descrição do produto. Uma declaração sobre uma determinada condição ou adequação para uma determinada aplicação não pode ser derivada de nossos dados. As informações não liberam o usuário de suas próprias avaliações e testes. Deve-se observar que nossos produtos estão sujeitos a um processo natural de desgaste e envelhecimento.  
 © Todos os direitos são reservados pela Bosch Rexroth AG, bem como os direitos de propriedade industrial das aplicações, incluindo os direitos de disposição, como os direitos de cópia e de transmissão.



**Lista de peças de reposição**

Número do material: R902546227  
 Desenho:  
 Designação: CONJUNTO ROTATIVO

Bosch Rexroth AG  
 Service Hydraulics  
 Glockeraustrasse 4  
 89275 Elchingen  
 Germany  
 +49 (0)7308/82-2126

Versão: 06/2024

Data: 18.06.2024

Folha: 4

| Pos. | Número do material | Designação              | Quantidade |   |
|------|--------------------|-------------------------|------------|---|
| 1    | R902580090         | CONJUNTO ROTATIVO       | 1 ST       | L |
| 5    | R902409240         | EIXO ACIONADOR          | 1 ST       |   |
| 6    | R902543421         | CAME DE COMANDO         | 1 ST       |   |
| 11   | R910960663         | SEGMENTO DISTANCIADOR   | 2 ST       |   |
| 12   | R902573717         | SEGMENTO SEXTAVADO      | 2 ST       |   |
| 13   | R910902360         | FLANGE DE VEDACAO       | 1 ST       |   |
| 19   | R910444677         | CALCO                   | 1 ST       |   |
| 20   | R902574254         | ROLAMENTO ROLO CILIND   | 1 ST       |   |
| 21   | R902574255         | ROLAMENTO ROLO CILIND   | 1 ST       |   |
| 25   | R902580449         | JOGO DE ANEL DE VEDAÇÃO | 1 ST       | D |
| 26   | R910640182         | ANEL DE VEDACAO O-RING  | 1 ST       | D |
| 28   | R910105813         | ANEL DE RETENCAO        | 1 ST       |   |
| 29   | R910189057         | ANEL DE RETENCAO        | 1 ST       |   |

L = Módulo      D = Elemento de vedação

Aviso de segurança:

A montagem, comissionamento e operação, desmontagem, manutenção (incluindo serviços e reparos) requerem conhecimentos básicos de mecânica/elétrica/hidráulica/pneumática, assim como conhecimento dos termos técnicos associados. Para garantir a segurança operacional, estas atividades só podem ser realizadas por um especialista apropriado ou por uma pessoa instruída sob a direção de um especialista. Um especialista é alguém que, com base em seu treinamento técnico, conhecimento e experiência, bem como seu conhecimento dos regulamentos pertinentes, é capaz de avaliar o trabalho a ele designado, reconhecer possíveis perigos e tomar as medidas de segurança adequadas. Um funcionário qualificado deve cumprir os regulamentos técnicos pertinentes. As regulamentações de aplicação geral, estatutárias e outras regulamentações obrigatórias da legislação europeia ou nacional, bem como as regulamentações sobre prevenção de acidentes e proteção ambiental aplicáveis no país devem ser observadas. Os dados fornecidos são apenas para fins de descrição do produto. Uma declaração sobre uma determinada condição ou adequação para uma determinada aplicação não pode ser derivada de nossos dados. As informações não liberam o usuário de suas próprias avaliações e testes. Deve-se observar que nossos produtos estão sujeitos a um processo natural de desgaste e envelhecimento.  
 © Todos os direitos são reservados pela Bosch Rexroth AG, bem como os direitos de propriedade industrial das aplicações, incluindo os direitos de disposição, como os direitos de cópia e de transmissão.

Firmensitz / Headquarters: Stuttgart, Registrierung / Registration: Amtsgericht Stuttgart HRB 23192  
 Vorstand / Executive Board: Dr. Steffen Haack (Vorsitzender / President), Roland Bittensauer, Thomas Fechner, Holger von Hebel, Reinhard Schäfer  
 Vorsitzender des Aufsichtsrats / Chairman of the Supervisory Board: Dr. Markus Forschner

# Anexo 10 – Lista Peças Reposição Bomba 3 - SYDFEE-3X/045R-VRB22U00S0479-A2A0FLX-022



## Lista de peças de reposição

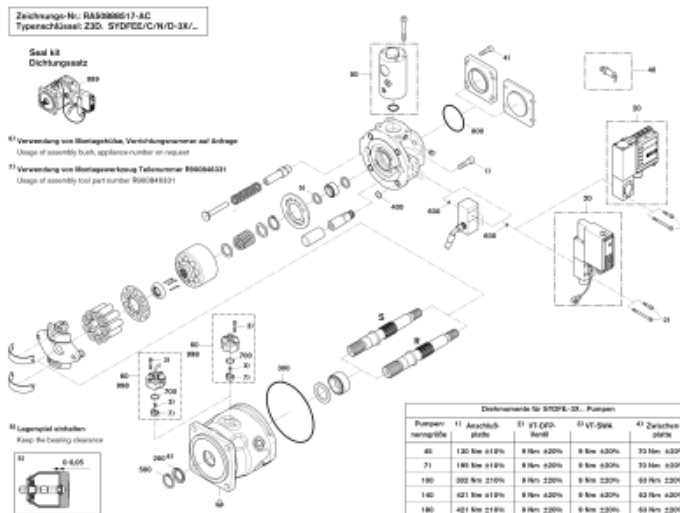
Número do material: R901414235  
 Desenho: RA50888517  
 Designação: PUMP CONTROL SYSTEM  
 SYDFEE-3X/045R-VRB22U00S0479-A2A0FLX-022

Versão: 06/2024

Bosch Rexroth AG  
 Service Hydraulics  
 Bgm.-Dr.-Nebel-Str. 8  
 97816 Lohr  
 Germany

Data: 18.06.2024

Folha: 2



L = Módulo D = Elemento de vedação

### Aviso de segurança:

A montagem, comissionamento e operação, desmontagem, manutenção (incluindo serviços e reparos) requerem conhecimentos básicos de mecânica/elétrica/hidráulica/pneumática, assim como conhecimento dos termos técnicos associados. Para garantir a segurança operacional, estas atividades só podem ser realizadas por um especialista apropriado ou por uma pessoa instruída sob a direção de um especialista. Um especialista é alguém que, com base em seu treinamento técnico, conhecimento e experiência, bem como seu conhecimento dos regulamentos pertinentes, é capaz de avaliar o trabalho a ele designado, reconhecer possíveis perigos e tomar as medidas de segurança adequadas. Um funcionário qualificado deve cumprir os regulamentos técnicos pertinentes. As regulamentações de aplicação geral, estatutárias e outras regulamentações obrigatórias da legislação europeia ou nacional, bem como as regulamentações sobre prevenção de acidentes e proteção ambiental aplicáveis no país devem ser observadas. Os dados fornecidos são apenas para fins de descrição do produto. Uma declaração sobre uma determinada condição ou adequação para uma determinada aplicação não pode ser derivada de nossos dados. As informações não liberam o usuário de suas próprias avaliações e testes. Deve-se observar que nossos produtos estão sujeitos a um processo natural de desgaste e envelhecimento.  
 © Todos os direitos são reservados pela Bosch Rexroth AG, bem como os direitos de propriedade industrial das aplicações, incluindo os direitos de disposição, como os direitos de cópia e de transmissão.

Firmensitz / Headquarters: Stuttgart, Registrierung / Registration: Amtsgericht Stuttgart HRB 23192  
 Vorstand / Executive Board: Dr. Steffen Haack (Vorsitzender / President), Roland Bittenauer, Thomas Fechner, Holger von Hebel, Reinhard Schäfer  
 Vorsitzender des Aufsichtsrats / Chairman of the Supervisory Board: Dr. Markus Freyberger

**Lista de peças de reposição**

Número do material: R901414235  
 Desenho: RA50888517  
 Designação: PUMP CONTROL SYSTEM  
 SYDFEE-3X/045R-VRB22U00S0479-A2A0FLX-022

Bosch Rexroth AG  
 Service Hydraulics  
 Bgm.-Dr.-Nebel-Str. 8  
 97816 Lohr  
 Germany

Versão: 06/2024 Data: 18.06.2024  
Folha: 1

| Pos. | Número do material | Designação   | Tech.Pos. | Quantidade |
|------|--------------------|--|-----------|------------|
| 20   | R901520663         | VALVULA PROPORCIONAL<br>VT-DFPE-A-2X/G24K0/2A0F/V-022        |           | 1 ST L     |
| 40   | R901342038         | TRANSDUTOR DE PRESSAO<br>HM 20-2X/315-F-C13-0,5-N            |           | 1 ST       |
| 998  | R900868651         | JOGO PECAS REPARO<br>JOGO PCS REPARO VT-SWA-1-1X/SYDFEE<br>& |           | 1 ST       |
| 999  | R961009729         | JOGO DE VEDACAO<br>JOGO DE VEDACAO SYDFE.-3X/045V            |           | 1 ST L     |

L = Módulo      D = Elemento de vedação

**Aviso de segurança:**

A montagem, comissionamento e operação, desmontagem, manutenção (incluindo serviços e reparos) requerem conhecimentos básicos de mecânica/elétrica/hidráulica/pneumática, assim como conhecimento dos termos técnicos associados. Para garantir a segurança operacional, estas atividades só podem ser realizadas por um especialista apropriado ou por uma pessoa instruída sob a direção de um especialista. Um especialista é alguém que, com base em seu treinamento técnico, conhecimento e experiência, bem como seu conhecimento dos regulamentos pertinentes, é capaz de avaliar o trabalho a ele designado, reconhecer possíveis perigos e tomar as medidas de segurança adequadas. Um funcionário qualificado deve cumprir os regulamentos técnicos pertinentes. As regulamentações de aplicação geral, estatutárias e outras regulamentações obrigatórias da legislação europeia ou nacional, bem como as regulamentações sobre prevenção de acidentes e proteção ambiental aplicáveis no país devem ser observadas. Os dados fornecidos são apenas para fins de descrição do produto. Uma declaração sobre uma determinada condição ou adequação para uma determinada aplicação não pode ser derivada de nossos dados. As informações não liberam o usuário de suas próprias avaliações e testes. Deve-se observar que nossos produtos estão sujeitos a um processo natural de desgaste e envelhecimento.  
 © Todos os direitos são reservados pela Bosch Rexroth AG, bem como os direitos de propriedade industrial das aplicações, incluindo os direitos de disposição, como os direitos de cópia e de transmissão.

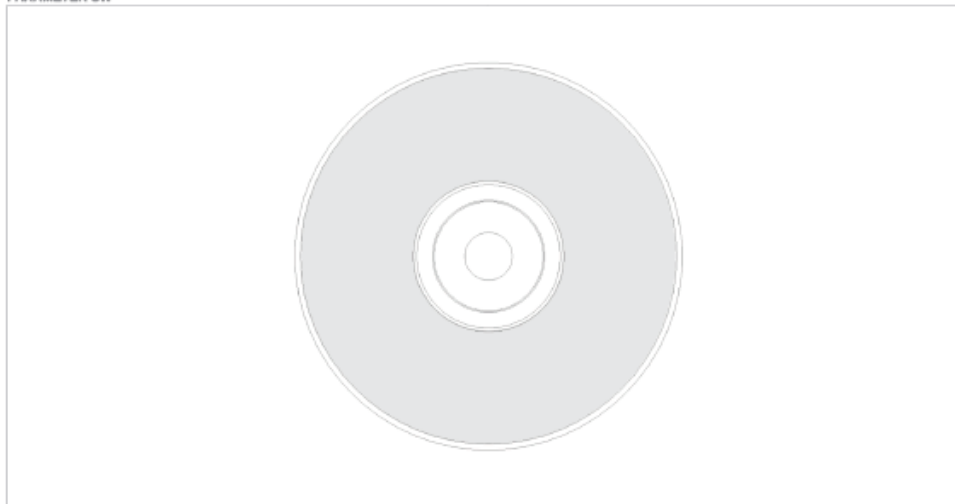
## Anexo 11 – Ficha Técnica *Software* VES004

### VES004

Software de parametrização para eletrônica de diagnóstico de vibração



PARAMETER-SW



| Aplicação                           |  |
|-------------------------------------|--|
| Aplicação                           | Software de parametrização para eletrônica de diagnóstico de vibração  |
| Software / programação              |  |
| Sistema operativo                   | Windows 7 SP1 / 8 / 8.1 / 10; Windows Server 2008 R2 SP1; Windows Server 2012 / R2; Windows Server 2016; Windows Server 2019 |
| Requisitos de sistema               |  |
| Mín. Quantidade de núcleos CPU      | 2  |
| RAM mín.                            | 2 GB   |
| Mín. Resolução de gráfico           | 1024 x 768   |
| Interface de equipamento necessária | LAN Adapter - RJ45   |
| Software adicional necessário       | Windows 10<br>necessário para versões de Windows mais antigas<br>que Windows 10: Visual C++ Redistributable Package          |
| Dados mecânicos                     |  |
| Peso [g]                            | 22,5   |
| Notas                               |  |
| Quantidade da embalagem             | 1 peças  |

## Anexo 12 – Script Python

```
### BIBLIOTECAS
import logging
import time
from datetime import datetime, timedelta
from opcoa import Client
import pyodbc
from decimal import Decimal
import numpy as np
import pandas as pd
from email.mime.multipart import MIMEMultipart
from email.mime.text import MIMEText
import smtplib
import traceback
from sklearn.metrics import r2_score, mean_squared_error
import math
from scipy.optimize import fsolve # Importar fsolve
import matplotlib.pyplot as plt
import requests

### FUNÇÃO PARA INSERIR OS DADOS NA BASE DE DADOS ManSimoldes
def insert_data(cursor, table, data):
    placeholders = ", ".join(["?"] * len(data))
    columns = ", ".join(data.keys())
    # Arredondar os valores para 6 casas decimais
    data_rounded = {key: round(value, 6) if isinstance(value, float) else
value for key, value in data.items()}
    sql = f"INSERT INTO {table} ({columns}) VALUES ({placeholders})"
    cursor.execute(sql, list(data_rounded.values()))

### FUNÇÃO PARA EXTRAIR O ÚLTIMO REGISTO NA BASE DE DADOS
def fetch_last_data(cursor, table):
    cursor.execute(f"SELECT TOP 1 * FROM {table} ORDER BY Date DESC")
    row = cursor.fetchone()
    if row:
        columns = [column[0] for column in cursor.description]
        return dict(zip(columns, row))
    return None

### FUNÇÃO PARA ARREDONDAR OS VALORES
def round_value(value):
    if isinstance(value, float):
        return round(value, 6)
    return value

### FUNÇÃO PARA COMPARAR OS NOVOS DADOS COM OS ÚLTIMOS DADOS INSERIDOS
def data_is_different(new_data, old_data):
    if old_data is None:
        return True

    # Ignorar a coluna ID e Date para realizar a comparação
    keys_to_ignore = ["ID", "Date"]

    for key, value in new_data.items():
        if key in keys_to_ignore:
            continue

    # Converter ambos os valores para DECIMAL
```

```

        if isinstance(value, float):
            value = Decimal(str(round(value, 6)))
        else:
            value = Decimal(str(value))

        if isinstance(old_data[key], float):
            old_data_value = Decimal(str(round(old_data[key], 6)))
        else:
            old_data_value = old_data[key]

        # Realizar a comparação usando a mesma base DECIMAL
        if value != old_data_value:
            return True

    return False

### FUNÇÃO PARA RECOLHER DADOS DO CLIENTE OPCUA, CALCULAR VALORES DERIVADOS
E ARMAZENAR NA BASE DE DADOS ManSimoldes
def get_and_strore_data(client, cursor, db_connection, errorflag):
    try:
        # Obter dados do servidor OPCUA para o dicionário "data"
        data = {
            "resistance":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.249:3321.Inputs.Analogue.Input01.V
alue").get_value(),
            "command-Q12":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.249:3321.Inputs.Analogue.Input02.V
alue").get_value(),

            "S1_aRMS":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object01.Value").
get_value(),
            "S1_aPEAK":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object02.Value").
get_value(),
            "S1_Bearings":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object03.Value").
get_value(),
            "S1_Electric_Problems":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object04.Value").
get_value(),

            "S2_aRMS":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object05.Value").
get_value(),
            "S2_aPEAK":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object06.Value").
get_value(),
            "S2_Bearings":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object07.Value").
get_value(),
            "S2_General_Condition":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object08.Value").
get_value(),

            "S3_aRMS":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object09.Value").
get_value(),

```

```

        "S3_aPEAK":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object10.Value").
get_value(),
        "S3_Bearings":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object11.Value").
get_value(),

        "S4_aRMS":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object12.Value").
get_value(),
        "S4_aPEAK":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object13.Value").
get_value(),
        "S4_vRMS_Safety_Indicator":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Objects.Object14.Value").
get_value(),

        "IN1_Rotation_Speed":
client.get_node("ns=3;s=ifm.VSE.172.30.3.250:3321.Inputs.Analogue.Input01.V
alue").get_value(),
        "Date": datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
    }

    # Calcular o indicador cREST
    data["S1_cREST"] = data["S1_aPEAK"] / data["S1_aRMS"]
    data["S2_cREST"] = data["S2_aPEAK"] / data["S2_aRMS"]
    data["S3_cREST"] = data["S3_aPEAK"] / data["S3_aRMS"]
    data["S4_cREST"] = data["S4_aPEAK"] / data["S4_aRMS"]

    # Introduz a informação na base de dados, se a rotação for > 750
    rpm e diferente do último registo efetuado
    if data["IN1_Rotation_Speed"] >= 750:
        tables = ["Electrical_Signals", "S1_Electric_Motor", "S2_Pump1",
"S3_Pump2", "S4_Pump3"]
        data_to_insert = [
            {
                "command": data["command-Q12"],
                "resistance": data["resistance"],
                "Date": data["Date"]
            },
            {
                "S1_aRMS": data["S1_aRMS"],
                "S1_aPEAK": data["S1_aPEAK"],
                "S1_cREST": data["S1_cREST"],
                "S1_Bearings": data["S1_Bearings"],
                "S1_Electric_Problems": data["S1_Electric_Problems"],
                "IN1_Rotation_Speed": data["IN1_Rotation_Speed"],
                "Date": data["Date"]
            },
            {
                "S2_aRMS": data["S2_aRMS"],
                "S2_aPEAK": data["S2_aPEAK"],
                "S2_cREST": data["S2_cREST"],
                "S2_Bearings": data["S2_Bearings"],
                "S2_General_Condition": data["S2_General_Condition"],
                "IN1_Rotation_Speed": data["IN1_Rotation_Speed"],
                "Date": data["Date"]
            },
            {
                "S3_aRMS": data["S3_aRMS"],

```

```

        "S3_aPEAK": data["S3_aPEAK"],
        "S3_cREST": data["S3_cREST"],
        "S3_Bearings": data["S3_Bearings"],
        "IN1_Rotation_Speed": data["IN1_Rotation_Speed"],
        "Date": data["Date"]
    },
    {
        "S4_aRMS": data["S4_aRMS"],
        "S4_aPEAK": data["S4_aPEAK"],
        "S4_cREST": data["S4_cREST"],
        "S4_vRMS": data["S4_vRMS_Safety_Indicator"],
        "IN1_Rotation_Speed": data["IN1_Rotation_Speed"],
        "Date": data["Date"]
    }
]

for table, new_data in zip(tables, data_to_insert):
    old_data = fetch_last_data(cursor, table)
    if data_is_different(new_data, old_data):
        insert_data(cursor, table, new_data)
        #detailed_logger.info("Data successfully inserted")

    # Confirmar a transação
    db_connection.commit()

except Exception as e:
    logger.error("Error collecting information from the OPC UA server:
%s", e)
    traceback_str = traceback.format_exc()
    send_email_script_error(traceback_str)
    errorflag = True

return data, errorflag

### FUNÇÃO PARA CALCULAR OS INDICADORES ESTATÍSTICOS
def calculate_statistics(df, column):
    max_value = df[column].max()
    mean_value = df[column].mean()

    # Ordenar os valores e pegar os 10% mais altos
    top_10_percent = df[column].nlargest(int(len(df) * 0.1))
    mean_top_10_percent = top_10_percent.mean()

    return max_value, mean_value, mean_top_10_percent

### FUNÇÃO PARA PROCESSAR E ARMAZÉNAR OS DADOS ESTATÍSTICOS
def process_table(table_source, columns, table_destination, target_date):
    # Conectar à base de dados
    conn = pyodbc.connect(db_connection_string)
    query = f"""
        SELECT {'', '.join(columns)}, [Date]
        FROM {table_source}
        WHERE CONVERT(DATE, [Date]) = '{target_date}'
        """
    df = pd.read_sql(query, conn)

    # Calcular estatísticas para cada variável, se houver dados disponíveis

```

```

if not df.empty:
    df['Date'] = pd.to_datetime(df['Date'])
    min_time = df['Date'].min()
    max_time = df['Date'].max()
    total_duration_hours = (max_time - min_time).total_seconds() / 3600
# Duração em horas

    if total_duration_hours >= 4:
        statistics = {}

        for var in columns:
            max_val, mean_val, mean_top_10_percent =
calculate_statistics(df, var)
            statistics[var] = {
                "Max": round(max_val, 6),
                "Mean": round(mean_val, 6),
                "Mean_Top_10%": round(mean_top_10_percent, 6),
            }

            # Imprimir os valores calculados para confirmação
            #print(f"Estadísticas para {var}:")
            #print(f" Máximo: {statistics[var]['Max']}")
            #print(f" Média: {statistics[var]['Mean']}")
            #print(f" Média dos 10% mais altos:
{statistics[var]['Mean_Top_10%']}")
            #print() # Linha em branco para separar as estatísticas de
cada variável

            # Preparar os valores para inserção na tabela de destino
            date_now = target_date
            data_to_insert = {
                'Date': date_now,
            }

            for var in columns:
                data_to_insert[f'{var}_Max'] = statistics[var]['Max']
                data_to_insert[f'{var}_Avg'] = statistics[var]['Mean']
                data_to_insert[f'{var}_Avg_Upper'] =
statistics[var]['Mean_Top_10%']

            # Inserir os valores na tabela de destino
            placeholders = ', '.join('? ' * len(data_to_insert))
            columns_insert = ', '.join(data_to_insert.keys())
            sql = f"INSERT INTO {table_destination} ({columns_insert})
VALUES ({placeholders})"
            cursor = conn.cursor()
            cursor.execute(sql, list(data_to_insert.values()))
            conn.commit()
            cursor.close()
            conn.close()

            #print(f"Estadísticas para {target_date} foram inseridas com
sucesso na tabela {table_destination}.")
            else:
                pass
                #print(f"Não há dados disponíveis para a data {target_date} na
tabela {table_source}.")
            else:
                pass

```

```

        #print(f"Não há dados disponíveis para a data {target_date} na
tabela {table_source}.")

### FUNÇÃO PARA AJUSTAR AS FUNÇÕES DE TENDÊNCIA AOS DADOS HISTÓRICOS
def fit_model(model_name, X, y, degree=None):
    if model_name == "Linear":
        coefficients = np.polyfit(X, y, 1)
        poly_func = np.poly1d(coefficients)
        trend_func = lambda x: coefficients[0] * x + coefficients[1]
    elif model_name.startswith("Polynomial"):
        coefficients = np.polyfit(X, y, degree)
        poly_func = np.poly1d(coefficients)
        trend_func = poly_func
    elif model_name == "Exponential":
        log_y = np.log(y)
        coefficients = np.polyfit(X, log_y, 1)
        poly_func = lambda x: np.exp(coefficients[1]) *
np.exp(coefficients[0] * x)
        trend_func = lambda x: np.exp(coefficients[1]) *
np.exp(coefficients[0] * x)
    elif model_name == "Logarithmic":
        log_X = np.log(X + 1) # Adiciona 1 para evitar log(0)
        coefficients = np.polyfit(log_X, y, 1)
        poly_func = lambda x: coefficients[1] + coefficients[0] * np.log(x
+ 1)
        trend_func = lambda x: coefficients[1] + coefficients[0] * np.log(x
+ 1)
    else:
        raise ValueError("Unknown model name")

    # Prever valores
    days_range = np.linspace(X.min(), X.max() + 12, 500)
    predictions = poly_func(days_range)

    # Calcular métricas de avaliação
    y_pred = poly_func(X)
    r2 = r2_score(y, y_pred)
    mse = mean_squared_error(y, y_pred)

    # Visualizar graficamente os resultados
    #plt.plot(days_range, predictions, label=f'{model_name} (R²={r2:.3f},
MSE={mse:.2f})')

    return coefficients, trend_func, r2, mse

### FUNÇÃO PARA SELECIONAR MELHOR MODELO E REALIZAR A PREVISÃO DO MOMENTO
DE FALHA
def trend_function(key, db_connection_string, trigger):
    statistics_table = key[:2] + "_Statistics"
    connection = pyodbc.connect(db_connection_string)
    query = f"SELECT * FROM {statistics_table}"
    df = pd.read_sql(query, connection)
    connection.close()

    df['Date'] = pd.to_datetime(df['Date'])
    df = df.sort_values('Date').reset_index(drop=True)
    df['Days'] = (df['Date'] - df['Date'].min()).dt.days
    X = df['Days'].values

```

```

dependent_variable = key + "_Avg"
y = df[dependent_variable].values

plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.scatter(X, y, label='Real Values', color='blue')

# Armazenar métricas dos modelos
model_metrics = []

# Ajustar e visualizar graficamente os diferentes modelos
models = ["Linear", "Exponential", "Logarithmic"]
degrees = [2, 3, 4]

for model in models:
    coefficients, trend_func, r2, mse = fit_model(model, X, y)
    model_metrics.append((model, r2, mse, trend_func, coefficients))
    #print(f"{model} model coefficients: {coefficients}")

for degree in degrees:
    model_name = f"Polynomial Degree {degree}"
    coefficients, trend_func, r2, mse = fit_model(model_name, X, y,
    degree=degree)
    model_metrics.append((model_name, r2, mse, trend_func,
    coefficients))
    #print(f"{model_name} model coefficients: {coefficients}")

# Normalizar os indicadores de avaliação R² e MSE
r2_scores = [metric[1] for metric in model_metrics]
mse_scores = [metric[2] for metric in model_metrics]

max_r2 = max(r2_scores)
min_r2 = min(r2_scores)
max_mse = max(mse_scores)
min_mse = min(mse_scores)

normalized_metrics = []
for model_name, r2, mse, trend_func, coefficients in model_metrics:
    normalized_r2 = (r2 - min_r2) / (max_r2 - min_r2)
    normalized_mse = (max_mse - mse) / (max_mse - min_mse) # Inverter
MSE para que menor MSE seja melhor
    combined_score = normalized_r2 + normalized_mse # Combinar as
métricas
    normalized_metrics.append((model_name, r2, mse, combined_score,
    trend_func, coefficients))

# Exibir o melhor modelo com base na pontuação combinada
best_model_combined = max(normalized_metrics, key=lambda item: item[3])
best_model_name, best_r2, best_mse, best_combined_score,
best_trend_func, best_coefficients = best_model_combined

#print(f"Melhor modelo baseado na pontuação combinada:
{best_model_name} com R² = {best_r2:.3f}, MSE = {best_mse:.2f} e Pontuação
Combinada = {best_combined_score:.3f}")

plt.xlabel('Dias desde o início')
plt.ylabel(key)
plt.legend()
plt.title('Comparação de Modelos de Linha de Tendência')
plt.grid(True)

```

```

plt.show()

# Armazenar coeficientes do melhor modelo em uma lista
best_coefficients = list(best_coefficients)
#print(f"Coeficientes do melhor modelo: {best_coefficients}")

if best_model_combined[0] == 'Linear': # f(x) = c0*x + c1
    coef_0 = best_coefficients[0]
    coef_1 = best_coefficients[1]
    x_value = (trigger - coef_1) / coef_0

elif best_model_combined[0] == 'Exponential': # f(x) = exp^c1 +
exp^(c0*x) <=> f(x) = exp(x*c0 + c1)

    coef_0 = best_coefficients[0]
    coef_1 = best_coefficients[1]
    x_value = (math.log(trigger) - coef_1) / coef_0

elif best_model_combined[0] == 'Logarithmic': # f(x) = c0*log(x+1) - c1
    coef_0 = best_coefficients[0]
    coef_1 = best_coefficients[1]
    x_value = math.exp((trigger + coef_1) / coef_0) - 1

elif best_model_combined[0] == "Polynomial Degree 2":
    x_value = fsolve(lambda x: trend_func(x) - trigger, X.max())

elif best_model_combined[0] == "Polynomial Degree 3":
    x_value = fsolve(lambda x: trend_func(x) - trigger, X.max())

else:
    x_value = fsolve(lambda x: trend_func(x) - trigger, X.max())

x_value = x_value[0] if isinstance(x_value, (list, np.ndarray)) else
x_value
date_of_first_record = df['Date'].min()
future_date = date_of_first_record + pd.to_timedelta(x_value, unit='D')
month = future_date.month
year = future_date.year
moth_and_year = f"{month}/{year}"
return moth_and_year

### FUNÇÃO PARA REALIZAR AS AUTENTICAÇÕES NO SOFTWARE DE GESTÃO DA
MANUTENÇÃO
def get_access_token():
    token_url = 'https://manwinwin-test.simoldes.com/api/Token'
    payload = {
        'grant_type': 'password',
        'username': 'drebelo', # User
        'password': 'SENHA' # Password
    }

    try:
        response = requests.post(token_url, data=payload)
        response.raise_for_status() # indentificar o erro se a requisição
falhar
        token_data = response.json()

```

```

        return token_data['access_token']
    except Exception as e:
        traceback_str = traceback.format_exc()
        send_email_script_error(traceback_str)
        return None

### FUNÇÃO PARA CRIAR UM NOVO PEDIDO DE MANUTENÇÃO
def create_maintenance_request(title, description, equipment, system,
destination_code):
    access_token = get_access_token()
    request_url = 'https://manwinwin-test.simoldes.com/api/Requests'

    # Dados do pedido de manutenção
    payload = {
        "Title": f"{title}",
        "Date": datetime.now().isoformat(),
        "Urgency": "Normal",
        "Description": f"{description}",
        "CostAllocation": {
            "Type": "Item",
            "Code": f"{equipment}"
        },
        "DestinationAllocation": {
            "Type": "Function",
            "Code": f"{destination_code}"
        },
        "System": f"{system}",
        "Record": None,
        "DownState": True,
        "Component": None,
        "Cause": None,
        "Symptom": None,
        "Performer": "DREBELO",
        "UserCode1": "Predictive Maintenance Script",
        "Quote": False,
        "UserCode2": None
    }

    headers = {
        'Authorization': f'Bearer {access_token}',
        'Content-Type': 'application/json'
    }

    try:
        response = requests.post(request_url, json=payload,
headers=headers)
        response.raise_for_status() # Identifica o erro se a a criação do
pedido falhar
        return response.json()
    except requests.exceptions.RequestException as e:
        # Imprime o erro e o corpo da resposta
        #print(f"Erro ao criar o pedido de manutenção: {e}")
        if response is not None:
            print(f"Resposta do servidor: {response.text}") # Imprime o
corpo da resposta
        return None

### FUNÇÃO PARA ENVIAR EMAIL EM CASO DE EXISTIR UMA PARAGEM DO SCRIPT, POR
ERRO FUNCIONAL
def send_email_script_error(body_text):

```

```

# Configurações do servidor SMTP e credenciais
smtp_server = 'smtp.gmail.com' # Servidor SMTP
smtp_port = 587 # Porta SMTP (geralmente 587 para STARTTLS)
sender_email = 'stopsricptalert@gmail.com' # Endereço de e-mail que
realiza o envio
password = 'SENHA' # Senha do endereço de e-mail que realiza o envio

# Configurações do e-mail
recipient_email = 'daniel.rebelo@simoldes.com' # Endereços de e-mail
destinatários
subject = 'DBManSimoldes - STOP SCRIPT - 20240729_Leitura
Dados_SIMOLDES_DBManSimoldes.py' # Assunto
body = f"{body_text}\n\n{datetime.now()}" #Corpo de texto

# Configuração do e-mail MIME
message = MIMEMultipart()
message['From'] = sender_email
message['To'] = recipient_email
message['Subject'] = subject
message.attach(MIMEText(body, 'plain'))

# Conexão com o servidor SMTP e envio do e-mail
with smtplib.SMTP(smtp_server, smtp_port) as server:
    server.starttls() # Iniciar conexão TLS
    server.login(sender_email, password)
    server.sendmail(sender_email, recipient_email, message.as_string())

### FUNÇÃO PARA ENVIAR EMAIL EM CASO DE UM NOVO PEDIDO DE MANUTENÇÃO SER
REALIZADO
def send_email_create_WR(WR_number, description ):
    # Configurações do servidor SMTP e credenciais
    smtp_server = 'smtp.gmail.com' # Servidor SMTP
    smtp_port = 587 # Porta SMTP (geralmente 587 para STARTTLS)
    sender_email = 'stopsricptalert@gmail.com' # Endereço de e-mail que
realiza o envio
    password = 'SENHA' # Senha do endereço de e-mail que realiza o envio

    # Configurações do e-mail
    recipient_email = 'daniel.rebelo@simoldes.com' # Endereços de e-mail
destinatários
    subject = 'DBManSimoldes - Predictive Maintenance - Number ' +
f"{WR_number}" # Assunto
    body = description #Corpo de texto

# Configuração do e-mail MIME
message = MIMEMultipart()
message['From'] = sender_email
message['To'] = recipient_email
message['Subject'] = subject
message.attach(MIMEText(body, 'plain'))

# Conexão com o servidor SMTP e envio do e-mail
with smtplib.SMTP(smtp_server, smtp_port) as server:
    server.starttls() # Iniciar conexão TLS
    server.login(sender_email, password)
    server.sendmail(sender_email, recipient_email, message.as_string())

```

```

### FUNÇÃO PARA REALIZAR A AVALIAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DOS COMPONENTES
(RESISTÊNCIAS + ACOPLAMENTO MOTOR-BOMBAS)
def
main(server_url,triggers,limit_values,table_mapping,WR_equipment,WR_system,
WR_destination_code,

max_number_over_trigger,trigger_increment,limit_value_increment,current_dat
e):

    count_trigger = {key: 0 for key in triggers.keys()}
    client = None
    errorflag= False
    resistanceflag = False

    while True:
        try:
            client = Client(server_url)
            client.connect()
            #detailed_logger.info("Connected to OPC UA server")

            with pyodbc.connect(db_connection_string) as db_connection:
                cursor = db_connection.cursor()
                while True:
                    data, errorflag = get_and_strore_data(client, cursor,
db_connection, errorflag)
                    if errorflag==True:
                        #print('New reconnection try in 1 hour')
                        time.sleep(3600)
                        errorflag=False

                    if resistanceflag == False:
                        ## RESISTÊNCIAS DE AQUECIMENTO
                        if (data["command-Q12"] <= 0 and data["resistance"]
> 0):

                            title = "-Q12 Circuit Board"
                            description = ('New work request created
automatically. The heating command has failed.\n\n'
'The resistor is heating but the -
Q12 circuit board is not sending a heating signal.')
                            WR_number = create_maintenance_request(title,
description, WR_equipment, WR_system, WR_destination_code)
                            send_email_create_WR(WR_number, description)
                            resistanceflag = True

                            elif (data["command-Q12"] > 0 and
data["resistance"] <= 0):

                                title = 'Injection Nozzle Resistance'
                                description = ('New work request created
automatically. The resistance of the injection nozzle is not working
properly.\n\n'
'The -Q12 circuit board is sending
the heating command, but the resistor is not heating correctly.')
                                WR_number = create_maintenance_request(title,
description, WR_equipment, WR_system, WR_destination_code)
                                send_email_create_WR(WR_number, description)
                                resistanceflag = True

```

```

        ## CONJUNTO DE MOTOR-BOMBAS
        for key, value in data.items():
            if key in triggers and value > triggers[key]: #
                Compara os valores do dicionário "triggers" com os valores do dicionário
                "data"
                count_trigger[key] += 1 # Se o valor de data
                for maior, incrementa uma unidade
                if count_trigger[key] ==
                max_number_over_trigger: # Se for superior à variável
                Max_number_over_trigger é iniciada a análise ao dados estatísticos
                trigger = (triggers[key])
                trigger_forecast = limit_values[key]

                moth_and_year = trend_function (key,
                db_connection_string, trigger_forecast)

                health_indicator = key
                print(health_indicator)

                prefix_health_indicator =
                health_indicator.split('_')[0]
                title =
                table_mapping.get(prefix_health_indicator)
                problem = health_indicator.split('_', 1)[1]

                description = ('New work request created
                automatically because the trigger value (' + f"{trigger}" + ') set for the
                health indicator ' + f"{health_indicator}" + ' has been exceeded.\n\n'
                'The ' + f"{problem}" + '
                in ' + f"{title}" + ' are starting to degrade.\n\n'
                'The average value of ' +
                f"{health_indicator}" + ' is expected to reach the maximum degradation
                limit value (' + f"{trigger_forecast}" + ') in ' + f"{moth_and_year}" +
                '.')

                WR_number =
                create_maintenance_request(title, description, WR_equipment, WR_system,
                WR_destination_code)
                send_email_create_WR(WR_number,
                description)
                print(moth_and_year)
                triggers[key] =
                triggers[key]*(1+trigger_increment)
                limit_values[key] =
                limit_values[key]*(1+limit_value_increment)

                ## Renicia as vezes que o valor real untrapassou o
                alarme e efetua as operações estatísticas
                if current_date != datetime.now().strftime('%Y-%m-%d'):

                    count_trigger = {key: 0 for key in triggers.keys()}

                    #CALCULAR ESTATÍSTICAS
                    current_date = datetime.now().strftime('%Y-%m-%d')
                    current_date_strtime =
                    datetime.strptime(current_date, '%Y-%m-%d')

```

```

        yesterday_date = current_date_strftime -
timedelta(days=1)
        yesterday_date_str = yesterday_date.strftime('%Y-
%m-%d')
        process_table('S1_Electric_Motor', ['S1_aRMS',
'S1_Bearings', 'S1_Electric_Problems'], 'S1_Statistics',
yesterday_date_str)
        process_table('S2_Pump1', ['S2_aRMS',
'S2_Bearings', 'S2_General_Condition'], 'S2_Statistics',
yesterday_date_str)
        process_table('S3_Pump2', ['S3_aRMS',
'S3_Bearings'], 'S3_Statistics', yesterday_date_str)
        process_table('S4_Pump3', ['S4_aRMS', 'S4_vRMS'],
'S4_Statistics', yesterday_date_str)

        time.sleep(3)

    except pyodbc.Error as db_error: # Quando existe um erro na conexão
à base de dados SQL, espera-se 1 horas antes de uma nova conexão
        logger.error("Database error: %s", db_error)
        #print('New reconnection try in 1 hour')
        traceback_str = traceback.format_exc()
        send_email_script_error(traceback_str)
        time.sleep(3600)

    except Exception as ua_error: # Quando existe um erro na conexão
com o servidor OPCUA, espera-se 2 horas antes de tentar uma nova conexão
        logger.error("OPC UA error: %s", ua_error)
        #print('New reconnection try in 2 hour')
        traceback_str = traceback.format_exc()
        send_email_script_error(traceback_str)
        time.sleep(7200)

    finally:
        if client:
            try:
                client.disconnect()
                detailed_logger.info("Disconnected from OPC UA server")
            except Exception as e:
                logger.error("Error disconnecting from OPC UA server:
%s", e)

                traceback_str = traceback.format_exc()
                send_email_script_error(traceback_str)

## CONFIGURAÇÃO GERAL DO LOGGER DE DETAILHES
detailed_logger = logging.getLogger('detailed')
detailed_logger.setLevel(logging.INFO) # Definindo o nível de log para
INFO
console_handler = logging.StreamHandler()
console_handler.setLevel(logging.INFO)
formatter = logging.Formatter('%(asctime)s - %(name)s - %(levelname)s -
%(message)s')
console_handler.setFormatter(formatter)
detailed_logger.addHandler(console_handler)

## CONFIGURAÇÃO DO LOGGER GERAL
logger = logging.getLogger(__name__)
logger.setLevel(logging.ERROR)

```

```

console_handler = logging.StreamHandler()
console_handler.setLevel(logging.ERROR)
formatter = logging.Formatter('%(asctime)s - %(name)s - %(levelname)s -
%(message)s')
console_handler.setFormatter(formatter)
logger.addHandler(console_handler)

## URL DO SERVIDOR OPCUA
server_url = "opc.tcp://172.30.1.195:32210/UA/VSE/Server"

# STRING DE CONEXÃO À BASE DE DADOS ManSimoldes
db_connection_string = (
    r"DRIVER={SQL Server};"
    r"SERVER=SPMANTMP\SQLEXPRESS;"
    r"DATABASE=ManSimoldes;"
    r"Trusted_Connection=yes"
)

# DEFINIÇÃO DOS VALORES ALERTA PARA OS INDICADORES DE CONDIÇÃO
triggers = {
    "S1_Electric_Problems": 3,
    "S1_Bearings": 30,

    "S2_Bearings": 30,
    "S2_General_Condition": 1,

    "S3_Bearings": 30,

    "S4_aRMS": 60,
    "S4_vRMS_Safety_Indicator": 1
}

# DEFINIÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS PARA OS INDICADORES DE CONDIÇÃO
limit_values = {
    "S1_Electric_Problems": 2,
    "S1_Bearings": 50,

    "S2_Bearings": 50,
    "S2_General_Condition": 0.1,

    "S3_Bearings": 50,

    "S4_aRMS": 200,
    "S4_vRMS_Safety_Indicator": 0.2
}

# IDENTIFICAR AS TABELAS
table_mapping = {
    "S1": "Electric Motor DS2-160M054W-35-5-A0",
    "S2": "Pump 1 - AH A4VSO 71 DFEH/10R-VZB25K99-S2332",
    "S3": "Pump 2 - AH A4F 0 56/10R-VZB25K99-S2196",
    "S4": "Pump 3 - SYDFEE-3X/045R-VRB22U00S0479-A2A0FLX-022"
}

# CONFIGURAÇÕES GERAIS
WR_equipment = 'IMM-0052' # Código do equipamento no SGM
WR_system = '2.03.50' # Código do sistema do equipamento no SGM

```

```
WR_destination_code = 'MAN.EMC' # Código da equipa de manutenção que
realiza as tarefas no SGM
max_number_over_trigger = 3 # Número máximo diário que o valor gatilho é
ultrapassado, para ser iniciada a avaliação ao indicador de condição a ser
avaliado
trigger_increment = 0.5 # % de aumento do valor alarme após o indicador de
condição ser avaliado
limit_value_increment = 2 # % de aumento do valor máximo limite depois do
indicador de condição ser avaliado
current_date = datetime.now().strftime('%Y-%m-%d')

main(server_url,triggers,limit_values,table_mapping,WR_equipment,WR_system,
WR_destination_code,

max_number_over_trigger,trigger_increment,limit_value_increment,current_dat
e)
```

### Anexo 13 – Tabela de Dados Estatísticos Diários do Indicador de Condição S2\_Bearings

| Data       | S2_Bearings_Max | S2_Bearings_Avg | S2_Bearings_Avg_Upper |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------------|
| 27/07/2024 | 14.618221       | 1.730103        | 6.113659              |
| 28/07/2024 | 19.650131       | 1.742654        | 6.427166              |
| 29/07/2024 | 15.741533       | 1.779142        | 6.096424              |
| 30/07/2024 | 17.820999       | 1.775221        | 6.169989              |
| 31/07/2024 | 47.480362       | 1.66523         | 5.095675              |
| 01/08/2024 | 16.142015       | 1.730041        | 5.597534              |
| 02/08/2024 | 16.949115       | 1.616543        | 5.877411              |
| 03/08/2024 | 17.79657        | 1.70737         | 6.171281              |
| 04/08/2024 | 18.686403       | 1.702739        | 6.479846              |
| 05/08/2024 | 19.620723       | 1.802876        | 6.803839              |
| 06/08/2024 | 20.601752       | 1.808019        | 7.144028              |
| 07/08/2024 | 21.63184        | 1.81842         | 7.50123               |
| 08/08/2024 | 22.713432       | 1.834341        | 7.876291              |
| 09/08/2024 | 23.849103       | 1.956058        | 8.270105              |
| 10/08/2024 | 25.041559       | 1.953861        | 8.683611              |
| 11/08/2024 | 26.293637       | 1.818054        | 9.117791              |
| 12/08/2024 | 27.608322       | 1.958957        | 9.573682              |
| 13/08/2024 | 28.988739       | 1.706905        | 10.052367             |
| 14/08/2024 | 30.438174       | 1.96225         | 10.554984             |
| 15/08/2024 | 31.960087       | 1.825363        | 11.082735             |
| 16/08/2024 | 33.55809        | 1.996631        | 11.636871             |
| 17/08/2024 | 35.235999       | 1.976463        | 12.218716             |
| 18/08/2024 | 36.997797       | 2.065286        | 12.829652             |
| 19/08/2024 | 38.847684       | 2.16355         | 13.471133             |
| 20/08/2024 | 40.790064       | 2.071727        | 14.144688             |
| 21/08/2024 | 42.829573       | 2.190314        | 14.851925             |
| 22/08/2024 | 44.971055       | 2.31983         | 15.594522             |
| 23/08/2024 | 47.219603       | 2.160821        | 16.374246             |
| 24/08/2024 | 49.580582       | 2.313862        | 17.192959             |
| 25/08/2024 | 52.05961        | 2.579555        | 18.052606             |
| 26/08/2024 | 54.662593       | 2.858533        | 18.955237             |
| 27/08/2024 | 57.395726       | 3.15146         | 19.903                |
| 28/08/2024 | 60.265513       | 3.459033        | 20.89815              |
| 29/08/2024 | 63.278782       | 3.781984        | 21.943056             |
| 30/08/2024 | 66.442719       | 3.921083        | 23.040208             |
| 31/08/2024 | 69.764863       | 5.477138        | 24.192221             |

## **Anexo 15 – Declaração de Integridade**

### **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

ISEP, Porto, 15 de setembro de 2024