

Integração de *Edge Computing* e IoT em equipamento CNC de 5 eixos

João Miguel Costa Carvalho

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Fernando Gomes de Almeida

Coorientador no INEGI: Engº Luís Carlos Moreira



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Março de 2021

The first rule of any technology used in a business is that automation applied to an efficient operation will magnify the efficiency. The second is that automation applied to an inefficient operation will magnify the inefficiency.

Resumo

Este documento apresenta a dissertação desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O tema a desenvolver nesta tese de mestrado tem como objetivo conceber e implementar soluções para a digitalização de equipamentos CNC de 5 eixos, cuja sua conceção original não previa uma integração direta com as novas abordagens da Indústria 4.0 e a IoT.

Combinar a natureza rápida do *Edge Control* com algumas das capacidades de análise de dados das aplicações é uma abordagem que faz parte de uma tendência cada vez mais ampla, o *Industrial Edge Computing*, que está a ganhar relevância. Atualmente há uma necessidade cada vez maior de contar com capacidades de processamento de dados no *Edge*: aplicações como a gestão de ativos no chão de fábrica necessitam de monitorizar o desempenho e processar os dados em tempo real para funcionarem corretamente.

Na prática, isto significa que os dados devem ser armazenados e analisados o mais próximo possível do local onde são produzidos. A latência é um inimigo – e em algumas aplicações de controlo estamos a falar de alguns milissegundos. A viagem de ida e volta a um *Data Center* na *Cloud* não é viável. Para fazer face a estes desafios à medida que entramos cada vez mais na Indústria 4.0, vamos ouvir falar cada vez mais do *Industrial Edge Computing*. Para apoiar estes propósitos, é importante combinar o poder e a flexibilidade do *Edge Computing* com as capacidades de *Machine Learning* e da *Internet of Things* que se podem traduzir numa fase posterior num planeamento de manutenção preditiva com a IoT. É assim proposto sustentar e conceber uma plataforma IIoT estabilizada que permita integrar em rede os diversos equipamentos implementados, potencialmente contribuindo para a digitalização do equipamento. O elemento central do trabalho consistiu na seleção de uma solução no âmbito da IIoT e da automação avançada para controlo de todo o sistema sensorizado.

Para a manutenção ser preditiva, e por isso, possível de agendar e monitorizar, os sensores podem ser integrados através de módulos de comunicação dos mesmos com a plataforma do INEGI. A interligação inteligente de componentes individuais permite criar uma base sólida de dados que podem ser usados para tratar de problemas estruturais dos ativos antecipadamente. Desta forma, é possível prolongar o ciclo de vida dos ativos e é neste contexto que se insere a implementação num equipamento CNC desta tecnologia na presente dissertação recorrendo à filosofia CBM (*Condition-based maintenance*) com recurso a monitorização da vibração através da simbiose entre a tecnologia de *Edge Computing* e a IoT.

Integration of Edge Computing and IoT in 5-axis CNC equipment

Abstract

This document presents the dissertation developed under the Integrated Master in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto. The theme to be developed in this master's thesis aims to conceive and implement solutions for the digitization of 5-axis CNC equipment, whose original design did not provide for a direct integration with the new approaches of Industry 4.0 and IoT.

Combining the fast nature of Edge Control with some of the data analysis capabilities of applications is an approach that is part of an increasingly broad trend, Industrial Edge Computing, which is gaining relevance. There is an increasing need today for data processing capabilities on the Edge: applications such as asset management on the shop floor need to monitor performance and process data in real time to work properly.

In practice, this means that data should be stored and analyzed as close as possible to the place where it is produced. Latency is an enemy - and in some control applications we are talking about a few milliseconds. Traveling to and from a Cloud Data Center is not feasible. To face these challenges as we enter Industry 4.0, we will hear more about Industrial Edge Computing. To support these purposes, it is important to combine the power and flexibility of Edge Computing with the capabilities of Machine Learning and the Internet of Things that can translate into a predictive maintenance planning with the IoT at a later stage. It is therefore proposed to support and design a stabilized IIoT platform that allows the various equipment implemented to be integrated into the network, potentially contributing to the digitalization of the equipment.

For maintenance to be predictive, and therefore possible to schedule and monitor, the sensors can be integrated through their communication modules with the INEGI platform. Intelligent interconnection of individual components allows you to create a solid database that can be used to address structural asset issues in advance. In this way, it is possible to extend the life cycle of the assets and it is in this context that the implementation in a CNC equipment of this technology is inserted in this dissertation using the CBM (Condition-based maintenance) philosophy using the vibration monitoring through the symbiosis between the Edge Computing technology and IoT.

Agradecimentos

Nota de agradecimento ao Professor Fernando Gomes de Almeida por toda a contribuição para a curva de aprendizagem ao longo do curso em diversas unidades curriculares na especialização de Automação Industrial e pelo acompanhamento e opiniões transmitidas, essenciais para a realização da presente dissertação.

Ao Engenheiro Luís Carlos Moreira, na qualidade de meu coorientador no INEGI, agradeço a disponibilidade, conhecimentos transmitidos, motivação e dicas valiosas no desenvolvimento de todo o projeto

De uma forma geral, a todos os colaboradores do INEGI que me ajudaram indiretamente em alguma fase do projeto.

Para os meus pais, a minha irmã e para a minha família, os pilares da minha evolução enquanto cidadão e homem. Aos meus companheiros da faculdade de engenharia Nuno, Matias e Pedro Jorge um obrigado pelo companheirismo durante o percurso. E para a minha namorada Ana, presente nos momentos mais importantes.

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do projeto CHETO_IIoT - Sistema inovador de manutenção preventiva e monitorização avançada para máquina ferramenta de furação profunda e fresagem integrando novos avanços em tecnologia Indústria 4.0, Projetos de I&D - Projetos Individuais com numero 45330, que é cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Índice de Conteúdos

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos.....	ix
Índice de Figuras	xiv
Índice de Tabelas	xix
Siglas e Acrónimos.....	xxi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2 A Engenharia Mecânica no âmbito da Engenharia de Automação	2
1.3 O Projeto de Dissertação integrado na Unidade de Desenvolvimento de Produto e Sistemas (DPS) do INEGI.....	2
1.4 Objetivos do Projeto de Dissertação	4
1.5 Arquitetura de monitorização	4
1.6 Topologia de implementação baseada em IoT Industrial e Edge Computing	5
1.7 Especificações iniciais para a seleção de sensores.....	5
1.8 Sensorização e aquisição de dados.....	8
1.9 Método seguido no projeto.....	8
1.10 Estrutura da Dissertação.....	9
2 Revisão da Literatura e do Estado de Arte	11
2.1 O que se entende efetivamente por Automação Industrial?.....	11
2.2 Conceitos de Automação	12
2.3 Revoluções Tecnológicas e Industriais	12
2.4 Sistemas Cíberfísicos.....	13
2.5 Indústria 4.0	13
2.5.1 Forças Motrizes da Indústria 4.0.....	13
2.5.2 Barreiras na Implementação da Indústria 4.0	14
2.5.3 Internet das Coisas: “IoT”	15
2.5.4 Novas Arquiteturas: edge-to-cloud	16
2.5.5 Digital Twin	17
2.6 Diferenças entre tecnologia de informação (TI) e tecnologia operacional (OT)	17
2.7 Protocolos de conectividade industrial emergentes	18
2.7.1 IO-Link	19
2.7.2 OPC UA	20
2.7.3 MQTT.....	21
2.8 Modelo da arquitetura de referência padrão da “Indústria 4.0” -RAMI 4.0	22
2.9 Sensorização	23
2.9.1 Tecnologia de acelerómetros	24
2.9.2 Análise técnica de vibrações	25
2.9.3 Detecção e diagnóstico de falhas.....	29
2.9.4 Vibrações em diferentes componentes	30

3	Implementação do projeto em estudo e enquadramento no INEGI.....	32
3.1	Descrição Genérica do Equipamento: fresadora CNC multiaxial Flexioptima 5Axis	32
3.2	Processo de Fresagem	33
3.3	Componentes típicos de um sistema CNC	34
3.4	Definição dos parâmetros de trabalho	35
3.5	Enquadramento na arquitetura e servidor da Unidade de Desenvolvimento de Produto e Sistemas (DPS) do INEGI	35
3.6	A Convergência de IT e OT no projeto	38
3.7	Seleção dos dispositivos	39
3.7.1	Edge Computer ADLINK MCM-100	40
3.7.2	Sensores de Vibração	40
3.7.3	Sensores de Temperatura	43
3.7.4	Eletrónica de diagnóstico	44
3.7.5	Siemens Simatic IOT 2000	45
3.8	Integração dos dispositivos IoT com os protocolos de comunicação	46
3.9	Softwares de parametrização	52
3.10	Sensorização e incorporação dos dispositivos no equipamento	53
3.11	Configurações realizadas nos software de parametrização	61
4	Solução de Comunicação.....	66
4.1	Arquitetura digital.....	66
4.2	Estrutura de monitorização.....	67
4.3	Abordagem Prática: metodologia da solução de integração final	68
5	Conceção da Interface Gráfica: uma abordagem dinâmica baseada em Node-RED	74
5.1	Criação de nós	76
5.2	Composição dos fluxos	79
5.3	Design e validação do <i>dashboard</i> funcional do equipamento	82
6	Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros	88
6.1	Conclusões.....	88
6.2	Trabalhos Futuros	89
6.2.1	Análise de vibração	90
6.2.2	<i>Machine Learning</i>	90
	Referências.....	95
ANEXO A:	Normas.....	99
ANEXO B:	Ligações elétricas	100

Índice de Figuras

Figura 1.1-Interface entre o processo/controlador [1].	2
Figura 1.2 - Esquema funcional dos projetos integrantes da divisão DPS do INEGI em implementação atualmente.	3
Figura 1.3 -Fluxograma da arquitetura geral de monitorização.	4
Figura 1.4 - Etapas de implementação da arquitetura baseada na tecnologia de <i>Edge Computing</i> .	5
Figura 1.5 - Aquisição de dados/sinais usados em processos de maquinagem [2].	8
Figura 1.6 - A otimização das operações de um sistema industrial exige ciclos iterativos	9
Figura 1.7 - Estrutura da dissertação.	10
Figura 2.1 - Forças motrizes da indústria 4.0 [11].	14
Figura 2.2 - Potencial económico da IOT em 2025 [31].	16
Figura 2.3 - Arquiteturas <i>Edge-to-Cloud</i> [33].	16
Figura 2.4 - Composição e mecanismos de operação de um Digital Twin [36].	17
Figura 2.5- Diferenças entre TI e OT [37].	18
Figura 2.6 - Protocolos de conectividade industrial a emergir [39].	19
Figura 2.7 - Arquiteturas possíveis do IO-Link. [40]	20
Figura 2.8 - Arquitetura multicamadas do OPC UA [41].	21
Figura 2.9 - Arquitetura MQTT: publish/subscribe [43].	22
Figura 2.10 - Arquitetura de Referência RAMI 4.0 [46].	23
Figura 2.11 - Severidade de Vibração: classe de máquinas – ISSO 10816,	27
Figura 2.12 - Severidade de Vibração: ISO 10816	28
Figura 2.13 - Explicação ilustrada da visão da vibração no domínio do tempo (canto inferior esquerdo) e no domínio da frequência (canto inferior direito) [61].	29
Figura 3.1 - Arquitetura de integração e comunicação dos sensores e/ou <i>hardware</i> periférico com o equipamento CNC para recolha e tratamento de dados.	32
Figura 3.2 - Equipamento alvo do projeto de dissertação. Fresadora CNC de 5 Eixos com controlador <i>Fagor</i> .	33
Figura 3.3- Especificações técnicas do equipamento.	33
Figura 3.4 - Principais componentes e eixos de deslocamento do equipamento CNC Flexioptima.	34
Figura 3.5 - Representação esquemática genérica da relação parâmetros de entrada e variáveis de saída num sistema de controlo	35
Figura 3.6 - Arquitetura IIoT da Unidade de Desenvolvimento de Produto e Sistema	35
Figura 3.7 - Página inicial do ambiente de trabalho do Node-RED. Exemplo de um <i>flow</i> utilizado durante o projeto na configuração de um sensor de vibração.	37
Figura 3.8 - Conceitos de Node-Red: tipos de nós.	38
Figura 3.9 - Conceitos de <i>import nodes</i> e <i>export nodes</i> no Node-Red.	38
Figura 3.10- Convergência dos domínios IT e OT	39
Figura 3.11- Detalhes da ligação do sensor triaxial ao <i>edge computer</i> .	42
Figura 3.12 - Corrente de Excitação para medição do Sensor IEPE do <i>edge computer</i> MCM-100.	42

Figura 3.13 - Sensor Triaxial <i>Bruel & Kjaer</i> conectado ao <i>edge computer</i> por IEPE	43
Figura 3.14 - Configuração e interfaces do módulo Input/Output	45
Figura 3.15 - Ligação à fonte de alimentação (1) do SIMATIC IOT 2000.....	46
Figura 3.16 - Porta IoT do IO-Link <i>master</i>	46
Figura 3.17 - Importação do Nó do IO-Link <i>master</i>	47
Figura 3.18 - Ligação do IO-Link <i>master</i> por MQTT no Node-RED.....	47
Figura 3.19 - Dados de processo exibidos de acordo com a ordem de classificação do dispositivo para leitura dos dados de entrada.....	48
Figura 3.20 - Programação em <i>JavaScript</i> da função que permite fazer a leitura dos dispositivos IO-link. Neste caso é apresentado a função correspondente ao sensor VVB010 conectado na porta 1 do IO-Link <i>master</i>	49
Figura 3.21 - Programação em <i>Javascript</i> da função que permite a leitura do parâmetro pico de vibração para aquisição de dados do sensor VVB010 do nó intitulado “VVB_a-Peak”.	49
Figura 3.22 - Programação do <i>flow</i> do sensor VVB010 no ambiente de execução do Node-RED para aquisição de dados e leitura dos parâmetros de vibração e temperatura.	50
Figura 3.23 - Características Modbus TCP do dispositivo VSE 153, retirado do manual de produto do fabricante <i>IFM</i>	50
Figura 3.24 - Códigos de função <i>input</i> e <i>output</i> Modbus TCP do dispositivo VSE 153; Em cima: código de função <i>input</i> . Em baixo: código de função <i>output</i> . Retirado do manual do fabricante.	51
Figura 3.25 - Nó para protocolo Modbus no Node-RED.	51
Figura 3.26 - Programação do <i>flow</i> do dispositivo VSE153 para aquisição de dados e medição dos respetivos parâmetros no ambiente de execução do Node-RED de um dos sensores de vibração VSA005.	51
Figura 3.27 - Configuração do nó “ <i>Modbus-Getter</i> ” para leitura de registos de <i>input</i> do parâmetro velocidade (“V_RMS”) do dispositivo VSE 153.	52
Figura 3.28 - Visualização do <i>cockpit</i> do software de parametrização LR <i>Device</i> . 1- Sensores integrados; 2- <i>Display</i> dos parâmetros pelo <i>dashboard</i> do <i>software</i>	53
Figura 3.29 - Sensores de vibração conectados no <i>software</i> de parametrização VES004.	53
Figura 3.30 - Disposição e montagem dos elementos em banca e respetiva calha DIN.	54
Figura 3.31 - Realização das correspondentes ligações elétricas.	54
Figura 3.32 - Sensor de Vibração VSA005 (esquerda); Sensor de Vibração VVB010 (direita); submetidos aos primeiros testes de ligação para verificação de funcionamento.....	55
Figura 3.33 - Esquema de cablagem e ligações elétricas do dispositivo VSE153 (esquerda); Ligação do sensor de vibração VSA005 ao dispositivo VSE153 correspondente ao sensor 1 no esquema de cablagem (direita).	55
Figura 3.34 - Impressão 3D da caixa depois de modelada nas instalações do INEGI.	56
Figura 3.35 - Fixação dos dispositivos na estrutura maciça do pórtico da máquina.	56
Figura 3.36 - Disposição final com a respetiva tampa de encaixe em PLA (verde).	57
Figura 3.37 - Constrangimentos estruturais associados ao veio fuso de esferas e aos seus rolamentos.	58
Figura 3.38 - Cabeçote do equipamento CNC com acessibilidade ao corpo estrutural do componente.....	58
Figura 3.39 - Visão geral esquemática dos locais de implementação de cada sensor no equipamento e do sistema de eixos correspondente.	59

Figura 3.40 - Implementação do sensor de vibração axial VVB010 no corpo do cabeçote na direção do eixo X (esquerda); Sensor de vibração axial VSA 005 implementado na estrutura do cabeçote na direção do eixo Y (direita).	60
Figura 3.41 - Fixação do sensor de vibração axial VSA005 instalado no corpo do motor Mz na direção do eixo Z, responsável pelo acionamento do veio fuso de esferas do eixo árvore. Fixação do sensor de temperatura TS2229 e sensor de vibração VSA005 implementados na direção do Eixo Y, no corpo do motor My (esquerda); Fixação do Sensor de vibração triaxial 4535-B na estrutura rígida da máquina (direita).	60
Figura 3.42 - Implementação do sensor de temperatura TS2229 e do sensor de vibração VSA005 fixados no corpo do motor Mx, na direção axial X.	61
Figura 3.43 - Visualização da conexão dos quatro sensores de vibração VSA005 na entrada dinâmica do dispositivo da eletrônica de diagnóstico VSE153 no <i>software</i> de parametrização VES004.	62
Figura 3.44 - Criação de um objeto de medição para o valor RMS de um sensor de vibração VSA005 no <i>software</i> VES004.	62
Figura 3.45- Definição dos valores limite do parâmetro de acordo com a norma ISO 10816.	63
Figura 3.46 - Número de registos associados aos objetos criados para os parâmetros de vibração no <i>software</i> VES004.	63
Figura 3.47 - Programação e aquisição de dados do parâmetro velocidade RMS dos sensores VSA005 no programa Node-RED.	64
Figura 3.48 - Exemplo de visualização gráfica após configuração do parâmetro velocidade RMS no <i>software</i> VES004.	64
Figura 4.1 - Arquitetura digital genérica de comunicação.	66
Figura 4.2 - Proposta de modelo de funcionamento para integração do equipamento com as tecnologias respetivas associadas.	68
Figura 4.3 - Esquema geral das ligações Ethernet realizadas na rede para comunicação de todos os equipamentos.	71
Figura 4.4 - ‘Derivação’ dos sinais dos <i>racks</i> do PLC para as entradas digitais do simatic IOT 2000.	72
Figura 4.5 - Esquema exemplificativo da “derivação” de sinais dos <i>racks</i> do PLC para o dispositivo SIMATIC IOT2000.	72
Figura 4.6 - Proposta de solução final para integração do <i>hardware</i> com o equipamento CNC e implementação da comunicação com o servidor INEGI.	73
Figura 5.1 - Sistema virtual (externo) que suporta a interface de programação que permite ao utilizador visualizar o <i>dashboard</i>	74
Figura 5.2 - Processo de aquisição de dados dos IO-link <i>master</i> pelo protocolo MQTT para visualização no <i>dashboard</i>	75
Figura 5.3 - Fluxo da programação da interface frontal no ambiente de execução do Node-RED.	75
Figura 5.4 - Programação dos nós no ambiente de execução do Node-RED para aquisição de dados do sensor triaxial de vibração através da ligação MQTT ao <i>Edge Computer</i>	77
Figura 5.5 - Configuração do nó de injeção denominado <i>timestamp</i> (a azul).	77
Figura 5.6 - Programação dos nós no ambiente de execução do Node-RED para aquisição de dados dos sensores de temperatura e do sensor de pressão conectados ao IO-Link <i>master</i> através do nó de injeção (<i>inject</i>).	78
Figura 5.7 - Representação do código de função para aquisição dos parâmetros de vibração: velocidade, aceleração e deslocamento do sensor triaxial, para os três eixos correspondentes: X, Y e Z.	78

Figura 5.8 - Fluxo de Node-RED da fonte de dados que lida com a entrada de dados do sensor VVB010 usando um <i>request</i> HTTP, computando e monitorizando os parâmetros de vibração definidos.	79
Figura 5.9 - Construção do <i>flow</i> associado à aquisição de sinais digitais do dispositivo simatic IOT.	80
Figura 5.10 - Composição do fluxo que permite apresentar os ficheiros de erros do controlador da máquina.....	80
Figura 5.11- Representação parcial do fluxo dos parâmetros de vibração dos sensores VSA005 configurados por Modbus.....	81
Figura 5.12 - Representação parcial da programação do fluxo dos parâmetros de vibração dos sensores VSA005 configurados por Modbus.	81
Figura 5.13 - Visualização da programação do fluxo do sensor VVB010 conectado ao IO-Link <i>master</i>	82
Figura 5.14 - Visualização do painel frontal do utilizador no <i>dashboard</i>	82
Figura 5.15 - Seleção do equipamento no <i>dashboard</i>	83
Figura 5.16 - Visualização da <i>tab</i> “Dispositivos IoT” no <i>dashboard</i>	83
Figura 5.17 - Visualização da monitorização dos sensores instrumentados no corpo do cabeçote.	84
Figura 5.18 - Visualização do painel de instrumentação dos eixos do equipamento e de todos os componentes associados.	84
Figura 5.19 - Visualização dos <i>widgets</i> dos parâmetros de vibração do cabeçote também na <i>tab</i> deste componente (seção parcial do <i>dashboard</i>).	84
Figura 5.20 - Visualização da monitorização de vibração do sensor triaxial.....	85
Figura 5.21 - Visualização da monitorização de vibração do Eixo X (seção parcial do <i>dashboard</i>).	85
Figura 5.22 - Visualização da monitorização do Eixo Y (seção parcial do <i>dashbaord</i>)	85
Figura 5.23- <i>Display</i> dos erros do controlador da máquina na <i>tab</i> “Alarmes Log” do <i>dashboard</i>	86
Figura 6.1 - Ligações entre o <i>Edge Computer</i> e a Fonte de Tensão e integração no armário da máquina.	101

Índice de Tabelas

Tabela 1-1 Tipologias de análise e respetiva aplicabilidade na interpretação de dados.....	6
Tabela 1-2 Associação de diferentes tipos de sensores para diferentes medições em aplicações industriais	7
Tabela 2-1diferenças entre as diferentes tecnologias de acelerómetros consideradas [55].....	25
Tabela 2-2 Recomendação do parâmetro para análise correspondente a uma gama de frequências.....	26
Tabela 3-1- especificações do <i>edge computer</i> utilizado no projeto.....	40
Tabela 3-2 detalhes técnicos dos sensores de vibração <i>IFM</i>	Erro! Indicador não definido.
Tabela 3-3detalhes técnicos do sensor triaxial da Bruel & Kjaer.....	41
Tabela 3-4 Detalhes técnicos do sensor de temperatura TS2229 da <i>IFM</i>	43
Tabela 3-5 Descrição geral da eletrónica de diagnóstico <i>IFM</i> utilizada no projeto.	44
Tabela 3-6 Síntese e associação entre as referências dos sensores e a respetiva colocação.....	61
Tabela 3-7 Associação entre os parâmetros de vibração configurados no <i>software</i> VES004 e o respetivo código de função Modbus dos sensores.....	65
Tabela 4-1 Representação de endereços IP e endereços <i>subnet mask</i>	70

Siglas e Acrónimos

3D – Tridimensional
BPF- *Ball Pass Frequency*
BPFO-*Ball Pass Frequency Outer*
CBM- Manutenção Baseada em Condições
CNC- Controlo Numérico Computorizado
CPS - *Cyber-physical systems*
DHCP- *Dynamic Host Configuration Protocol*
DT- *Digital Twin*
EC-*Edge Computing*
ERP-*Enterprise Resource Planning*
FA- Fabrico Aditivo
FFT- *Fast Fourier Transform*
HTTP-*Hypertext Transfer Protocol*
IEPE- *Integrated Electronics Piezo-Electric*
IoS- *Internet of services*
I/O – Entrada/Saída, do inglês *Input/Output*
IoT - *Internet of things*
IIoT- *Industrial Internet of Things*
IP-*Internet Protocol*
IT-*Information technology*
JSON- *Java Script Object Notation*
LAN – *Local Area Network*
MEMS- (Sistema microeletromecânico)
MES-*Manufacturing Execution System*
ML-*Machine Learning*
MQTT-*Message Queuing Telemetry Transport*
OPC UA- *OPC Unified Architecture*
OT-*Operational technology*
PLA - Ácido Polilático
PDM - Manutenção Preditiva
RMS- *Root Mean Square*
SCADA- *Supervision, Control and Data Acquisition*
SOA- Arquitetura Orientada a Serviços
TCP-*Transmission Control Protocol*
UDP- *User Datagram Protocol*
WWE -*World Economic Fórum*

1 Introdução

O foco desta dissertação é a integração de *Edge Computing* em equipamentos CNC na era da Indústria 4.0. Na Indústria 4.0 e na era da *Internet of Things*, todos os componentes num ambiente de produção estão conectados entre si por uma infraestrutura digital, tornando-os parte integrante do processo. As soluções digitais IoT baseadas em dados assentam em 5 funções principais: recolha de dados, processamento de dados, comunicação e análise de dados e interação com o utilizador. Este é o ponto de partida, para a problemática proposta na presente dissertação.

Estas soluções digitais criam novas oportunidades para acrescentar valor, melhorando a eficácia do equipamento ou criando relatórios automatizados pormenorizados para um controlo eficaz do sistema. Com a introdução de conceitos como *Internet of Things* e *Industry 4.0*, torna-se cada vez mais importante conseguir prever as tecnologias industriais do futuro e como as alcançar. Utilizando tecnologias como serviços de *cloud* e comunicações bilaterais entre os vários componentes fabris será possível não só comunicar para a máquina da fábrica, como esta poderá devolver dados ao sistema SCADA (sistema de supervisão, controlo e aquisição de dados), comunicando assim qualquer falha que possa existir e ao mesmo tempo fornecendo dados relevantes para o processo de fabrico.

Para conseguir chegar a este ponto, será preciso desenvolver sistemas de comunicação e produção que consigam acomodar todo o tipo de comunicações quer horizontal, quer vertical, ao nível da pirâmide de automação. É com este aproveitamento das tecnologias de computação industrial e com a crescente expansão da largura de banda e a com a progressiva disponibilidade de serviços em nuvem e a respetiva potência crescente do processamento gráfico e interação utilizador-interface, que se está a ir além do ecrã e a entrar na produção industrial.

As soluções de *Edge Computing* para aumentar o desempenho são, no entanto, apenas um dos caminhos para gerir os desafios da era dos produtos conectados da Indústria 4.0 que enfrentamos. Não precisamos apenas de mais energia ou mais velocidade de computação. Precisamos de ser capazes de corresponder à procura proveniente da proliferação de dispositivos e dados recolhidos. Precisamos de ser capazes de usar recursos de computação em situações e contextos que sejam significativos e em tempo real, mesmo que os ativos do chão de fábrica apresentem constrangimentos a esse nível de integração.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

A presente dissertação intitulada “Integração de *Edge Computing* e IoT em equipamento CNC de 5 eixos” foi realizada no INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial. Constituído oficialmente a 20 de janeiro de 1986, o INEGI é uma referência incontornável no panorama nacional de inovação e investigação, no campo da ciência e inovação em engenharia mecânica e industrial.

Desde a sua fundação, o Instituto afirmou-se como um agente ativo do sistema nacional de I&D e um parceiro tecnológico de excelência para a indústria em território nacional. As empresas industriais estão cada vez mais interessadas nas operações remotas – e por boas razões. Com a Indústria 4.0 e um certo nível adequado de cibersegurança, a gestão remota permite aos agentes industriais do chão de fábrica continuar a ajustar processos, realizar manutenção e tomar decisões operacionais com uma visão prática e eficiente, mesmo quando o acesso físico às instalações é limitado.

Essa situação destaca também a importância do *Edge Industrial*. É nesse contexto que a presente dissertação é realizada, nas instalações do INEGI, com a implementação de *Edge Computing* que tem vindo a crescer e agora com o acelerar da transformação digital ainda mais, uma evolução e inovação a todos os níveis do qual o INEGI se tem posicionado como um dos principais *players* no panorama da indústria.

1.2 A Engenharia Mecânica no âmbito da Engenharia de Automação

Para a materialização de engenharia de automação é necessário congrega dois recursos fundamentais: ciência e tecnologia. Se por um lado não é fácil detalhar e justificar formalmente as ciências e tecnologias a que a engenharia de automação necessita recorrer, é sem dúvida mais fácil contextualizá-la no seio da engenharia mecânica. E tendo em conta os objetivos inerentes da dissertação que o projeto será desenvolvido abordando os sistemas industriais relacionados mas também todos os condicionalismos que possam ser impostos pelo sistema a integrar.

Dada a diversidade de processos que podem ser automatizados no espectro da engenharia de automação, a automação de diferentes processos exige soluções distintas, tanto ao nível da informação, como da tecnologia e da energia.

Os aspetos tecnológicos de maior relevo para a automação de processos no âmbito da engenharia mecânica são: os sensores, os atuadores e os mecanismos. Os sensores e os atuadores desempenham a função de interface entre os controladores e os objetos controlados. Aos mecanismos compete o papel de fazer de interface entre os atuadores e os materiais a processar. Os mecanismos sendo responsáveis pela transformação do movimento dos atuadores em movimentos com as características necessárias do processo são os elementos que contribuem para o correto funcionamento das máquinas [1].

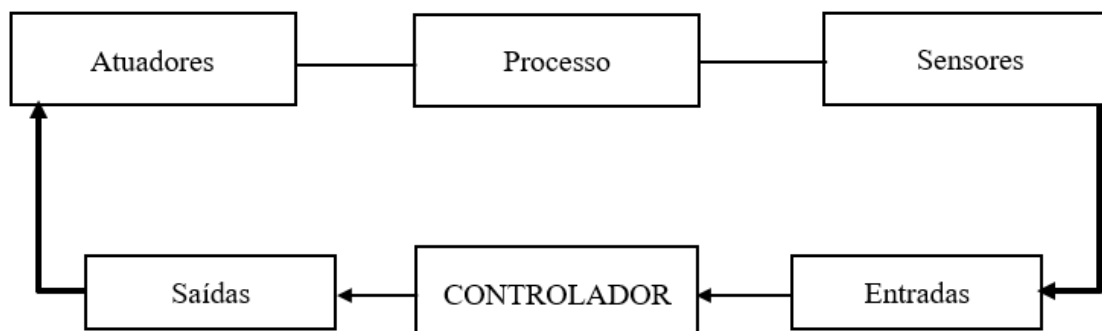


Figura 1.1- Interface entre o processo/controlador [1].

1.3 O Projeto de Dissertação integrado na Unidade de Desenvolvimento de Produto e Sistemas (DPS) do INEGI

Na sua estratégia de investimento, o INEGI, nomeadamente a unidade de Desenvolvimento de Produto e Sistemas, tem vindo a apostar na exploração de tecnologias de fabrico aditivo, automação avançada e robótica.

No âmbito de desenvolvimento de competências nas áreas da IoT e automação avançada, a unidade de Desenvolvimento de Produto e Sistemas possui na sua infraestrutura informática diversas soluções de *software* e *hardware*. Estas soluções têm como objetivos:

- **Implementar** e **testar** diferentes protocolos de comunicação, *hardware*, *software*, plataformas de *cloud* e todo o tipo de soluções que possam ser uma mais-valia para a unidade no âmbito da IIoT e da Automação Avançada;
- Criar essa **implementação** e teste numa perspetiva de médio longo prazo, permitindo validar da melhor forma o comportamento e robustez dos elementos testados;

- **Gerar quantidades** apreciáveis de dados para implementar e validar diferentes abordagens ao seu tratamento;
- **Sustentar uma plataforma IIoT estabilizada** que permita integrar em rede os diversos equipamentos da unidade, potencialmente contribuindo para a sua melhor utilização.

É neste contexto que se situa a proposta da presente dissertação de mestrado na **FEUP**. A figura seguinte apresenta a lista de projetos integrantes na unidade DPS:

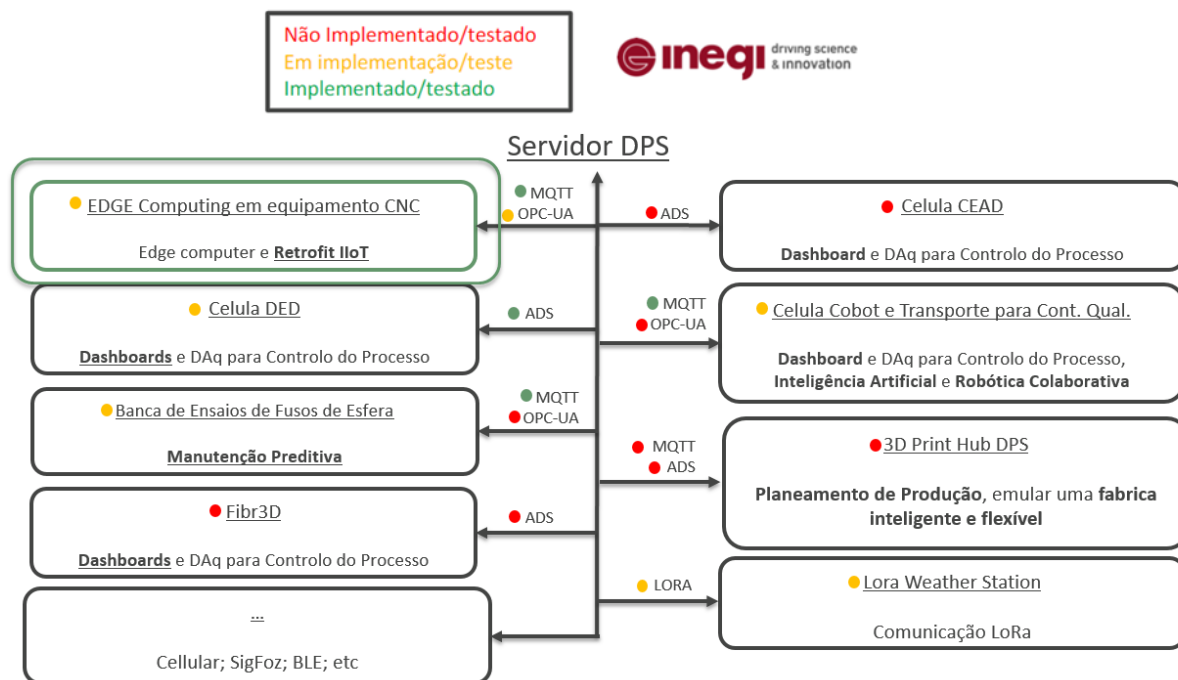


Figura 1.2 - Esquema funcional dos projetos integrantes da divisão DPS do INEGI em implementação atualmente.

A partir desse pressuposto, este projeto de dissertação inserido no conceito da Indústria 4.0 irá permitir a aquisição de dados a processar através de tecnologias de *Edge Computing* num equipamento que integra os ativos industriais do INEGI. Vários tipos de sensores disponíveis no mercado como sensores de temperatura, pressão, vibração, potência, binário, caudal, peso e deformação que fazem medições em tempo real e que permitem criar uma imagem digital do processo de produção, podem ser analisados para implementação no equipamento CNC alvo; no entanto, nem todos são adequados à problemática em estudo. Esta seleção será feita numa fase posterior.

Este equipamento CNC é um ativo utilizado com frequência em operações de maquinaria no INEGI que não dispõe de qualquer tipo de soluções de IoT e *Edge Computing* integradas atualmente. É nesse contexto que a presente dissertação se pretende focar, procurando encontrar e desenvolver formas de implementação de soluções que permitam ultrapassar as barreiras próprias do equipamento, quer ao nível de constrangimentos associados derivados do projeto inicial de *design* e desenvolvimento de construção da máquina, mas também ao nível de dificuldades impostas pelo próprio controlador integrado de raiz na máquina. Outro fator limitante poderá ser a infraestrutura de comunicação utilizada.

Nesta medida, a transposição de certos obstáculos irá permitir utilizar sistemas computacionais distribuídos e integrados por intermédio de redes de comunicação, que será possível atingir um estágio de maturidade aceitável para os requisitos industriais de um sistema de aquisição de dados, monitorização e diagnóstico remoto proposto no âmbito desta dissertação.

1.4 Objetivos do Projeto de Dissertação

Com o advento dos sistemas de automação baseados em computação distribuída com redes de campo para sensores/atuadores e tecnologia digital, pode-se ter vários benefícios em termos de funcionalidade operacional. A automação alarga os limites do chão de fábrica, sendo aplicada não só na fase de produção mas também nas fases de gestão e manutenção dos ativos.

Uma solução completa de automação deve prover metodologias de gestão na indústria e processos de forma transparente, bem como garantir que todos os esforços sejam direcionados para se atingir a meta de implementação estabelecida, facilitando a tomada de decisão quando há mudanças relevantes no desempenho de indicadores e variáveis de controlo do sistema importantes. Os objetivos gerais da dissertação são:

- **Identificar** as grandezas relevantes a monitorizar no equipamento em análise;
- **Captar** os dados recolhidos dos sensores, armazenar e disponibilizar esses mesmos dados ao utilizador através de interfaces com visualização através de *dashboards* funcionais;
- **Armazenar** e analisar dados o mais próximo possível do local onde são produzidos, porque existe a necessidade de processar grandes quantidades de dados rapidamente;
- **Selecionar** protocolos de comunicação que permitam integrar todos os dispositivos para que possam comunicar harmoniosamente entre si;
- **Potenciar** a combinação da natureza do *Edge Computing* com as capacidades de análises de dados das aplicações de *software* proprietários de diversos fabricantes;
- **Promover** a conectividade da tecnologia de *Edge Computing* com o servidor do INEGI;
- **Analisar** os parâmetros relevantes providenciados pelos diferentes *software* para otimizar o ciclo de vida do equipamento e tirar partido das potencialidades da IoT;

1.5 Arquitetura de monitorização

Considerando que um processo industrial seja composto por diversos dispositivos computacionais, com o propósito de controlar ou gerenciar um sistema específico, esses são interligados e integrados por diferentes formas. Assim a arquitetura descrita na figura 1.3, deve ser baseada nos seguintes elementos:

- Unidades simples para captar dados (I/O) sem inteligência embutida, para atuação e medição de grandezas físicas do processo;
- Dispositivos inteligentes, como sensores inteligentes ou controladores programáveis;
- Sistemas para interface homem-máquina (HMI) e supervisão.

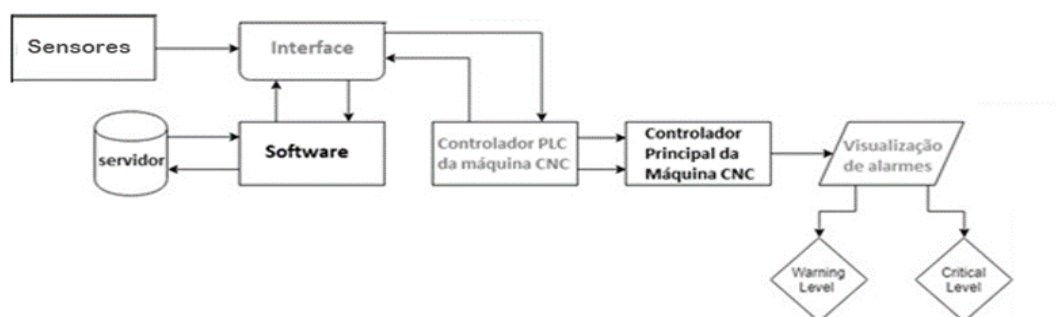


Figura 1.3 - Fluxograma da arquitetura geral de monitorização.

Todos estes dispositivos estão ligados entre si, utilizando diferentes protocolos de comunicação, permitindo sintetizar uma arquitetura inicial, descrita no fluxograma mencionado acima.

O sensor integrado envia sinais para a unidade de interface. O *software*, que é dedicado e conectado à unidade de interface, por sua vez especifica o nível de advertência e os valores de nível crítico. A seleção do sensor e a arquitetura de processamento de sinal dependem dos objetivos da aplicação que se pretende. Para simplificar e não ter problemas com a transferência de dados é essencial haver uma boa estruturação dos sinais, assegurar a compatibilidade eletromagnética e conceber uma arquitetura de rede adequada.

1.6 Topologia de implementação baseada em IoT Industrial e Edge Computing

No âmbito dos objetivos da presente dissertação, é numa arquitetura de manutenção preditiva baseada em IoT Industrial que os dados serão recolhidos e analisados. Os dados adquiridos são então modelados usando ferramentas e *software* baseados em *Edge Computing*. As etapas de processo dos sistemas de manutenção preditiva baseados em IoT industrial envolvidas são os seguintes:

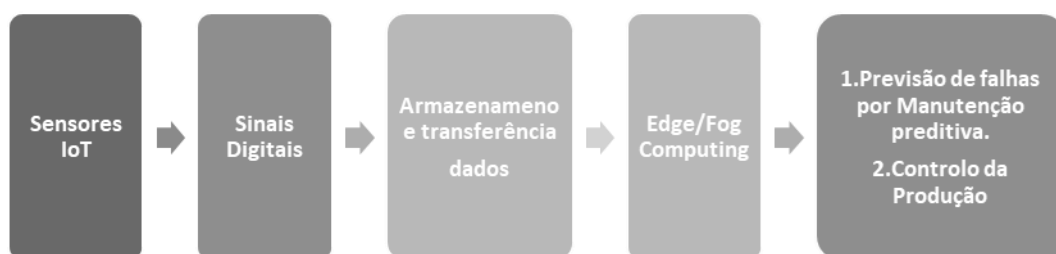


Figura 1.4 - Etapas de implementação da arquitetura baseada na tecnologia de *Edge Computing*.

O objetivo deste tipo de implementação prende-se com a manutenção e condição dos ativos, por forma a ter uma previsão de falha dos componentes estruturais sensorizados. O processamento dos dados dos sensores é feito na borda (nós de *Edge Computing*). Os *software* de parametrização utilizados numa fase posterior processam os dados enviados dos sensores IoT incorporados no ativo.

A tecnologia de *Edge Computing* combina e distribui poder de processamento entre os nós dos sensores inteligentes e as *gateways* envolvidas com o objetivo de enviar os dados certos no momento certo para sistemas de nível empresarial (ERP, MES, SCADA, etc.), se for necessário, onde diversas análises podem ser realizadas. O processo na borda permite também usar algoritmos de *machine learning* de ferramentas de análise de diversos fabricantes no mercado, é neste contexto que a implementação de sensores inteligentes permitirá ampliar o espectro de deteção e classificação de anomalias no futuro.

1.7 Especificações iniciais para a seleção de sensores

A chave para a implementação bem-sucedida de um programa de manutenção preditiva baseada em IoT é utilizar os sensores adequados para determinar a condição da máquina. A seleção dos sensores começa com a compreensão dos modos de falha potenciais de uma máquina e os sinais de alerta associados a esses modos, e às grandezas mensuráveis de medição necessárias para efetuar o controlo dessas mesmas falhas para uma instrumentação posterior.

Num programa de manutenção preditiva, os ativos são monitorizados para medir o estado atual de integridade, e diferentes sensores podem ser usados para a tarefa ou processo que se pretende. No entanto, pode ser difícil combinar o sensor com a aplicação. A escolha de um sensor requer também ter em conta algumas características, as mais importantes são fornecidas abaixo:

- **Performance:** um conjunto de características metrológicas dos sensores (precisão, linearidade, sensibilidade, etc.).

- **Confiabilidade:** os sensores devem ser escolhidos para que não alterem a confiabilidade do sistema sob vigilância.

- **Custo:** este critério deve ser levado em consideração na escolha dos sensores a fim de obter uma proposta de solução lucrativa e competitiva.

- **Número e posição:** o número de sensores depende de cada aplicação e dos objetivos esperados (redundância de sensores para vigilância e controle do sistema, estimativa de uma grandeza mensurada por uma ou mais medidas, etc.). A posição dos sensores também é um critério que deve ser considerado durante a escolha, de forma a garantir que as medidas obtidas correspondem às medidas pretendidas.

- **Tipo de fixação:** diferentes soluções de fixação são possíveis (colagem, aparafusamento, magnético ou adesivo) e a escolha depende da qualidade das medidas esperadas, no componente sob vigilância, no ambiente em que o componente opera, etc.

- **Dimensões e peso:** tamanho, forma, peso e revestimento de cada sensor são elementos a ter em conta para não influenciar as medidas que serão analisadas e respeitar as restrições de espaço.

- **Espaço:** em algumas aplicações, o acesso aos sensores pode ser difícil, ou até mesmo impossível. Portanto, os sensores devem ser escolhidos com pleno conhecimento do espaço e as suas restrições.

- **Meio ambiente:** os sensores suportam variações de parâmetros ambientais (temperaturas extremas, alta humidade, presença de radiações nucleares e eletromagnéticas, etc.). Portanto, devemos escolher os sensores de forma que as medidas provenientes deles não sejam afetadas pelas variações dos parâmetros ambientais.

Numa fase inicial devem ser analisadas e estudadas algumas técnicas para a interpretação dos dados, utilizando entre outras, diferentes tipos de análise como:

Tabela 1-1 Tipologias de análise e respetiva aplicabilidade na interpretação de dados

Descrição	Aplicabilidade	Exemplo
Análises imediatas e diretas	Comparação direta do valor ou estado de uma variável com valores padrão identificados por dimensionamento, experiência empírica ou referência justificada.	Valor de temperatura acima de um máximo pré-definido para essa zona da máquina.
Análises imediatas e combinadas	Consideração do valor de uma variável, levando em conta o estado de outras grandezas das quais a primeira é “função de”.	Análise de Vibração num ponto tendo em conta as condições dinâmicas da máquina (movimentos e cargas).
Análise de tendência temporal	Monitorização da tendência de uma variável ao longo do tempo (de forma direta ou combinada) para identificar mudanças inesperadas nessa tendência.	Condição do óleo hidráulico irá evoluir numa tendência que permite determinar a necessidade para a sua substituição.
Análise de tendência comparativa	Comparação da tendência evolutiva de determinada variável com uma tendência equivalente identificada como padrão “normal”	Se a variação dos consumíveis for muito diferente entre máquinas iguais, deverá resultar de uma falha de qualidade.

Numa análise posterior, é feita uma síntese de associação sobre os vários tipos de sensores e como implementá-los com eficácia de acordo com os requisitos de uma aplicação industrial em geral baseada em certas falhas mecânicas como mostra a seguinte tabela:

Tabela 1-2 Associação de diferentes tipos de sensores para diferentes medições em aplicações industriais

Tipo de Medição	Sensor	Informação-chave	Falhas
<i>Vibração</i>	<u>Acelerômetro Piezoelétrico</u>	Baixo ruído, frequências de até 30 kHz, bem estabelecido em aplicações de manutenção preditiva.	<i>Condição do rolamento e engrenagem, desalinhamento, desequilíbrio, condição de carga.</i>
<i>Vibração</i>	<u>Acelerômetro MEMS</u>	Baixo custo/ potência /tamanho, frequências de até 20 kHz +	<i>Condição do rolamento, engrenagem, cavitação da bomba, desalinhamento, desequilíbrio, condição de carga.</i>
<i>Pressão sonora</i>	<u>Microfone ultrassônico</u>	Baixo custo/ potência/tamanho, frequências de até 100 kHz	<i>Variações de pressão de fluido, condição do rolamento, engrenagem, desalinhamento, desequilíbrio.</i>
<i>Corrente de Motores</i>	<u>Transformador de corrente</u>	Baixo custo, não invasivo, geralmente medido no fornecimento do motor	<i>Rotores excêntricos, problemas da barra do rotor, desequilíbrio de abastecimento, problemas de rolamento.</i>
<i>Condição de óleo</i>	<u>Sensor de monitorização de partículas</u>	Viscosidade, partículas e contaminação	<i>Detetar detritos de desgaste.</i>
<i>Temperatura</i>	<u>Termografia Infravermelha</u>	Custo elevado, precisão elevada, vários ativos/fontes de calor ao mesmo tempo	<i>Localização da fonte de calor devido ao atrito, mudanças de carga, arranque/ paragem excessiva, fonte de alimentação insuficiente.</i>
<i>Temperatura</i>	<u>RTD, termopar</u>	Baixo custo, dimensão, precisão	<i>Mudança de temperatura devido ao atrito, mudanças de carga, arranque/ paragem excessiva, fonte de alimentação insuficiente.</i>

1.8 Sensorização e aquisição de dados

Para implementar uma estratégia de Manutenção baseada em condições (CBM) existe a necessidade de utilizar equipamentos como sensores para que estes possam recolher, analisar e interpretar os dados críticos do ativo. A etapa de aquisição de sinais tem como principal objetivo fazer a medição de uma ou mais grandezas físicas de um certo componente da máquina fresadora CNC, com o objetivo de recolher os dados relevantes.

Uma variedade de métodos de aquisição de dados (ou sinais) são usados para prever os estados da ferramenta/máquina. Eles podem ser divididos em *offline* e *online* ou métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos são categorizados como *offline*, enquanto os métodos indiretos são definidos como *online* [2], descritos na figura 1-5.

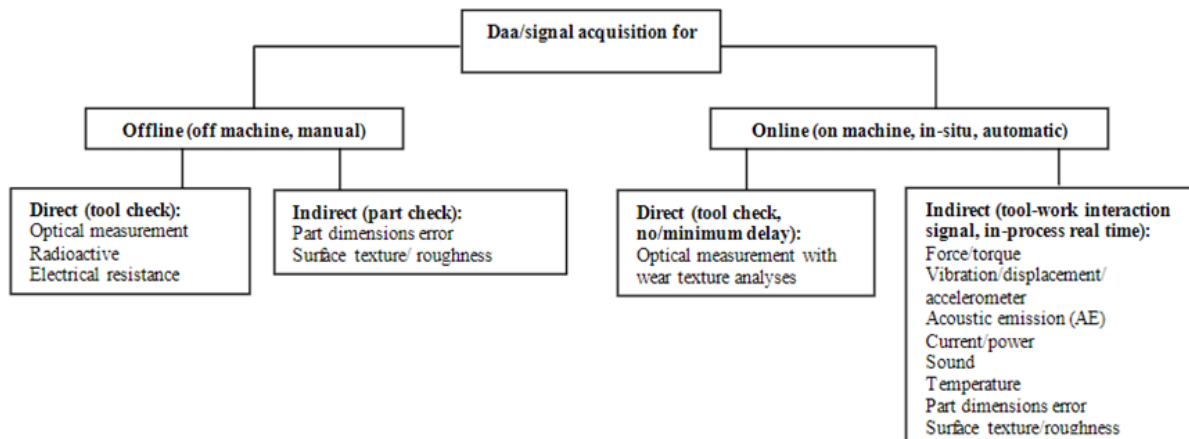


Figura 1.5 - Aquisição de dados/sinais usados em processos de maquinagem [2].

Como pode ser visto na Figura 1.4, os métodos indiretos *online* envolvem a medição das respostas de saída do processo, como força de corte, vibração, emissão acústica, corrente ou potência, som, temperatura, rugosidade da superfície, dimensões da peça, etc., que estão correlacionados com as características de desgaste da ferramenta. Se os dados são obtidos direta ou indiretamente, mas na máquina, e processamento dos dados/sinais é realizado *online* de modo que seja necessário tempo de processo mínimo ou zero, então ele pode ser denominado como método de medição *online* direto/indireto. Com métodos indiretos, então, os parâmetros de saída relevantes são correlacionados com o desgaste da ferramenta.

1.9 Método seguido no projeto

Para um modelo de otimização de processo eficaz, baseado na transformação digital, é implementado o seguinte método de trabalho, referenciado na figura 1-6:

- Procura no mercado de componentes adequados para satisfazer a solução proposta na dissertação;
- Aquisição e implementação desses mesmos dispositivos no chão de fábrica no equipamento CNC alvo;
- Recolha e análise de dados provenientes de todos os dispositivos;
- Conexão dentro de uma arquitetura apropriada;
- Implementação de soluções;

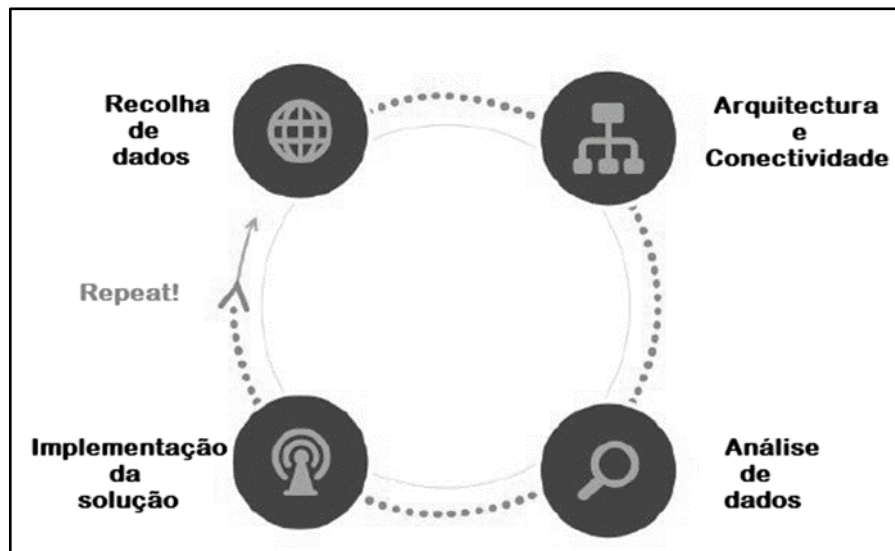


Figura 1.6 - A otimização das operações de um sistema industrial exige ciclos iterativos de tarefas específicas, que são habilitadas e aceleradas pelo processo digital de transformação.

A duração e as respetivas fases envolvidas neste projeto de dissertação e são:

1. Análise do Estado da arte e estudo de soluções de mercado semelhantes (3 semanas).
2. Especificação e seleção de sensores e *hardware* periférico, bem como realização de ensaios exploratórios na recolha e interpretação de dados (3 semanas).
3. Integração do *hardware* com o equipamento CNC e implementação da comunicação dos mesmos com a plataforma INEGI (6 semanas).
4. Realização de ensaios e implementação de procedimentos de análise (4 semanas).
5. Redação da tese (4 semanas).

1.10 Estrutura da Dissertação

De acordo com a metodologia seguida, a presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos.

No primeiro capítulo, “Introdução”, é feito um enquadramento do projeto e os seus princípios objetivos, destacando-se os aspetos diferenciadores do trabalho e a sua importância na instituição onde foi desenvolvido.

No segundo capítulo, é realizada a revisão bibliográfica do estado da arte e todos os tópicos atuais que fornecem *insights* importantes de tecnologias e conceitos associados à temática da dissertação que suportam a sua fundamentação.

O terceiro capítulo descreve o desenvolvimento do trabalho com todo o enquadramento na instituição de acolhimento, o INEGI, e a respetiva solução de automação e sensorização desenvolvida no equipamento com os dispositivos escolhidos para a exequibilidade desta etapa.

No quarto capítulo, foi proposta uma solução de comunicação, por forma a dotar a máquina de uma infraestrutura digital de IoT com capacidade de processar todos os dados. Essa estrutura transportará os dados através do chão de fábrica, criando assim uma comunicação contínua, desde os sensores inteligentes até ao servidor local.

No quinto capítulo, para demonstrar a solução proposta para a sensorização do equipamento, foi possível conectar a máquina através de um *dashboard* de monitoramento da solução de IoT integrada, através da programação da interface dinâmica no Node-Red.

Por último, o sexto capítulo apresenta as conclusões e propostas de trabalhos futuros, visando oportunidades de melhoria para o projeto.

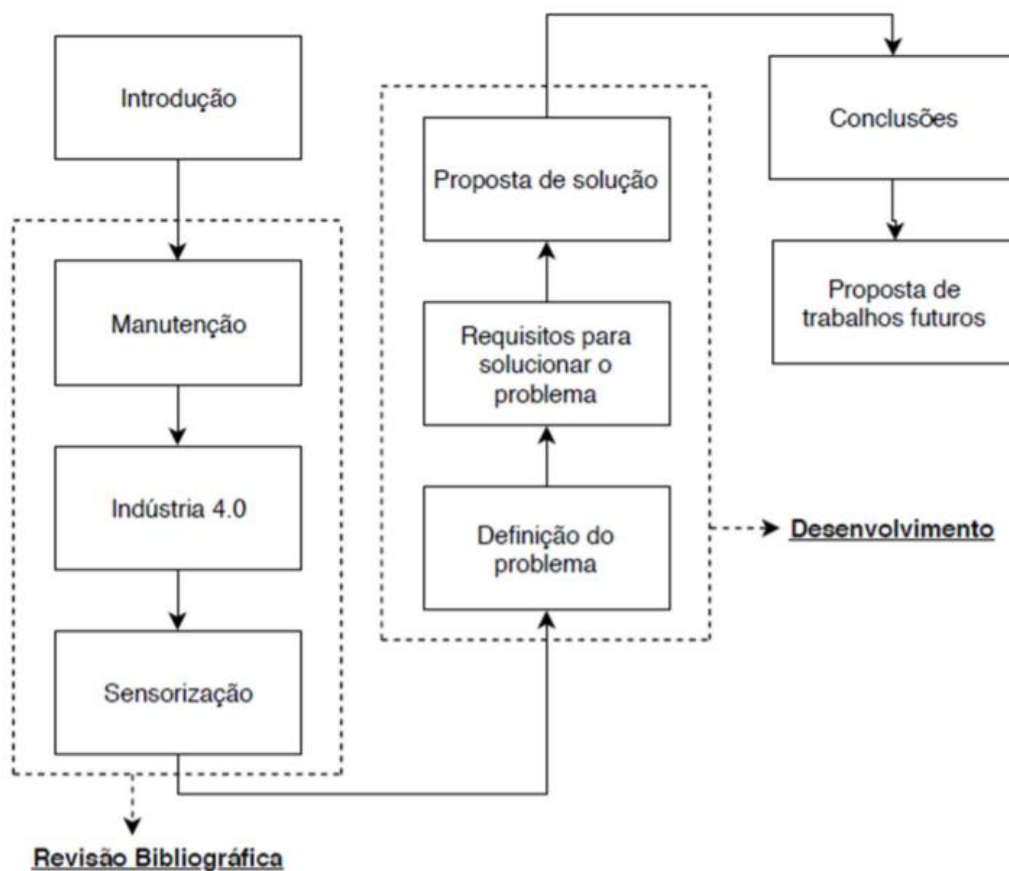


Figura 1.7 - Estrutura da dissertação.

2 Revisão da Literatura e do Estado de Arte

Atualmente e de uma forma consensual, a automação é considerada como uma das áreas tecnológicas mais relevantes e promissoras a que se acrescenta a importância que assume na área da engenharia. Naturalmente que a engenharia de automação terá que ser considerada uma simbiose entre ciência e tecnologia dado que o sucesso da engenharia de automação reside nos recursos que tipicamente agrega bem como na diversidade de conhecimentos que devem ser tidos em conta.

2.1 O que se entende efetivamente por Automação Industrial?

Automação descreve um conceito bastante vasto, que envolve um conjunto de técnicas de controlo, das quais é criado um sistema ativo, capaz de fornecer a resposta adequada em função das informações que recebe do processo que está a controlar. Dependendo das informações, o sistema calculará a ação a ser executada. Estes sistemas foram desenvolvidos de forma a maximizar a produção e minimizar os seus custos, para além de também eliminarem possíveis riscos envolvidos na produção. Tarefas que antes implicavam um alto risco para os operadores dos equipamentos, podem ser realizadas remotamente sem qualquer risco daí resultante.

A Automação Industrial é também atuação. Isso implica disponibilidade de atuadores industriais de vários tipos, de forma a se adaptarem às várias situações que se colocam. Em termos atuais, utilizam-se essencialmente três tecnologias: pneumática, hidráulica e elétrica. Os atuadores representam a possibilidade de controlar o processo ou o equipamento a que está associado a um sistema de automação industrial. Na maioria das aplicações os atuadores são utilizados em dois estados: nível lógico alto (1) ou nível lógico baixo (0). Se aceitarmos a premissa de que não há riqueza sem produção, quer a nível individual quer a nível nacional, somos imediatamente conduzidos à conclusão de que o estudo dos sistemas produtivos e tecnologias associadas, como o caso da Automação Industrial, está na frente dos assuntos que devem ser estudados de uma forma detalhada nos diversos ramos relevantes da engenharia.

Esta necessidade de evolução do processo produtivo tendente à sua automatização global requer a formação de engenheiros com fortes conhecimentos, não só das tecnologias base da Automação Industrial, mas também, das matérias ligadas aos sistemas computacionais, às teorias da decisão e da organização e aos sistemas distribuídos, por forma a estes desempenharem um papel relevante nos desenvolvimentos e manutenção destes sistemas de Automação Industrial [3].

A Automação Industrial proporciona eficiência, economia de energia, melhor controlo de qualidade do produto e maior utilização da instalação industrial, bem como aumenta a produtividade e a segurança operacional. Em essência, a automação nas indústrias permite elevar os níveis de continuidade e de controlo global do processo com maior eficiência, aproximar ao máximo a produção real à capacidade nominal da planta industrial, ao reduzir ao mínimo possível as horas paradas, de manutenção corretiva e falta de matéria-prima.

Uma característica dominante da automação é a operação e a execução de tarefas rápidas e precisas. Frequentemente isso significa que partes da máquina estão em movimento, dentro de um espaço limitado numa instalação. Essas tarefas rápidas requerem ciclos de operação curtos e à prova de falhas de sinais dos sensores, bem como dos atuadores. Outra consideração

é a dispersão espacial limitada pela aplicação ou sistemas instalados, em que podem requerer diversas redes para a automação industrial numa área relativamente pequena

2.2 Conceitos de Automação

Começando por consultar o dicionário da língua portuguesa, poderemos encontrar as seguintes definições:

Automação: o mesmo que automatização;

Automatização: Ação ou efeito de automatizar. Técnica de que resulta a execução automática de tarefas administrativas, científicas ou industriais;

Automatizar: Tornar automático;

Automático: Que funciona por si só, sem intervenção humana. Funcionamento de uma máquina ou grupo de máquinas para, a partir de um programa, efetuar operações da mais variada natureza, sem intervenção humana;

Resumidamente, podemos afirmar que, a automação deve ser considerada como uma área de conhecimento, onde os processos são controlados e executados por meio de aplicações eletromecânicas, *software* e equipamentos específicos para automatizar processos industriais. A materialização deste conceito resulta na concretização, de uma forma automática, de um qualquer processo [1]. De acordo com as necessidades de controlo, foram-se também desenvolvendo componentes elétricos tais como os temporizadores, contadores, relés biestáveis e um sem número de outros componentes que iam integrando os sistemas de automação, cada vez mais complexos. Em paralelo, outras tecnologias como a pneumática, foram desenvolvendo uma série de elementos com capacidades e desempenho idênticos aos dos componentes elétricos. Por outro lado, a supremacia que hoje em dia a tecnologia programada assume sobre a tecnologia cablada, torna difícil falar em automação sem que se tenha de referir o autómato programável.

2.3 Revoluções Tecnológicas e Industriais

O mundo que conhecemos e experimentamos hoje foi modelado por três revoluções tecnológicas e industriais. **A primeira revolução industrial**, que teve início em Inglaterra, em meados do século XVIII (1760), marcou a transição de uma economia essencialmente agrária para outra dominada pela mecanização. Este processo, que decorreu até meados do século XIX (1820-1840), incluiu passar de métodos de produção manual para máquinas, a produção de novos produtos químicos e processos de produção de aço, a melhoria da eficiência de sistemas movidos por água corrente, o uso crescente da energia do vapor, o desenvolvimento de máquinas-ferramentas e o desenvolvimento de ideia de fábrica.

A segunda revolução industrial, também conhecida por revolução tecnológica, decorreu desde meados do século XIX até ao início da I Guerra Mundial e foi um período de rápido desenvolvimento industrial, principalmente na Grã-Bretanha, na Alemanha e nos Estados Unidos, mas também na França, na Itália e no Japão. Foi um grande período caracterizado pela construção de ferrovias, produção de ferro e aço em grande escala, muito maior uso do vapor, uso generalizado do telégrafo, utilização de petróleo e início da eletrificação. Foi nesta altura que Henry Ford, nos EUA, tirou partido do conceito de linha de montagem, inaugurando a era da produção em massa.

A terceira revolução industrial teve início no final da década de 60 do século XX, com a utilização de eletrónica e de sistemas de informação, o que permitiu a realização de sistemas produtivos mais eficientes e mais automatizados. Na verdade, com a invenção, em 1947, nos laboratórios *Bell*, do transístor de semicondutor, que foi sendo desenvolvido na década seguinte, foi possível projetar computadores, sensores e todo o tipo de equipamentos eletrónicos até aí considerados impossíveis de realizar com a tecnologia disponível. Conceitos como a da produção assistida por computador, a utilização de *software* para gerir e controlar a produção bem como a utilização de sistemas controlados por computador que mimetizavam algumas das capacidades humanas e de sensores e atuadores eletrónicos que tornavam a produção mais eficiente e previsível, conduziram aos sistemas que atualmente vemos nas várias indústrias.

A **quarta revolução industrial** nasce com a percepção, no mundo ocidental, de que só se poderia ganhar a batalha da competitividade e da qualidade de produtos na indústria se houvesse a capacidade de reduzir custos, incluindo o do trabalho, aumentar a qualidade e a produtividade e diminuir o tempo até ao mercado, entre outros fatores. Além disso, o fenómeno de envelhecimento da população, aliado ao facto de existir menor vocação para as áreas técnicas e industriais, em contraponto com países de Leste, do Oriente e da Ásia, fez com que as poderosas indústrias da Alemanha, dos EUA e do Japão considerassem a possibilidade de automatizar e digitalizar a cem por cento [4].

2.4 Sistemas Cíberfísicos

Os sistemas ciberfísicos são uma evolução dos sistemas embebidos que facilmente se interligam e são capazes de fornecer serviços inteligentes, o que permite uma maior eficiência, capacidade de decisão e deteção de problemas complexos que precisam da ação conjugada de vários sistemas embebidos. É nessa perspetiva que são essenciais os novos mecanismos de comunicação (IoT), bem como a possibilidade que abrem para uma verdadeira rutura nos modelos de negócio, na capacidade de construir novos e revolucionários produtos e serviços.

Os sistemas ciberfísicos são, na sua génese, computacionais e colaborativos e têm a capacidade de ter uma intensa ligação com o mundo físico envolvente. Essa capacidade é proporcionada através da Internet das Coisas (IoT) e Internet de Serviços (IoS), permitindo o acesso remoto, serviços inteligentes e análises *online* de *big data* e em tempo real, proporcionando assim a partilha de dados sobre uma rede de sistemas e dispositivos físicos inteligentes. Podem ser aplicados numa variedade de usos industriais e comerciais, desde dispositivos e veículos a eletrodomésticos. Em relação à conceção e implementação dos CPS, os desafios fundamentais são: padronização de protocolos de comunicação; modelação e reconfiguração dos processos de negócio e produtivos; assim como a implementação efetiva da interoperabilidade e de um sistema fiável de cibersegurança.

A IoT enfrenta diferentes desafios, que estão sobretudo relacionados com a grande quantidade de dados disponíveis e processados com recurso a esta tecnologia, como por exemplo, a gestão eficiente de dados, prospeção de dados, níveis de privacidade, o problema da inovação hiperacelerada e o ciclo de evolução enfrentados pelas tecnologias relacionadas com a IoT, conhecido como o desafio do caos [5].

2.5 Indústria 4.0

Atualmente quando pensamos na conectividade das nossas empresas já não podemos ter apenas em atenção a parte física entre o elemento terminal e o sistema de controlo, mas também precisamos de levar em consideração a conectividade entre a nossa instalação e o mundo digital.

Há alguns anos passamos da cablagem dedicada dos sinais para o *fieldbus*, mas atualmente não podemos apenas permanecer nesse ponto, tendo de determinar como vamos conectar a informação com os diferentes níveis da organização. A evolução da indústria faz com que todos os níveis estejam interligados. Estamos num mercado cada vez mais competitivo e a informação tem um grande poder. Ter o máximo de dados no nosso sistema permitir-nos-á detetar possíveis melhorias. Às vezes é muito difícil saber se um dado analisado é bom ou mau, mas a verdade é que se não tivermos estes dados não poderemos analisá-los.

No essencial, a Indústria 4.0 é uma evolução tecnológica em que se alarga fortemente a utilização de meios digitais para produzir, tomar decisões e interligar os meios de produção

2.5.1 Forças Motrizes da Indústria 4.0

A quarta revolução industrial prevê uma instalação fabril, onde os componentes, os produtos, e as entidades estão interconectados e podem negociar entre si e para tal recorrem a diferentes aplicações e propostas tecnológicas mais recentes [6].

Acontece assim, inúmeras vezes, uma confusão ou fusão entre o termo “Indústria 4.0” e as tecnologias que possibilitam a sua criação, ou seja, acaba por existir na prática dificuldade em distinguir os condutores e aqueles que viabilizam o processo revolucionário da própria

revolução. A chamada quarta revolução industrial é então possível através da tecnologia digital, sendo esta a principal força motriz, essencialmente manifestada em aspetos e aplicações como são os sistemas ciberfísicos (CPS) [7].

Além de compreender o conceito da Indústria 4.0, é importante discutir os fatores que podem encorajar as empresas a seguirem nessa direção. Mudanças constantes a nível global levaram a uma sociedade em rede, afetando tanto os negócios quanto a vida privada. Estas mudanças também resultaram numa série de mudanças para empresas de produção [8].

Kaivo-oja et al. [9] afirmam que estamos a caminhar em direção a uma sociedade do conhecimento omnipresente, na qual máquinas inteligentes e autônomas são inevitáveis. Também é importante abordar os desafios sociais em muitas sociedades desenvolvidas, incluindo a Europa Ocidental. Também é importante abordar os desafios sociais em muitas sociedades desenvolvidas, incluindo a Europa Ocidental. Esses desafios incluem um número reduzido de força de trabalho devido ao declínio da população e ao envelhecimento da sociedade [10].

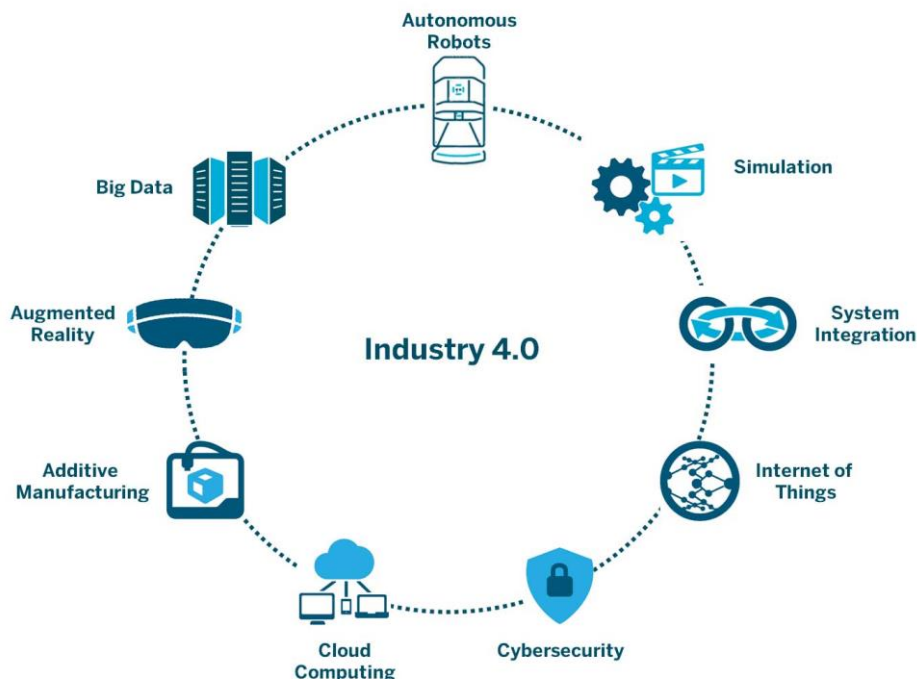


Figura 2.1 - Forças motrizes da indústria 4.0 [11].

2.5.2 Barreiras na Implementação da Indústria 4.0

Vários autores [12,13,14,15,16] concordaram que um dos principais desafios para a implementação da Indústria 4.0 é a falta de força de trabalho qualificada e a necessidade de qualificar pessoas para se adequarem às novas circunstâncias. No futuro, novas formas de trabalhar serão necessárias, o que pode ter efeitos positivos e negativos para os funcionários [17]. As mudanças nas condições de trabalho podem levar a conflitos nas organizações empresariais [8].

Uma série de fontes [12,16,17,18] sugeriram que a escassez de recursos financeiros também é um obstáculo significativo para a implementação. Müller e Voigt [19] descobriram que baixos graus de padronização, baixo entendimento de integração e preocupações com segurança de dados também podem impedir a adoção da Indústria 4.0.

Nagy [20] observou que problemas de padronização podem ocorrer nos relacionamentos interorganizacionais, bem como nas ferramentas e sistemas dentro das empresas de produção. As questões de segurança de dados foram apoiadas por outros estudos. Esses estudos enfatizaram as preocupações com a segurança cibernética e a propriedade de

dados. De Sousa Jabbour et al. [21] foram os primeiros a observar que a Indústria 4.0 pode afetar positivamente a fabricação sustentável ambientalmente, com o desenvolvimento de produtos verdes, processos de fabricação e gestão da cadeia de suprimentos (*supply chain management*). A Indústria 4.0 também pode levar a mudanças significativas nos modelos de negócios existentes, permitindo novas maneiras de criar valor. Espera-se que essas mudanças resultem na transformação das cadeias de valor tradicionais e criem modelos de negócios totalmente novos que permitem níveis mais elevados de envolvimento do consumidor [22].

Um estudo da *McKinsey & Company* [23] sugere que a comunicação intensiva exigida pelos projetos da Indústria 4.0 e, portanto, a introdução de novas tecnologias, pode ser significativamente afetada pela dificuldade de coordenação entre as unidades organizacionais.

2.5.3 Internet das Coisas: “IoT”

A Internet das coisas pode ser definida como sensores e atuadores conectados através da Internet em sistemas de computação [24]. De outra perspectiva, a IoT também pode ser definida como uma rede de dispositivos inteligentes conectados que se comunicam entre si pela internet, usando sensores e atuadores, sem interação humana [25]. Irfan Awan et al. [26] afirmam que a IoT é a plataforma de internet que conecta dispositivos inteligentes com interfaces e identidades, que podem comunicar entre si por meio de protocolos de comunicação padronizados.

A IoT é um elemento essencial da infraestrutura da Quarta Revolução Industrial. Consiste numa variedade de sensores inteligentes e ligados que recolhem, processam e transformam dados de acordo com as necessidades: em seguida, os dados são comunicados a outros dispositivos ou indivíduos para atingir os objetivos de um sistema ou utilizador. A IoT pode ser resumida como uma tecnologia de utilidade disruptiva que pode ser usada como uma ferramenta para agilizar as comunicações entre dispositivos inteligentes e humanos, por meio de sensores e sistemas integrados IoT complexos habilitados para análise e manipulação de dados. Na verdade, harmoniza a maneira como as pessoas se conectam ao mundo físico usando serviços públicos, como a computação em nuvem [27].

A competência para monitorizar, medir e gerenciar as coisas do mundo físico não só irá estimular, mas também gerar novas oportunidades em muitos campos por meio da tomada de decisão, otimizando o desempenho de sistemas e processos, economizando tempo e melhorando a qualidade de vida desde monitorizar máquinas em indústrias de produção ou veículos na estrada usando sensores que fornecem informações em tempo real [28].

No decorrer desta década mais de 80 mil milhões de dispositivos ligados em todo o mundo estarão em constante comunicação com as pessoas e entre si. Esta vasta rede de interação, análise e produção irá remodelar a forma como os objetos são produzidos, antecipar as nossas necessidades e fornecer novas perspectivas sobre o mundo. Ao mesmo tempo, os sistemas distribuídos irão desafiar a forma como criamos, medimos e distribuímos dados e valor. Graças à onnipresença dos sensores, o mundo também mudará de outras formas. À medida que os modelos de negócios aproveitam a Internet das Coisas (IoT) para otimizar as suas operações e criar uma “economia de atracção” (*pull economia*), o mundo à nossa volta irá continuamente antecipar as nossas necessidades, analisando os nossos padrões de comportamento.

A IoT já está a ajudar a monitorizar os níveis de água em países em desenvolvimento e pode dar vida a tecnologias médicas em áreas remotas por meio de cobertura de satélite. É provável que o crime público diminua devido à convergência de sensores, câmaras, IA e *software* de reconhecimento facial. A confiança nos sistemas tecnológicos pode aumentar à medida que a IoT ajuda a descentralizar e a democratizar a produção económica, proporcionando a muitas pessoas em todo o mundo oportunidades novas. A IoT é um elemento essencial da infraestrutura da Quarta Revolução Industrial [29].

A *IHS*, uma empresa de estudos de mercado sediada em Londres, prevê que o número de dispositivos IoT crescerá de aproximadamente 15,4 mil milhões em 2015 para 75.4 mil milhões em 2025. Este aumento de cinco vezes conduzirá a uma ligação mais profunda em todas as áreas da vida, unirá economias globais de formas inovadoras e provavelmente

abrangerá uma economia máquina-máquina em expansão [30]. O potencial económico da IoT é visualizado na figura seguinte:

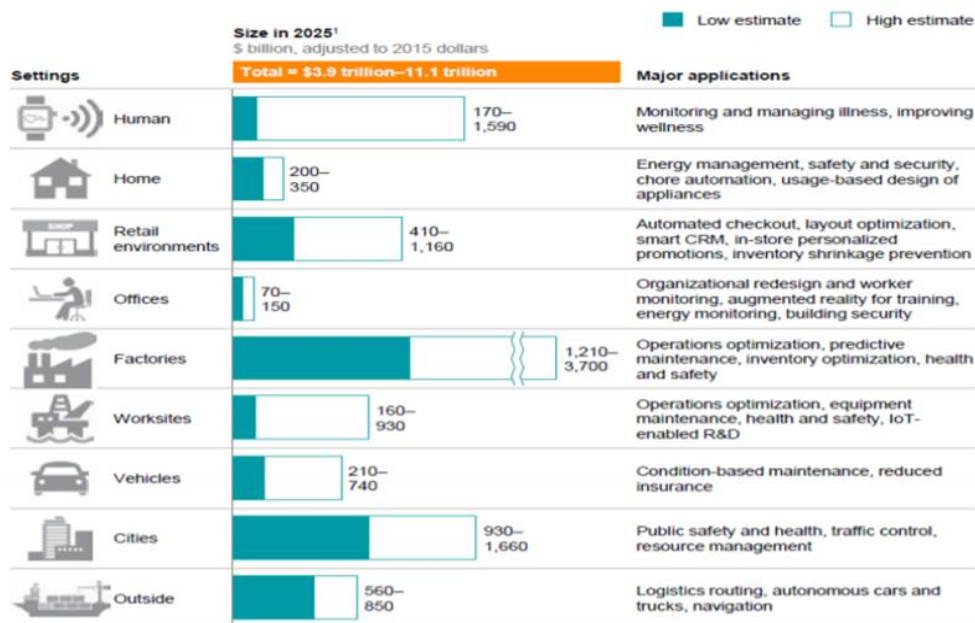


Figura 2.2 - Potencial económico da IOT em 2025 [31].

2.5.4 Novas Arquiteturas: *Edge-to-Cloud*

Conforme o topo da pirâmide de automação tradicional de cinco camadas se consolida e se move para a nuvem, novas arquiteturas de conectividade industrial estão a ser usadas para obter conectividade direta borda-nuvem (*edge-cloud*). O método tradicional de comunicação por meio de sistemas SCADA e MES centralizados geralmente dependem de servidores OPC para converter *ethernet* industrial e protocolos *fieldbus* em protocolos compatíveis com OPC [32].

Os avanços tecnológicos em conectividade, *hardware* de computação e software permitem novas arquiteturas de conectividade que contornam a pilha de automação tradicional e fornecem conectividade direta da borda à nuvem [33].

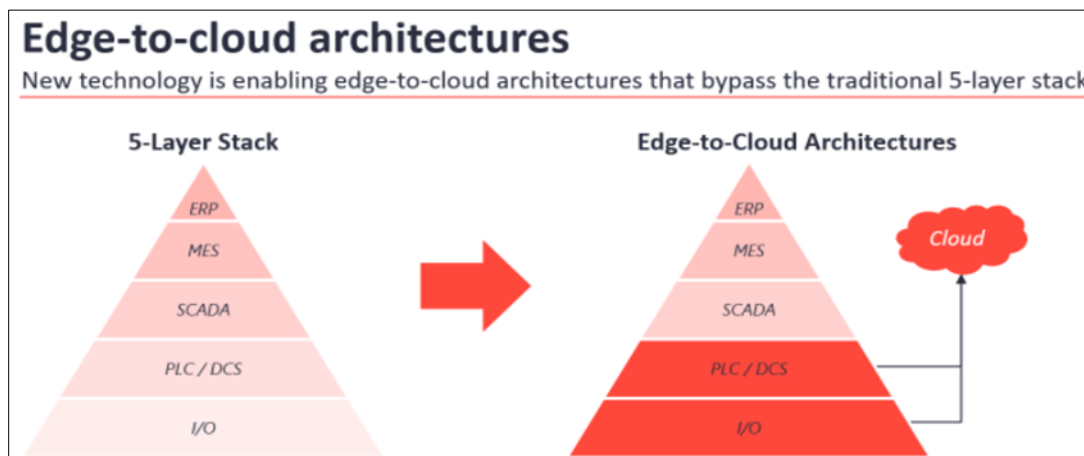


Figura 2.3 Arquiteturas *Edge-to-Cloud* [33].

2.5.5 Digital Twin

O conceito de Digital Twin (DT) foi apresentado pela primeira vez por Grieves numa das suas apresentações sobre PLM em 2003 na Universidade do Michigan [34]. Até agora, várias explicações e definições de gémeo digital foram propostas.

Uma definição geral de gémeo digital que foi reconhecida e usada pela maioria das pessoas até agora foi dada por Glaesegen e Stargel [35] que afirmam: “o gémeo digital é uma simulação probabilística multi-física, multi-escala e integrada de um produto complexo que usa os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, etc., para espelhar a vida dos seus correspondentes gémeos.”

Enquanto isso, o gémeo digital consiste em três partes: física, produto virtual e dados conectados que ligam o produto físico e o virtual. De acordo com essas explicações e definições de gémeo digital, as seguintes características de gémeo digital são resumidas:

- (1) Reflexão em tempo real. Existem dois espaços no gémeo digital, espaço físico e espaço virtual. O espaço virtual é o reflexo real do espaço físico, e pode manter sincronização com o espaço físico.
- (2) Interação e convergência. Esta característica pode ser explicada a partir de três aspetos. (a) Interação e convergência no espaço físico. Os dados gerados em várias fases no espaço físico podem conectar-se com todas as outras do espaço digital. (b) Interação e convergência entre dados históricos e dados em tempo real. (c) Interação e convergência entre espaço físico e espaço virtual. O espaço físico e o espaço virtual não estão isolados no gémeo digital.
- (3) Auto evolução. O *Digital Twin* (DT) pode atualizar dados em tempo real, para que os modelos virtuais possam sofrer melhoria contínua por meio da comparação do espaço virtual com o espaço físico em paralelo [36].

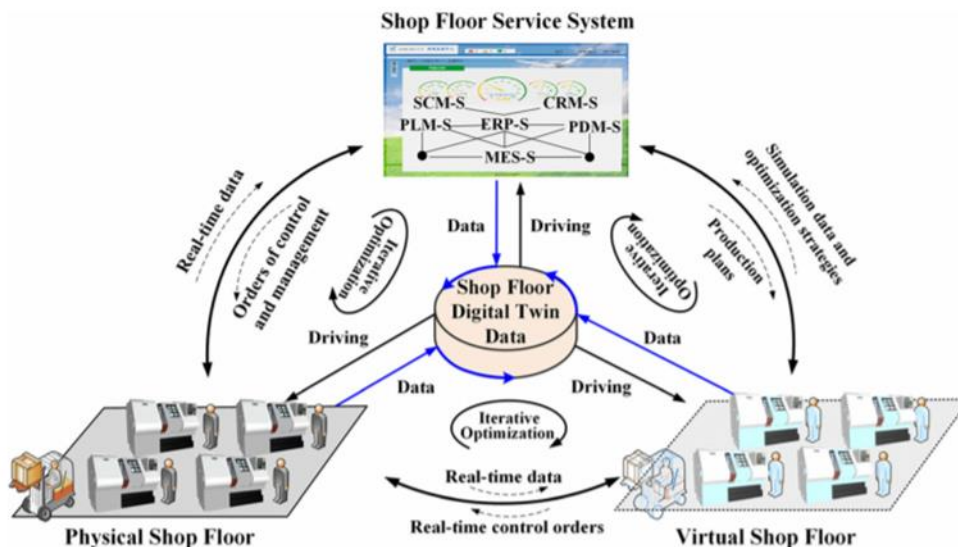


Figura 2.4 - Composição e mecanismos de operação de um Digital Twin [36].

2.6 Diferenças entre tecnologia de informação (TI) e tecnologia operacional (OT)

Qual é a diferença entre Tecnologia da Informação (TI) e Tecnologia Operacional (OT)? Em suma, a TI lida com informações, enquanto a OT lida com máquinas. A primeira gere o fluxo de informações digitais (leia-se: dados), enquanto a segunda gere o funcionamento dos processos físicos e da maquinaria utilizada para realizá-los. Uma boa analogia (embora cada vez mais imprecisa) para representar essa distinção é o escritório (TI) versus o chão de fábrica (OT). Outra justaposição boa (e talvez ainda menos precisa) seria a de *software* (TI) versus *hardware* (OT) [37].

A OT compreende os processos, equipamentos e materiais que produzem os produtos. Esse produto pode ser eletricidade, água, automóveis ou qualquer outro de entre um milhão de produtos diferentes. Já a TI compreende o conjunto de ativos e tecnologias que permitem a realização do negócio de uma empresa. A OT usa tecnologias como EtherNet/IP, PROFINET IO e ModbusTCP. A TI depende de dispositivos como *switches*, *routers* e protocolos especiais como DHCP e SMTP. Elas estão correlacionadas com tecnologias, filosofias operacionais e processos muito diferentes. Em termos desses dispositivos:

Em termos desses dispositivos:

- **OT:** Dispositivos que fazem conexões geralmente são Clientes. Dispositivos que recebem conexões são servidores. Os clientes geralmente fazem conexões exclusivas com um grande grupo de servidores. Em alguns protocolos, clientes e servidores têm nomes especiais. Na EtherNet / IP, os clientes são conhecidos como *scanners*; Os servidores são conhecidos como *adapters*.
- **TI:** Servidores são dispositivos que fornecem recursos para dispositivos *host*. Um dispositivo *host* é um Cliente que se conecta a um Servidor. Muitos clientes fazem conexão não exclusiva com o mesmo servidor [38].

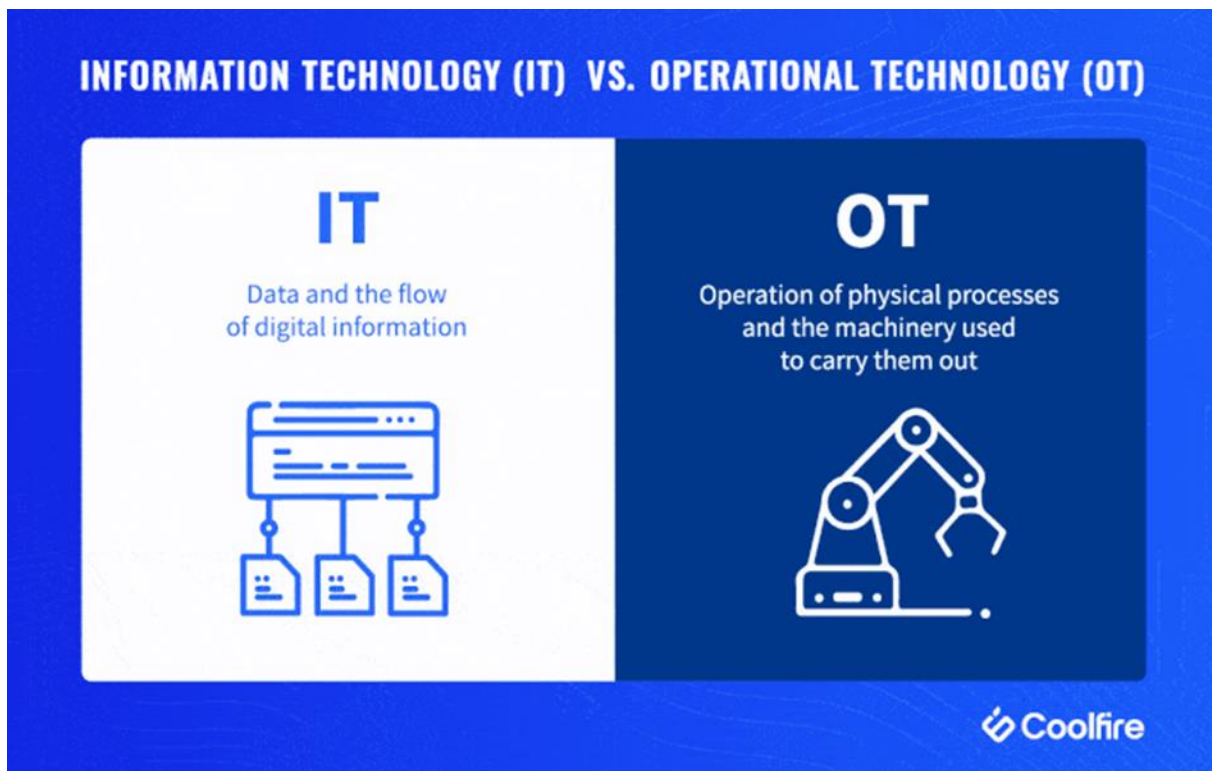


Figura 2.5 - Diferenças entre TI e OT [37].

2.7 Protocolos de conectividade industrial emergentes

IO-Link, OPC UA e MQTT estão a emergir como os protocolos de I/O, *Operational Technology* (TO) e *Information Technology* (TI) de crescimento mais rápido, respetivamente, à medida que fornecedores e utilizadores finais procuram capturar conjuntos de dados industriais mais ricos com mais eficiência. Uma barreira importante que impede a adoção mais ampla dos protocolos OPC UA e MQTT é a falta de padrões de estrutura de dados amplamente adotados [39]. Na figura 2-6 é feita uma síntese deste protocolos que estão a imergir.

IO-Link, OPC UA and MQTT are emerging as the leading protocols for I/O, OT and IT connectivity

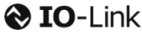
	<u>I/O Protocols</u>	<u>OT Protocols</u>	<u>IT Protocols</u>
 <i>High growth</i>			
 <i>Low growth</i>	4-20 mA 0-10 V Discrete	Modbus PROFIBUS DeviceNET	FTP SQL / ODBC HTTP / REST

Figura 2.6 - Protocolos de conectividade industrial a emergir [39].

Estão a ser feitos esforços para estabelecer estruturas de dados padrão (como especificações complementares OPC UA), mas na prática a maioria das instalações resolve usar estruturas de dados customizadas correspondentes a estruturas de *tags* PLC customizadas. Apesar destes desafios, muitos fornecedores de conectividade industrial introduziram produtos que oferecem suporte nativo a estes protocolos, como:

- Módulos remotos de I/O usando o IO-link;
- PLC's com servidores OPC UA nativos;
- Plataformas IoT e SCADA com suporte nativo para MQTT;
- Fornecedores de gateway com suporte nativo para MQTT.

2.7.1 IO-Link

O IO-Link é um protocolo de comunicação aberto, padronizado pela norma **IEC 61131-9** para integração de dispositivos de I/O (sensores e atuadores). Permite, não apenas a troca de sinais *On/Off* entre os sensores/atuadores e os dispositivos de interface de I/O, como também a troca de informações com o controlador.

Com estas informações é possível monitorizar o estado de um sensor e situações anormais de operações contribuindo para uma operação mais estável, melhorando os processos de manutenção e comissionamento. Fabricantes líderes de sensores, atuadores e tecnologia de controlo desenvolveram o IO-Link.

Em conjunto criaram uma interface padronizada e independente de barramentos de campo para a automação, que oferece ao utilizador uma ligação ponto-a-ponto sem endereçamentos complexos. Dos interruptores binários, que no passado estavam na maior parte limitados a sinais de comutação ou valores analógicos, foram desenvolvidos sensores inteligentes.

Com esta tecnologia, conseguimos uma total visibilidade e integração de automação, desde o chão de fábrica até os níveis mais altos da pirâmide de automação. A arquitetura do protocolo IO-Link e dos dispositivos que integram esta tecnologia é descrita na figura 2-7.

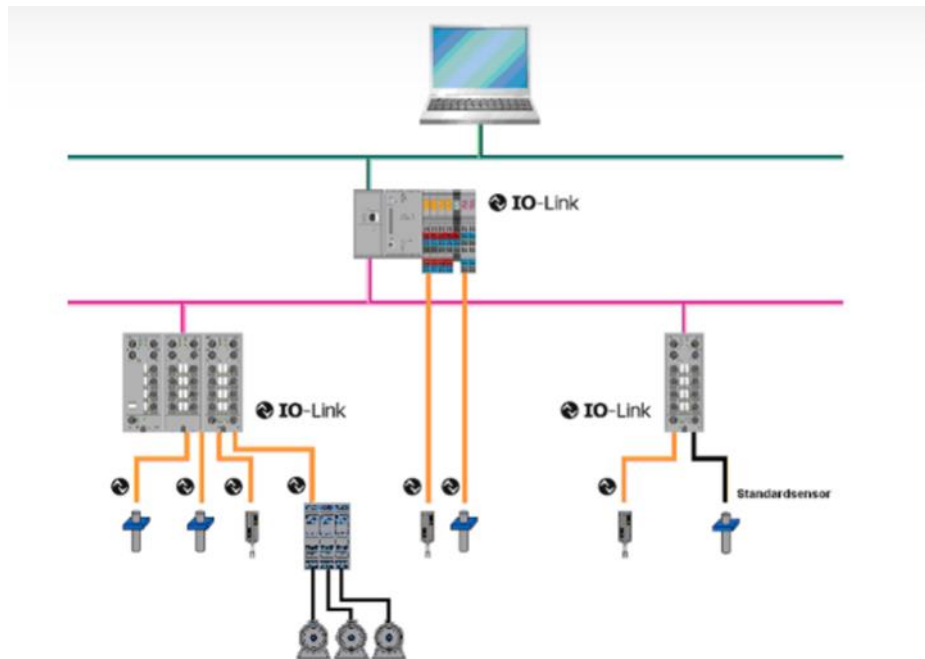


Figura 2.7 - Arquiteturas possíveis do IO-Link [40].

Um sistema IO-Link consiste nos seguintes componentes:

- Mestre IO-Link;
- Dispositivos IO-Link – maioritariamente, sensores, atuadores ou a combinação entre ambos;
- Cabo não blindado de 3 fios simples: sensor/atuador.

Um mestre IO-Link tem uma ou mais portas. Apenas um dispositivo IO-Link ou um sensor/ atuador de cada vez pode ser conectado a cada porta. Assim, o IO-Link é um sistema de comunicação ponto-a-ponto e não um fieldbus. Todos os sensores IO-Link possuem um arquivo IODD (*IO Data Description*), que descreve qual o tipo de instrumento que são e quais são seus parâmetros. Os arquivos IODD são globais e, portanto, os sensores IO-Link podem ser utilizados da mesma maneira com qualquer fabricante [40].

2.7.2 OPC UA

O padrão OPC é uma série de especificações, geridas pela OPC Foundation, que definem a interface entre clientes e servidores ou servidores e servidores, incluindo acesso a dados em tempo real, monitorização de alarmes e eventos, acesso a dados históricos, entre outras aplicações. A Arquitetura Unificada OPC UA, lançada em 2008, é uma arquitetura orientada a serviços independente da plataforma que integra todas as funcionalidades das especificações individuais OPC *Classic* numa estrutura extensível. Esta abordagem em várias camadas cumpre os objetivos de especificação de *design* original de:

- Equivalência funcional: todas as especificações COM OPC *Classic* são mapeadas para UA;
- Independência da plataforma: de um microcontrolador incorporado a uma infraestrutura baseada em nuvem;
- Seguro: criptografia, autenticação e auditoria;
- Extensível: capacidade de adicionar novos recursos sem afetar os aplicativos existentes;
- Modelação de informações abrangente: para definir informações complexas.

O OPC UA foi projetado para aprimorar e superar as capacidades das especificações do OPC Classic. Dada a grande variedade de plataformas de *hardware* e sistemas operacionais disponíveis, a independência de plataforma é essencial. O OPC UA funciona em qualquer um dos seguintes e mais:

- Plataformas de hardware: *hardware* de PC tradicional, servidores baseados em nuvem, PLCs, microcontroladores.
- Sistemas operativos: *Microsoft Windows, Apple, Android* ou qualquer distribuição de *Linux*, etc.

A arquitetura de várias camadas do OPC UA fornece uma estrutura “à prova de futuro”. Tecnologias e metodologias inovadoras, como novos protocolos de transporte, algoritmos de segurança, padrões de codificação ou serviços de aplicativo, podem ser incorporados ao OPC UA, mantendo a compatibilidade com versões anteriores para produtos existentes. Para a comunicação cliente-servidor, a gama completa de acesso ao modelo de informação está disponível por meio de serviços e, assim, segue o paradigma de *design* da arquitetura orientada a serviços (SOA), com a qual um provedor de serviços recebe solicitações, processa-as e envia os resultados de volta com a resposta. A visualização da arquitetura do OPC UA é apresentada na figura seguinte:

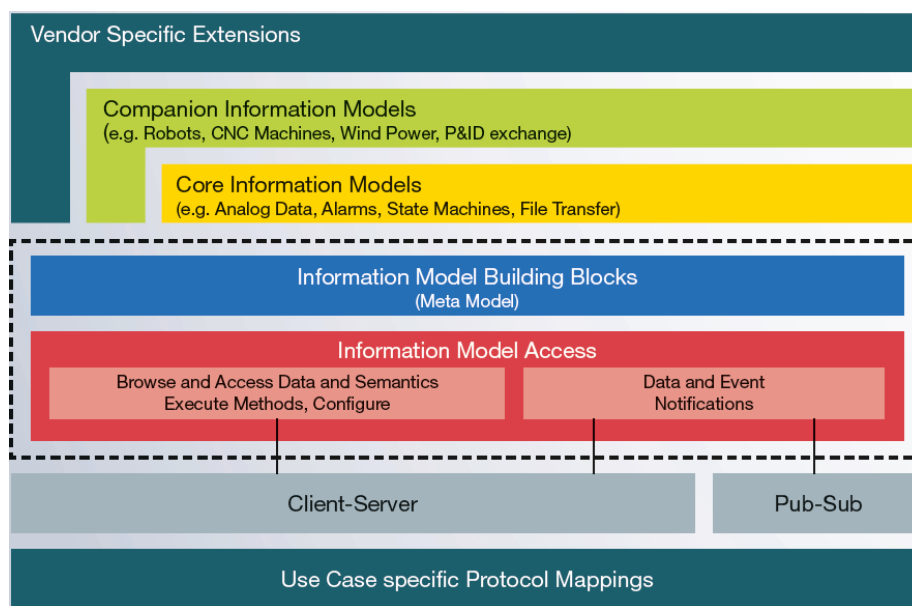


Figura 2.8 - Arquitetura multicamadas do OPC UA [41].

O modelo publicar-assinar (*publish-subscribe*) fornece um mecanismo alternativo para notificação de dados e eventos. Enquanto na comunicação cliente-servidor cada notificação é para um único cliente com entrega garantida, o modo *publish-subscribe* foi otimizado para configurações muitos para muitos [41].

2.7.3 MQTT

O protocolo MQTT foi inventado em 1999 por Andy Stanford-Clark (*IBM*) e Arlen Nipper (*Arcom*, atualmente na, *Cirrus Link*). Precisavam de um protocolo para perda mínima de bateria e largura de banda mínima para conexão com oleodutos via satélite.

A designação oficial fornecida pela MQTT é a seguinte:

“MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de comunicação máquina para máquina (M2M - *Machine to Machine*) com foco na *Internet of Things* (IoT) que funciona

em cima do protocolo TCP/IP. Um sistema MQTT baseia-se na comunicação entre cliente e servidor. É leve, aberto, simples e projetado para ser fácil de implementar. Estas características tornam-no ideal para uso em muitas situações, incluindo ambientes restritos, como para comunicação em contextos de *Machine to Machine* (M2M) e *Internet of Things* (IoT)”[42].

É um protocolo binário. O MQTT destaca-se na transferência de dados pela conexão, em comparação com protocolos como o HTTP. Outro aspeto importante do protocolo é que o MQTT é extremamente fácil de implementar no lado do cliente. A facilidade de uso foi uma preocupação fundamental no desenvolvimento do MQTT e torna-o adequado para dispositivos com recursos limitados.

O padrão de arquitetura publicar/assinar (também conhecido como *publish/subscribe*) fornece uma alternativa à arquitetura cliente-servidor tradicional. No modelo cliente-servidor, um cliente comunica diretamente com um terminal. O modelo *publish/subscribe* desacopla o cliente que envia uma mensagem (o editor), do cliente ou clientes que recebem as mensagens (os assinantes). Os editores e assinantes nunca se contactam diretamente. Na verdade, eles nem sabem que o outro existe. A conexão entre eles é feita por um terceiro componente (*broker*). O trabalho do *broker* é filtrar todas as mensagens recebidas e distribuí-las corretamente para os assinantes.

O aspeto mais importante do *publish/subscribe* é a dissociação do editor da mensagem do destinatário (assinante). Esse desacoplamento tem várias dimensões: desacoplamento de espaço (o editor e o assinante não precisam de se conhecer; por exemplo, nenhuma troca de endereço IP e porta), desacoplamento de tempo (o editor e o assinante não precisam de ser executados ao mesmo tempo) e desacoplamento de sincronização (as operações em ambos os componentes não precisam de ser interrompidas durante a publicação ou o recebimento).

O MQTT desacopla-se com o tempo. Embora a maioria dos casos de uso de MQTT entregue mensagens em tempo quase real, se desejado, o *broker* pode armazenar mensagens para clientes que não estão online. (Duas condições devem ser atendidas para armazenar mensagens: o cliente conectou-se a uma sessão persistente e inscreveu-se num tópico com uma qualidade de Serviço maior que 0) [43].

Um exemplo da arquitetura do MQTT é visualizado na figura seguinte:

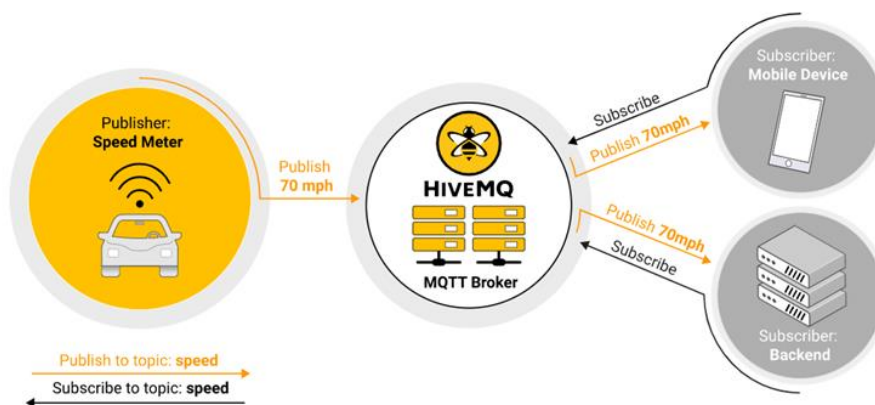


Figura 2.9 - Arquitetura MQTT: publish/subscribe [43].

2.8 Modelo da arquitetura de referência padrão da “Indústria 4.0” - RAMI 4.0

O Fórum Económico Mundial (*The World Economic Fórum*) considerou recentemente a manutenção preditiva (PDM) como uma das tecnologias aplicáveis na “Nova Era da Automação”. Um dos principais desafios da Indústria 4.0 é a falta de um padrão internacional para implementação [44]. A DIN com uma nova abordagem produziu a norma **DIN SPEC 91345: 2016-04** [45].

Ela descreve um modelo de arquitetura de referência padrão para a Indústria 4.0 chamado “RAMI 4.0” que pode resolver este problema. Os próximos desafios são agora, de acordo com a “*Plattform Industrie 4.0*” a criação de submodelos para processos individuais, criação de uma linguagem comum e recomendações específicas para implementação. A arquitetura de referência RAMI 4.0 é ilustrada na figura seguinte:

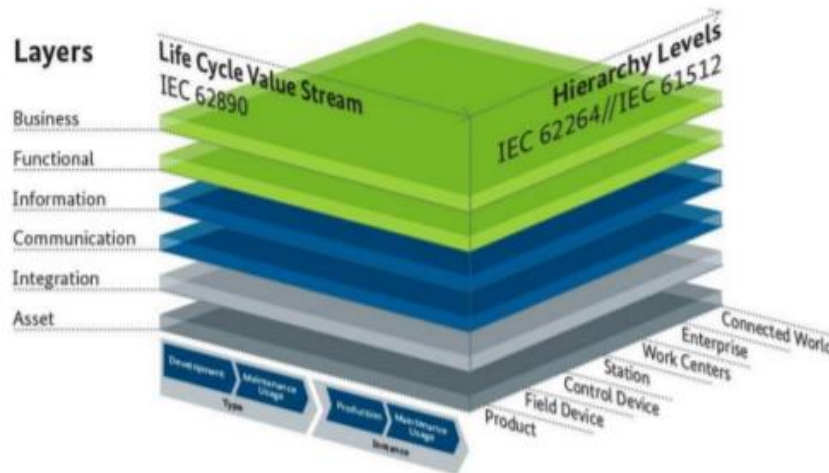


Figura 2.10 - Arquitetura de Referência RAMI 4.0 [46].

O modelo divide processos complexos em pacotes compreensíveis, garantindo que todos os participantes envolvidos nas discussões da Indústria 4.0 se entendem. O primeiro eixo contém a hierarquia da fábrica. O segundo eixo é a arquitetura que mostra as camadas de ativos físicos na camada de ativos para a informação ser habilitada na organização na camada de negócio.

O terceiro eixo ilustra o ciclo de vida do produto, desde o desenvolvimento até às operações de manutenção [47]. Assim sendo, a dissertação converge para esta arquitetura de referência RAMI4.0, centrando-se em dispositivos de campo na instância de manutenção e aquisição de dados, na camada de ativos e promovendo a transição para as camadas digitais. No entanto, não existe atualmente um padrão para a implementação de manutenção preditiva e *edge computam* no quadro da Indústria 4.0.

2.9 Sensorização

Para implementar a estratégia de EC e IoT no equipamento existe a necessidade de utilizar sensores para que estes possam recolher os dados do equipamento. A aquisição de dados e sinais tem como principal objetivo a medição de grandezas físicas de um certo componente do equipamento com o objetivo de recolher esses dados para diagnóstico.

No anexo A pode observar-se um excerto da norma **ISO 17359:2002** no qual são apresentados exemplos de parâmetros de monitorização de condição com a respetiva tipologia de máquina. Segundo a norma, os parâmetros possíveis de medição de máquinas com motores elétricos são vibração, corrente, temperatura, emissão acústica entre outros. Esta norma irá ser substituída pela norma **ISO 17359:2018** publicada em 2018 e que se encontra em processo de revisão para substituir a norma transata. A **ISO 230:2012**, por sua vez, é mais específica na medida em que estabelece um só parâmetro, a vibração, para monitorização de máquinas ferramenta.

2.9.1 Tecnologia de acelerômetros

Os sensores de vibração estão amplamente disponíveis atualmente e vêm em quase todas as formas e tamanhos. O foco neste tipo de sensores será importante, já que a tecnologia de acelerômetros será predominantemente usada no decorrer da tese.

Existem acelerômetros em muitos sistemas, por exemplo, sistemas de navegação inercial, sistemas de *airbag* automóvel e sistemas de controlo de movimento [48]. Devido ao amplo uso de acelerômetros, muitos tipos de acelerômetros foram projetados usando vários princípios físicos, como acelerômetros piezoresistivos, capacitivos e piezoelétricos. Desses tipos de acelerômetros, os acelerômetros capacitivos e piezoelétricos são os mais onipresentes. Especialmente, graças ao avanço das tecnologias de MEMS, os acelerômetros capacitivos MEMS têm os benefícios de baixo consumo de energia, baixa sensibilidade a mudanças de temperatura, baixo custo de fabricação e integração conveniente de MEMS e IC [49].

Para a análise de vibração, é necessário medir corretamente a vibração. A medição de vibração pode ser realizada medindo vários parâmetros, como deslocamento, velocidade e aceleração. Existem diferentes tipos de dispositivos de detecção para medir os parâmetros mencionados. Cada tipo de medição é baseado num princípio distinto [50].

A vibração é normalmente medida por meio de aceleração usando um acelerómetro. Um acelerómetro mede a aceleração dinâmica e disponibiliza-a como uma tensão de saída. Medir a aceleração traz a capacidade de medir a inclinação, a vibração ou choque. A vibração é medida principalmente por um sensor piezoelétrico no caso da indústria. Esse tipo de sensor funciona com base no efeito piezoelétrico que ocorre quando uma tensão é produzida em determinados tipos de cristais à medida que são excitados [51].

Eficiência energética e o custo-benefício são mencionados como as características desejáveis de um dispositivo habilitado para IoT. Observar os sensores piezoelétricos que são dispositivos caros e que consomem energia mostra que eles não são a melhor escolha para serem usados num dispositivo habilitado para IoT. Além disso, os sensores piezoelétricos funcionam com base num conceito mecânico que é menos compatível com soluções eletrônicas inteligentes como a IoT. Dentre várias tecnologias, os acelerómetros de sistemas microeletromecânicos (MEMS) são propostos como muito promissores para a manutenção inteligente [50].

Isso ocorre porque os MEMS têm um tamanho insignificante e baixo consumo de energia e podem ser usados com facilidade de integração. O desempenho dos sensores MEMS dá a oportunidade de desempenhar um papel significativo na expansão maciça dos dispositivos eletrônicos pessoais de hoje [52].

No entanto, o uso de MEMS para detecção de vibração é limitado a aplicativos que podem funcionar com baixa largura de banda. Os principais critérios para acelerómetros de monitorização de condições industriais são o baixo ruído e a ampla largura de banda. Outra limitação dos acelerómetros MEMS é o ruído. Isto porque; o desempenho de ruído em MEMS não é baixo o suficiente para detetar falhas em máquinas industriais. Embora existam alguns acelerómetros MEMS de baixo ruído disponíveis, eles são limitados a uma largura de banda muito baixa [53].

Por outro lado, os acelerómetros piezoelétricos têm largura de banda de 3 Hz a várias centenas de kHz. Além disso, eles também podem funcionar bem em ambientes de alta temperatura. Uma vez que os acelerómetros piezoelétricos são de natureza mecânica, eles não escalam para um grande volume de fabricação, ao contrário dos sensores MEMS.

Finalmente, os acelerómetros piezoelétricos são caros em preço e consomem energia em comparação com MEMS. A tecnologia IoT visa reduzir o cabeamento de forma a utilizar tecnologias sem fio e de baixa potência que funcionam com fonte de alimentação integrada. Estas são as características desejáveis para dispositivos habilitados para IoT [54].

Tabela 2-1 diferenças entre as diferentes tecnologias de acelerómetros consideradas [55].

Tipo de Acelerómetro	Piezoelétrico	Capacitivo MEMS
Vantagens	Baixo nível de ruído	Dimensões reduzidas
	Elevado intervalo dinâmico	Baixo peso
	-	Baixo custo (<10% acelerómetro piezoelétrico)
	Compacto e de variadas dimensões	Condicionamento e aquisição de sinal integrado no sensor.
	Resistente	Integração e funcionalidade com outros sensores
	-	Auto-teste
Desvantagens	Elevado Custo	
	Frequências baixas	Menor frequência máxima

2.9.2 Análise técnica de vibrações

Os sinais provenientes dos sensores de vibração podem ser analisados em dois domínios: do tempo e da frequência. Neste subcapítulo é feita uma síntese de algumas técnicas de análise de vibrações que podem ser empregues no equipamento, num contexto de futuro, já que, alguns dos parâmetros de vibração que foram selecionados para aquisição de dados inserem-se nestes domínios.

Um elemento rotativo de uma máquina cria vibrações que são função da dinâmica da máquina. A análise de vibração permite a capacidade de dizer se há um desalinhamento ou desequilíbrio de um eixo, rolamentos e engrenagens em deterioração ou defeituosos ou se vibrações em certos elementos da máquina são amplificadas por ressonância.

Isso é feito através da análise de amplitudes em certas frequências ou tendências em medidas estatísticas. A análise de tendências dos dados também pode revelar práticas de manutenção inadequadas, como instalação inadequada e substituição de rolamentos ou mau alinhamento de rotores e eixos [56].

As vibrações em componentes mecânicos são de natureza estocástica não estacionária. Isso significa que a característica do sinal pode estar a mudar e a oscilar ao longo do tempo e nem sempre se pode esperar que siga um padrão estatístico [57].

Análise no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo é baseada em diferentes parâmetros estatísticos ligados à amplitude de deslocamento, velocidade ou aceleração das vibrações. Parâmetros como valor mínimo, valor máximo, valor médio, variância, desvio padrão e *Root-Mean-Square* (RMS) são chamados de parâmetros dimensionais e estão relacionados com as condições operacionais. Parâmetros como Curtose (*Kurtosis*), valor de pico (*peak value* - o nível máximo registado durante o intervalo de tempo em questão) e fator de crista (*crest factor* - a razão entre RMS e valor de pico) são chamados de não dimensionais e podem ser mais precisos para diagnóstico de falha abrupta ou análise de impulsos transitórios fortes [56].

A Curtose é definida como o quarto momento estatístico, normalizado pelo desvio padrão à quarta potência e representa o achatamento da curva da função de distribuição de probabilidade perto do valor médio [58].

Os dados de vibração no domínio do tempo são representados graficamente como amplitude geral de vibração versus tempo. As vibrações podem ser analisadas em relação ao deslocamento, velocidade e aceleração, todas diretamente dependentes da série temporal. A análise desses parâmetros é de importância variável para os diferentes modos de falha, mas todos são relevantes ao decidir as amplitudes de vibração. Este tipo de análise é útil no estudo de mudanças nas condições, uma vez que os dados históricos recolhidos na mesma velocidade de execução e carga são diretamente comparáveis. No entanto, isso torna o método sensível às variações na mesma velocidade e carga.

A Raiz do Valor Quadrático Médio (RMS) é uma medida do conteúdo de energia das vibrações que, em alguns casos, é um ângulo importante de análise. A medição da aceleração é análoga à medição da força. Forças elevadas nos rolamentos podem levar a falhas, como lubrificação insuficiente, que podem causar falhas. Uma carga de 10% a mais do que a carga estática projetada do rolamento pode, com o tempo, causar forças dinâmicas que levam à falha.

A gama de frequências no sinal pode ajudar a determinar se a aceleração, a velocidade ou o deslocamento devem ser usados para análise. As recomendações para diferentes gamas de frequências podem ser encontradas na Tabela 2-2. Isso também se aplica à análise no domínio da frequência [56].

Tabela 2-2 Recomendação do parâmetro para análise correspondente a uma gama de frequências [56].

Gama de Frequências	Parâmetro Recomendado
<10Hz	Deslocamento
10-1000 HZ	Velocidade
>1000 HZ	Aceleração

- **Root Mean Square**

Conforme mencionado anteriormente, o valor *Root Mean Square* (RMS) de um sinal está relacionado com o seu conteúdo de energia do sinal. Um aumento do valor RMS indica que o nível geral de vibração aumentou e um defeito pode estar presente [56].

A *International Standards Organization* (ISO) desenvolveu um padrão relativo às vibrações de máquinas em peças não rotativas como, por exemplo, rolamentos em motores: **SSISO 10816-3** “Vibrações mecânicas - Avaliação da vibração da máquina por medições em peças não rotativas - Parte 3: máquinas industriais com potência nominal acima de 15 kW e velocidades nominais entre 120 r/min e 15.000 r/min quando medidas in situ” [59].

A **SS-ISO 10816-3** cobre os critérios para avaliar as vibrações da máquina causadas pela própria máquina e não por fontes externas. Com base na quantidade de informações acessíveis sobre a condição real da máquina, dois critérios diferentes podem ser usados. O primeiro critério requer um conhecimento profundo da condição e considera a magnitude das vibrações observadas. O segundo critério requer apenas uma magnitude de linha de base bem definida e considera a mudança de magnitudes observada.

Ao aplicar o primeiro critério, o padrão divide a gravidade da vibração em quatro zonas diferentes A-D que estão descritas na figura 2-11. Estas zonas são:

- Zona A: Níveis de vibrações de máquinas recém comissionadas.
- Zona B: níveis de vibrações considerados aceitáveis para operação de longo prazo.
- Zona C: Níveis de vibrações considerados inaceitáveis para operação de longo prazo. A maquinaria pode funcionar dentro desta zona por um período limitado antes de se tomarem ações de medidas corretivas
- Zona D: Níveis de vibrações considerados prejudiciais à saúde das máquinas [59].

Vibration Severity Grade	Overall Vibration measurement measured on the machine Structure			Machine Class*						
	Displacement in μm - micron (rms)	Velocity in mm/sec (rms)	Acceleration meter/sec (rms)	1	2	3	4	5	6	7
1.1	≤ 17.8	≤ 1.12	≤ 1.76	A	A	A	A	A	A	A
1.8	≤ 28.3	≤ 1.78	≤ 2.79	B	A	A	A	A	A	A
2.8	≤ 44.8	≤ 2.82	≤ 4.42	B	B	B	A	A	A	A
4.5	≤ 71.0	≤ 4.46	≤ 7.01	C	B	B	B	B	A	A
7.1	≤ 113	≤ 7.07	≤ 11.1	D	C	C	B	B	B	B
11	≤ 178	≤ 11.2	≤ 17.6	D	D	C	C	C	C	C
18	≤ 283	≤ 17.8	≤ 27.9	D	D	D	C	C	C	C
28	≤ 448	≤ 28.2	≤ 44.2	D	D	D	D	C	C	C
45	≤ 710	≤ 44.6	≤ 70.1	D	D	D	D	D	C	C
71	≤ 1125	≤ 70.7	≤ 111	D	D	D	D	D	D	C
112	≤ 1784	≤ 112	≤ 176	D	D	D	D	D	D	D
180	≤ 1784	> 112	> 176	D	D	D	D	D	D	D

Zone A: Vibration of newly Commissioned Machines;
 Zone B: Machines considered acceptable for unrestricted long-term operation
 Zone C: Machines considered unsatisfactory for long-term continuous operation
 Zone D: Vibration values normally considered to be sufficient severity to cause damage to the machine

Figura 2.11 - Severidade de Vibração: classe de máquinas – ISSO 10816.

Ao usar o segundo critério, todas as máquinas devem ser consideradas individualmente, e o nível-base de amplitude de vibração deve ser decidido separadamente para cada máquina.

No entanto, a SS-ISO 10816-3 fornece diretrizes numéricas para os limites zonais com base nas características da máquina. Por exemplo, máquinas de médio porte com potência nominal acima de 15kW até e incluindo 300 kW e máquinas elétricas com altura de eixo $160 \text{ mm} \leq H < 315 \text{ mm}$ e suporte rígido (como os motores que podem ser considerados nesta dissertação) têm os seguintes limites:

- Zona limite A/B: deslocamento RMS = 22 μm , velocidade RMS = 1,4 mm/s
- Zona limite B/C: deslocamento RMS = 45 μm , velocidade RMS = 2,8 mm/s
- Zona limite C/D: deslocamento RMS = 71 μm , velocidade RMS = 4,5 mm/s

A SS-ISO 10816-3 fornece recomendações para definir o nível de alarme e desarme (quando uma ação imediata deve ser tomada para evitar danos graves) para ambos os critérios (detalhes podem ser encontrados em [59]).

Class I machines may be separate driver and driven, or coupled units comprising operating machinery up to approximately 15kW (approx 20hp).
Class I machinery (electrical motors 15kW (20hp) to 75kW (100hp), without special foundation, or Rigidly mounted engines or machines up to 300kW (400hp) mounted on special foundations.
Class III machines are large prime movers and other large machinery with large rotating assemblies mounted on rigid and heavy foundation which are reasonably stiff in the direction of vibration.
Class IV includes large prime movers and other large machinery with large rotating assemblies mounted on foundations which are relatively soft in the direction of the measured vibration (i.e., turbine generators and gas turbines greater than 10MW (approx. 13500hp) output.

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816					
Machine		Class I	Class II	Class III	Class IV
		small machines	medium machines	large rigid foundation	large soft foundation
Vibration Velocity Vrms	in/s	mm/s			
	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71		good	
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80		satisfactory	
	0.18	4.50			
	0.28	7.10		unsatisfactory	
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
	0.71	28.0		unacceptable	
	1.10	45.0			

Figura 2.12 - Severidade de Vibração: ISO 10816.

Análise no Domínio da Frequência

Análise no domínio da frequência tem a vantagem sobre a anterior de identificar e isolar determinadas frequências de interesse para localização de defeitos. Correntemente, usa-se a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) para transformar os sinais no domínio do tempo para o da frequência [60].

Esta análise é usada para investigar o nível de vibrações em bandas estreitas de frequências, ao contrário da análise no domínio do tempo, em medidas como, por exemplo, RMS que considera o nível geral de vibração numa banda larga de frequências. Isso torna possível distinguir entre diferentes fontes de vibrações e as frequências características de diferentes defeitos. A possibilidade de diferenciar entre os diferentes componentes e diferentes falhas ajudará a diminuir a quantidade de equipamento de medição e o tempo necessário para diagnosticar os defeitos.

O domínio da frequência é um ângulo importante de análise. A frequência pode explicar qual é o problema e a amplitude explicará a correspondente gravidade. À medida que uma falha se desenvolve, a amplitude da frequência associada à falha aumenta. Embora o nível desta certa frequência esteja a aumentar, o nível geral de vibração ou nível de pico máximo pode não ser afetado em relação ao domínio do tempo. O uso do domínio da frequência, neste caso, tornará possível detetar e diagnosticar a falha mais cedo [61].

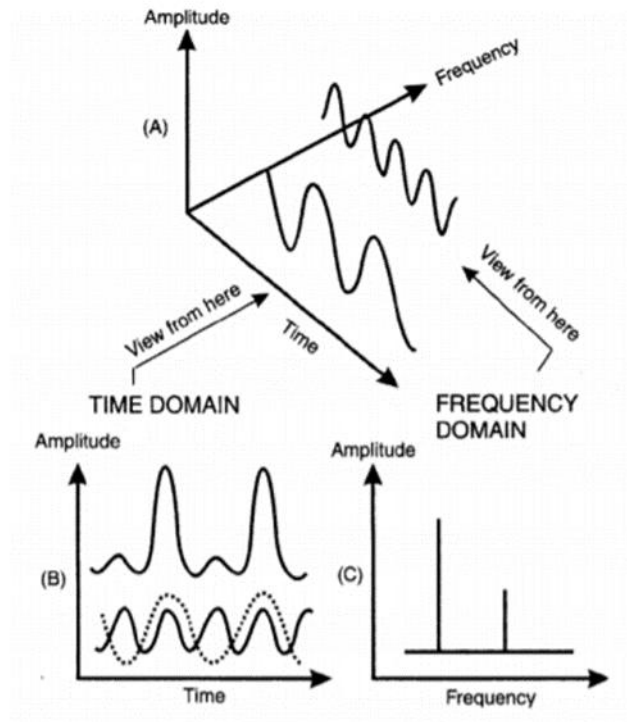


Figura 2.13 - Explicação ilustrada da visão da vibração no domínio do tempo (canto inferior esquerdo) e no domínio da frequência (canto inferior direito) [61].

A Transformada Discreta de Fourier (DFT) é usada para transformar sinais analógicos do domínio do tempo para o domínio da frequência. A DFT separa as várias frequências e amplitudes que compõem um sinal discreto (sinal que é limitado em comprimento/tempo). Normalmente, quando se fala em transformadas de Fourier, a transformada rápida de Fourier (FFT) é mencionada. A FFT é um algoritmo usado para calcular o DFT de um sinal e é popular devido à rapidez de cálculo. O comprimento da FFT é uma potência de dois (N^2) e esta propriedade é o que torna a FFT especialmente 'rápida'.

A amplitude *Root Mean Square* (RMS) entre duas frequências f_1 e f_2 pode ser calculada como:

$$\sqrt{2 \sum_{f_1}^{f_2} |X(f)|^2} \quad (\text{Equação 2-1})$$

Onde $X(f)$ é o valor absoluto dos componentes complexos da DFT em cada linha espectral. Se for necessário calcular o RMS de todo o espectro, os limites de frequência aplicados devem ser $f_1=0$ e $f_2 = f_s/2$, onde f_s é a taxa de amostragem dos sinais.

Existe um terceiro ângulo de análise de vibração chamado domínio de tempo-frequência. A metodologia de análise no domínio da frequência do tempo é como no domínio da frequência, mas o comprimento do sinal é reduzido ainda mais para investigar como o conteúdo da frequência do sinal muda ao longo do tempo. O domínio do tempo-frequência não será descrito nesta dissertação.

2.9.3 Detecção e diagnóstico de falhas

- **Detecção de falhas**

O método mais básico de monitorização de vibrações é a tendência do nível geral de vibração ao longo do tempo. Frequentemente, isso é feito usando o valor de pico e/ou RMS com os valores crescentes a serem considerados como um sinal de deterioração das condições.

O RMS é preferível ao valor de pico devido à sensibilidade do valor de pico ao ruído. O uso de RMS também é o método descrito na **ISO 10816-3**. No entanto, as vibrações gerais não fornecem informações sobre a fonte de vibração.

Além disso, para obter uma diferença perceptível no RMS, pode ser necessário um aumento significativo do nível de vibração geral, ao ponto que falhas localizadas podem ter causado danos secundários graves e falha catastrófica.

- **Diagnóstico de falhas**

O diagnóstico de falhas pode ser muito difícil e, para simplificar o processo de diagnóstico, apenas as frequências que apresentam mudanças significativas na amplitude são analisadas em detalhes. As falhas distribuídas que causam um aumento da amplitude de algumas frequências discretas, como um desequilíbrio ou excentricidade, são mais fáceis de diagnosticar.

Embora falhas localizadas como um dente de engrenagem danificado sejam mais difícil de diagnosticar e só possam ser detetadas como um pico transitório no sinal bruto do domínio do tempo.

2.9.4 Vibrações em diferentes componentes

Diferentes falhas que podem surgir em máquinas geralmente geram vibrações com diferentes assinaturas espectrais. Essas assinaturas são frequentemente harmônicas da velocidade de rotação, bandas laterais e/ou ruído de alta frequência. Em termos de análise espectral, o sinal correspondente à velocidade de rotação do componente em questão é referido como primeira ordem (1x). Os sinais harmônicos correspondentes a duas vezes a velocidade de rotação são referidos como de segunda ordem (2x) e assim por diante.

As engrenagens normalmente geram picos em frequências baixas e altas. Os picos de primeira e segunda ordem de velocidade de rotação estarão sempre presentes na representação espectral (por exemplo, DFT) de qualquer caixa de engrenagens. Haverá também um pico na frequência da malha das engrenagens ($GMF = \text{número de dentes na engrenagem} \times \text{velocidade rpm da engrenagem}$). Todos esses picos ocorrem em amplitudes baixas, mas se a amplitude aumentar significativamente, uma falha poderá estar a ocorrer.

Em termos de rolamentos, existem algumas frequências de rolamento fundamentais que sempre serão visíveis no espectro de velocidade, possivelmente junto com os harmônicos. Estas são a *BPFI (Ball Pass Frequency Inner Race)* associada a defeitos na pista interna do rolamento e a *BPFO (Ball Pass Frequency Outer Race)* associada a defeitos na pista externa do rolamento.

O *BPFI* pode ser estimado como: $0,6 \times N \times f$, onde N é o número de elementos rotativos e f é a velocidade em rps. *BPFO* pode ser estimado da mesma forma como: $0,4 \times N \times f$. O *BPF* é estimado como: $0,2 \times N \times f$. Além das frequências fundamentais, existem ressonâncias de rolamentos que ocorrem naturalmente entre 3-50 kHz [62].

Como muitos outros componentes, os eixos podem estar sujeitos a, por exemplo, folga, desalinhamento ou atrito do rotor. Ao monitorizar o lado motriz e o lado não-motriz de um eixo, o sinal provavelmente terá a mesma assinatura e, na melhor das hipóteses, deverá ter a mesma amplitude. Pode-se esperar que o lado motriz tenha uma amplitude um pouco maior, já que esse lado será em maior medida afetado pelos componentes adjacentes.

A determinação dos níveis de alarme para eixos é realizada assumindo um nível com base em medições anteriores numa condição bem definida. Se o nível atual acabar por ser várias vezes mais baixo do que o nível de alarme assumido, o nível deve ser reduzido. Se não for reduzido, aumentos substanciais nas vibrações que podem ser críticos, podem passar despercebidos.

A boa prática de alinhamento de um eixo é uma etapa vital no procedimento de manutenção de máquinas rotativas. Alguns sintomas de um eixo desalinhado são: parafusos da fundação soltos ou quebrados, perda de óleo nas vedações do mancal, parafusos de acoplamento soltos, ruptura ou fendas dos eixos e aumento da temperatura em diferentes componentes da máquina, como rolamentos ou acoplamentos [63].

Quando o motor é confrontado com altos binários de carga e/ou correntes aplicadas no inversor de corrente, a armadura do estator ficará sobrecarregada. Como resultado, a resistência dos fios irá aumentar. Este aumento levará a um decréscimo no nível de corrente de fase defeituosa do motor, devido à lei de Ohm. Portanto, um campo eletromagnético desequilibrado irá girar em torno do rotor, o que aumentará a vibração gerada na máquina [63].

3 Implementação do projeto em estudo e enquadramento no INEGI

Numa primeira fase e nos primeiros contactos com as máquinas no chão de fábrica do INEGI, é possível observar o tipo de arquitetura implementada no INEGI, por forma a ser possível tirar partido dos recursos da tecnologia de *Edge Computing* e de todos os sensores que irão ser instalados, quer numa integração vertical ao nível das camadas de automação mas também numa integração horizontal.

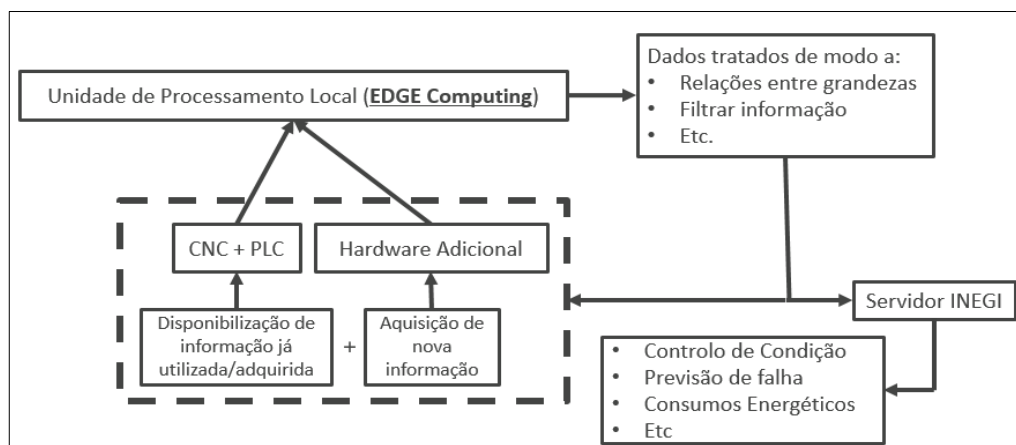


Figura 3.1 - Arquitetura de integração e comunicação dos sensores e/ou *hardware* periférico com o equipamento CNC para recolha e tratamento de dados.

Assim, é possível verificar através da figura 3-1 de que forma é feita a integração do *hardware* com o equipamento CNC e a respetiva implementação da comunicação com a plataforma INEGI. A capacidade de comunicação entre os dispositivos e o uso de mecanismos padronizados, abertos e transparentes são componentes indispensáveis do conceito atual de automação. A comunicação vem se expandindo rapidamente no sentido horizontal nos níveis inferiores (*field level*) e no sentido vertical, integrando todos os níveis hierárquicos.

3.1 Descrição Genérica do Equipamento: fresadora CNC multiaxial Flexioptima 5Axis

A máquina fresadora CNC multiaxial é um sistema complexo que consiste em muitos componentes. Esses tipos de máquinas são amplamente utilizados na indústria de produção em geral. No âmbito do projeto de dissertação, a máquina fresadora CNC Flexioptima do INEGI é o equipamento que visa toda esta implementação.

A Flexioptima 5-Axis é um equipamento CNC para corte, fresagem, furação e gravação, com controlador numérico *Fagor* que controla os 5 eixos, com acionamento por servomotores. A máquina é composta por uma estrutura monobloco onde está incluída a mesa, um pórtico em configuração dupla assimétrica e uma coluna vertical, construída em aço de alta resistência soldado permitindo uma elevada rigidez. O controlador FAGOR 8065, é equipado com *touchscreen*, otimizado para maquinação de alta velocidade e *software* para *autotuning* que permite a otimização da estrutura.

A cabeça de maquinagem bi-rotativa é constituída pelo *spindle* de maquinação, e pelos eixos rotativos A e C. O *spindle* tem capacidade para velocidades até 24000rpm e 7,4kW, refrigerado a líquido. O equipamento usa a tecnologia de maquinação de alta velocidade para ser usada por fabricantes de peças realizadas em materiais compósitos e materiais leves. Possui capacidade para trabalhar materiais de naturezas, espessuras e volumes diversificados, como materiais macios, ligas leves e ligas de alumínio.



Figura 3.2 - Equipamento alvo do projeto de dissertação. Fresadora CNC de 5 Eixos com controlador *Fagor*.

As principais especificações são descritas na seguinte figura:

Especificações dos modelo Models specification		5 Eixos	Especificações spindle Specifications spindle		5 Eixos
Cursos Courses	mm	2900x2050x1000	Potência máxima Maximum power	kW	7,4
Dimensões da mesa Table dimension	mm	3000x2000	RPM Motor	RPM	24000
Velocidade máxima de deslocação Maximum speed	m/s	vX= 1, vY= 1, vZ= 0,5	Binário máximo Maximum binary	N/m	3,9
Aceleração máxima Maximum acceleration	m/s ²	aX= 3, aY= 3, aZ= 2	Curso eixo C Course axe C		+/- 225°
Lubrificação Lubrification		Air Air	Curso eixo A Course axe A		+/- 100°
Fixação Fixation		Grampos Staples	Velocidade máxima eixo C C axe maximum speed		100°/s
Software		CNC Fagor	Velocidade máxima eixo A A axe maximum speed		100°/s
Movimentação Movimentation		Servo motor Servomoteur	Porta-ferramentas Tool holders		ISO 30
Peso Weight	Kg	8000	Arrefecimento Cooling		Líquido Liquid

Figura 3.3- Especificações técnicas do equipamento.

3.2 Processo de Fresagem

Por definição “a fresagem é um processo de arranque progressivo do material fazendo uso de uma ferramenta de aresta múltipla chamada fresa.” [64]. Em fresagem, o índice de remoção do material é extremamente alto, permite excelentes acabamentos de superfície, o que faz com que a fresagem seja um dos métodos de maquinagem por arranque de apara de maior

versatilidade, sendo também um dos mais complexos. Existem mais fatores que podem influenciar o resultado da maquinagem comparativamente com o torneamento. A velocidade e capacidade de realizar operações de fresagem num centro de maquinagem ou numa fresadora CNC, está relacionada com as capacidades da máquina, mais diretamente com o número de eixos que o controlador pode comandar em simultâneo [64].

3.3 Componentes típicos de um sistema CNC

Para a implementação de um sistema de monitorização da condição de uma máquina é necessário primeiro compreender quais os componentes típicos do sistema em análise, neste caso os componentes de uma máquina CNC multi-eixos e numa fase posterior quais os elementos críticos.

Os componentes típicos de uma máquina de comando numérico incluem:

- Eixos de deslocamento;
- Transmissões;
- Motores
- Veios de acionamento;
- Dispositivos de medida de posição e de deslocamento;
- Ferramenta principal ou cabeça (árvore);
- Sistemas de aperto das peças;
- Sistemas de mudança das ferramentas
- Eixos complementares de rotação e de deslocamento.

Na designação das máquinas de comando numérico utiliza-se sempre o conceito de eixos lineares: direções dos deslocamentos principais das partes móveis da máquina. Convencionalmente estes eixos designam-se por X, Y, Z. A designação e a descrição dos eixos de cada tipo de máquina de comando numérico é normalizada (Z // árvore). A descrição dos eixos do equipamento e o respetivo modo de acionamento é visualizado na seguinte figura:

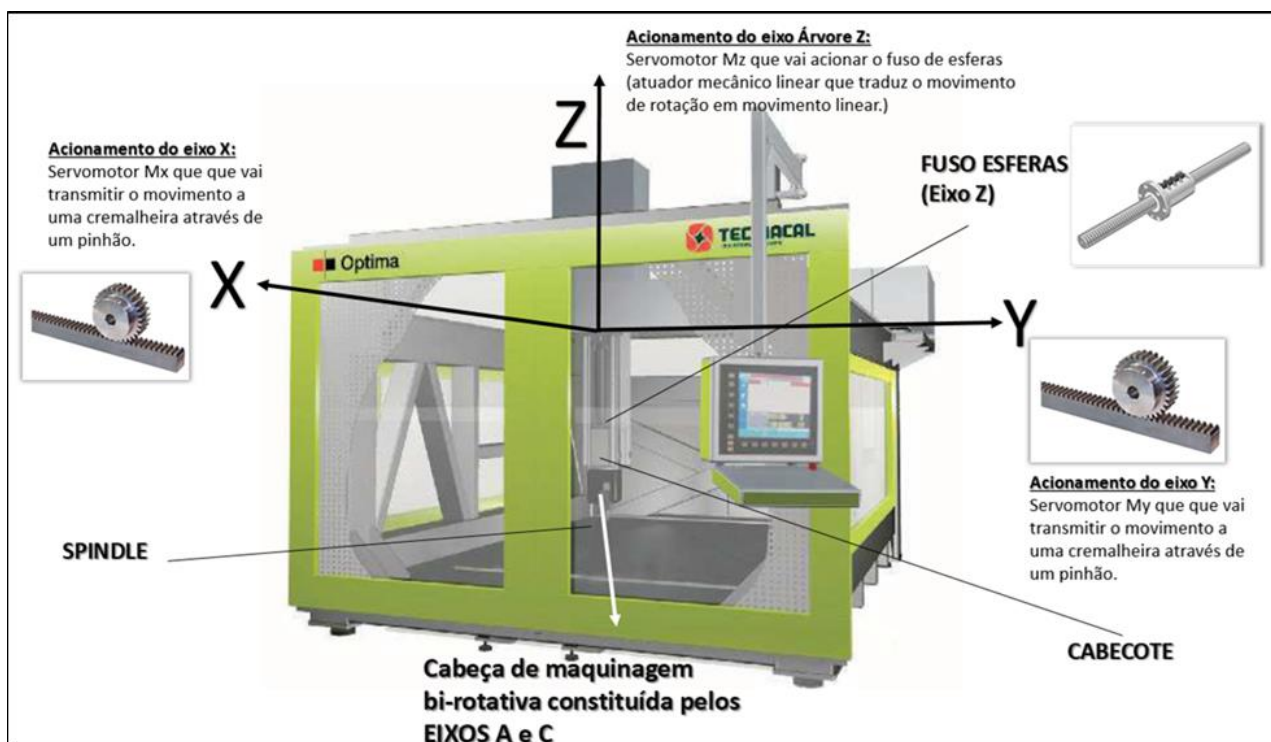


Figura 3.4 - Principais componentes e eixos de deslocamento do equipamento CNC Flexioptima.

Algumas máquinas de comando numérico dispõem de mesas giratórias e/ou cabeça orientável. Os eixos sobre os quais giram essas mesas e cabeça podem ser controlados de forma independente e são designados por eixos complementares de rotação, mas na maioria das máquinas, incluindo o equipamento em questão, são interpolados e controlados em conjunto com os 5 eixos. A sua velocidade é também regulada de forma autónoma. Os eixos complementares de rotação (paralelos a X, Y, Z) são designados, por A, B, C.

3.4 Definição dos parâmetros de trabalho

Para monitorizar a condição do ativo, é importante conhecer os parâmetros de entrada que vão ser alvo de análise, por forma a interpretar os dados que vão ser fornecidos pelas variáveis de saída.

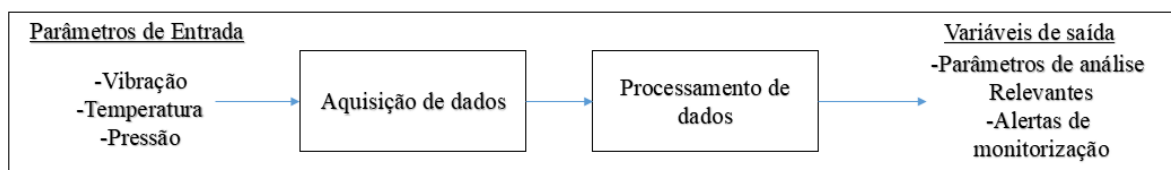


Figura 3.5 - Representação esquemática genérica da relação parâmetros de entrada e variáveis de saída num sistema de controlo.

As variáveis selecionadas foram a Vibração, a Temperatura e a Pressão, que não interferem com as operações de maquinagem da máquina. As variáveis de saída serão todos os alertas de monitorização que possam ser definidos e os parâmetros de análise relevantes.

A escolha das variáveis de medição prende-se com o facto de a monitorização de vibração ser uma técnica amplamente utilizada de manutenção preditiva e, com poucas exceções, pode ser aplicada a uma ampla variedade de equipamentos rotativos. A vibração de uma máquina vem de muitas fontes, rolamentos, engrenagens, correias, desequilíbrios, etc. e até mesmo pequenas amplitudes podem ter um efeito severo na vibração geral da máquina.

3.5 Enquadramento na arquitetura e servidor da Unidade de Desenvolvimento de Produto e Sistemas (DPS) do INEGI

A presente dissertação de Mestrado está enquadrada num contexto de equipamentos produtivos que não estejam completamente preparados para Integração de *Edge Computing* e Manutenção Preditiva e processos IoT. Possuir dispositivos de controlo que possam gerir os dados é fundamental.

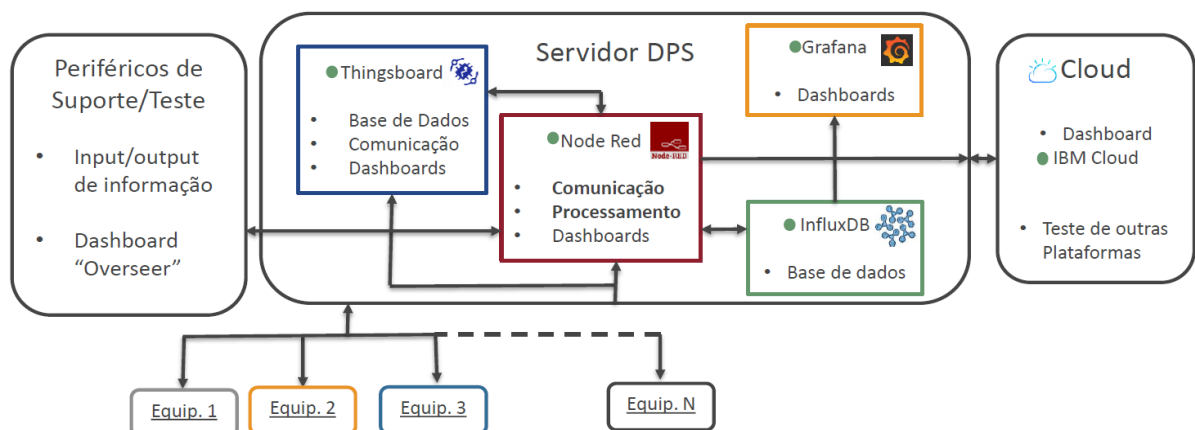


Figura 3.6 - Arquitetura IIoT da Unidade de Desenvolvimento de Produto e Sistema.

Por um lado poderem efetuar o controlo clássico da máquina ou processo, e por outro lado, com os mesmos dispositivos, conceber uma aplicação IoT para comunicar com as

camadas superiores, seja o servidor local ou a *cloud*. A arquitetura IIoT da Unidade de Desenvolvimento de produto e sistemas será o pilar em que a dissertação assenta em termos funcionais e é descrita na figura 3-6.

A par da transformação provocada pela IoT existem no mercado vários *gateways* que nos permitem, através de protocolos de comunicação específicos já referidos (MQTT, OPC-UA.), transferir os nossos dados. Mas existem situações em que é preferível trabalhar com o servidor local e não enviar dados para a *cloud*, como é o caso deste projeto de dissertação. Ou apontamos o *gateway* para um IP que pertence a um servidor local ou sobre o espaço contratado na *cloud*. No contexto do INEGI a escolha recaiu no servidor local, baseado na infraestrutura informática implementada.

Para terminar o enquadramento do servidor, é importante referir a conectividade para destacar que existem alguns *softwares* disponíveis para realizar a aplicação entre a *gateway* (pelo protocolo de comunicação escolhido) e o fornecedor da *cloud*. Na conectividade com a Indústria 4.0 é fundamental a qualidade da cablagem e ligação, proteção EMC e a conceção da arquitetura de rede. É importante escolher um *hardware* adequado, modular e preparado para o IoT e estudar corretamente a aplicação para escolher um protocolo de comunicação adequado e em função da necessidade.

- **Restrições na arquitetura de comunicação a implementar**

A necessidade da monitorização dos equipamentos assume um papel cada vez mais importante atualmente face à competitividade da indústria. O uso de instrumentos inteligentes para aprimorar os processos industriais por meio de análises em tempo real, requer a geração de grandes quantidades de *big data*, que são adquiridos e armazenados em sistemas *host* para avaliação. As principais fontes desses dados são os instrumentos inteligentes (sensores) instalados em todas as instalações industriais. Esses instrumentos transmitem variáveis básicas de processo, como parâmetros de calibração e diagnóstico em redes digitais. Estes dados tornam-se valiosos quando os pudemos analisar no contexto de um processo específico, permitindo realizar manutenção preditiva, reduzir tempo de inatividade e fazer outras melhorias operacionais.

No entanto, só podemos perceber o valor total destes dispositivos e o potencial subsequente de análises IoT quando os sistemas conseguem aceder rápida e facilmente à quantidade crescente de dados disponíveis. IoT é um bom ponto de partida, mas está esta tecnologia pronta para lidar com os seus dados de controlo críticos? Estes sistemas podem ser escalados de forma rápida e económica e, ao mesmo tempo, operar de maneira confiável?

A digitalização de estratégias de automação oferece muitos benefícios para a comunidade industrial mundial. É a chave para uma plataforma *Industrial Internet of Things* (IIoT) centrada em dados, que permite expandir o acesso seguro aos dados dos dispositivos e da rede para aumentar a produtividade e criar um local de trabalho mais seguro. A tendência para a digitalização é particularmente importante para monitorizar em tempo real operações remotas.

Para ultrapassar todos os constrangimentos inerentes quer ao nível da estrutura da máquina, mas também na arquitetura de comunicação para uma integração robusta e fiável de todos os dispositivos será necessário ir ao encontro de várias soluções.

Uma delas será a conexão eficiente ao nível do campo. Esta dependência é importante para não ter problemas com a transferência de dados, por forma a ter uma boa estruturação dos sinais e controlar a compatibilidade eletromagnética entre sistemas elétricos e eletrónicos e fazer uma integração adequada na arquitetura de rede.

A conexão adequada de uma arquitetura de rede e o tratamento de todos os dados é fundamental em sistemas que são ampliados todos os dias e que vão crescendo em complexidade. O facto dos dados de OT e IT conviverem obriga-nos a escolher quais os dados que podem ser tratados e quais os que têm de ser tratados. O abuso de *switches* não geridos e a ligação de IT ao processo faz com que muitos sistemas fiquem saturados porque não estão bem priorizados.

A convivência e a importância do elo de dados entre OT e IT será explicada num capítulo posterior. É esta adaptação que permite a adaptar o equipamento existente para a digitalização. Comunicar com uma fonte de alimentação, conhecer o estado da alimentação de

- Nós de credenciais;
- Nós criados por utilizadores.

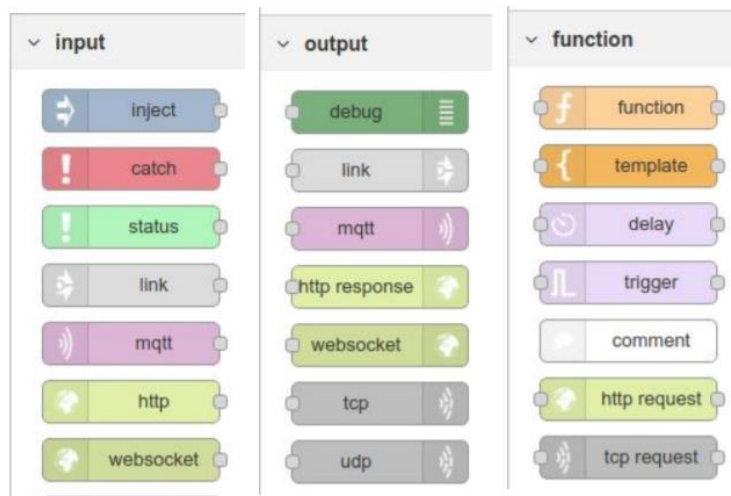


Figura 3.8 - Conceitos de Node-Red: tipos de nós.

Em sequência, é na área de trabalho, que se encontram os nós conectados através dos seus *data hubs* e *data wires*, as pontes por onde os dados trafegam entre um nó e outro. Um passo importante para utilização do Node-Red no decorrer do projeto foi o ‘importar’ e o ‘exportar’ nós. No Node-Red conseguimos trazer fluxos ou até mesmo programas inteiros feitos noutros servidores para o nosso ou vice-versa, para isso foi necessário selecionar os nós ou os *flow* que queríamos exportar seguido da opção *clipboard*.



Figura 3.9 - Conceitos de *import nodes* e *export nodes* no Node-RED.

3.6 A Convergência de IT e OT no projeto

Os domínios anteriormente separados de *Operational Technologies* (OT) e *Information Technologies* (IT) são cada vez mais o mesmo. Há menos distância do que nunca entre os sistemas que controlam os processos de produção e os que controlam o armazenamento, as comunicações e a aquisição de dados.

As abordagens de tecnologias de informação e tecnologia operacional para operações encontram-se em pólos opostos. Embora a inovação e a segurança formem a base de IT, a OT é mais sobre como deixar um sistema a funcionar de forma confiável e com o mínimo de mudanças possível.

A convergência IT/OT é a integração dos sistemas de produção que controlam eventos e processos físicos com *hardware* e software para transmitir e processar informações. Cada vez mais, os componentes de OT podem comunicar diretamente com outras máquinas (máquina a máquina), bem como com servidores centralizados. Quando falamos sobre sistemas modernos da IoT, de muitas maneiras estamos a falar desta convergência entre os dois domínios

anteriormente distintos. Devido à convergência IT/OT, podemos transformar os dados gerados por máquinas e processos em valiosos *insights*.

Agora, o fato de máquinas, *gateways* e sensores estarem todos conectados ao sistema de informações centralizado permite que os dados de várias fontes possam ser combinados numa imagem holística das operações. O resultado é ter uma visibilidade do processo em tempo real.

E será essa convergência que permitirá chegar ao dashboard geral do equipamento do INEGI no chão de fábrica, integrando todos esses dados, seguindo os respectivos passos:

1. Consultar as especificações de I/O dos sensores e diagramas de fios para ligação:
 - a. Configurar os canais de I/O;
 - b. Verificar o *status* e os valores de I/O.
2. Criar um fluxo de dados com o editor de execução do Node-RED.
3. Disponibilizar a visualização dos processos em tempo real.

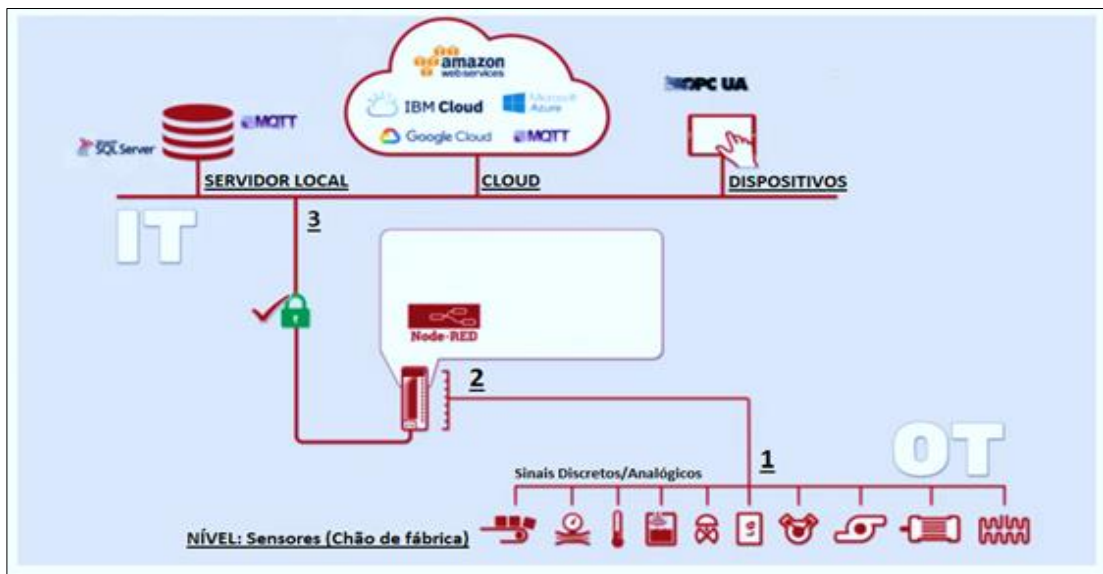


Figura 3.10- Convergência dos domínios IT e OT.

3.7 Seleção dos dispositivos

Nesta fase, foi necessário escolher quais os componentes que iriam integrar o projeto. O equipamento foi dotado de sensores de vibração e de temperatura, ligados por cabos de conexão à eletrônica de diagnóstico associada, sensor de pressão, um IO-Link *master* com interface ethernet/IP e um *switch* Ethernet.

A escolha de mercado para os sensores e o IO-link *master* recaiu sobre o fabricante da marca *IFM* [65], à exceção do *switch* da *Weidmuller* [66] e do sensor triaxial da *Bruel & Kjaer* (já na posse do INEGI) [67]. De notar, que os sensores da *IFM* apenas podem utilizar a eletrônica de diagnóstico da *IFM*. Os sensores extraem todas as informações da máquina, usando a tecnologia-chave IO-Link.

O IO-Link *master* permitiu fazer a separação entre automação e rede de IT para conectar os quatro aparelhos IO-Link para uma transmissão confiável dos dados da máquina, parâmetros de processo e dados de diagnóstico ao sistema de comando.

Permitiu também incorporar as interfaces EtherNet/IP e MQTT JSON. Em conjunto, todos os dispositivos criaram uma interface padronizada e independente de barramentos de campo para a automação, que oferece uma conexão ponto a ponto sem endereçamentos complexos.

3.7.1 Edge Computer ADLINK MCM-100

O *edge computer* cedido pelo INEGI e utilizado foi o ADLINK MCM-100. Este é construído com base em padrões abertos e arquitetado com componentes modulares que permitem fácil integração com qualquer sistema existente de IT e OT. Permite o monitoramento da condição da máquina, integração de sensores, aquisição de dados, computação de borda e *software* de análise de vibração. O *edge computer* permite de maneira não intrusiva a aquisição de dados num formato IT “*friendly*” sem modificações estruturais na máquina. Um módulo de condição de sinal, DAQ (*data acquisition*) e função de PC são integrados num único sistema, evitando complicadas passagens de cabos, economizando *hardware* e custos de instalação convencional.

As suas especificações gerais são descritas na seguinte tabela:

Tabela 3-1- especificações do *Edge Computer* utilizado no projeto.

	
ADLINK MCM 100	
Tipologia	<i>Edge IoT Platform for Machine Condition Monitoring</i>
Processador	Intel® Atom x7-E3950
Memória	4 GB DDR3L 1600 MHz SODIMM module (Up to 8 GB support)
Interface I/O	Ethernet 2 x GbE ports (2 x Intel I210IT)
Portas de Série	2 x BIOS-configurable RS232/422/485 (COM1 and COM2)
Fonte de Alimentação	6 to 36 VDC wide-range DC input 3P pluggable connectors with latch (GND, V-, V+)

3.7.2 Sensores de Vibração

Optou-se por escolher acelerômetros capacitivos de tecnologia MEMS. Avanços recentes na tecnologia de acelerômetros MEMS capacitivos permitem soluções de baixo custo e baixo consumo de energia empregues em manutenção preditiva para um tipo de manutenção baseada em condições permitindo novas percepções de diagnóstico na gestão de instalações e mantendo o tempo de atividade do sistema crítico.

Os acelerômetros MEMS são adequados para sistemas de manutenção preditiva devido ao seu tamanho pequeno, baixa potência, recursos de alto desempenho e têm excelente sensibilidade. Na tabela seguinte é feita uma descrição dos detalhes técnicos dos sensores de vibração da IFM utilizados:

Os sensores de vibração VVB010 e VSA005 obtêm e analisam internamente diferentes valores de processo que são usados para detetar danos na máquina: **v-RMS** (valor eficaz da velocidade de vibração, deteta fadiga de peças), **a-RMS** (valor eficaz de aceleração, deteta atrito mecânico), **a-Peak** (valor máximo de aceleração, deteta impactos mecânicos), fator de crista **a-Peak/a-RMS** (valor característico importante para a condição geral da máquina).

Tabela 3-2 detalhes técnicos dos sensores de vibração IFM.

Acelerômetros Capacitivos MEMS da IFM		
SENSOR	VSA 005	VVB010
		
Tipologia	Sistema microeletromecânico (MEMS)	Sistema microeletromecânico (MEMS)
Gama de medição de vibração [G]	25	50
Escala de frequência [Hz]	1-10000	2-10000
Tensão de funcionamento [V]	7,2-10,8 DC	18-30 DC
Número de eixos de medição	1	1
Gama de medição de temperatura [°C]	-20 a 80	-30 a 80
Precisão	0,2% Linearidade	≤ 4 kHz +/-10 %; ≥ 4...10 kHz
Interface de comunicação	Modbus via software de eletrônica de diagnóstico VSE	IO-Link
Tipo de Montagem	Parafuso de montagem 1 x M5 x 20	Pino de enroscar: 1 x 1/4" 28 UNF / M8

A principal diferença entre estes sensores prende-se com o diferente intervalo de medição de vibração. Em termos de fixação, seguiram a montagem acima descrita na tabela. Em todos os sensores de vibração, a direção de medição é o eixo Z. O eixo Z corresponderá à direção de rosqueamento.

O sensor da *Bruel & Kjaer* que se encontrava em utilização no INEGI foi também reaproveitado e apresenta as seguintes especificações da tabela 3-3:

Tabela 3-3 detalhes técnicos do sensor triaxial da Bruel & Kjaer.

Acelerómetro Triaxial	
SENSOR	4535-B 001
	
Tipologia	Piezoelétrico
Interface	IEPE
Material	Titânio ASTM Grade 5
Sensibilidade	1 mV/ms ⁻²
Escala de frequência [Hz]	X: 0.3 to 10.0k Y: 0.3 to 10.0k Z: 0.3 to 12.8k
Temperatura de operação [°C]	-60 a +125
Número de eixos de medição	3
Tipo de Montagem	Parafuso: M3 × 2.8 mm ou adesivo
Conexão Elétrica	1/4"-28 UNF 4-pin (M)

Quando apenas uma medição de um ou dois eixos é necessária num local, este sensor permite a possibilidade de fornecimento de alimentação de eixo único; no entanto, todos os eixos serão utilizados.

A descrição dos pinos é feita da seguinte forma e visualizada na figura 3-11:

- Pino A = Eixo X (*Integral cable color* = Vermelho) - ligação ao *edge computer*: AI 0
- Pino B = Eixo Y (*Integral cable color* =Azul) - ligação ao *edge computer*: AI 1
- Pino C = Eixo Z (*Integral cable color* =Preto) - ligação ao *edge computer*: AI 2

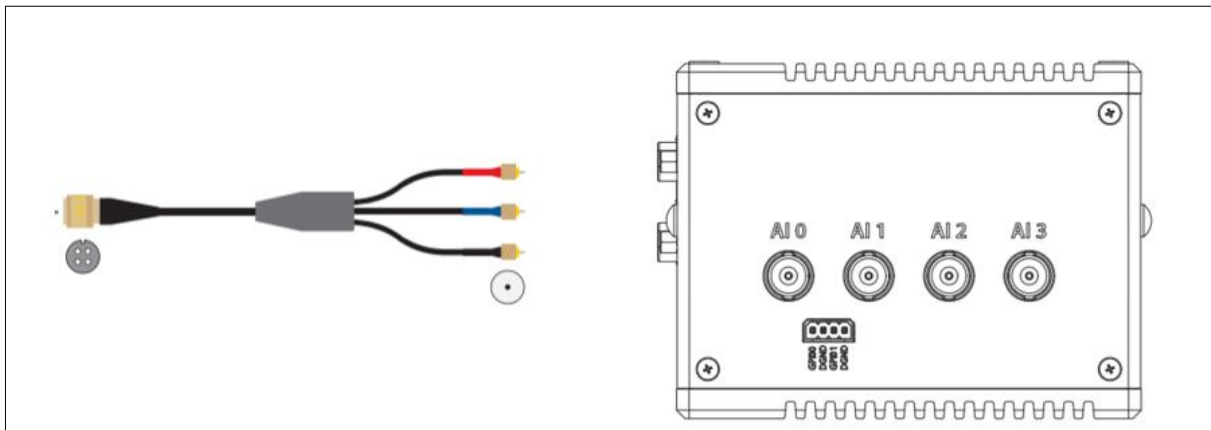


Figura 3.11 - Detalhes da ligação do sensor triaxial ao *edge computer*.

Para aplicações que utilizam sensores IEPE, o *edge computer* fornece uma corrente de excitação. A corrente de excitação é de 2 mA, com deslocamento de tensão DC gerado por causa da corrente de excitação e da impedância do sensor. Ao habilitar fontes de corrente IEPE, o *edge computer* define automaticamente a configuração de entrada para acoplamento AC.

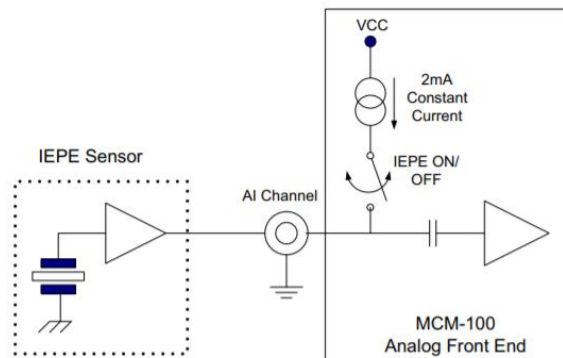


Figura 3.12 - Corrente de Excitação para medição do Sensor IEPE do *edge computer* MCM-100.



Figura 3.13 - Sensor Triaxial *Bruel & Kjaer* conectado ao *edge computer* por IEPE.

3.7.3 Sensores de Temperatura

A escolha recaiu sobre o sensor de temperatura TS2229 da *IFM*. É uma sonda de temperatura plana, da série TS que mede a temperatura e transmite os valores de medição para uma unidade eletrônica de visualização e avaliação dos modelos TP/TR da *IFM*.

O *IFM* TS2229 é um sensor de temperatura do tipo Pt100, com uma ligação de 4 fios. Este sensor tem de ser ligado a um dispositivo de condicionamento de sinal, neste caso, ao dispositivo *IFM* TP3231, de forma a obter-se um sinal em corrente proporcional à temperatura. Estados críticos do processo, como por exemplo quando os valores limites de temperatura são excedidos, podem ser sinalizados diretamente através da saída de comutação.

Tabela 3-4 Detalhes técnicos do sensor de temperatura TS2229 da *IFM*.

Sensor de Temperatura	
SENSOR	TS2229
	
Intervalo de Medição	-40...90 °C
Elemento de Medição	1 x Pt 100; (para DIN EN 60751, classe A)
Isolamento Nominal [V]	2500; (isolamento entre o invólucro do sensor e a estrutura interna do sensor)
Precisão [K]	$\pm (0,15 \text{ K} + 0,002 \times t)$
Protecção	IP 67
Materiais	1.4303 (aço inoxidável / 305 / 308); cobre niquelado
Conexão de processo	Sensor aparafusado 12 x 8,7 x 51 mm
Instalação	RTD de montagem à superfície para corpos sólidos
Conexão Elétrica	Cabo: 2 m, PUR, Ø 4,9 mm; 4 x 0,34 mm ² (42 x Ø 0,1 mm)

3.7.4 Eletrônica de diagnóstico

A eletrônica de diagnóstico permitiu fazer a ligação dos sensores à rede local e ao *edge computer*, e, digamos, que são o cérebro de toda a implementação dos sensores. Podem ser conectados até 4 sensores de vibração *IFM* (tipo VSA, VSP) ou sensores com um sinal padrão IEPE ao modelo VSE153. Na tabela seguinte é feita uma descrição geral da função e aplicação destes dispositivos de eletrônica de diagnóstico:

Tabela 3-5 Descrição geral da eletrônica de diagnóstico *IFM* utilizada no projeto.

IFM- Mestre IO-Link com interface EtherNet/IP AL1322	IFM- Eletrônica diagnóstica para sensor diagnóstico de vibração VSE153	IFM-Unidade eletrônica de avaliação para sensores de temperatura PT100/PT1000
		
Função		
Componente para barramento de campo.	Sistema para monitoramento e diagnóstico de vibração.	Conversor para sensores de temperatura PT100.
Aplicações		
• Transmissão confiável de dados de máquina, parâmetros de processo e dados de diagnóstico ao sistema de comando; • Invólucro robusto para aplicação em ambiente industrial duro.	• Para o monitoramento confiável da vibração de máquinas e sistemas; • Entradas para a detecção simultânea de até quatro sensores de vibração; • Entradas analógicas para monitoramento de outras grandezas de medição.	• Saída analógica precisa e comunicação via IO-Link; • Simplificação da montagem e minimização das causas de erros em relação a transmissores para cabeçote.

O VSE153 é um sistema de diagnóstico de 6 canais para a avaliação de quatro sinais dinâmicos (ex. vibração como foi o caso dos quatro sensores de vibração conectados) e duas entradas analógicas. Possui 3 portas Ethernet, para separação da rede de máquinas e rede informática, e 6 canais: 4 dinâmicos (ex. vibração, pressão) e 2 duas entradas analógicas.

O mestre IO-Link descentralizado, funcionou como um *gateway* entre sensores IO-Link inteligentes e a rede de campo. Com um conector IoT-Ethernet separado, a rede IT pôde ser configurada completamente à parte da rede de automação. As informações dos sensores foram transferidas/enviadas através da interface TCP/IP-JSON.

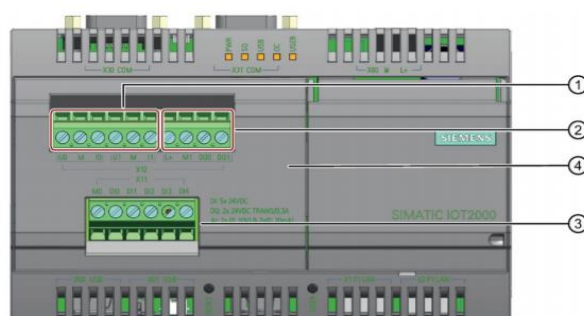
O software *LR device* que será descrito mais à frente, permitiu “encontrar” e configurar o mestre IO-Link na rede e criar uma visão geral de todos os sensores ligados. Além disso, todos os sensores conectados são exibidos com os respetivos parâmetros, isso permitiu definir os parâmetros de todos os sensores do IO-Link *master* do sistema de num ‘ponto central’. Os sensores foram conectados através de cabos *standard* com conectores M12 sem blindagem. Dependendo da versão, poderiam ser conectados até 4 ou 8 sensores IO-Link, neste caso foram conectados 4 sensores.

Tabela 3-6 Detalhes técnicos dos dispositivos de eletrônica de diagnóstico da IFM.

Eletrônica diagnóstico da IFM			
Componente	AL1322	VSE153	Conversor PT100
Entradas	Entradas digitais: 16 (IO-Link Port 8 x 2)	Entradas analógicas: 2	-
Saídas	Saídas digitais: 8	Saídas digitais: 2; saídas analógicas: 1	Saídas analógicas: 1
Protocolo	Ethernet/IP	Modbus TCP	-
Tensão de Operação [V]	20...30 DC	24 V DC	-
Corrente da saída analógica [mA]	-	-	4...20mA
Interface de Comunicação	Ethernet; IO-Link	Ethernet	IO-Link
Proteção	IP 65; IP 66; IP 67	IP 20	IP 67
Temperatura Ambiente [°C]	-25...60	0...60	-25...70
Resistência a vibrações	DIN EN 60068-2-64 2009-04	DIN EN 60068-2-64 2009-04	DIN IEC 68-2-6
Fixação	Por parafuso: 2 x M5	Borne cortante, borne roscado ou grampo de gaiola de mola	Por parafuso: 1 x M12
Materiais	Invólucro: PA; soquete: latão niquelado	Revestido com material sintético/PA	PET; Material da porca (aço inoxidável/316L)

3.7.5 Siemens Simatic IOT 2000

O *simatic* IOT 2000 extrai dados de uma variedade de componentes e dispositivos de automação, como controladores, sensores e dispositivos USB. O sistema suporta inúmeros protocolos, como o Protocolo S7, OPC UA, Modbus TCP, TCP/IP; UDP, MQTT *Subscriber* ou Modbus RTU através de várias interfaces, incluindo RS232/422/485, Serial USB interface, Ethernet ou *WiFi*. Possui 5 entradas digitais, que foram usadas para extrair sinais da máquina.



		Interface	Interface description
①	Analog interface	M 1)	Ground of analog input
		U0, U1	Analog voltage input
		I0, I1	Analog current input
②	Digital output interface	M1 2)	Ground of digital output
		L+	Power supply of digital output
		DQ0, DQ1	Digital output
③	Digital input interface	M0 2)	Ground of digital input
		DI1 DI2, DI3, DI4, DI5	Digital input
④	IOT2000 Input/Output Module cover		

Figura 3.14 - Configuração e interfaces do módulo *Input/Output*.

Para a sua integração, foi conectado a uma fonte de alimentação, com o respetivo bloco de bornes elétricos que têm como finalidade fazer a conexão para interligar o dispositivo com os fios para as saídas digitais. A conexão é exposta na figura seguinte:

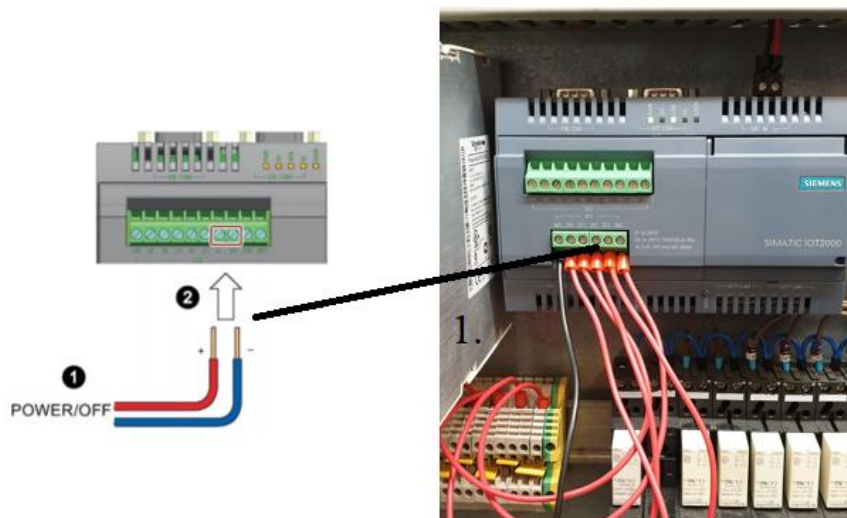


Figura 3.15 - Ligação à fonte de alimentação (1) do SIMATIC IOT 2000.

3.8 Integração dos dispositivos IoT com os protocolos de comunicação

Integração do IO-Link master com interface IoT MQTT

Para aceder ao mestre IO-Link por meio da infraestrutura de TI, foi necessário definir as configurações de IP da porta IoT. Para definir as configurações de IP com DHCP, um servidor DHCP devia estar ativo na rede de IT. Se nenhum servidor DHCP pudesse ser alcançado na rede de TI, um endereço IP era automaticamente atribuído à porta IoT.

Para obter os dados de processo de entrada dos dispositivos conectado nas portas do IO-Link *master* com interface IoT (AL1322) seguiram-se os seguintes passos:

1. Definir o endereço IP do AL1322 para 192.168.203.101;
2. Conectar os dispositivos IO-Link nas portas;
3. Exemplo: conectou-se um dispositivo IO-Link à porta 1, neste caso foi conectado o sensor VVB010.



Figura 3.16 - Porta IoT do IO-Link *master*.

De seguida, foi necessário importar o nó do fabricante e criar o respetivo *flow* na área de execução do Node-RED.

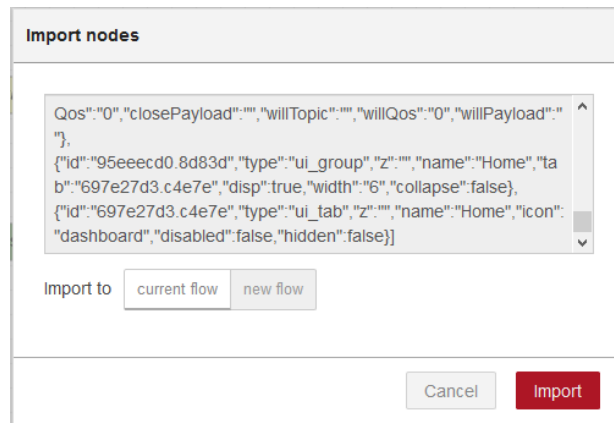


Figura 3.17 - Importação do Nó do IO-Link *master*.

A integração com o nó MQTT do Node-RED para ligação ao *broker* MQTT foi feita da seguinte forma:

1. Utilização do nó de saída MQTT;
2. Inserido o endereço IP desejado e a porta do MQTT *broker* do INEGI.

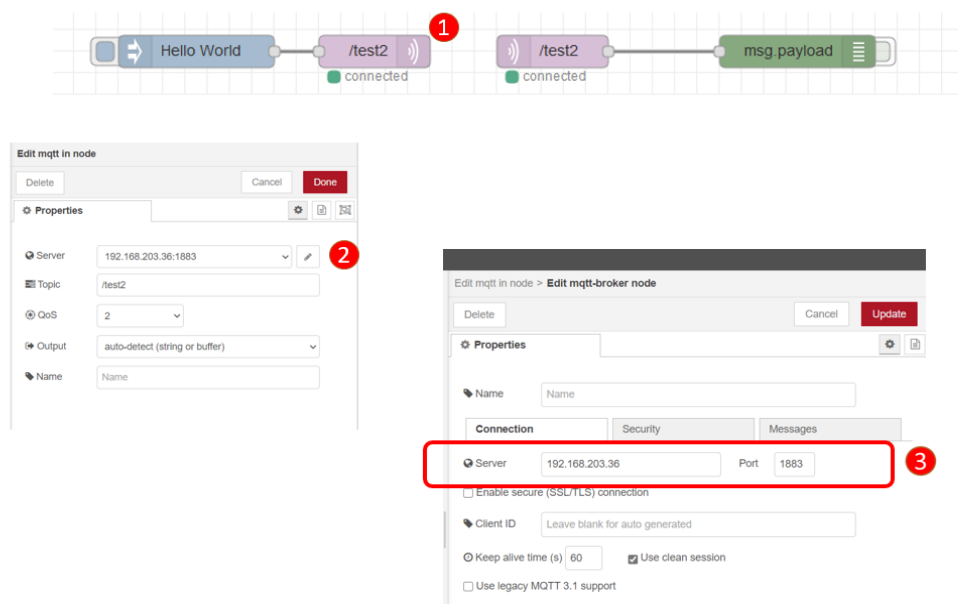


Figura 3.18 - Ligação do IO-Link *master* por MQTT no Node-RED.

A porta IoT possibilitou o acesso a todas as áreas de dados do mestre IO-Link e sensores conectados. As informações são lidas e escritas através do acesso HTTP e dos comandos JSON. Os dados dos sensores foram assim transmitidos digitalmente. Diferentemente dos sinais analógicos, as resistências de contato e as interferências eletromagnéticas não podem distorcer os sinais no protocolo IO-link.

Aquisição de dados através do IO-link *master*

Para testar os dados do processo de entrada de um dispositivo IO-Link, o sensor VVB010 foi conectado na porta 1 e foi necessário usar o IODD do mesmo. Essa informação pôde ser retirada do site da *IFM* na página de descrição do produto.

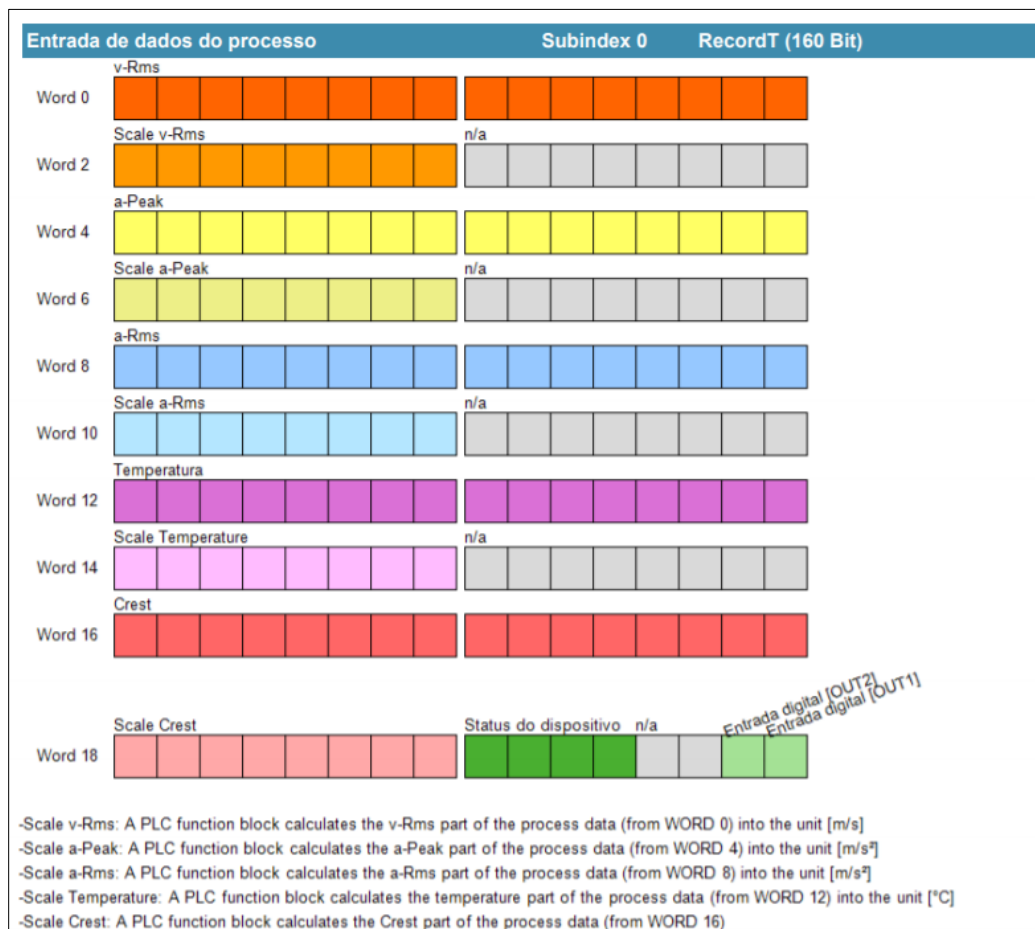


Figura 3.19 - Dados de processo exibidos de acordo com a ordem de classificação do dispositivo para leitura dos dados de entrada.

Para ler os dados do processo de um dispositivo IO-Link conectado, foi essencial ler os dados da entrada do processo com o serviço *getdata*. Por exemplo, para aquisição do valor da temperatura correspondente ao nó da função correspondente que o sensor VVB010 permite fornecer foi fundamental seguir o seguinte processo:

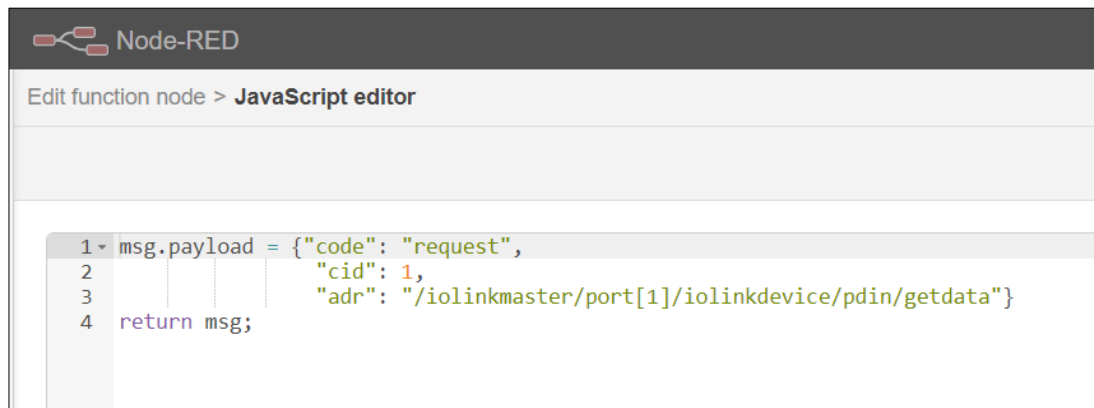
- **Request**

```
{ "code": "request",
  "cid": 1,
  "adr": "/iolinkmaster/port[1]/iolinkdevice/pdin/getdata" }
```
- **Return**

```
{
  "cid": 1,
  "data": { "value": "03C9" },
  "code": 200
}
```

O valor de retorno foi fornecido em formato hexadecimal. Além do valor da temperatura, o valor de retorno contém informações adicionais (IO Device Description (IODD) do sensor). O valor da temperatura era mostrado nos bits 2 a 15 - 0x03C9 = 0b1111001001. O valor da temperatura: 0b11110010 = 242 Portanto: O valor atual da temperatura era 24,2°C.

A função que permitiu obter os dados de conexão do sensor à porta 1 do IO-Link *master* foi executada da seguinte forma:



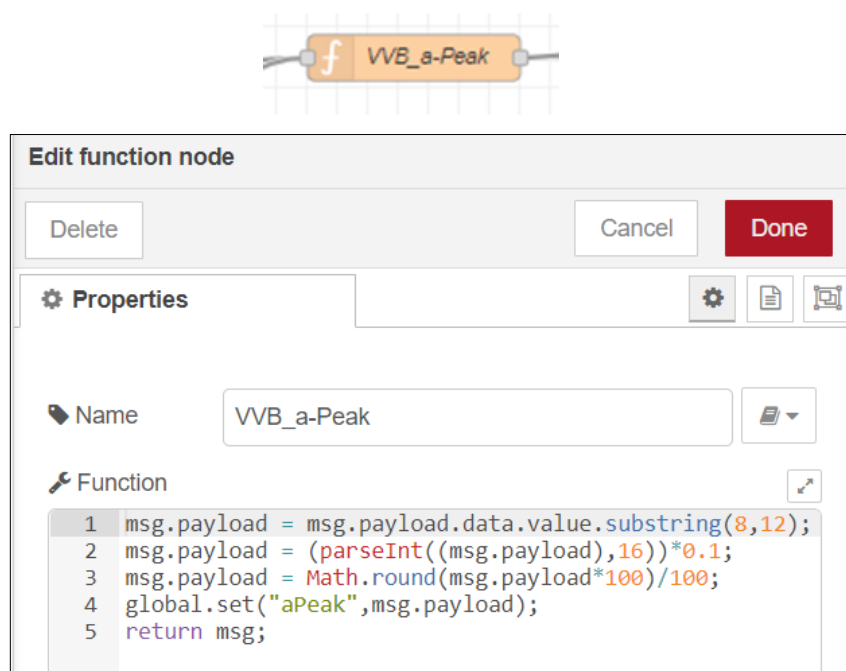
```

1 msg.payload = {"code": "request",
2               "cid": 1,
3               "adr": "/iolinkmaster/port[1]/iolinkdevice/pdin/getdata"}
4 return msg;

```

Figura 3.20 - Programação em *JavaScript* da função que permite fazer a leitura dos dispositivos IO-link. Neste caso é apresentado a função correspondente ao sensor VVB010 conectado na porta 1 do IO-Link *master*.

No nó de função denominado como “VVB_a-Peak” criada para neste caso obtermos o a variável valor de pico de vibração do sensor que neste caso correspondia ao *word* número 4 na entrada de dados do processo foi desenvolvido o seguinte código:



```

1 msg.payload = msg.payload.data.value.substring(8,12);
2 msg.payload = (parseInt((msg.payload),16))*0.1;
3 msg.payload = Math.round(msg.payload*100)/100;
4 global.set("aPeak",msg.payload);
5 return msg;

```

Figura 3.21 - Programação em *JavaScript* da função que permite a leitura do parâmetro pico de vibração para aquisição de dados do sensor VVB010 do nó intitulado “VVB_a-Peak”.

Os dados de leitura dos parâmetros apresentavam um *offset* de 4 bits, como tal os valores são lidos na *substring* (8,12) e a conversão de hexadecimal para decimal é feita dividindo os dados de processo por 16 na segunda linha de código. O valor convertido seria depois o valor real do processo interpretado e unidade de medida fornecidos pela descrição do dispositivo IODD. A fórmula de conversão para converter os dados brutos IO-Link transmitidos em unidades físicas, era sugerida pelo manual do produto e neste caso a conversão é feita pela multiplicação por 0,1 na segunda linha do código para se obter este parâmetro de vibração dado em mm/s.

Todo este processo de configuração do sensor VVB010 seria equivalente para os restantes sensores conectados nas respetivas portas do IO-link *master*. Essas configurações traduziram-

se no seguinte *flow* executado no Node-RED para leitura de todos os parâmetros de processo lidos pelo sensor:

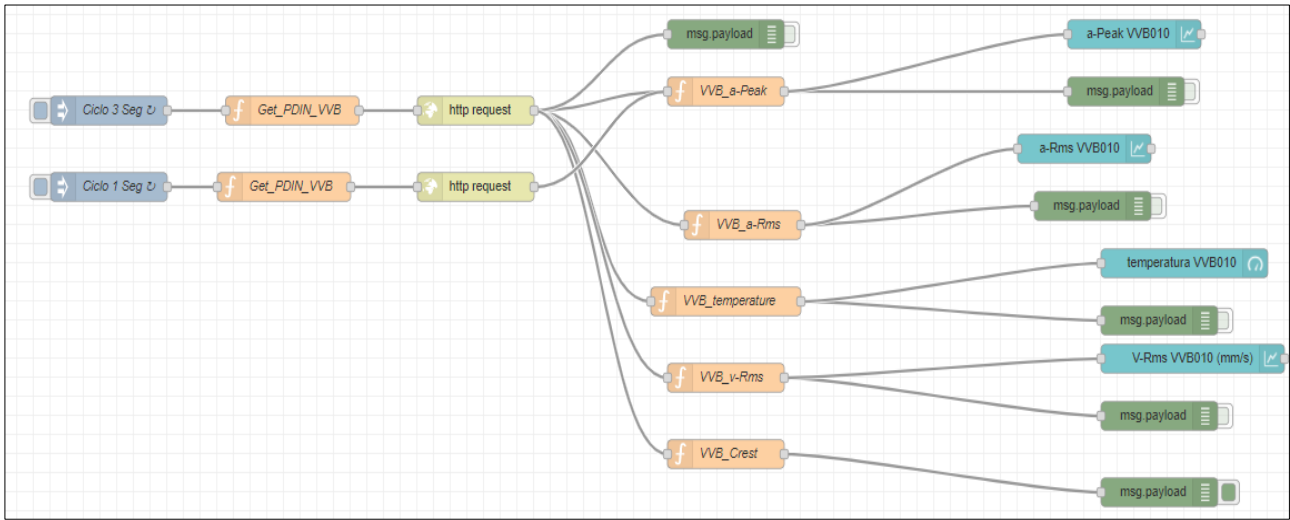


Figura 3.22 - Programação do *flow* do sensor VVB010 no ambiente de execução do Node-RED para aquisição de dados e leitura dos parâmetros de vibração e temperatura.

Integração do dispositivo VSE 153 com o protocolo Modbus TCP

Os parâmetros do dispositivo VSE153 foram definidos exclusivamente através do *software* de parametrização VES004 que será exposto mais à frente. Todos os parâmetros do aplicativo configurado são agrupados num conjunto de parâmetros e transferidos para o dispositivo. Este conjunto de parâmetros é descrito na figura 3-23.

Request	Parameters
Register access	only acyclical r/w
Register addressing	based on 1
Transmission rate	100 Mbits/s, 10 Mbits/s
Protocols and minutes	Modbus TCP/IP
Data format	big-endian
Modbus TCP/IP	
Max. input and output process image	1024 bytes (512 registers)
Configuration	via PC with configuration tool: VES004
Max. number of socket connections	8x Modbus TCP
Register filing of the input data	analogue input register 16 bits (r)
Register filing of the output data	analogue holding register 16 bits (r/w)
Supported function codes	FC3, FC4, FC6, FC16
Write max. byte length for registers	1...123 registers
Read max. byte length for registers	1...125 registers

Figura 3.23 - Características Modbus TCP do dispositivo VSE 153, retirado do manual de produto do fabricante IFM.

Os registros de entrada são marcados com 3xxxx e podem ser lidos por meio do código de função 4 do Modbus (FC4). Os registros de saída (retenção) são marcados com 4xxxx.

Um registo individual podia ser escrito através do código de função 6 do Modbus (FC6), vários registros simultaneamente através do FC16 (*function code*). O código de função Modbus (FC3) permitiu a leitura do registo de saída. Para programar o acesso ao registo nas ferramentas mestre Modbus o endereçamento geralmente começava no endereço "0", dependendo da configuração do "BaseAddress" também em "1".

A distinção entre os registos de entrada e saída foi feita através do uso do código de função respetivo. Como por exemplo, a leitura do registo 30001 do dispositivo foi feita consultando o endereço "0" via FC4 (*function code*). A escrita do registo 40001 no VSE153 é executada na ferramenta mestre escrevendo no endereço "0" via FC6. Os códigos de função Modbus TCP do dispositivos são descritos de seguida, na figura 3-24.

function code	Parameter
Code 4 (dec)	read input register

Function code	Description
Code 3 (dec)	read holding register
Code 6 (dec)	write single holding register
Code 16 (dec)	write multiple holding register

Figura 3.24 - Códigos de função *input* e *output* Modbus TCP do dispositivo VSE 153; Em cima: código de função *input*. Em baixo: código de função *output*. Retirado do manual do fabricante.

Foi assim usado o nó “*Modbus Getter*” descrito na figura 3-25, no Node-RED para comunicação com Modbus TCP:

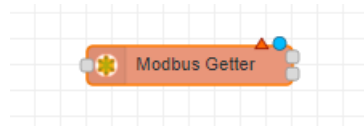


Figura 3.25 - Nó para protocolo Modbus no Node-RED.

Depois de instalar na biblioteca do Node-RED os nós Modbus para usar o protocolo de comunicação Modbus TCP/IP, foi possível usar esses nós. Mas antes de usar o bloco principal que organiza a comunicação foi necessário configurar alguns parâmetros. É sempre necessário especificar o tipo e o endereço. O tipo será a função Modbus e o endereço será a posição do *array* do nó onde se encontram as *inputs* e os *outputs* (I/O) desejados

O nó Modbus TCP/Serial contém uma função de leitura acionada por entrada. Conecta-se a um dispositivo Modbus TCP ou serial para ler *coils*, *registers* e *inputs* na taxa da mensagem de entrada. As funções suportadas pelo nó são: **FC 1-** Read Coil Status; **FC 2-** Read Input Status; **FC 3-** Read Holding Registers; **FC 4-** Read Input Registers.

Um exemplo de uma configuração executada para medição da velocidade de vibração no Node-Red por Modbus TCP é descrita na figura seguinte:

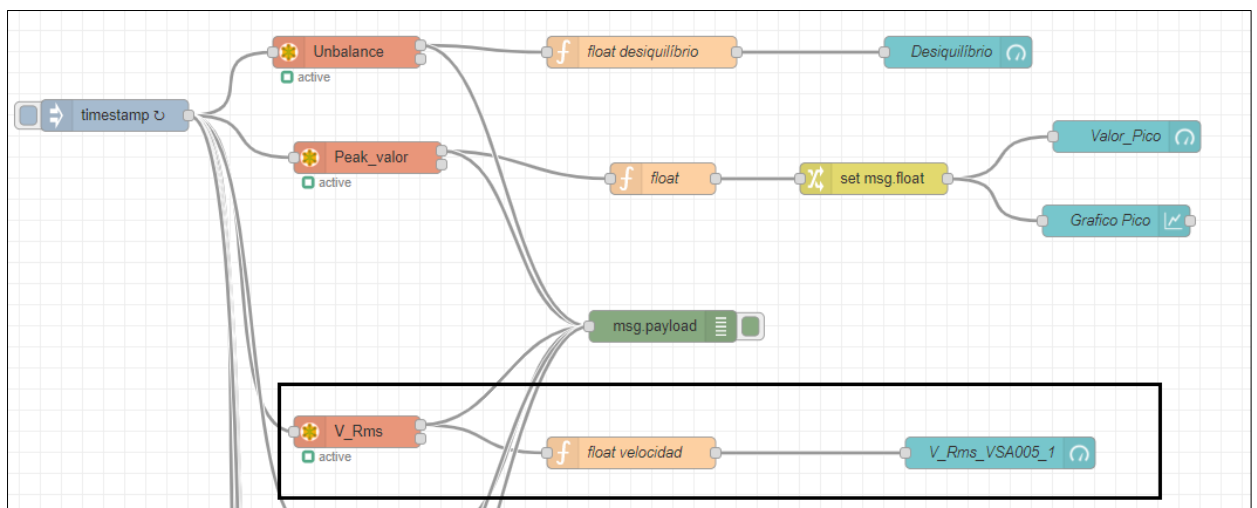


Figura 3.26 - Programação do *flow* do dispositivo VSE153 para aquisição de dados e medição dos respetivos parâmetros no ambiente de execução do Node-RED de um dos sensores de vibração VSA005.

O nó “*inject*” injetou uma mensagem no fluxo em intervalos regulares. A carga útil da mensagem (*payload*) pode ser de vários tipos, incluindo *strings*, objetos *JavaScript* ou a hora atual. O nó podia iniciar um fluxo com um valor de carga útil específico. A carga útil padrão é um carimbo de data/hora da hora atual em milissegundos. Depois de executado, a sua descrição passa a “*timestamp*” como se vê na figura acima. A configuração do nó é passível de visualização na figura seguinte:

The image shows a software interface for configuring a 'Modbus-Getter' node. The window is titled 'Edit Modbus-Getter node' and has buttons for 'Delete', 'Cancel', and 'Done'. It features a 'Properties' tab and an 'Optional' tab. Under the 'Settings' section, the following fields are visible: 'Name' with the value 'V_Rms', 'Unit-Id' (empty), 'FC' set to 'FC 4: Read Input Registers', 'Address' set to '0', 'Quantity' set to '2', and 'Server' set to 'vse153modbus'.

Figura 3.27 - Configuração do nó “*Modbus-Getter*” para leitura de registos de *input* do parâmetro velocidade (“*V_RMS*”) do dispositivo VSE 153.

3.9 Softwares de parametrização

Para configurar e analisar os dados recolhidos com os sistemas eletrónicos de diagnóstico foi necessário recorrer a dois software de parametrização: *LR Device* e o *VES004* ambos da *IFM*.

O *LR Device* permitiu fazer a parametrização através do master IO-Link compatível com todos os dispositivos IO-Link e fazer a importação do IODD (*IO Device Description*), já que é um requisito necessário na utilização do IO-Link. A parametrização e a validação através da visualização gráfica dos valores do processo permitiu visualizar que todos os sensores estavam configurados corretamente no software. A respetiva associação de ligação feita foi a seguinte:

- Porta 1: sensor de vibração IFM VVB 010
- Porta 2: Unidade eletrônica de avaliação para sensor de temperatura nº1: IFM TP3231
- Porta 3: Unidade eletrônica de avaliação para sensor de temperatura nº2: IFM TP3231
- Porta 4: sensor de pressão: IFM PV8004

A parametrização do sistema eletrónico de diagnóstico *VSE 153* ocorreu através do software *VES004*. O software permite criar uma estrutura de árvore, na qual são integrados os aparelhos e sensores. A definição de parâmetros é feita por assistentes.

O *VES004* permitiu definir os objetos a monitorizar conjuntamente com os parâmetros velocidade RMS, aceleração RMS, valor de pico, valos de crista entre outros e os respetivos limites e alertas que despoletará quando definidos pelo utilizador. Este software dispõe de análise espectral FFT, análise de tendência e outros, e pode ter até 24 parâmetros diferentes de diagnóstico. Na figura 3-28 é possível visualizar a tela frontal e o respetivo dashboard do software *LR Device* após a conexão dos respetivos sensores associados.

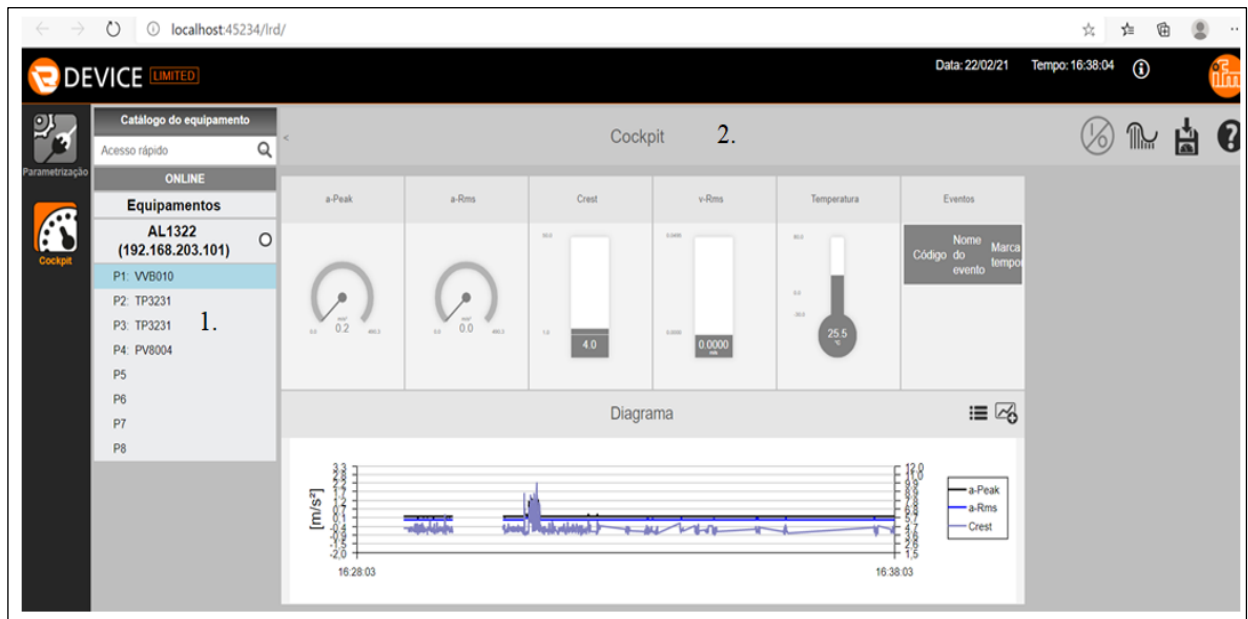


Figura 3.28 -Visualização do *cockpit* do software de parametrização LR Device. 1- Sensores integrados; 2- Display dos parâmetros pelo *dashboard* do software.

A visualização dos dados brutos dos canais dinâmicos dos sensores de vibração VES004 é visualizada na seguinte figura:

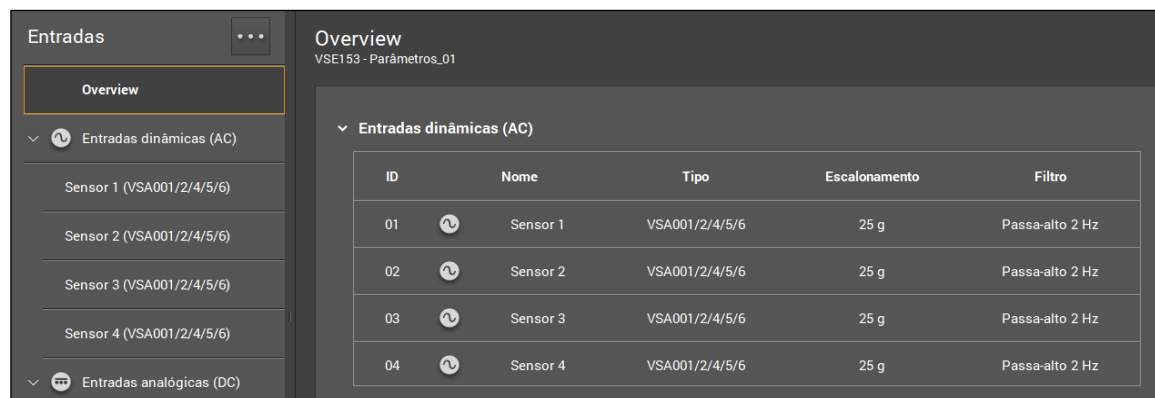


Figura 3.29 - Sensores de vibração conectados no software de parametrização VES004.

3.10 Sensorização e incorporação dos dispositivos no equipamento

Antes de partir para a incorporação dos dispositivos na máquina CNC foi feita uma montagem em laboratório de uma banca elétrica com os dispositivos para uma verificação do correto funcionamento dos mesmos, tendo em vista a exequibilidade da sua aplicação no decorrer do projeto de dissertação. Para eliminar cargas eletrostáticas, os dispositivos foram montados numa guia DIN *rail*, com a seguinte ordem de componentes:

- 1- Disjuntor de acionamento manual biestável (o disjuntor age como um interruptor a montante do aparelho a proteger);
- 2- Borne de ligação Terra - 1 via para calha DIN;
- 3- Fonte de Tensão Industrial 24VDC/15A;
- 4- Dois fusíveis (o fusível é um ponto fraco desejável no circuito elétrico; a sua constante de tempo térmica é inferior à do aparelho a proteger e em caso de sobrecarga ou curto-circuito deve aquecer, atingindo o seu ponto de rutura (fusão) antes do aparelho protegido);
- 5- Bornes de ligação de fase de 1 via para calha DIN;
- 6- Calha DIN.

A visualização dos equipamentos integrados em banca no laboratório é descrita na figura 3-30.



Figura 3.30 - Disposição e montagem dos elementos em banca e respetiva calha DIN.

Tendo em conta o projeto elétrico executado foi possível proceder à montagem de todos os componentes elétricos necessários. A montagem do quadro elétrico foi feita de forma faseada, envolvendo operações de furação, aparafusamento e cravação de cabos elétricos, como ilustrado na Figura 3-30.

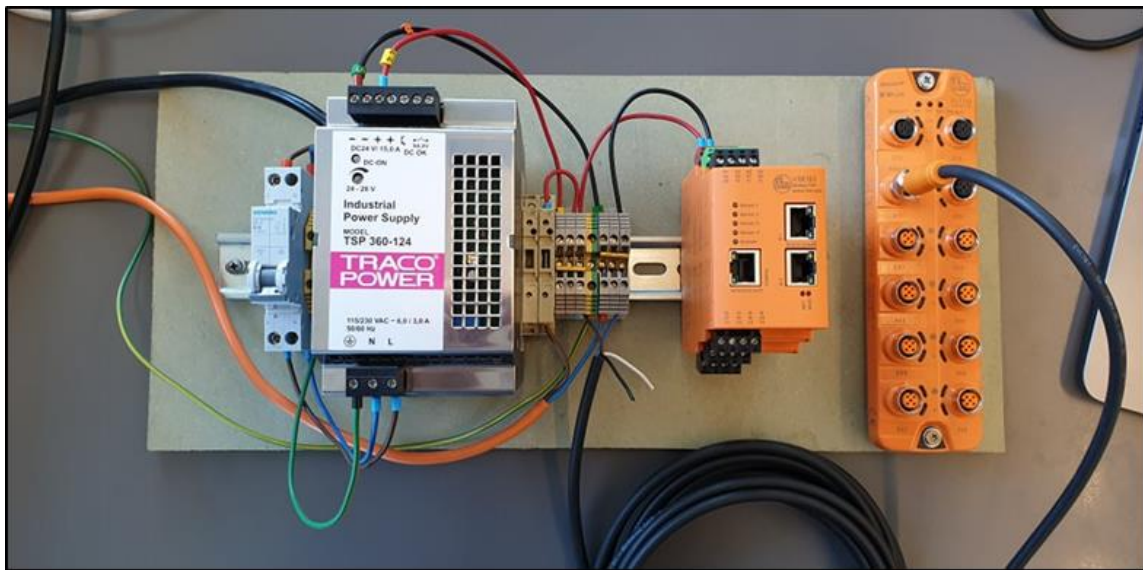


Figura 3.31 - Realização das correspondentes ligações elétricas.

De igual modo, é possível observar que, nesta fase, as ligações que dizem respeito aos equipamentos VSE153 e do IO-Link *master* foram realizadas numa fase posterior.

Foram submetidos a teste no IO-Link *master*, o sensor de vibração VVB010 e um dos quatro sensores de vibração VSA005 no dispositivo VSE153.

A eletrônica de diagnóstico VSE 153 tem: 4 entradas dinâmicas, 2 entradas analógicas, 1 saída analógica ou digital, 1 saída digital, 1 interface de configuração de parâmetro TCP/IP e 2 portas Modbus TCP. Um sinal de corrente analógico (0/4...20 mA) ou um sinal de pulso (HTL) pode ser conectado às entradas analógicas. Os sensores de aceleração VSA ou IEPE padrão podem ser conectados às entradas dinâmicas, deste modo, os quatro sensores de vibração VSA005 foram conectados às 4 entradas dinâmicas.

As entradas dinâmicas são usadas para a monitorização de vibração e diagnóstico de vibração. Alternativamente, as entradas dinâmicas também podem ser usadas como uma entrada analógica com um sinal de corrente analógico (4...20 mA). A interface de configuração do parâmetro (TCP/IP) é usada para a comunicação entre a eletrônica de diagnóstico e o computador (via software de configuração de parâmetro VES004). O esquema de cablagem e ligações elétricas do dispositivo VSE153 é representado na figura 3-33.



Figura 3.32 - Sensor de Vibração VSA005 (esquerda); Sensor de Vibração VVB010 (direita); submetidos aos primeiros testes de ligação para verificação de funcionamento.

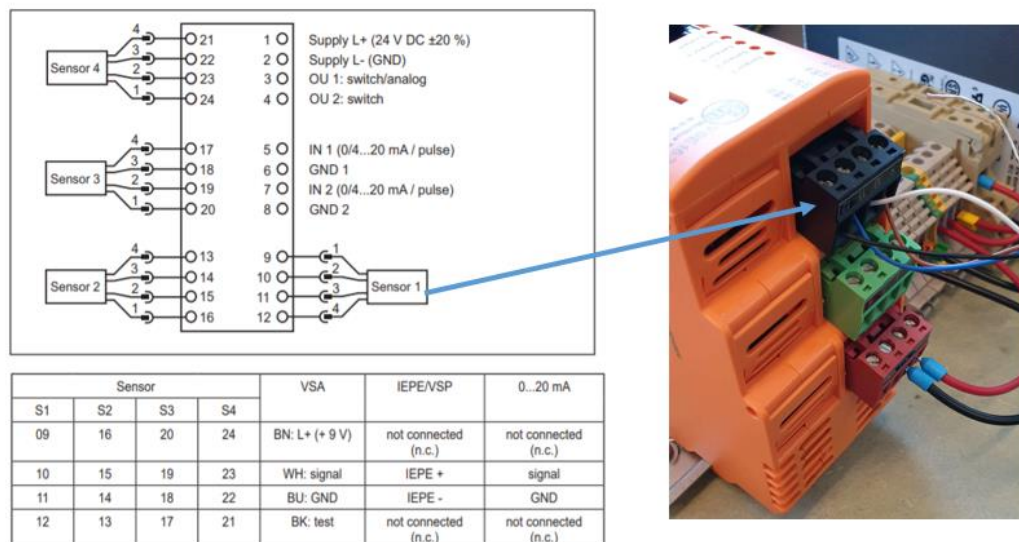


Figura 3.33 - Esquema de cablagem e ligações elétricas do dispositivo VSE153 (esquerda); Ligação do sensor de vibração VSA005 ao dispositivo VSE153 correspondente ao sensor 1 no esquema de cablagem (direita).

Foi possível verificar o correto funcionamento de todos os equipamentos. De seguida, para tornar o equipamento genérico numa máquina autônoma equipada com um *cluster* de vários sensores foi realizada a implementação de todos os dispositivos em pontos estruturais.

Os componentes: IO-Link *master*, o dispositivo VSE 153, o *switch* ethernet e as respetivas ligações elétricas foram depois instalados na estrutura maciça de pórtico do eixo Y da máquina. A sua fixação foi realizada na parte traseira do corpo maciço. A seleção deste local para realizar a instalação destes dispositivos deveu-se ao facto de não colocar em causa a integridade estrutural da máquina e de não inviabilizar as operações de maquinaria.

Outro fator tido em conta para a instalação neste local foi o comprimento de toda a cablagem, para que fosse possível acomodar todos os diferentes comprimentos de cabos dos sensores. Para instalar e receber todos estes dispositivos foi modelada em *Solidworks* e impressa em fabrico aditivo, uma caixa em PET-G (politereftalato de etileno glicol) e a respetiva tampa de encaixe em PLA (ácido polilático).

O PLA é indicado para protótipos que não sejam submetidos a grandes esforços mecânicos, sem necessidade de pós-processamento/acabamento. O PET-G produz peças resistentes a impactos e é ideal para peças que precisem de encaixes mantendo a resistência. A impressão 3D, permite uma rápida validação efetiva do *design*, não requer montagem de componentes e os protótipos podem ser impressos em espaços de tempo curtos (algumas horas),e figurou-se como uma solução eficiente, rápida e flexível para alojar os dispositivos de IoT necessários no decorrer da dissertação.

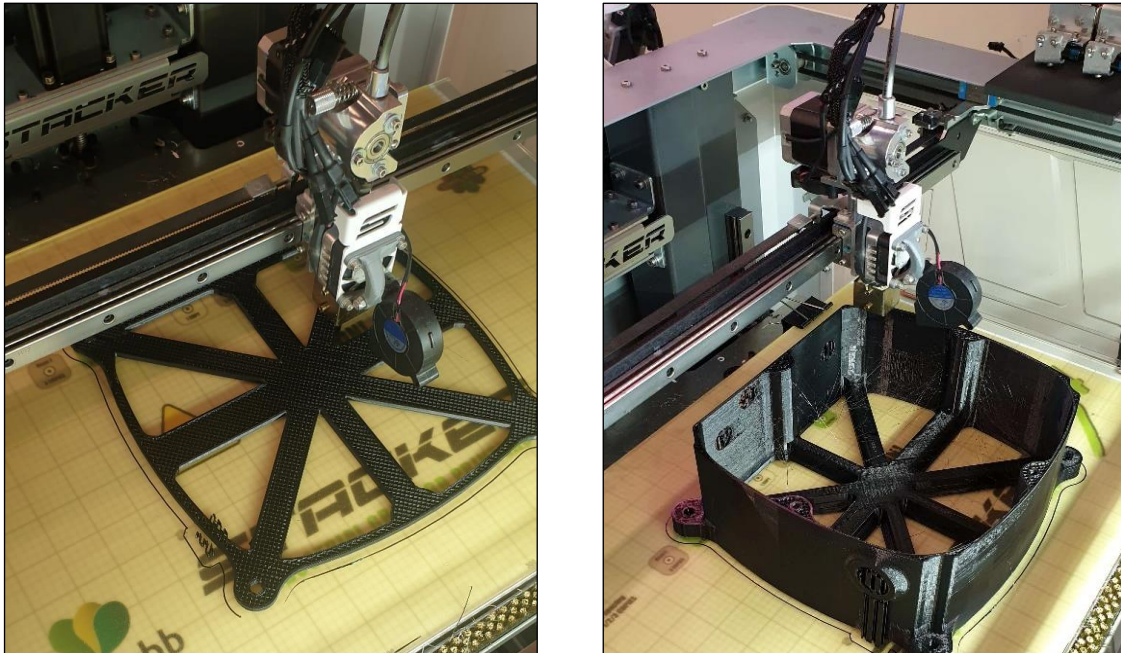


Figura 3.34 - Impressão 3D da caixa depois de modelada nas instalações do INEGI.

Assim sendo, é possível visualizar a disposição dos dispositivos instalados na caixa e fixados na estrutura maciça do pórtico da máquina:

- 1- *Master IO-Link*;
- 2- *Switch Ethernet*;
- 3- *VSE 153*;
- 4- *Ligações Elétricas e respetiva calha DIN*;
- 5- *Caixa de fabrico aditivo em PET-G*;

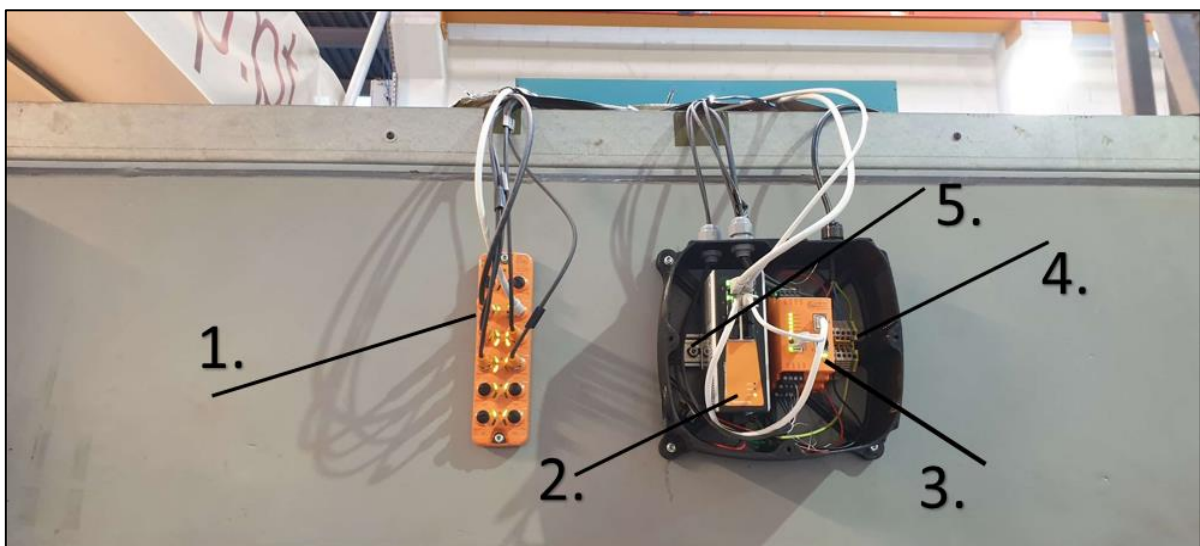


Figura 3.35 - Fixação dos dispositivos na estrutura maciça do pórtico da máquina.

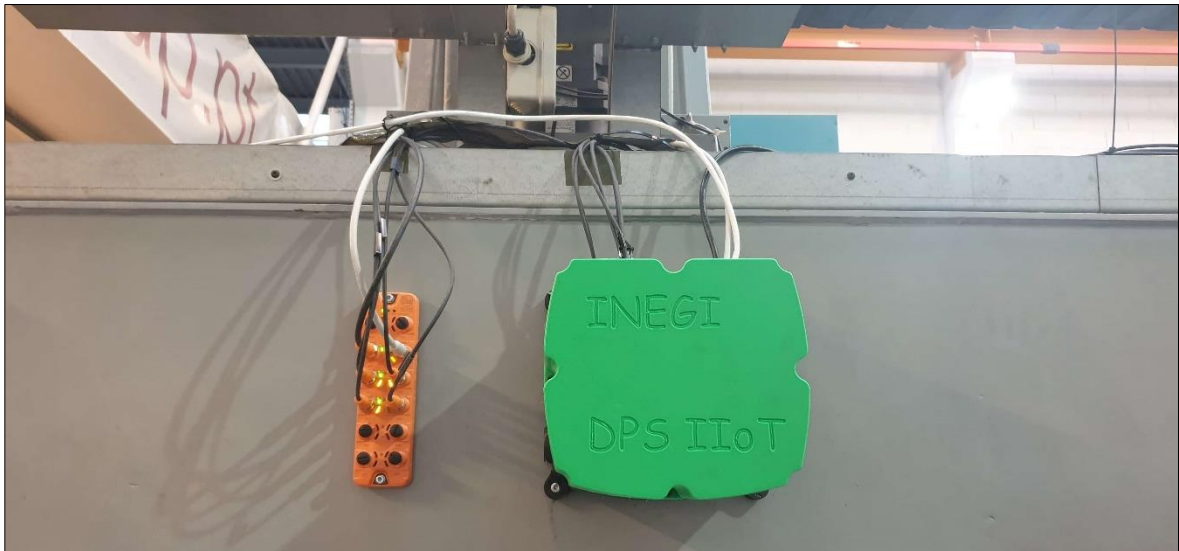


Figura 3.36 - Disposição final com a respetiva tampa de encaixe em PLA (verde).

Depois de todo esse processo, foi possível avançar para a implementação dos sensores em pontos estruturais da máquina, a partir de uma análise global à estrutura da máquina. A máquina apresenta uma estrutura rígida e precisa. A fresagem a alta velocidade é um processo que implica maiores tensões nas máquinas-ferramentas do que as que ocorrem nos centros de maquinagem normais. Deste modo, este tipo de máquinas são por norma mais rígidas para absorver as elevadas vibrações sem causar uma flexão exagerada na estrutura do corpo da máquina. A arquitetura de pórtico da máquina assente na ponte de movimento do eixo X será fundamental para se ter uma perceção das vibrações presentes nos eixos X e Y e no eixo árvore principal (eixo Z).

No que toca ao fuso de esferas, a principal vantagem do fuso de esferas é a alta precisão de posição em velocidades de acionamento elevadas. No seu funcionamento comum, o fuso mancalizado nas extremidades recebe movimento de rotação do motor do eixo Z e, por contato direto com esferas de aço que se alojam entre a porca e o fuso, provoca o deslocamento de uma porca. As esferas metálicas são, por sua vez, guiadas e realimentadas por canais de recirculação na porca, promovendo linearidade e suavidade ao movimento.

Este tipo de operação em operações de fresagem de alta velocidade com alta aceleração causa vibrações e possíveis erros de posição no sistema de alimentação de uma máquina-ferramenta e como tal seria um possível local de implementação para análise de vibração. O acesso ao veio fuso de esferas encontrava-se inibido sem um acesso conveniente para configurações com visibilidade total. A movimentação do eixo Z árvore, na zona de contacto com os rolamentos de apoio do veio fuso de esferas, mancalizado nas extremidades, não permitia a extensão de todo o curso do eixo Z sem embater no sensor.

O sentido de medição do sensor deve ser executado na direção da vibração principal. Normalmente, esta ocorre na direção radial em relação ao eixo. Em caso de mancais fixos com alta absorção de forças axiais, a direção de medição preferencial é a direção axial em relação ao eixo, não sendo exequível a instalação do sensor que permitisse atender a estes requisitos.

Dessa forma, não foi possível considerar o fuso de esferas e os seus rolamentos para colocação de sensores de vibração devido à inacessibilidade e também pelo facto de não ser viável a colocação em qualquer ponto, que permitisse que as operações de maquinagem decorressem sem danificar o sensor ou a própria máquina. A estrutura da máquina por razões de *design* estrutural não o permite, não sendo possível instrumentar o fuso e os seus rolamentos para análise de vibração, como tal, uma das instrumentações foi realizada na direção do eixo do fuso de esferas, na direção do motor de acionamento do eixo Z. Os constrangimentos são passíveis de visualização na figura 3-37.



Figura 3.37 - Constrangimentos estruturais associados ao veio fuso de esferas e aos seus rolamentos.

A interação da fresa com a peça é um processo que pode gerar diferentes efeitos físicos. Durante o encosto da ferramenta na peça, é libertada energia que resulta em forças de corte, vibração e emissão acústica. A emissão desta vibração é uma oscilação de baixa frequência devido à aceleração do objeto por causa das mudanças dinâmicas das forças de corte [48]. Assim sendo foi também instrumentada a mesa de trabalho com a colocação do sensor triaxial na estrutura rígida da máquina com colocação no patamar inferior.

A nível de acionamento dos eixos, a dinâmica do sistema de comando permite velocidades de trabalho em fresagem de 60m/min nos eixos X e Y, e 30m/min no eixo Z. A análise de vibrações nestes eixos será importante, e todos eles serão instrumentados com a implementação de sensores alinhados com as direções axiais dos eixos dos servomotores.

O cabeçote da máquina, figurou-se como uma zona em que seria possível a instalação de sensores, através da sua acessibilidade e uma viável fixação no corpo estrutural deste componente. O corpo estrutural é visualizado na figura 3-38.



Figura 3.38 - Cabeçote do equipamento CNC com acessibilidade ao corpo estrutural do componente.

A colocação de sensores no corpo do cabeçote foi feita de forma a que o mesmo pudesse manter toda a extensão do curso do eixo Z livre de constrangimentos associados aos sensores.

A instrumentação e colocação de sensores no equipamento foi feita da seguinte forma com representação esquemática na figura 3-39:

1. Sensor de vibração axial **VVB010** fixado no corpo do cabeçote na direção do eixo X.
2. Sensor de vibração triaxial **4535-B** na estrutura rígida da máquina (patamar inferior).
3. Sensor de vibração axial **VSA 005** implementado na estrutura do cabeçote na direção do eixo Y.
4. Sensor de temperatura **TS2229** e sensor de vibração **VSA005** implementados no Eixo Y, no motor My (designação atribuída ao motor de acionamento do eixo Y). O motor My é utilizado no acionamento do sistema pinhão/cremalheira que traduzem diretamente o movimento rotativo do acoplamento no motor My num movimento de saída linear do eixo Y.
5. Sensor de vibração axial **VSA005** instalado na direção do eixo Z, no motor Mz responsável pelo acionamento do fuso de esferas do eixo árvore.
6. Sensor de temperatura **TS2229** e sensor de vibração **VSA005** implementados no Eixo X, no motor Mx (designação atribuída ao motor de acionamento do eixo X). O motor Mx é utilizado no acionamento do sistema pinhão/cremalheira que traduzem diretamente o movimento rotativo do acoplamento no motor Mx num movimento de saída linear do eixo X.
7. Sensor de Pressão **PV8004** para deteção de fugas de ar comprimido na rede de alimentação.

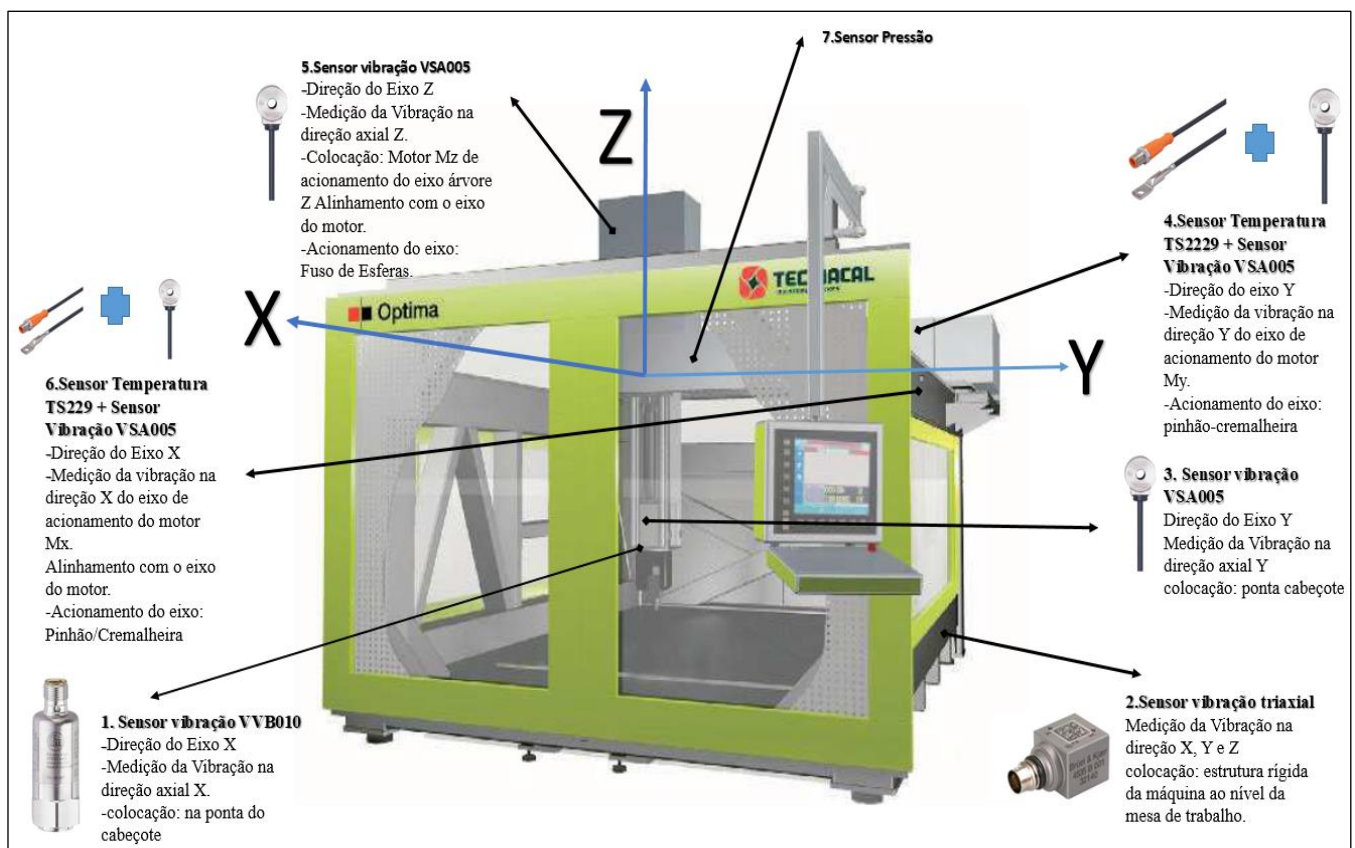


Figura 3.39 -Visão geral esquemática dos locais de implementação de cada sensor no equipamento e do sistema de eixos correspondente.

Na figura 3-40 é exibida a fixação dos sensores que foram instrumentados no corpo estrutural do cabeçote. Na figura 3-41 é exposta a fixação do sensor de vibração axial VSA005 instalado no corpo do motor de acionamento do respetivo eixo na direção do eixo Z, responsável pelo acionamento do veio fuso de esferas do eixo árvore e fixação do sensor de temperatura TS2229 e sensor de vibração VSA005 implementados na direção do eixo Y.



Figura 3.40 - Implementação do sensor de vibração axial VVB010 no corpo do cabeçote na direção do eixo X (esquerda); Sensor de vibração axial VSA 005 implementado na estrutura do cabeçote na direção do eixo Y (direita).

A fixação do sensor VVB010 foi através de um pino de enroscar (1 x 1/4" 28 UNF/M8) e todos os sensores VSA005 foram instalados todos da mesma forma por parafuso cilíndrico (1 x M5 x 20). Os sensores de temperatura apesar de ser possível a fixação dos mesmos por parafuso, foram instalados com fita adesiva, por forma a não ser recomendável e desnecessário a abertura de furos nos locais onde foram montados.



Figura 3.41 - Fixação do sensor de vibração axial VSA005 instalado no corpo do motor Mz na direção do eixo Z, responsável pelo acionamento do veio fuso de esferas do eixo árvore. Fixação do sensor de temperatura TS2229 e sensor de vibração VSA005 implementados na direção do Eixo Y, no corpo do motor My (esquerda); Fixação do Sensor de vibração triaxial 4535-B na estrutura rígida da máquina (direita).



Figura 3.42 - Implementação do sensor de temperatura TS2229 e do sensor de vibração VSA005 fixados no corpo do motor Mx, na direção axial X.

As figuras 3-40, 3-41, 3-42 figuram-se assim como alguns exemplos de sensorização realizados no equipamento alvo do projeto. A colocação dos sensores nesta dissertação é resumida conforme indicado na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 Síntese e associação entre as referências dos sensores e a respectiva colocação.

Sensor	Modelo	Eixo
Vibração	IFM VSA005_1	Y (*corpo do cabeçote)
Vibração	IFM VSA005_2	X
Vibração	IFM VSA005_3	Y
Vibração	IFM VSA005_4	Z
Vibração	IFM VVB010	X(*corpo do cabeçote)
Vibração	Bruel & Kjaer 4535 B	X,Y e Z (triaxial)
Temperatura	IFM TS2229_1	Y(*corpo do cabeçote)
Temperatura	IFM TS2229_2	X
Pressão	IFM PV8004	-

3.11 Configurações realizadas nos software de parametrização

Uma análise no domínio do tempo para o valor RMS pôde ser feita através da configuração dos parâmetros dos sensores no *software* de parametrização VES004. O elemento [Entradas] contém, para além das entradas analógicas e dos sensores, entradas virtuais (entradas externas), cuja fonte do sinal é a interface Ethernet. As entradas do sensor são designadas como [Entradas dinâmicas], pois nestas entradas é possível analisar a componente dinâmica (AC) do sinal nas faixas de tempo e de frequência.

O filtro é alvo de uma atenção especial no monitoramento segundo a ISO 10816 na faixa de tempo. Para estes objetos, o filtro tem de ser ajustado com base na velocidade de rotação. Além do filtro selecionado no objeto, também é exibido o filtro igualmente eficaz da entrada dinâmica. Para objetos do tipo são usuais 2 combinações de filtros conforme a ISO10816:

- Entrada dinâmica de 2 Hz, passa-baixo de 975 Hz no objeto: Máquinas/instalações com uma velocidade de rotação entre 120...600 rpm.
- Entrada dinâmica de 10 Hz, passa-baixo de 975 Hz no objeto: Máquinas/instalações com uma velocidade de rotação superior a 600 rpm.

O escalonamento e a unidade podem ser consultados na ficha técnica do sensor.

Tipo	Nota	Escalonamento/sensibilidade	Unidade
VSA001/2/4/5/6	Especificação fixa	25	g
VSA003	Especificação fixa	17,5	g
VSA101	Especificação fixa	3,3	g
VSA201	Especificação fixa	250	g
VSP01A/VSP02A/VSP001	---	100	mV/g

Figura 3.43 - Visualização da conexão dos quatro sensores de vibração VSA005 na entrada dinâmica do dispositivo da eletrônica de diagnóstico VSE153 no *software* de parametrização VES004.

Em Objetos é possível calcular e monitorizar valores característicos. Os valores característicos podem ser calculados para os sinais das entradas (entradas dinâmicas, analógicas ou/e externas). Em Objetos são fornecidos tipos de objetos predefinidos que facilitam uma configuração das tarefas de monitorização para a respetiva máquina.

Adotando um procedimento de configuração para o parâmetro RMS (faixa de tempo) que monitoriza o valor efetivo da velocidade de vibração com os recursos do *software* são definidos todos os valores para a medição correta do parâmetro, conforme é exibido na figura 3-44:

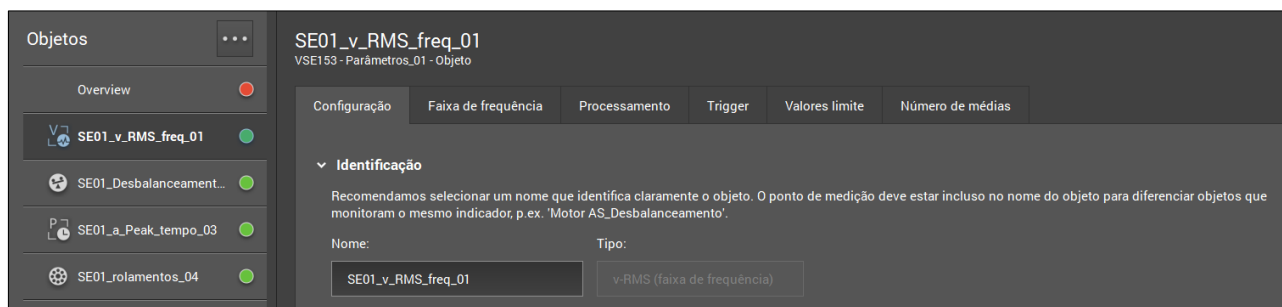


Figura 3.44 - Criação de um objeto de medição para o valor RMS de um sensor de vibração VSA005 no *software* VES004.

O processo de análise indica em que espectro de frequência deve ser realizado o monitoramento. É possível selecionar entre:

- Espectro FFT (*Fast Fourier Transformation*)
- Espectro de curva envoltória (H-FFT)

Para sinais harmônicos (p. ex. desbalanceamento) deve ser selecionado preferencialmente o FFT e para sinais periódicos (p. ex. mancal de rolamentos) o H-FFT.

A velocidade de vibração e especialmente o deslocamento vibratório são unidades pertinentes somente em caso de frequências baixas. Para o processo de análise H- o sinal só pode ser avaliado como Aceleração.

Considerando a zona limite C/D (deslocamento RMS = 71 μ m, velocidade RMS = 4,5 mm/s), são definidos os valores limites do sensor de vibração:

Considerando a zona limite C/D (deslocamento RMS = 71 μm , velocidade RMS = 4,5 mm/s), são definidos os valores limites do sensor de vibração na figura 3-45:

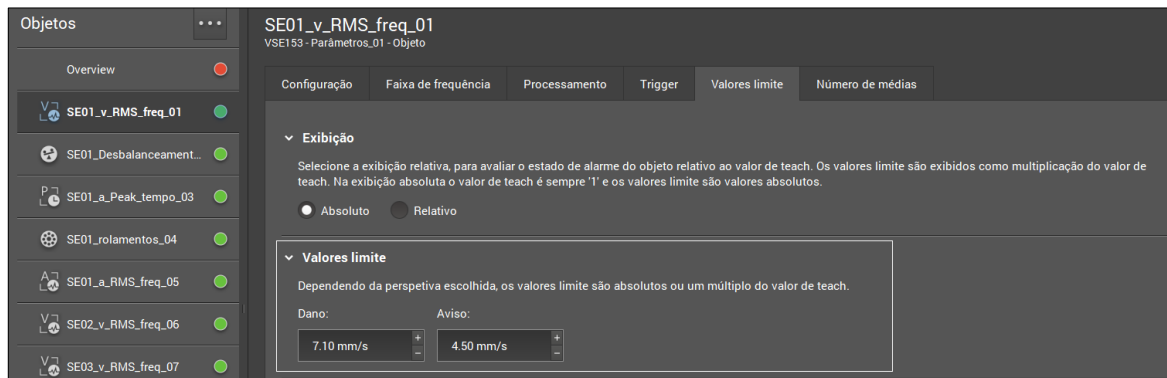


Figura 3.45 - Definição dos valores limite do parâmetro de acordo com a norma ISO 10816.

A comunicação pelo protocolo de Modbus com integração no Node-Red para aquisição do valor do parâmetro RMS é feita recorrendo ao *address* de leitura. No *tab* "Modbus TCP" é possível ver todos os objetos que estão atribuídos ao conjunto de sensores.

As designações "Entrada" e "Saída" são referidas do ponto de vista do mestre de barramento de campo. Os elementos selecionados dessa forma aparecem na janela da direita "Índice". Na coluna anterior aparece o número de registo, dependendo do comprimento dos dados (quantidade de bytes) dos elementos selecionados. Um número de registo corresponde a 1...2 bytes.

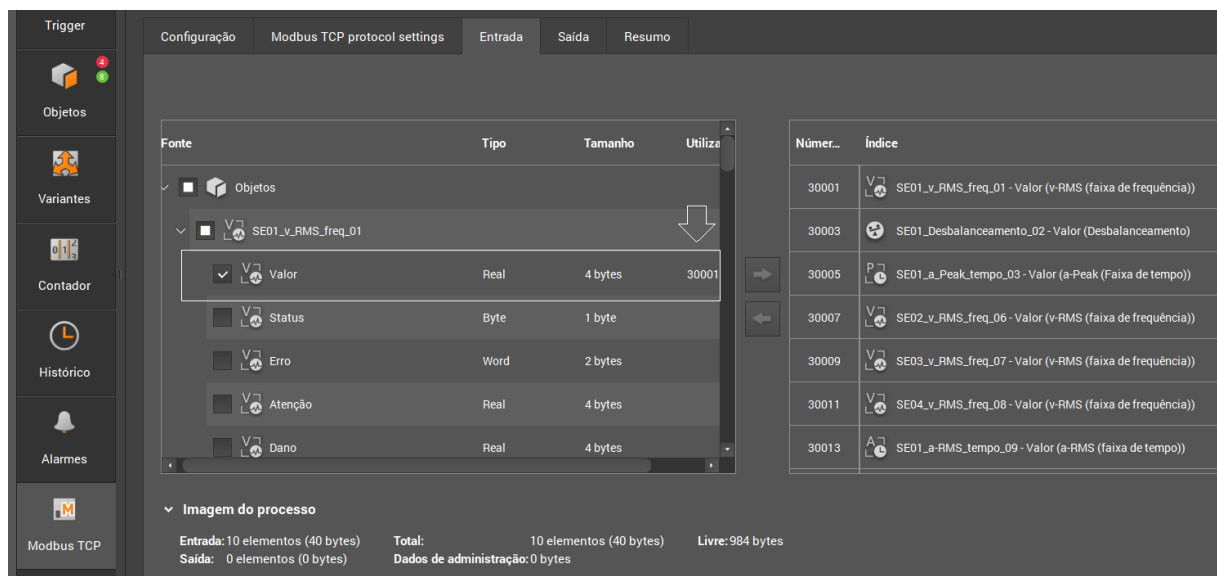


Figura 3.46 - Número de registos associados aos objetos criados para os parâmetros de vibração no *software* VES004.

No monitoramento dos dados são exibidos os valores de medição atuais dos objetos ou subobjectos. Os valores dos objetos, junto com os limites de alarme, podem oferecer uma visão geral do estado atual da máquina.

Os fundamentos da técnica de controlo das vibrações estão guardados no conjunto de parâmetros (os objetos) do sistema eletrônico de diagnóstico e somente é exibido o resultado de medição atual deste monitoramento.

O objeto corresponde ao número 30001 no *software* VES004, como tal corresponderá ao *address* 0 na configuração do nó Modbus no Node-RED e assim sucessivamente seguindo essa ordem. Um objeto correspondente ao número 30003 corresponderá ao *address* 2 na configuração do nó Modbus como se pode visualizar nas seguintes figuras:

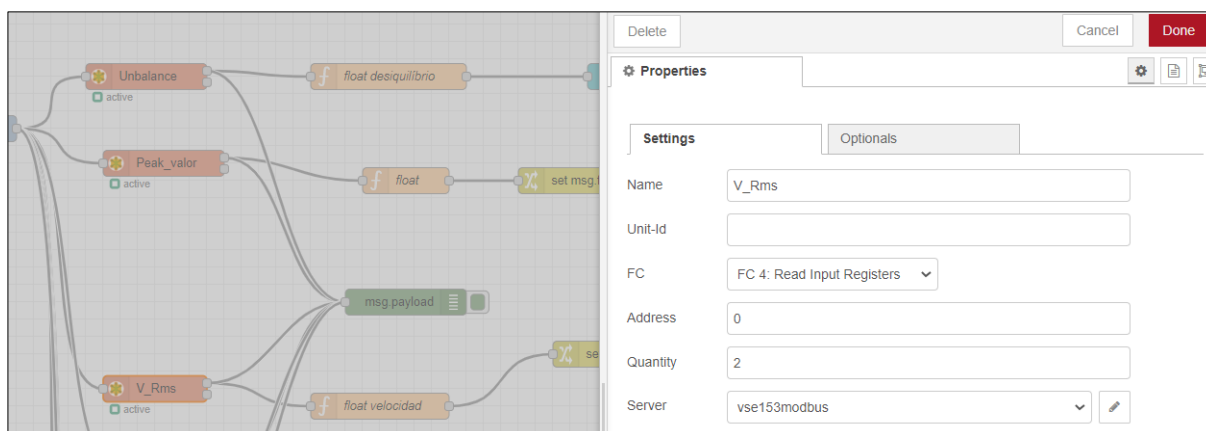


Figura 3.47 - Programação e aquisição de dados do parâmetro velocidade RMS dos sensores VSA005 no programa Node-RED.

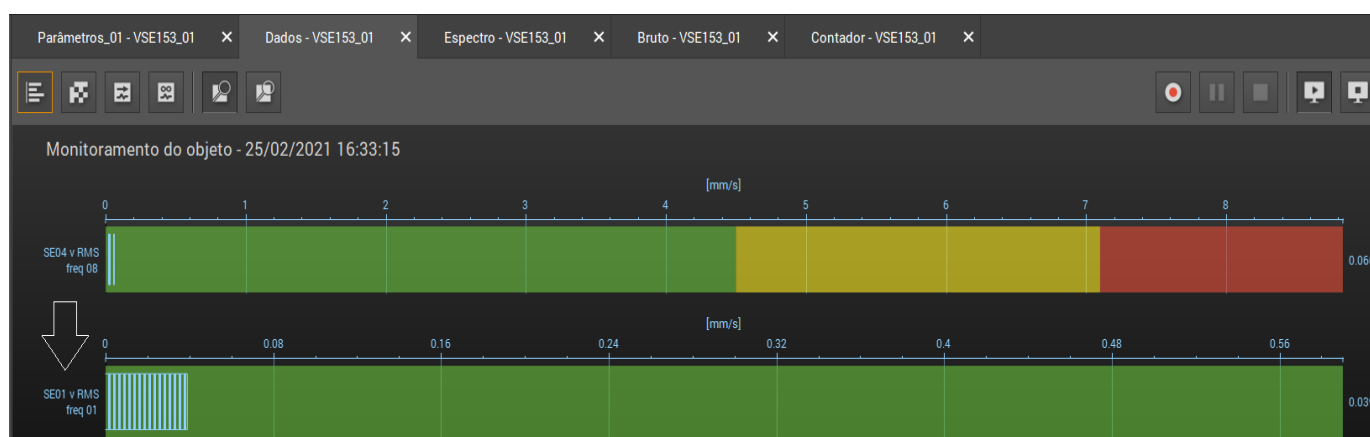


Figura 3.48 - Exemplo de visualização gráfica após configuração do parâmetro velocidade RMS no *software* VES004.

Em síntese, no *software* VES004 foram realizadas as seguintes configurações de Objetos descritas na tabela 3-7 que representam todos os parâmetros de vibração dos respectivos sensores configurados para aquisição de valores correlacionados com estes mesmos parâmetros.

Tabela 3-7 Associação entre os parâmetros de vibração configurados no *software* VES004 e o respetivo código de função Modbus dos sensores.

Número VES004	Objecto	Código de função Modbus	Address	Sensor
30001	v_RMS	FC4	0	VSA005_1
30003	Unbalance	FC4	2	VSA005_1
30005	Peak_valor	FC4	4	VSA005_4
30007	v_RMS	FC4	6	VSA005_2
30009	v_RMS	FC4	8	VSA005_3
30011	v_RMS	FC4	10	VSA005_4
30013	a_RMS	FC4	12	VSA005_1
30015	a_RMS	FC4	14	VSA005_2
30017	a_RMS	FC4	16	VSA005_3
30019	a_RMS	FC4	18	VSA005_4
30021	a_Peak	FC4	20	VSA005_1
30023	a_Peak	FC4	22	VSA005_2
30025	a_Peak	FC4	24	VSA005_3
30027	A_Peak	FC4	26	VSA005_4
30029	Unbalance	FC4	28	VSA005_2
30031	Unbalance	FC4	30	VSA005_3
30033	Unbalance	FC4	32	VSA005_4

4 Solução de Comunicação

4.1 Arquitetura digital

Ao considerar uma metodologia para conectar e monitorizar a máquina, várias considerações iniciais tiveram de ser feitas. Primeiro, a máquina devia estar equipada com o *hardware* e *software* adequados para facilitar a comunicação. Em segundo lugar, a máquina necessitava de ser dotada de uma conexão muitos-para-um a um *gateway* de alta largura de banda, capaz de direccionar com eficiência as mensagens da máquina para o aplicativo final do utilizador.

Esta estrutura de conectividade garantiu um desacoplamento entre a máquina e a arquitetura remota. Terceiro, o *gateway* (*edge computer*) devia ser capaz de canalizar as mensagens para as aplicações escolhidas e eventualmente para bases de dados que são optimizadas para aplicativos de monitorização. Por último, os aplicativos de monitorização precisavam de ser capazes de aceder com eficiência esses dados para fornecer *feedback* útil do *status* da máquina para um utilizador. Uma escolha relevante do projeto no desenvolvimento de uma arquitetura IoT prende-se com os protocolos de conectividade industrial associados na área de automação pelo qual as mensagens são transmitidas.



Figura 4.1 - Arquitetura digital genérica de comunicação.

A arquitetura genérica de comunicação em que assenta o equipamento alvo do projeto é exibida na figura 4-1.

O MQTT usa um formato *publish/subscribe* descrito anteriormente, enquanto o HTTP usa um formato de *request/answer*. Como resultado desta diferença, o MQTT tem menor sobrecarga para os requisitos de *streaming* de dados contínuos num *framework* IoT. O MQTT é atualmente um padrão aceite para aplicativos IoT e é amplamente suportado. Por esse motivo, a arquitetura proposta neste projeto utilizou MQTT.

Para garantir uma estrutura de dados comum que acomode os vários protocolos na máquina CNC e os dados de sensores externos, é necessário criar as respetivas configurações que cada protocolo tem como requisitos de funcionamento. O *Edge Computer* neste caso atua como uma *gateway* para permitir que os dados fluam da máquina para a rede corporativa. Um *gateway* pode ser considerado como qualquer computador de uso geral capaz de fazer a interface com o controlador da máquina e publicar as mensagens. Para fornecer flexibilidade e acomodar as várias fontes de dados, o *Edge Computer* usa o Node-RED para receber, analisar e publicar dados entre a máquina e os sensores, o que permite aceder a dados operacionais valiosos de forma instantânea, tomar decisões para otimizar as operações do ativo figurando-se como uma solução capaz de atender a uma gama abrangente de requisitos do utilizador desde a monitorização remota da máquina até à análise de dados final.

4.2 Estrutura de monitorização

A implementação de uma estrutura de *Edge Computing* em articulação com o servidor local representou uma melhoria para o monitoramento inteligente dos processos de maquinagem do equipamento, permitindo explorar as capacidades da IoT para oferecer diagnóstico em tempo real sobre a condição dos componentes de acordo com uma abordagem orientada a certos pontos estruturais da máquina seguindo a metodologia de manutenção preditiva.

A integração de todos os recursos físicos desde sensores e dispositivos de IoT permitiu criar uma comunicação em rede no chão de fábrica do INEGI que suportará o diagnóstico inteligente de processos na máquina, bem como a ativação oportuna de ações adaptativas com base nas condições atuais dos processos de maquinagem observados pelo utilizador.

Os recursos físicos, o servidor local e o *Edge Computer* estão ambos incluídos na rede do INEGI, representando os recursos de *hardware* e *software* disponíveis no chão de fábrica. Por outro lado, os benefícios da IoT baseados na rede de internet podem ser potencialmente conectados dentro ou fora do sistema produtivo onde se encontra a máquina.

Na camada física, a máquina-ferramenta CNC foi equipada com um sistema multi-sensor para superar as limitações do próprio equipamento e promover a fusão da tecnologia de sensores de natureza diferente, para recolher informações a fim de melhorar a qualidade e robustez da caracterização do processo.

Diferentes métodos podiam ser escolhidos para conectar a máquina, como já referido anteriormente, quer com a plataforma de servidor *cloud*, quer com o servidor local. Dentro do INEGI foi preferível optar pela rede local LAN (*local area network*).

Analisando a proposta de estrutura de monitorização no nível físico foi implementado o sistema multi-sensor na máquina. O sistema de sensores foi incorporado para captar em tempo real, durante a maquinagem, os vários sinais dos sensores que contêm informações relevantes para diagnóstico futuro. As tarefas de computação relacionadas com o pré-processamento dos sinais dos sensores foram atribuídas ao servidor local.

A arquitetura da estrutura de monitorização assenta em três camadas essencialmente: recursos físicos, servidor local/*Edge Computing* e IoT. Esta estrutura permite compartilhar o esforço computacional entre os diferentes recursos.

A capacidade da tecnologia de *Edge Computing* permite executar posteriormente tarefas de diagnóstico *online* rapidamente e a base de dados em nuvem pode ser potencialmente usada para compartilhar e manter informações relevantes se assim se pretender. O nível de conectividade baseado na monitorização e recursos computacionais de medição e análise está conectado aos dispositivos físicos do chão de fábrica através do servidor local e poderá fornecer

adicionalmente algoritmos baseados em *data analytics* e *machine learning* capazes de fazerem um diagnóstico nas condições dos componentes com base nos dados adquiridos no futuro próximo. A proposta de modelo de funcionamento desenvolvido é exibido na figura 4-2.

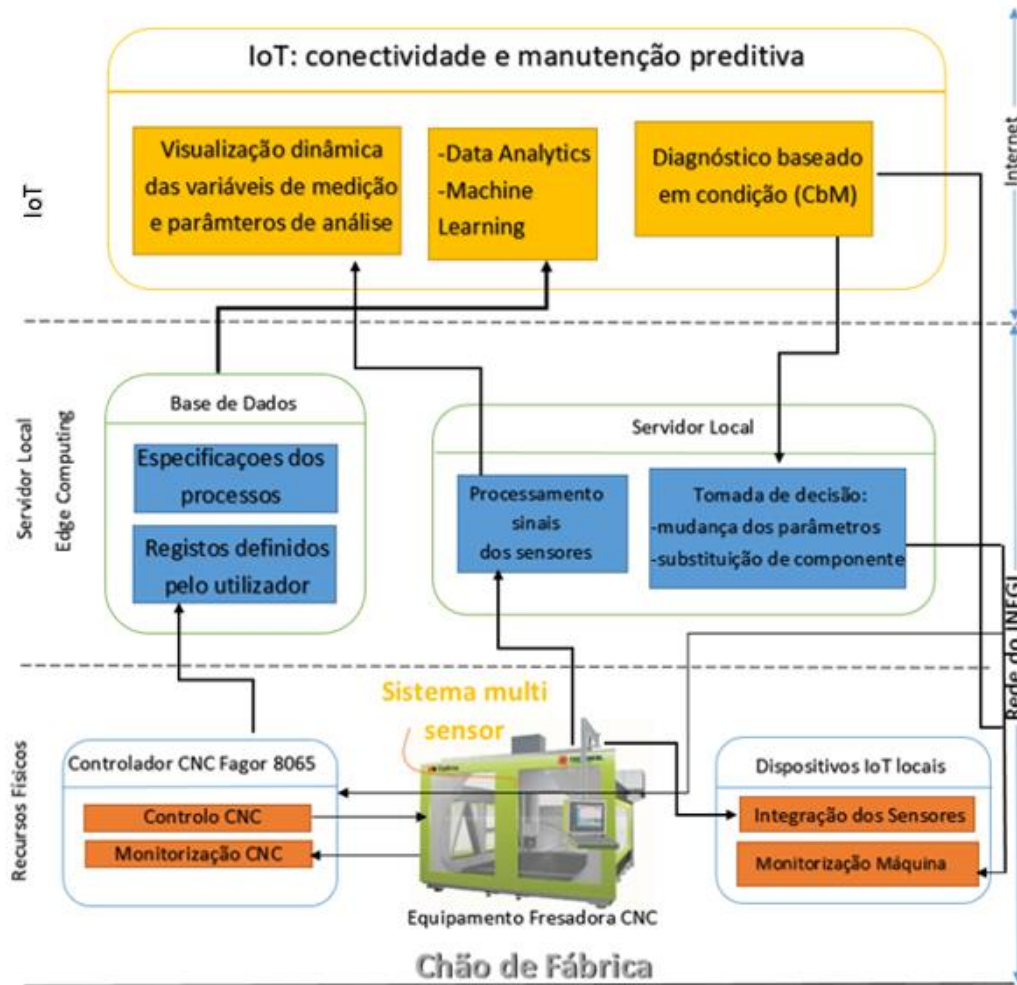


Figura 4.2 - Proposta de modelo de funcionamento para integração do equipamento com as tecnologias respetivas associadas.

4.3 Abordagem Prática: metodologia da solução de integração final

O conceito da Indústria 4.0 está associado com a integração de *hardware*, software e tecnologia baseada em IoT para melhorar a produtividade e aumentar a eficiência do processo produtivo. É de notar, que a *Ethernet* está a tornar-se onnipresente e económica, com *links* físicos comuns e com velocidade e determinismo aumentados.

Portanto, a maioria das redes industriais de automação usa protocolos baseados em *Ethernet*, já que a *Ethernet* é conhecida por transportar uma grande quantidade de dados. Além disso, o uso de protocolos *Ethernet* no nível do chão de fábrica facilita a integração das redes de qualquer ambiente fabril, um recurso exigido pela indústria 4.0.

- **IO-Link**

Com tudo isso, procurou captar-se os benefícios do IO-Link já que ele é baseado em cabos de três fios padrão, de modo que elimina o cabeamento e conectores simplificando a cablagem. No IO-Link a informação transmitida é sempre digital, sendo esta a sua principal vantagem pelo facto de o IO-Link digitalizar o sinal o que reduz os problemas de perdas ou distorção de sinal.

O IO-Link fornece-nos muito mais informações sobre o elemento terminal do que simplesmente um sinal transistorizado com ou sem deteção. Podemos conhecer os dados reais das medições de vibração ou a temperatura na qual o equipamento está a trabalhar, ou até

mesmo parametrizá-los, pelo menos o sinal de processo. Assim, os dados de processos, da máquina e de diagnósticos fornecidos através do IO-Link pelos sensores com a tecnologia IO-link podem ser amplamente lidos, avaliados e diagnosticados com as soluções de *software* de parametrização utilizadas e disponibilizadas por diversos fabricantes que contenham no seu portfólio de produtos dispositivos IO-Link, por isso a escolha dos dispositivos do nível de sensores recaiu no IO-Link preferencialmente.

Conectar os sensores IO-Link ao mestre IO-Link permite transmitir os valores dos sensores para diferentes ambientes de *software* IoT via TCP/IP, Modbus TCP ou MQTT. Em termos de IO-Link, a transmissão ocorreu por MQTT para o Node-RED.

- **MQTT**

O MQTT é um protocolo adequado para conectar os dispositivos IoT. O protocolo é adequado para a maioria dos casos de uso de IoT e permite a transferência de dados de forma confiável e escalonável. O uso do IO-Link *master* com o protocolo MQTT permitiu facilitar a construção do sistema IoT. O mestre IO-Link suporta vários protocolos e é útil para a criação de novos sistemas personalizados sem problemas de compatibilidade associados. À medida que se foram implementando os dispositivos IO-Link, estes podiam ser adicionados com o seu próprio *hardware* de sensor personalizado

Após a configuração dos sensores com o *software* LR *Device*, a comunicação seguiu o protocolo MQTT. Além disso, todos os sensores conectados indicavam os respetivos parâmetros. Isso significa que a configuração dos parâmetros de todos os sensores do sistema foi possível a partir de um ponto central.

- **Dispositivo VSE 153**

Relativamente ao dispositivo VSE153, a comunicação ocorreu por Modbus TCP/IP usualmente referida como Modbus TCP que não é mais que o protocolo Modbus RTU com uma interface TCP que corre em Ethernet. O TCP assegura que todos os pacotes de dados são recebidos corretamente e o IP assegura que as mensagens são corretamente enviadas e endereçadas.

Usualmente, a combinação TCP/IP permite fornecer os recursos do protocolo de transporte e não define o que os dados significam ou como os dados devem ser interpretados. Este foi o trabalho do protocolo de aplicação do sistema físico. O Modbus no entanto herda muitos dos pontos fortes e fracos do TCP/IP, sendo *multi-master* (força) e não determinístico (fraqueza em relação a redes industriais).

Assim como a *Ethernet*, o MODBUS está disponível gratuitamente e é amplamente suportado por fabricantes de equipamentos industriais. Compartilha as mesmas camadas, físicas e de enlace de dados da *Ethernet* IEEE 802.3 tradicional e usa o mesmo conjunto de protocolos TCP/IP e é totalmente compatível com a infraestrutura *Ethernet* já instalada do INEGI e com o *switch*. Adicionalmente pode coexistir com outro protocolo baseado em Ethernet na mesma rede se for necessário (por exemplo: PROFINET). A principal desvantagem é que é não-determinístico.

- **Comunicações Ethernet**

A nível de comunicações *Ethernet* realizadas na rede, a sub-rede apresenta uma importância vital. A maioria das ligações baseadas em *Ethernet* abordadas nesta dissertação identificaram o seu *host* por endereço IP. Além disso, o esquema de endereçamento determina o seguimento dos dados nas redes, algo que é muito importante para as redes industriais de automação, pois requerem determinismo e velocidade.

Os endereços IP consistem em 32 bits e geralmente são mostrados como 4 números, cada um entre 0 e 255 representados na forma decimal em vez da forma binária. Estes endereços IP são classificados em cinco categorias com base no primeiro octeto do endereço. A primeira parte identifica a rede e a segunda parte identifica o *host*.

A máscara de sub-rede é um endereço de 32 *bits* usado com um endereço IP para identificar a rede e as partes do endereço do *host*. Por exemplo, o endereço IP 200.1.1.2 com uma máscara de sub-rede 255.255.255.0, 200.1.1 é a parte da rede e o último octeto é a parte do *host*. As sub-redes são criadas ao ‘emprestar’ alguns dos bits de identificação do *host* usando-

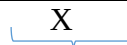
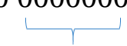
os como parte dos bits de identificação da rede. Os bits devem ser tomados consecutivamente, estratificando da esquerda para a direita.

Imaginemos que o endereço de uma rede do INEGI seja 192.168.2.0 com a máscara de sub-rede 255.255.255.0. Se for necessário criar duas sub-redes, as informações da rede do INEGI serão representadas em binário e decimal conforme mostrado na tabela seguinte.

O bit do *host X* que é emprestado para fazer parte dos bits de rede pode assumir um valor de 0 ou 1, produzindo dois endereços. Portanto, depois de obter um dos bits da parte de identificação do *host* do endereço IP, produzimos duas identificações de rede possíveis, a saber: 192.168.2.0 e 192.168.2.128. isto deixa apenas sete bits para identificar os *hosts*, levando a um máximo de $(2^7 - 2 = 126)$ *hosts* por sub-rede e um total de $(126 \times 2 = 252)$ *hosts* em toda a rede.

A tabela 4-1 fornece uma representação genérica de endereços IP e endereços de sub-rede.

Tabela 4-1 Representação de endereços IP e endereços *subnet mask*.

Original <i>Network Address (decimal)</i>	192	168	2	0
Original <i>Subnet Mask (decimal)</i>	255	255	255	0
Original network address (binário)	11000000	10101000	00000010	00000000 (<i>Host Id portion</i>)
Original <i>subnet mask</i> (binário)	11111111	11111111	11111111	00000000
<i>Network address – One Bit Taken</i>	11000000	10101000	00000001	 00000000 (<i>Host Id portion</i>)
<i>Subnet Mask – One Bit taken (decimal)</i>	255	255	255	128
1º <i>Network address possível (Binário)</i>	11000000	10101000	00000010	0 0000000  (<i>Host Id portion</i>)
1º <i>Network address possível (Decimal)</i>	192	168	2	0
2º <i>Network address possível (Decimal)</i>	192	168	2	128

A rede *Ethernet* composta pelos diversos dispositivos conectados, inclui um *switch* de 8 portas para controlar o tráfego de dados para onde convergem todas as ligações *Ethernet*, e o servidor INEGI que age como intermediário.

Numa primeira fase, realizaram-se as ligações entre o *switch* industrial e o dispositivo VSE 153, com a conexão da porta *Ethernet/IP* entre ambos e também com a ligação por *TCP/IP*, que posteriormente iria permitir a configuração no *software* VES004.

Posteriormente realizaram-se todas as outras ligações *Ethernet* que o *switch* viria a acomodar, o IO-Link *master* foi conectado via porta IoT, o Simatic IOT 2000 e o *Edge Computer* pelas respetivas portas de ligação *Ethernet*.

Assim sendo as ligações *Ethernet* traduzem-se no seguinte esquema descrito pela figura 4-3:

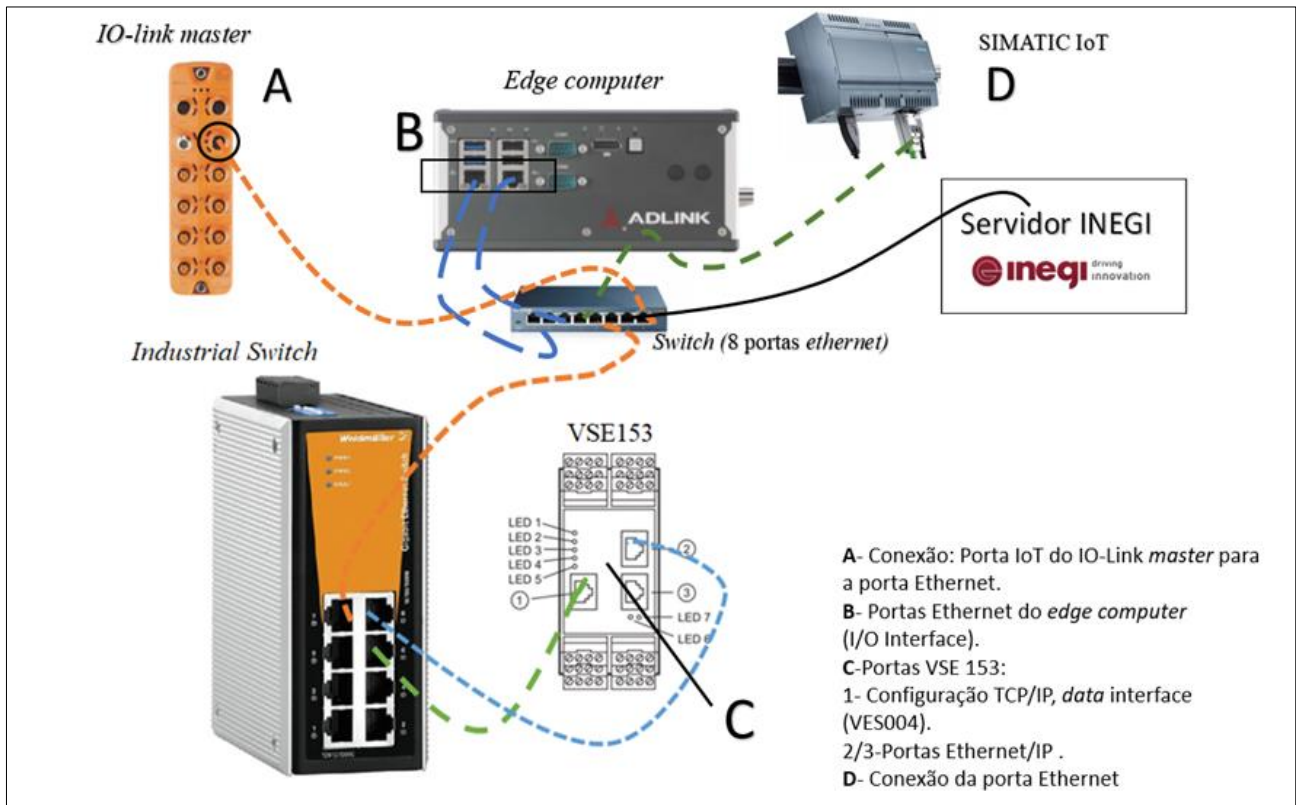


Figura 4.3 - Esquema geral das ligações Ethernet realizadas na rede para comunicação de todos os equipamentos.

- **Aquisição de sinais através do gateway SIMATIC IOT 2000**

Por fim, foi necessário que o SIMATIC IOT 2000 recolhesse dados 24VDC da máquina e os enviasse por MQTT para o *Edge Computer*, onde depois viriam a ser apresentados no dashboard final do equipamento.

A aquisição de sinais para o dispositivo SIMATIC IOT 2000 (2) dos racks (1) do PLC da máquina foi feita por MQTT. Na imagem, as ligações a vermelho representam os dados extraídos do PLC referentes ao equipamento para o Simatic, através das 5 entradas digitais do SIMATIC (5 x DI 24V)). Os sinais foram ‘derivados’ do PLC ao SIMATIC através de um ponto comum, neste caso bornes contactores, por forma a permitir que o sistema e controlador do equipamento não comprometessem o correto funcionamento da máquina.

Esta etapa é apresentada na figura 4-4, tendo sido implementada no armário elétrico da máquina já existente nas instalações do INEGI.

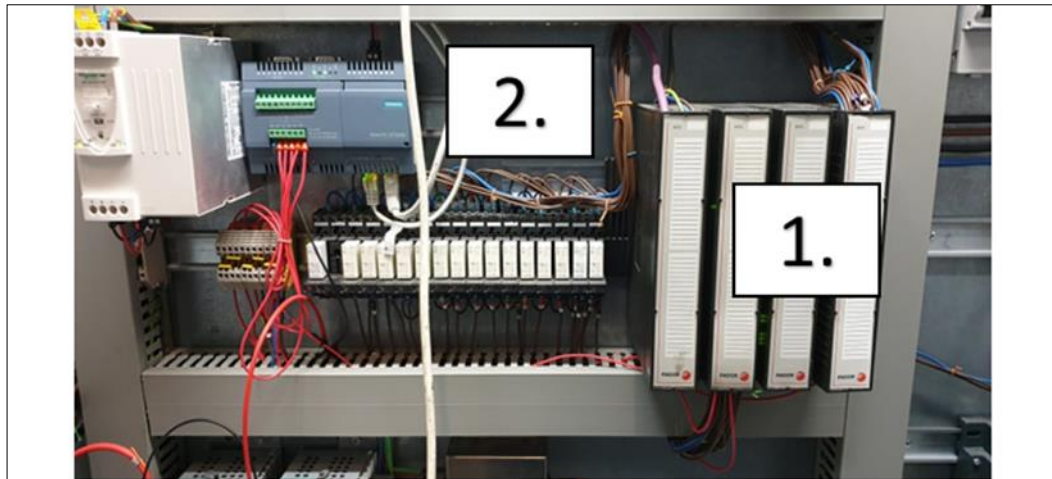


Figura 4.4 - 'Derivação' dos sinais do racks do PLC para as entradas digitais do simatic IOT 2000.

O SIMATIC IOT2000 converte os dados para o protocolo necessário e transfere esses para um sistema de nível superior como a *cloud* ou o servidor local. Neste caso foi para o Node-RED via MQTT. Este processo é exibido na figura 4-5.

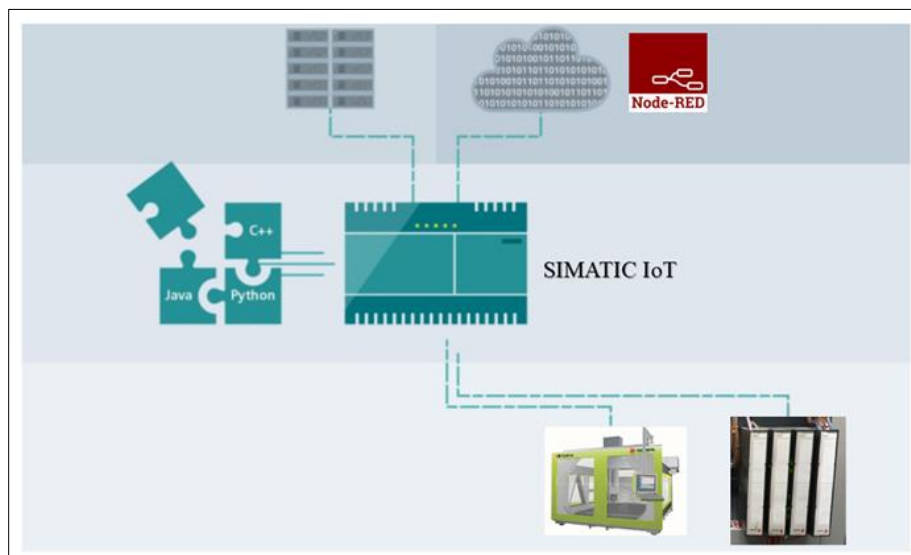


Figura 4.5 - Esquema exemplificativo da “derivação” de sinais dos racks do PLC para o dispositivo SIMATIC IOT2000.

Toda esta integração permitiria numa fase posterior ser visualizada no *dashboard* funcional da máquina no chão de fábrica onde são exibidos os dados associados, para acompanhar o estado de sinais escolhidos para representar o funcionamento do equipamento. Independentemente do tipo de *dashboard*, o objetivo é o de informar ou atuar sobre variáveis de um processo produtivo. A programação do *dashboard* ocorre no editor de execução do Node-RED. A plataforma Node-RED é baseada em fluxos e foi desenvolvida para interagir com dispositivos de *hardware* e serviços online com vista a simplificar os sistemas IoT.

Na figura 4-6 é exposta a proposta final da solução implementada para integração de todos os dispositivos, *hardware* e protocolos de comunicação selecionados. Toda esta integração viria a culminar na concepção gráfica do *dashboard* final do equipamento para a visualização em tempo real do equipamento para a monitorização do ativo. A ferramenta *dashboard* permite orientar o utilizador através do processo de desenvolvimento do modelo de análise implementado.

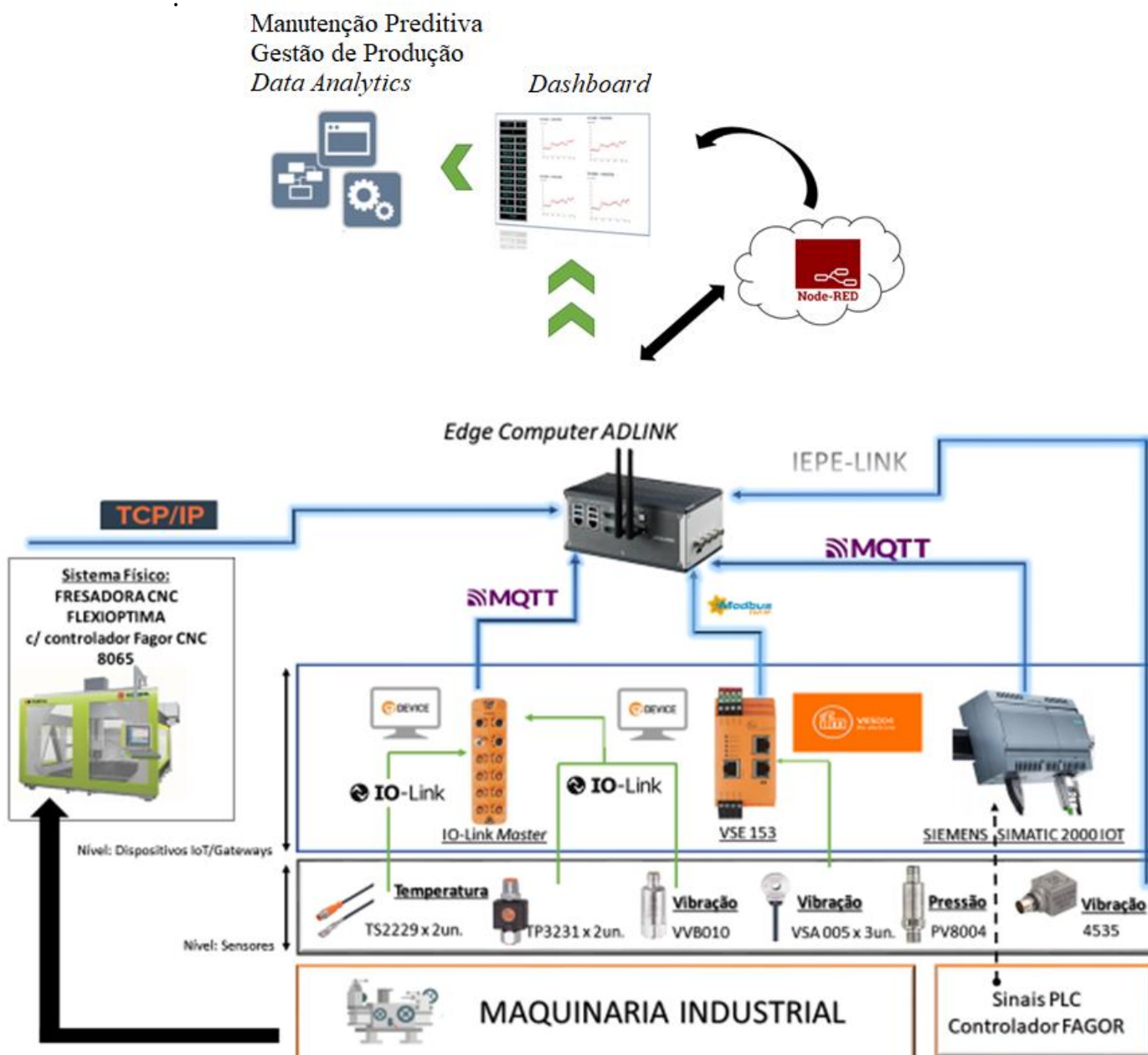


Figura 4.6 - Proposta de solução final para integração do *hardware* com o equipamento CNC e implementação da comunicação com o servidor INEGI.

Normalmente há um volume suficiente de dados relevantes do processo para máquinas e instalações. A fim de obter o valor agregado da aquisição desses dados, eles são analisados através do desenvolvimento de modelos de visualização apropriados via Node-RED. No final do processo de criação do dashboard, o utilizador seleciona o modelo e parâmetros que pretende para serem passíveis de visualização.

5 Conceção da Interface Gráfica: uma abordagem dinâmica baseada em Node-RED

O presente capítulo apresenta a evolução do desenvolvimento do *dashboard* e procura apresentar a base tecnológica em que este projeto de dissertação se utilizou para desenvolver o *dashboard* que serve de interface na interação utilizador-máquina. O volume de dados e informações recolhidas e armazenadas são quase ilimitados. Os dados oriundos da monitorização da máquina podem ser sumarizados numa estrutura e disponibilizados para visualização, servindo como ferramenta para tomada de decisões.

O Node-RED fornece uma interface gráfica intuitiva para programas orientados a eventos. Implementou-se assim o sistema virtual (sistema externo). Esse sistema externo consistiu na comunicação por meio de porta Ethernet entre o *Edge Computer* e o servidor local do INEGI depois de todos os dispositivos ligados, e um computador *host* que, através da plataforma do Node-RED que se encontrava instalado no *Edge Computer*, organiza e armazena todas as informações do sistema. Além disso, a biblioteca *dashboard* do Node-RED foi utilizada para a implementação da interface de utilizador que permite, através de acesso remoto credenciado numa fase inicial, aceder depois a um endereço *localhost* onde o Node-RED é executado, para a leitura de todos os parâmetros recolhidos de todos os sensores por meio de gráficos dinâmicos e construção de *flows*. A representação esquemática do acesso ao endereço *localhost* é exibida na figura 5-1.

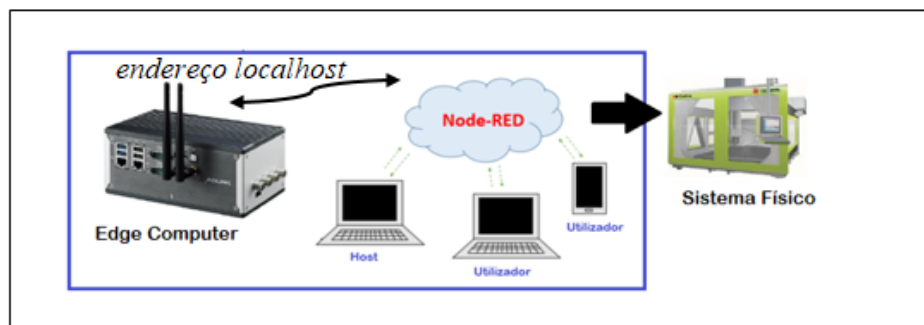


Figura 5.1 - Sistema virtual (externo) que suporta a interface de programação que permite ao utilizador visualizar o *dashboard*.

Para isso foi necessário aceder ao editor Node-RED num navegador através do endereço web: <http://localhost:1880>. O Node-RED abriu assim uma interface de comunicação entre o *Edge Computer* e o computador *host*. Para evidenciar toda a integração utilizou-se todas as funcionalidades do ambiente Node-RED para desenvolver a aplicação lógica e gráfica com base em *Javascript*. Depois de recolher os dados dos sensores do IO-link *master*, em seguida, foi imprescindível publicá-los para um MQTT *broker*. Foi usado o *Mosquitto*, o *broker* que a unidade DPS utiliza.

O Node-RED atuou assim como um assinante para receber os dados do *broker* MQTT. Com o Node-RED, os fluxos programados para manipular os dados recebidos dos sensores IO-Link e para os apresentar no *dashboard*, podem ser exibidos de três formas: de medidor (*widget*), texto e gráfico no painel.

Mais especificamente, os sensores IO-Link neste projeto de dissertação comportam-se como clientes que se conectam a um corretor (*broker*) e publicam mensagens em tópicos, enquanto o *broker* permite a conexão, agindo como uma interface comum. Os clientes podem receber mensagens criando assinaturas. Uma assinatura pode ser para um tópico explícito, caso em que apenas mensagens desse tópico serão recebidas

Não há necessidade de configurar um tópico, basta publicá-lo e atribuir-lhe uma designação.

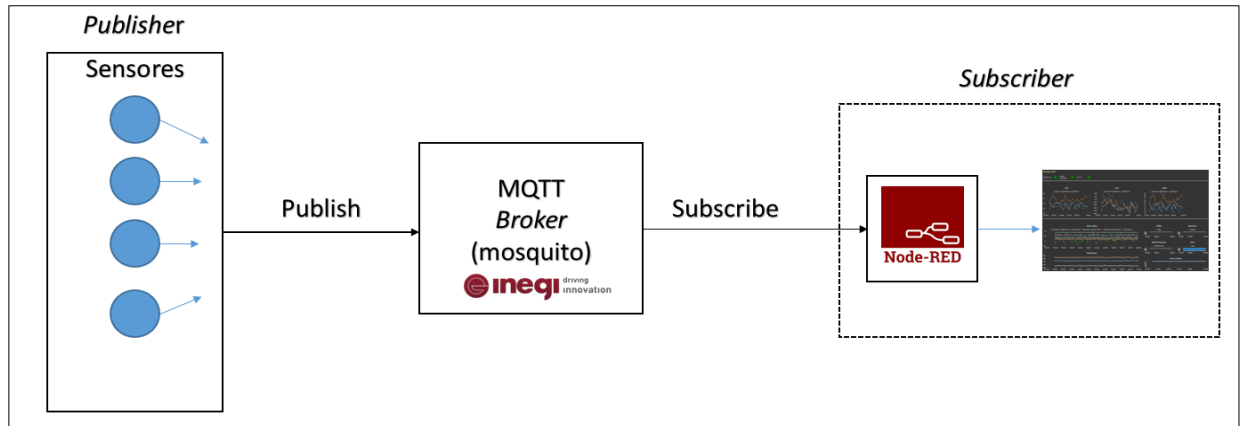


Figura 5.2 - Processo de aquisição de dados dos IO-link *master* pelo protocolo MQTT para visualização no *dashboard*.

Diante da solução apresentada foram feitos testes de comunicação para transferência de dados entre o *Edge Computer* e a plataforma de programação do Node-RED a resposta de comunicação com o ambiente supervisor mostrou-se satisfatória assim que o sistema foi submetido a teste de entradas digitais dos sensores.

A conceção do *dashboard* final permite ao utilizador final interagir com todos os dispositivos integrados. A sua função consiste em monitorizar as variáveis do processo em tempo real, visualizar alarmes e reagir de forma preventiva, se assim for o caso, a falhas inesperadas no equipamento. Para a manutenção ser preditiva e, por isso, possível de agendar, a interligação inteligente dos componentes individuais criou a base sólida para uma solução digital de *dashboard* por forma a ter uma visão geral do processo de implementação.

A decisão de que informações ou funcionalidades seriam implementadas para visualização no *dashboard* envolveu algumas variantes, entre elas, o tempo disponível e a complexidade inerente de não estar familiarizado com a linguagem de programação orientada a eventos: *Javascript*. A interface frontal escolhida acomodou três áreas de seleção principais escolhidas:

- **Máquinas no chão de fábrica;**
- **Alarmes Log;**
- **Dispositivos IoT.**

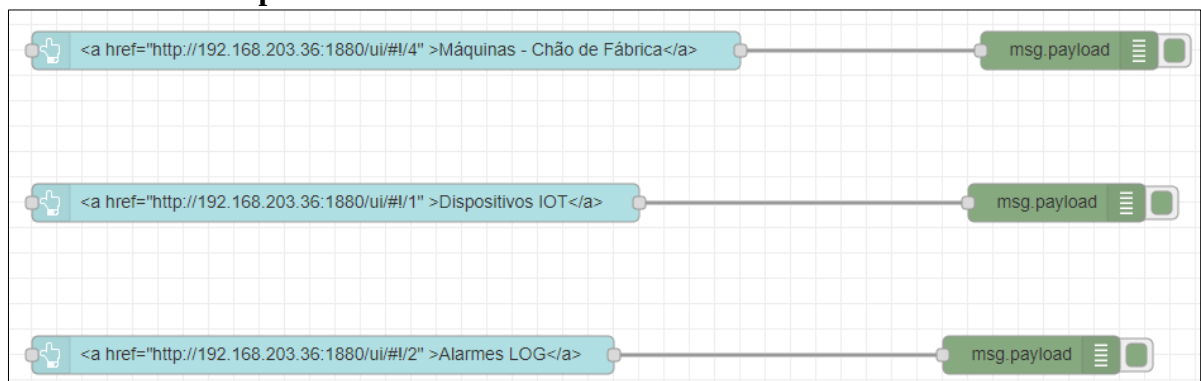


Figura 5.3 - Fluxo da programação da interface frontal no ambiente de execução do Node-RED.

A partir do *layout* pensado para esta etapa de planeamento da interface foi criado o protótipo navegável. A *tab* “Máquinas no chão de fábrica” acomoda os equipamentos alvo de integração de IoT no chão de fábrica do INEGI. Neste caso, apenas é considerada a informação do equipamento alvo do projeto de dissertação.

A *tab* “Alarmes Log” foi definida para emitir diversos erros do controlador *Fagor* da máquina para diagnosticar eventuais falhas em estado incipiente e definir limites aceitáveis para a operação do equipamento. Na *tab* “Dispositivos IoT” é possível visualizar o *status* de ligação dos dispositivos de eletrónica de diagnóstico, o IO-link *master* e o *Edge Computer*.

A programação no Node-RED aconteceu através da conexão dos nós. Obrigatoriamente, foi preciso de um nó de entrada e um nó de saída. O nó de entrada era responsável por iniciar a aplicação. Enquanto o nó de saída foi responsável por realizar a saída do processamento dos dados.

Geralmente uma aplicação é desenvolvida utilizando os três nós, gerando uma estrutura de fluxo com entrada, processamento e saída. A junção dos nós, organizados numa sequência de funcionamento, trabalhando em conjunto para obter um determinado dado de qualquer sensor, é considerado um fluxo. Os dados seguiram a estrutura desenhada pelos fluxos, ao longo dos nós, percorrendo cada ponto.

Para aceder ao *dashboard* e não o ambiente de programação do Node-RED, a ligação foi feita através do navegador da web através do endereço <http://localhost:1880/ui>.

5.1 Criação de nós

Os nós em Node-RED são criados a partir de dois arquivos: um HTML representando a lógica e visual do lado cliente e um arquivo *JavaScript* implementando a manipulação do lado servidor. Os trechos de construção de nós contidos nas figuras seguintes foram retirados da programação desenvolvida no Node-RED e são apresentados como um dos exemplos usados para a implementação de nós customizados dos respetivos sensores.

Os nós realizam o processamento das partes do fluxo. Normalmente possuem uma porta do lado esquerdo e uma do lado direito. Os de saída proveem um meio de saída para a aplicação, seja na seção de *debug* (representado pelo nó verde ***msg.payload***) ou serviço externo.

Toda a comunicação entre os nós é baseada na troca de mensagens, mais especificamente através do objeto chamado ***msg***. Muitas das vezes, ***msg*** é acompanhado de uma propriedade chamada *payload* que representa a carga útil da mensagem (***msg*** pode conter inúmeros parâmetros).

Neste caso, é apresentada de seguida a programação do sensor triaxial para a aquisição dos parâmetros de vibração. A conexão do sensor ao *Edge Computer* é executada pelo nó MQTT denominado “*PH_GM_info*” que caracteriza a ligação ao *Edge Computer*. Este nó por sua vez está ligado a um bloco de função que permite fazer a leitura dos parâmetros nos três eixos de medição: X, Y e Z.

Para a leitura do valor da aceleração no eixo X é possível visualizar a função que caracteriza este parâmetro denominada “*DP-ACC*” e assim sucessivamente para os restantes eixos. As funções “*DP-Disp*” e “*DP-ISO*” permitem recolher do sensor os parâmetros de vibração velocidade e deslocamento nos respetivos eixos.

Este fluxo o que faz é a partir do nó de processamento transformar toda mensagem contida no atributo *payload* do objeto ***msg*** e transformá-la em valores de leitura de aquisição dos parâmetros do sensor.

A figura 5-4 apresenta um exemplo de programação realizado no ambiente do Node-RED para aquisição de dados do sensor triaxial instrumentado no equipamento, através da respetiva ligação MQTT ao *Edge Computer*.

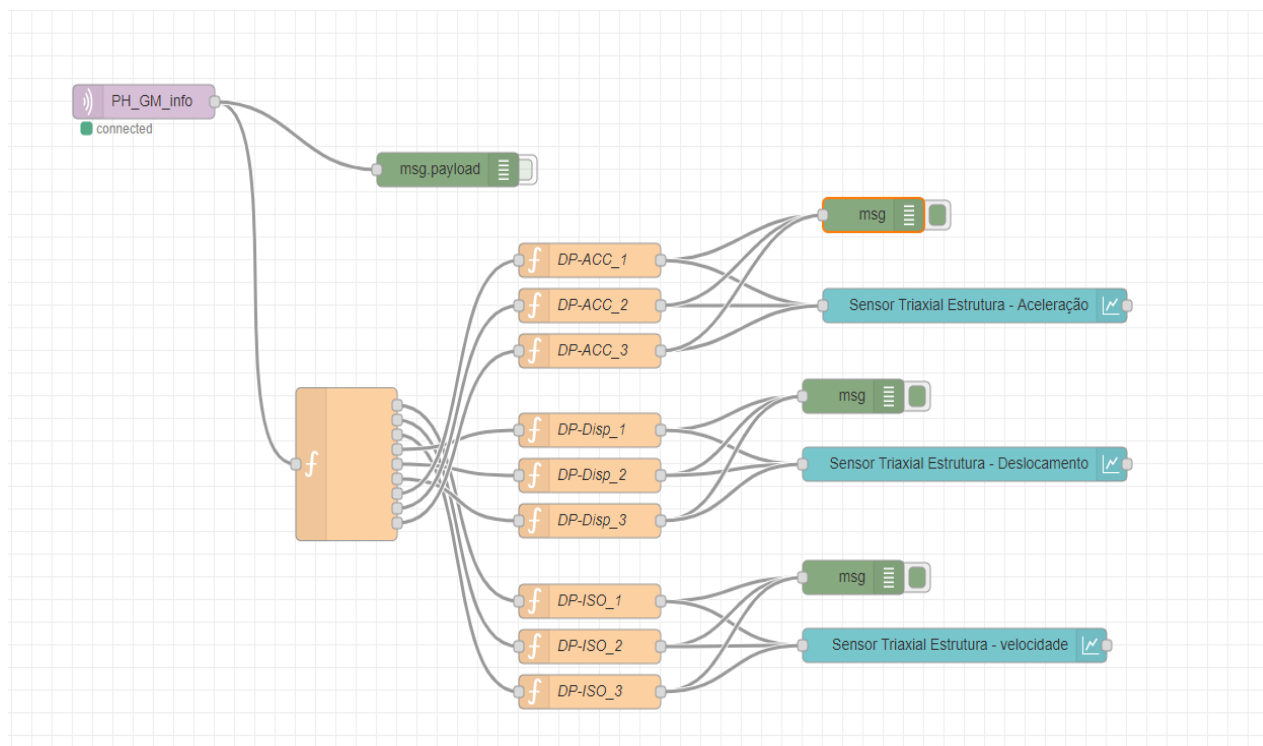


Figura 5.4 - Programação dos nós no ambiente de execução do Node-RED para aquisição de dados do sensor triaxial de vibração através da ligação MQTT ao *Edge Computer*.

No caso dos dispositivos conectados ao IO-link master foi necessário proceder à configuração dos nós de injeção (*inject*) de entrada, representados a azul. A função deste nó é disparar um processo que inicia um algoritmo que é executado pelo sensor. O intervalo é definido para 3 segundos. O nó *f* representado pelos blocos *f* nas imagens seguintes representam os blocos de funções que permitem a programação em linguagem *JavaScript*. O nó de injeção inicia o bloco de funções, que transmite posteriormente as mensagens aos sensores. A configuração comum de um nó *inject* é apresentada na figura 5-5.

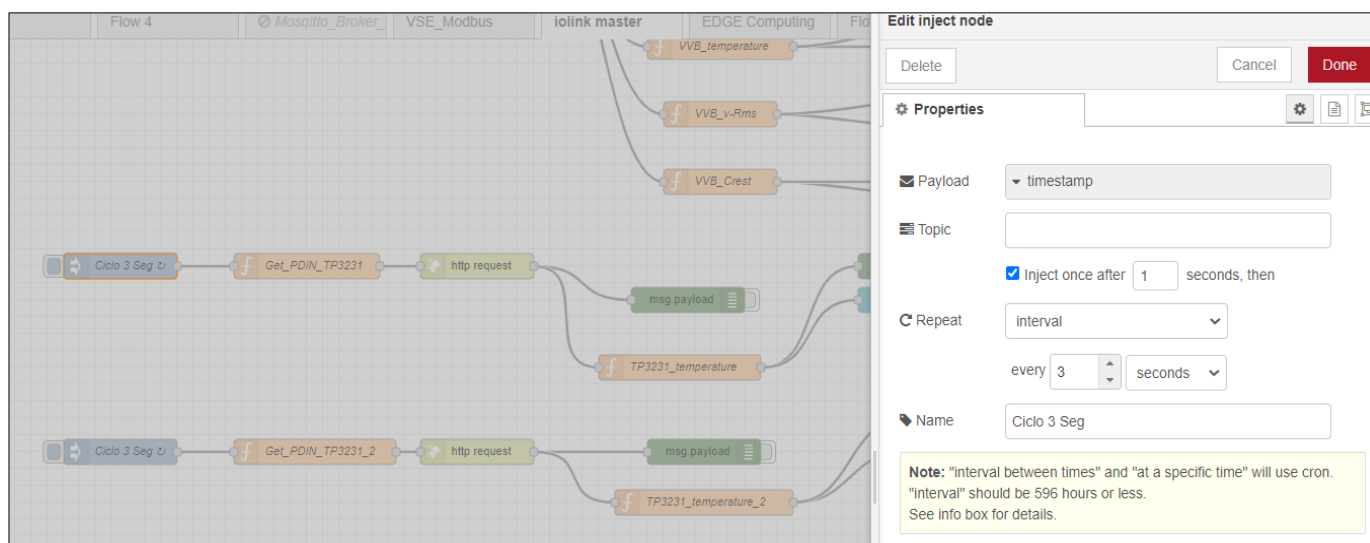


Figura 5.5 - Configuração do nó de injeção denominado *timestamp* (a azul).

A última parte do fluxo contém os nós *debug* (representados a verde por *.msg*). O nó de *debug* permite mostrar os dados recebidos dos sensores que foram processados pelo bloco de funções. Depois da criação de um fluxo, o botão *deploy* é pressionado e os dados recebidos dos sensores, neste caso, a temperatura dos sensores de TP3231 e a pressão ambiente medida pelo sensor de pressão são exibidos na seguinte figura 5-6.

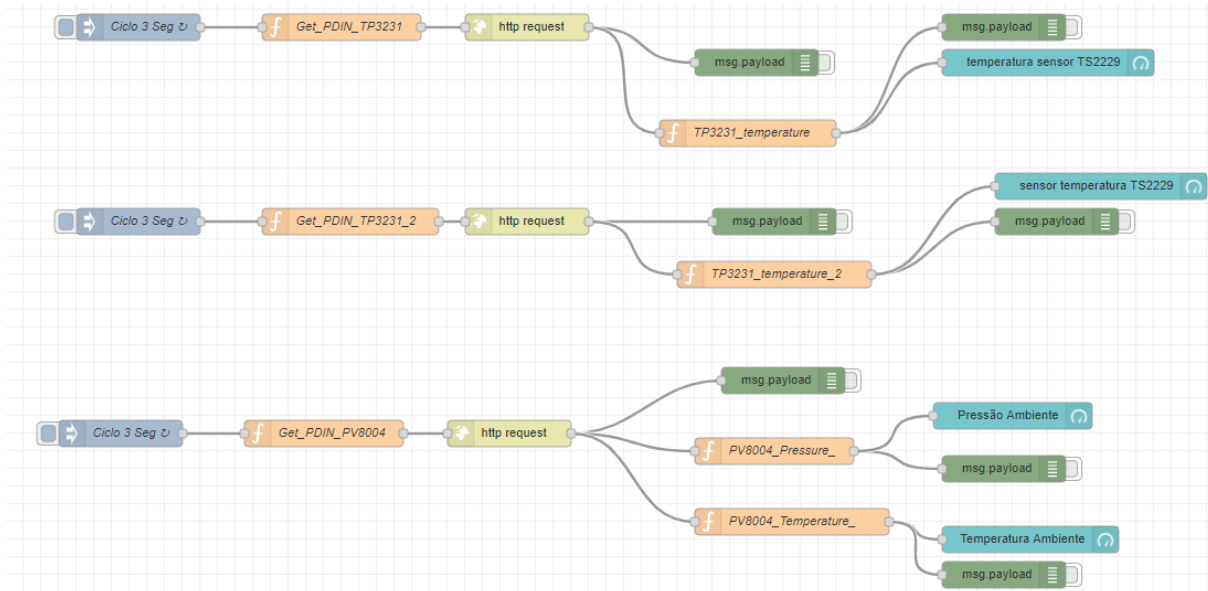


Figura 5.6 - Programação dos nós no ambiente de execução do Node-RED para aquisição de dados dos sensores de temperatura e do sensor de pressão conectados ao IO-Link *master* através do nó de injeção (*inject*).

A representação do código-fonte de algumas funções do sensor triaxial de vibração e dos sensores de temperatura são apresentadas de seguida na figura 5-7.

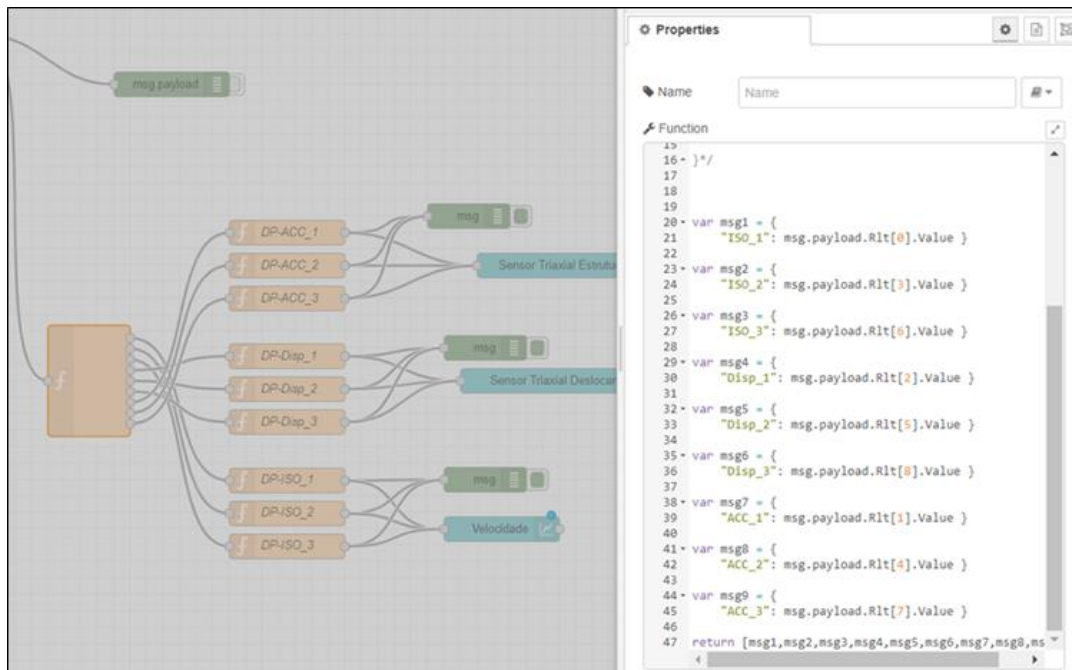


Figura 5.7 - Representação do código de função para aquisição dos parâmetros de vibração: velocidade, aceleração e deslocamento do sensor triaxial, para os três eixos correspondentes: X, Y e Z.

5.2 Composição dos fluxos

Os fluxos no Node-RED lidam com a entrada dos dados através de diferentes fontes. A fim de transmitir com eficácia os dados que estão a ser trocados entre os sensores através do equipamento, o protocolo MQTT para o IO-Link *master* e o Modbus TCP para o dispositivo VSE 153 foram executados e configurados no Node-RED.

A abordagem combinada com os muitos atributos do protocolo MQTT (ou seja, mensagens retidas, sessões limpas e conexões duráveis) permitiu a adição de sensores de forma escalonável, de acordo com o número de entradas digitais permitidas pelos dispositivos IoT, na presente dissertação. Os clientes (sensores) capturaram e transmitiram os dados com o *broker* MQTT usando um formato JSON simples. As mensagens também incluem o número real de valores numéricos que o dispositivo estava a capturar no caso do protocolo MQTT. O nó MQTT permitiu efetivamente reunir, processar e republicar os dados do IO-link *master* para o *broker* do INEGI quando necessário.

A instância do Node-RED executa um fluxo “escutando” um URL específico. O nó do meio é um nó de função que inclui o código *JavaScript*, conforme já mencionado, necessário para que se crie uma página HTML de amostra. O último nó envia o HTTP de resposta correspondente à solicitação HTTP acionando a execução do nó. O Node-RED oferece flexibilidade através de uma ampla gama de nós para diferentes protocolos e camadas de rede: HTTP, MQTT, TCP, UDP etc.

Outro aspeto interessante do Node-RED é que ele permitiu separar a lógica de fluxos em fluxos separados por dispositivo. Desta forma, foi possível programar e dividir o código em diferentes módulos que interagem entre si assim que são implementados. Esta propriedade é de extrema importância para a nossa abordagem, porque permite descarregar fluxos específicos para a nuvem se for necessário, enquanto mantemos por exemplo, um fluxo simples em execução localmente no servidor. Um dos fluxos Node-RED implementados é exibido na figura 5-8 para monitorizar os dados vibração do sensor VVB010.

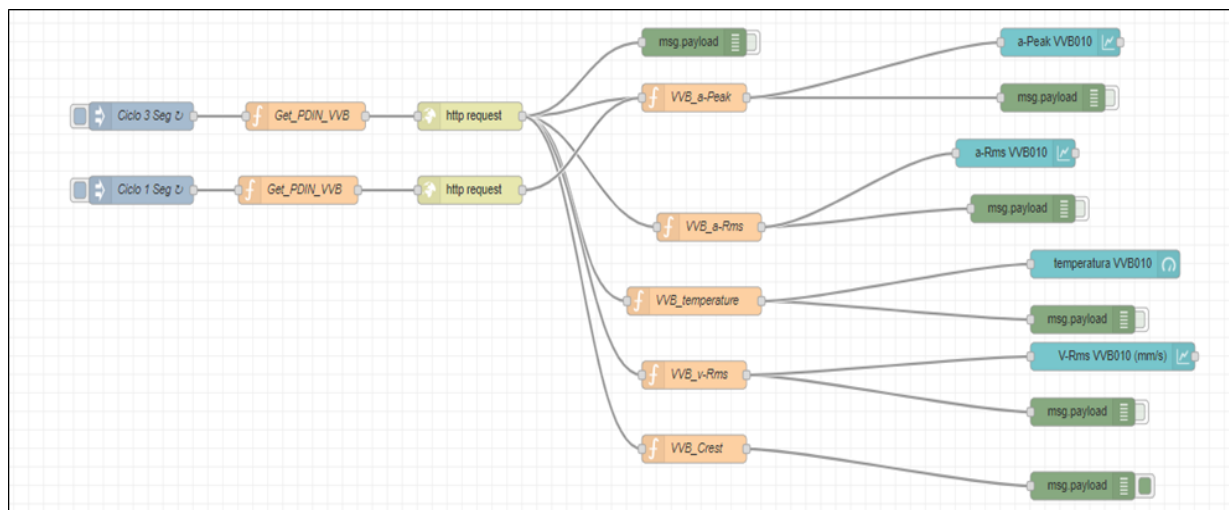


Figura 5.8 - Fluxo de Node-RED da fonte de dados que lida com a entrada de dados do sensor VVB010 usando um *request* HTTP, computando e monitorizando os parâmetros de vibração definidos.

A aquisição dos sinais das entradas digitais do dispositivo Simatic IOT 2000 representam três sinais distintos do equipamento:

- Inicialização da máquina;
- Abertura da porta da máquina;
- Máquina em funcionamento.

O correspondente *flow* desenvolvido que engloba as ligações aos nós MQTT, foi realizada da seguinte forma: primeiro, um nó MQTT com a respetiva correspondência do tópico que subscreve (por exemplo: “*iot_io_4*”) representado na figura seguinte, irá obter os dados do

broker MQTT sempre que este publicar os dados, em seguida os dados passarão para o correspondente nó *led*. A construção do fluxo referente ao dispositivo SIMATIC IOT 2000 para aquisição de dados é apresentada na figura 5-9.

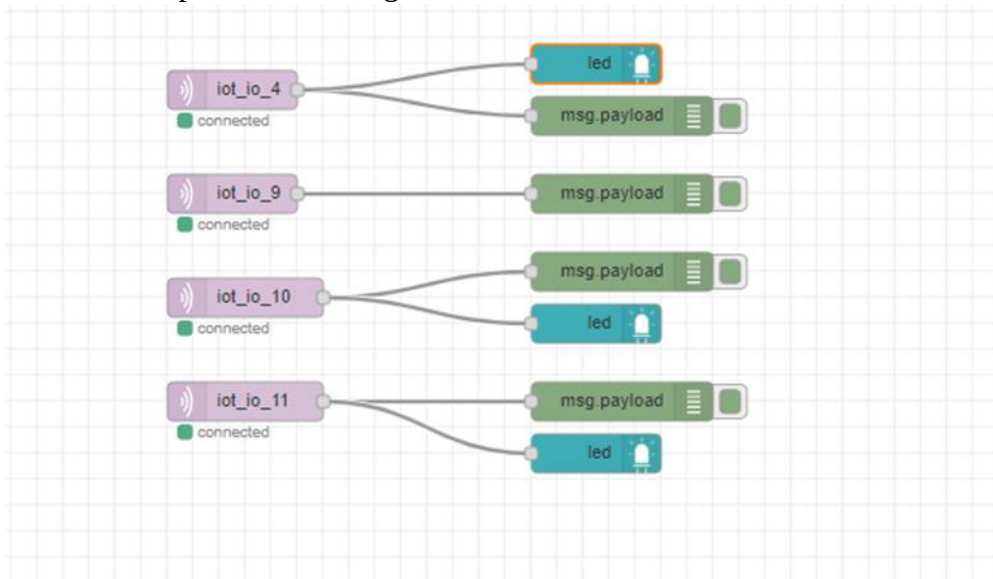


Figura 5.9 - Construção do *flow* associado à aquisição de sinais digitais do dispositivo simatic IOT.

Estes três nós serão exibidos posteriormente na interface de utilizador no painel de monitorização, na tela de instrumentação dos eixos disponível no *dashboard*.

Relativamente ao fluxo que deriva os sinais do PLC, através dos ficheiros de *logs*, e erros extraídos da máquina, através do nó *.csv*, é possível disponibilizá-los sob a forma de tabela. Este tipo de nó converte uma *string* formatada em CSV e a sua representação de objeto em *JavaScript*, em qualquer direção e cria um objeto *JavaScript* de pares chave/valor para cada linha. O nó envia depois uma mensagem para cada linha ou uma única mensagem contendo uma matriz de objetos. A composição do fluxo encontra-se representada na figura 5-10.

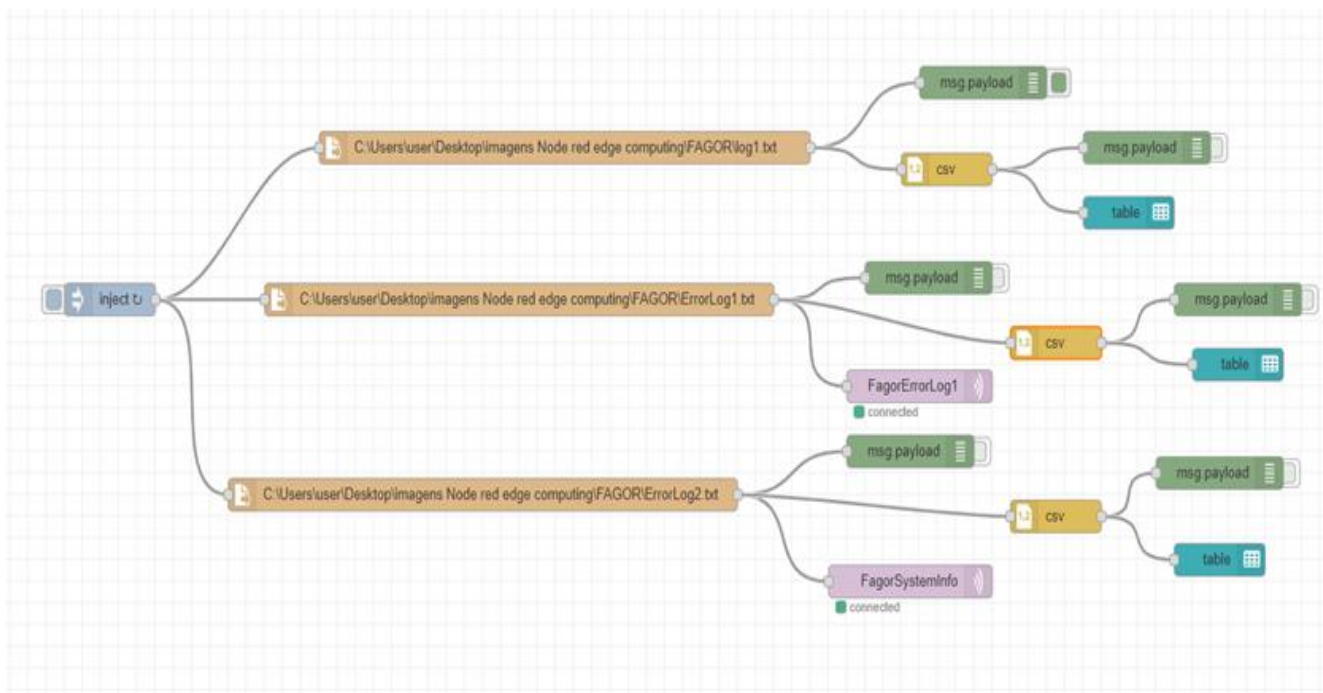


Figura 5.10 - Composição do fluxo que permite apresentar os ficheiros de erros do controlador da máquina.

Relativamente aos fluxos dos parâmetros de vibração dos sensores VSA005 configurados pelo protocolo Modbus, é exposto de seguida nas figuras 5-11 e 5-12 uma representação parcial da programação efetuada no Node-RED.

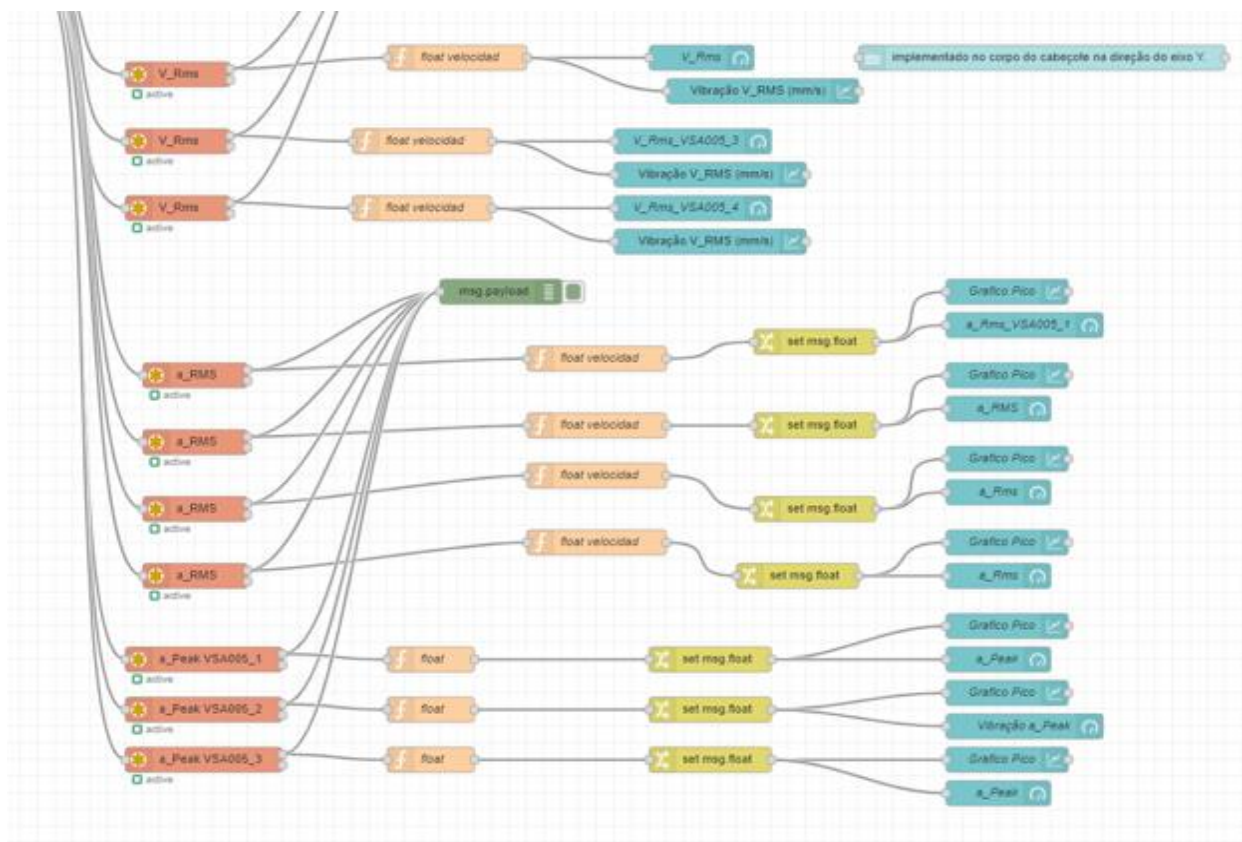


Figura 5.11- Representação parcial do fluxo dos parâmetros de vibração dos sensores VSA005 configurados por Modbus.

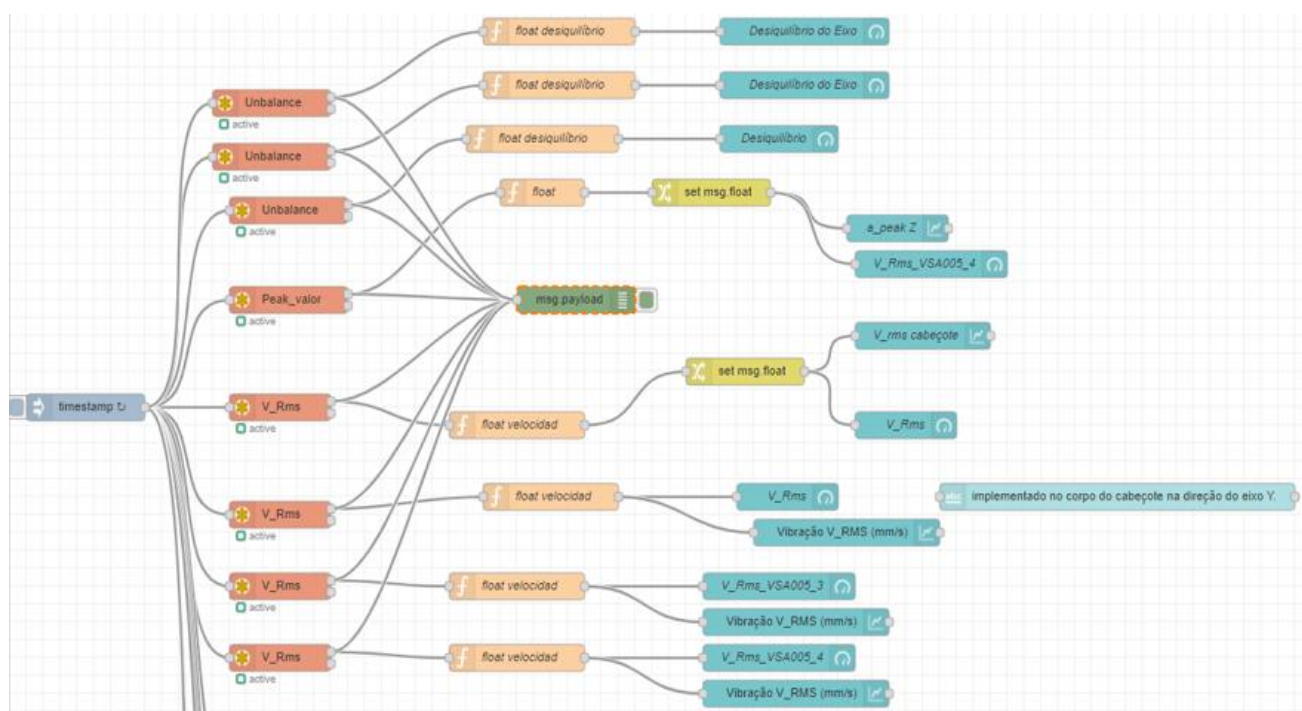


Figura 5.12 - Representação parcial da programação do fluxo dos parâmetros de vibração dos sensores VSA005 configurados por Modbus.

Em termos de programação e composição do fluxo relativamente ao sensor VVB010, uma visualização parcial é apresentada na figura 5-13.

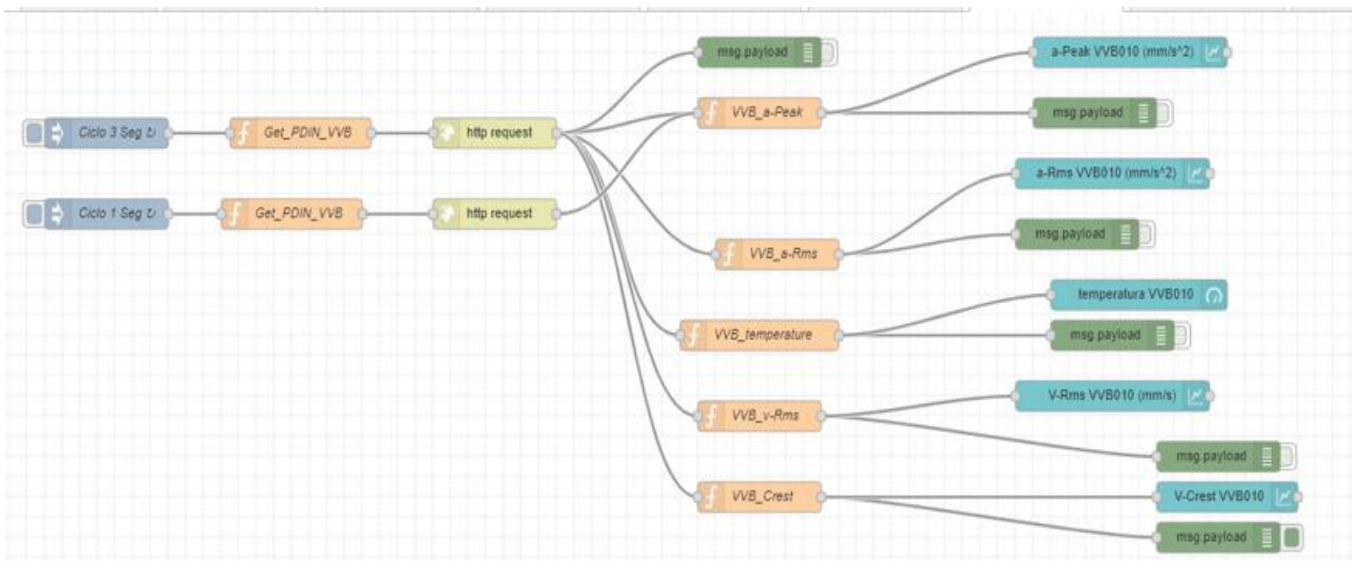


Figura 5.13 - Visualização da programação do fluxo do sensor VVB010 conectado ao IO-Link *master*.

5.3 Design e validação do *dashboard* funcional do equipamento

O *dashboard* é um aplicativo executado na *web* fornecido pelo Node-RED. Para aceder ao *dashboard* e não ao ambiente de programação do Node-RED, a ligação foi feita através do navegador da *web* através do endereço <http://localhost:1880/ui>. A figura 5-14 exhibe a ligação efetuada no navegador.

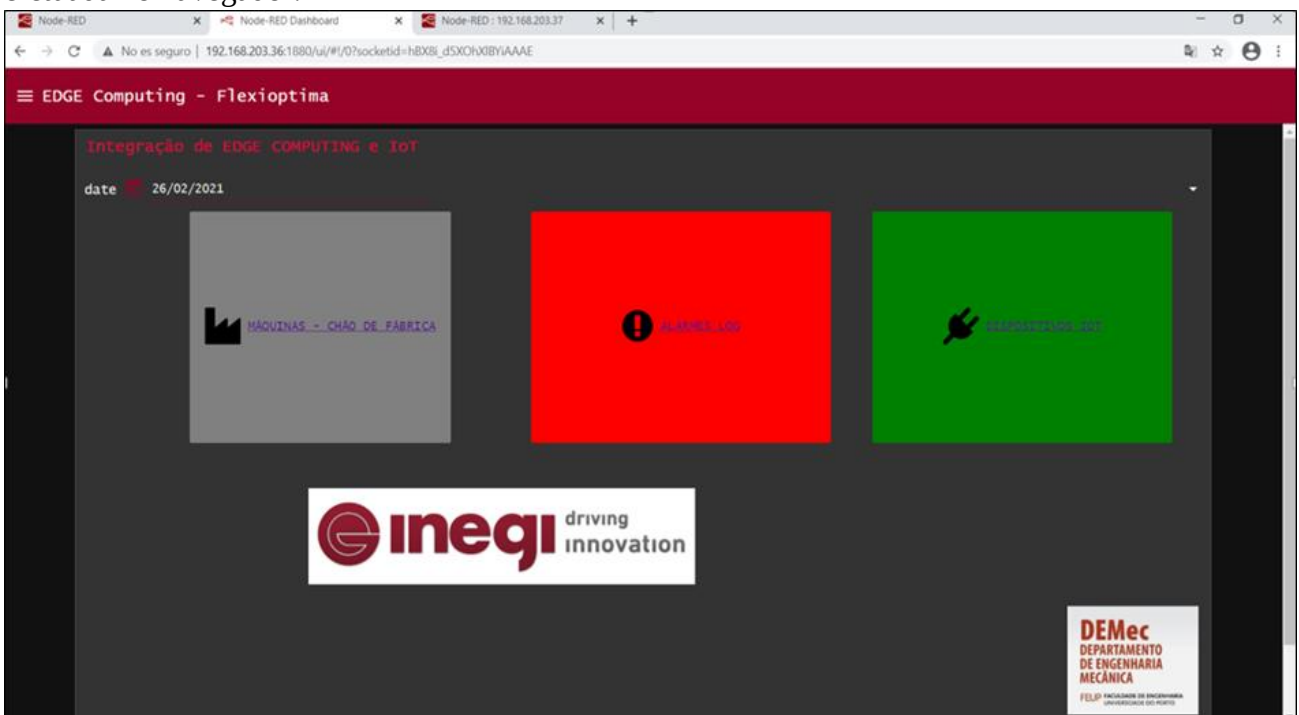


Figura 5.14 - Visualização do painel frontal do utilizador no *dashboard*.

Disseminando o *dashboard* por todo o conteúdo nas restantes *tabs* do Node-RED, podemos ter uma visão geral de toda a informação disponível que foi programada e considerada

para ser disponibilizada. Este *layout* funciona como um mapa de navegação com as regras que cada elemento seguiu e consequentemente como foi concebida a sua visualização na tela.

Ao seleccionarmos o equipamento Flexioptima e tendo o ativo sido instrumentado em diversos eixos, foi definida uma seleção parcelada eixo a eixo em conjunto com o componente cabeçote e o sensor triaxial para ir ao encontro do *display* em separado dos parâmetros adquiridos pelos sensores. Além disso, a derivação dos sinais da máquina pelo Simatic IoT também foram seleccionados para visualização nesta aba do *dashboard*.



Figura 5.15 - Seleção do equipamento no *dashboard*.

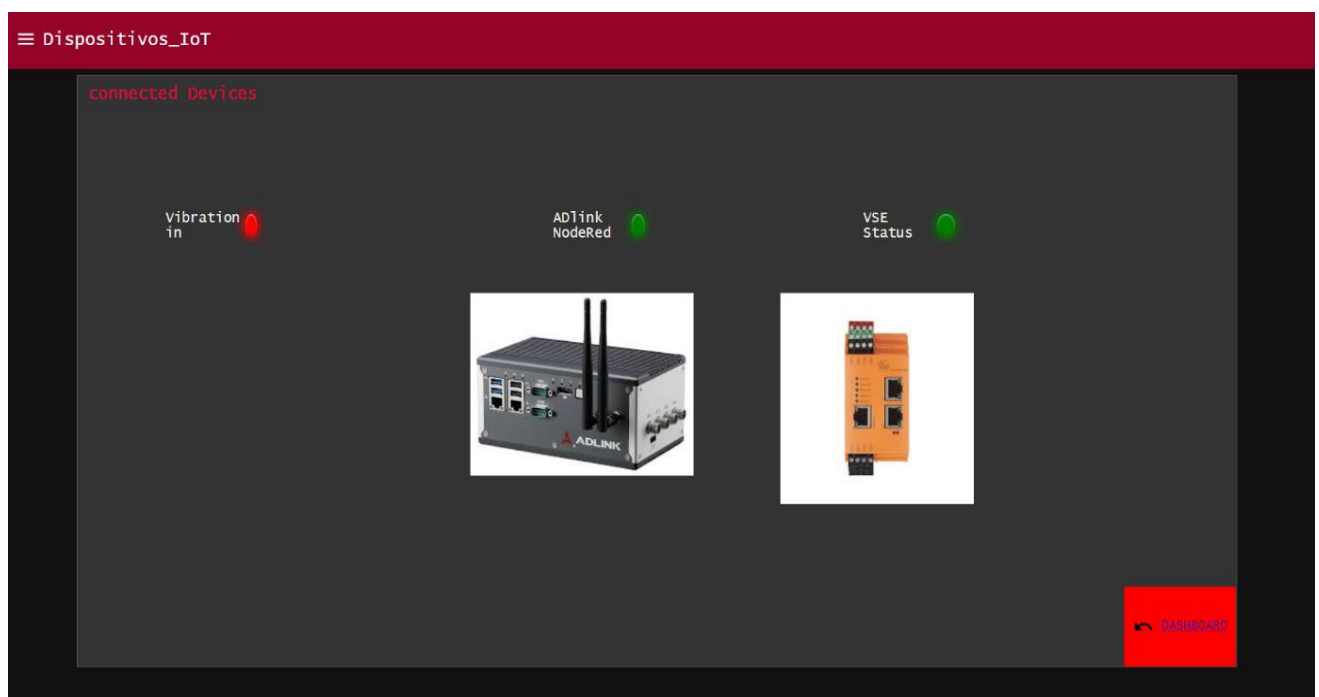


Figura 5.16 - Visualização da *tab* “Dispositivos IoT” no *dashboard*.

Nas figuras 5-15 e 5-16 são exibidas algumas abas da estrutura que compõem o *dashboard* quer ao nível dos dispositivos IoT conectados, mas também a seleção do equipamento. A visualização da monitorização dos sensores instrumentados nos diversos eixos é exibida entre as figuras 5-17 e 5-22 conforme representado mais abaixo.



Figura 5.17 - Visualização da monitorização dos sensores instrumentados no corpo do cabeçote.

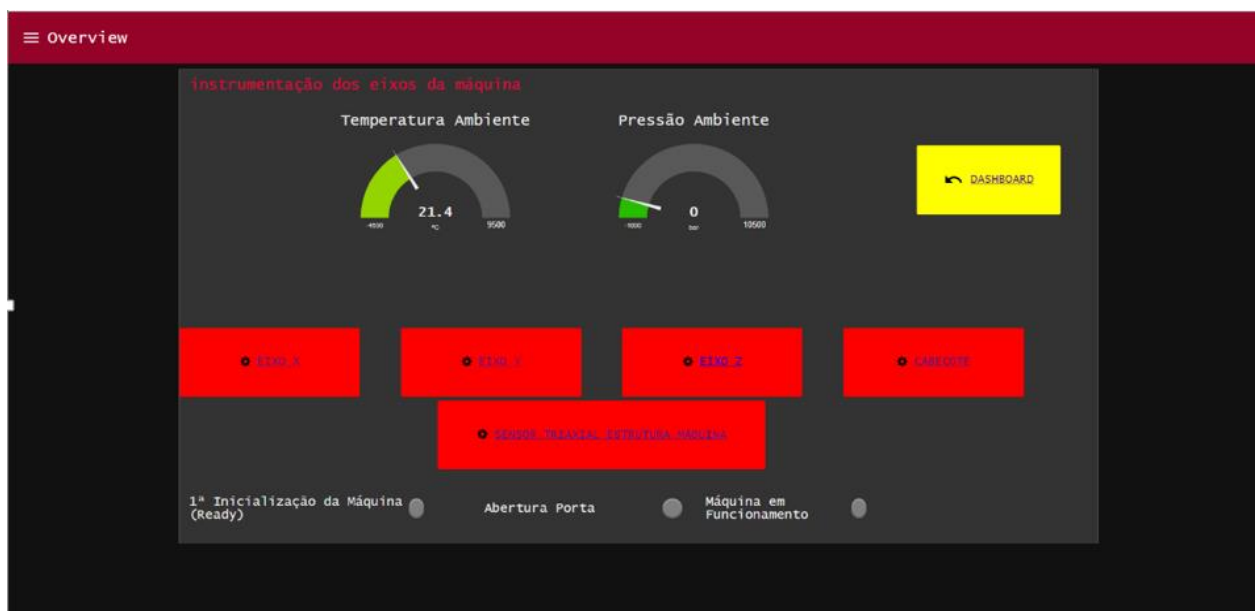


Figura 5.18 - Visualização do painel de instrumentação dos eixos do equipamento e de todos os componentes associados.

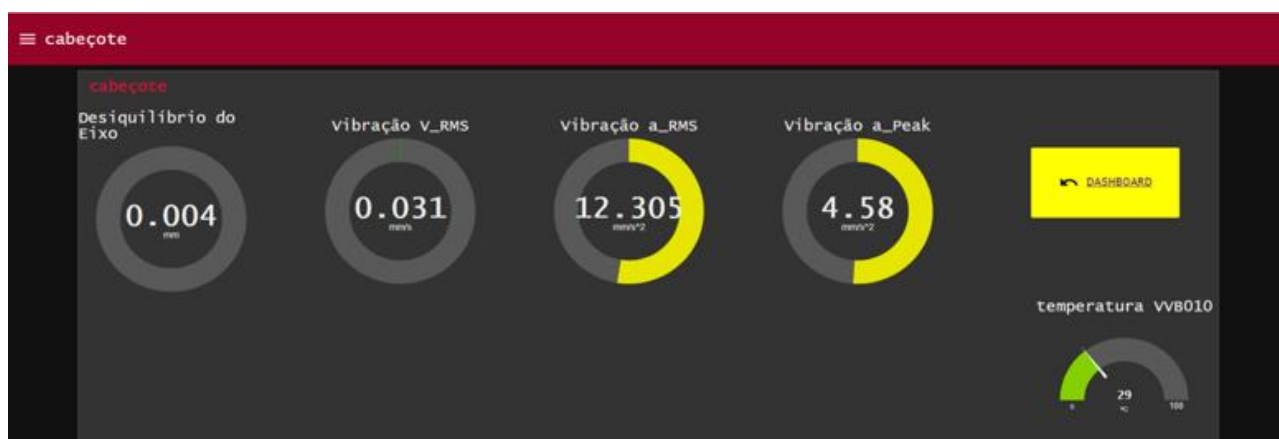


Figura 5.19 - Visualização dos widgets dos parâmetros de vibração do cabeçote também na *tab* deste componente (seção parcial do *dashboard*).

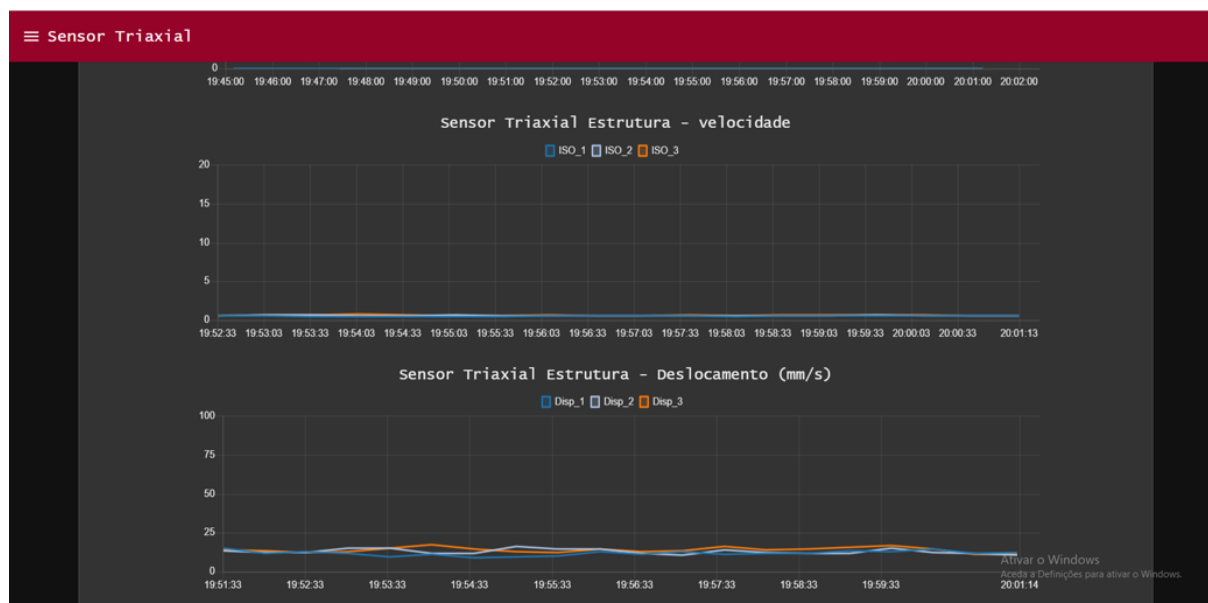


Figura 5.20 - Visualização da monitorização de vibração do sensor triaxial.

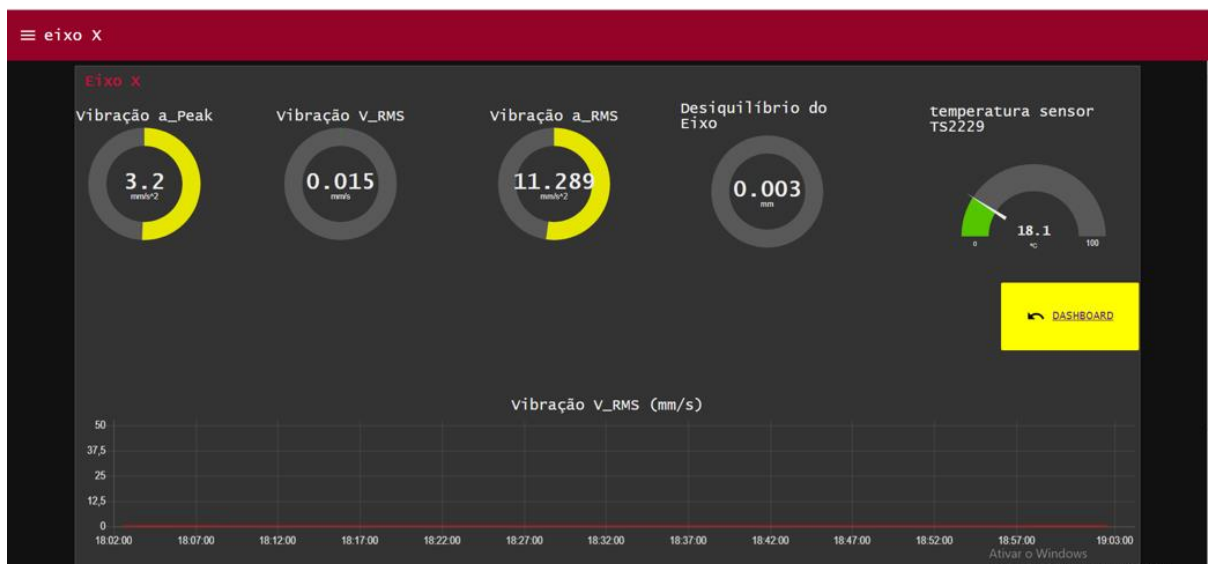


Figura 5.21 - Visualização da monitorização de vibração do Eixo X (seção parcial do *dashboard*).

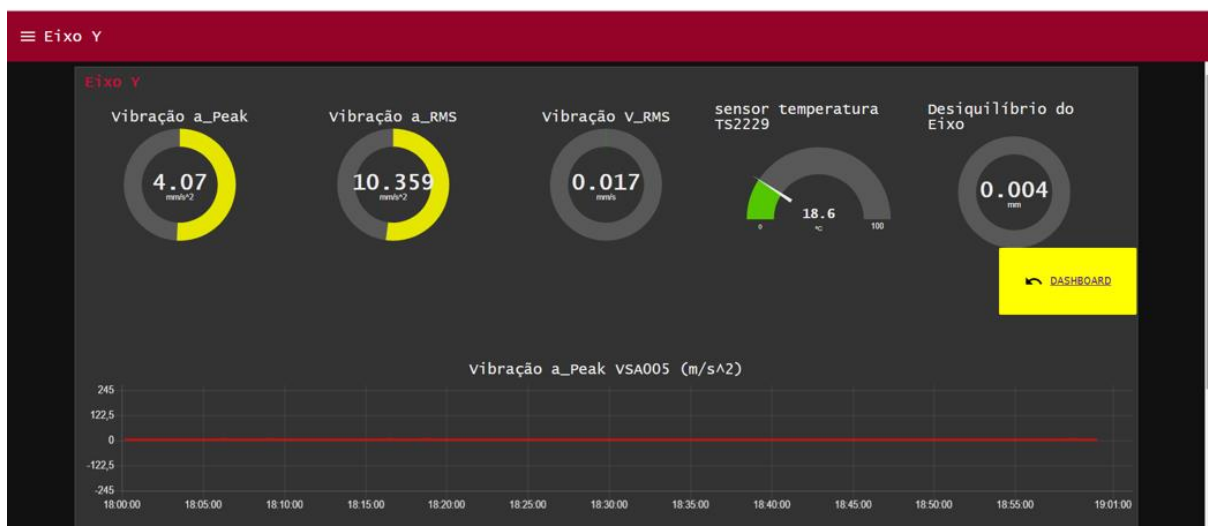


Figura 5.22 - Visualização da monitorização do Eixo Y (seção parcial do *dashbaord*).

Os erros do controlador Fagor da máquina foram também considerados relevantes para serem disponibilizados na interface final e são exibidos na figura 5-23. Extraíndo estes dados da máquina foi possível criar a seguinte lista que fornece alguns exemplos de erros, e a respectiva causa:

- **Erro 0003 'Erro na solicitude de memória. Reiniciar Windows e CNC'**

Causa: O CNC não dispõe de memória suficiente ou a memória encontra-se excessivamente fragmentada.

- **Erro 0005 'O CNC não se desligou corretamente, é necessário referenciar'**

Causa: Os dados do CNC relativos às cotas, interpolações, etc. que se salvam no disco não são válidos. O ficheiro que contém estes dados não existe, não é acessível ou está corrompido.

- **Erro 3026 'Limite negativo de *software* ultrapassado'**

Causa: O CNC terá tentado deslocar um eixo a um ponto que se encontra fora dos limites de *software*.

- **Erro 3711 'Erro no restabelecimento de contagens CAN'**

Causa: Se o erro mostra o nome de um eixo, o CNC não completou a leitura das contagens desse eixo. Se o erro não mostrar o nome de nenhum eixo, o CNC não completou a atualização cíclica dos contadores. O erro pode ser devido a um erro no bus CAN, devido a uma falha em alguma contagem, no módulo de contagem ou à saturação do bus CAN.

- **Erro 6003 'Emergência externa ativada.'**

- **Erro 6001 'Alarme do teste de tendência ativada'**

Causa: Realimentação positiva no eixo durante um tempo superior ao definido no parâmetro.

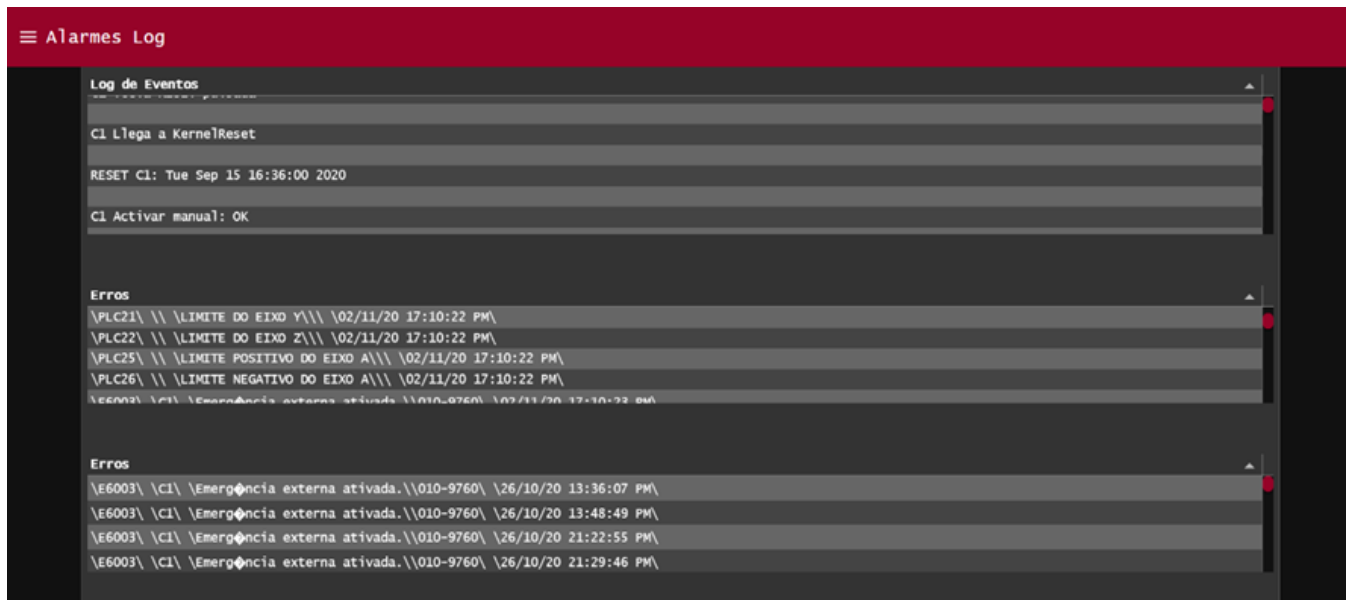


Figura 5.23 - *Display* dos erros do controlador da máquina na *tab* “Alarmes Log” do *dashboard*.

O *dashboard* prova assim ser uma ferramenta de manutenção da produção estratégico que usa fatores críticos e indicadores-chave de desempenho para traduzir a missão e a estratégia de uma organização num conjunto equilibrado de medidas de desempenho integradas a ações concretas relacionadas.

A utilização de *dashboards* ocorre quando é necessário fornecer uma visão geral de alto nível dos dados que permita descobrir tendências viáveis, já que fornecem informações em tempo real sobre o estado das variáveis mais importantes de um determinado sistema. Assim, a disponibilização deste tipo de ferramenta, para orientar os utilizadores, de forma simples, é uma

decisão que requer planeamento prévio sobre que tipo de interface é mais adequado num determinado contexto.

Uma das características mais notáveis de um banco de dados gráfico, o que também é crucial para a nossa implementação, é a sua eficácia em lidar com grandes volumes de informações em tempo real. O nosso sistema baseado nesse banco de dados gráfico altamente escalonável processa em tempo real questões simples e complexas, como "Qual é a temperatura em um dia/hora específico?", "Qual é o nível do pico de vibração e aceleração de um certo sensor na data/hora específica?".

6 Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Este subcapítulo tem como objetivo fazer uma descrição do problema e metodologia utilizada, apresentar os principais resultados obtidos da implementação dos sensores e as respectivas implicações no problema. Como referido anteriormente, existe uma grande competitividade na indústria e por este motivo a monitorização da condição é cada vez mais utilizada em conjunto com a tecnologia de *edge computing* para um aumento da produtividade, redução de paragens não planeadas

Um dos principais benefícios que a digitalização na Indústria 4.0 aliada às potencialidades da IoT pode trazer é a rastreabilidade dos processos e equipamentos. Monitorizar os ativos no chão de fábrica pode ajudar a detetar congestionamentos e falhas no processo produtivo o que permite executar medidas preventivas para corrigir ao invés de simplesmente adicionar equipamentos.

Através da manutenção preditiva, a digitalização também melhora a produtividade reduz custos. Hoje em dia, ao dotar as máquinas de sensores e *softwares* que forneçam informações sobre a sua saúde, permite recolher os dados e recorrendo a mecanismos de análise, detetar quando determinada máquina deixa de funcionar dentro dos parâmetros para ela estabelecida.

Para se alcançar todos estes potenciais benefícios, devemos ser capazes de tratar um fluxo de dados em tempo real. O volume de dados, no entanto, será elevado, pelo que o seu processamento o mais próximo possível da fonte onde são recolhidos é fundamental através do *edge industrial*.

Neste sentido, foi proposto desenvolver um sistema de integração de *edge computing* e IoT num equipamento fresadora CNC. Dentro deste equipamento, e após uma análise dos componentes e estrutura do equipamento, foram implementados sensores que no futuro poderão denotar falhas de componentes e durante os processos de maquinagem que comprometam o bom funcionamento da máquina.

Após se identificar os componentes a instrumentar, definiu-se como variáveis para avaliar a sua condição a vibração e a temperatura, com especial foco na vibração e partiu-se para a aquisição de sensores que pudessem tornar exequível todos os requisitos para a implementação.

Foram sugeridas algumas técnicas de análise de vibração: análise no domínio do tempo e da frequência para avaliar os sinais recolhidos com os sensores, através de sistemas de aquisição de dados e *software* especializados que poderão no futuro vir a ser aprofundadas na com maior desenvolvimento na área de vibrações mecânicas.

Deste modo foi proposto o modelo de funcionamento da figura 4-2.

Com base neste modelo de funcionamento e no problema presente foi proposta a solução da figura 4-6 para a comunicação de todos os dispositivos integrados na sensorização do equipamento para comunicar com a plataforma do INEGI.

Com a pesquisa realizada, foi possível concluir a implementação eficaz com um sistema final composto por um *cluster* de sensores inteligentes e dispositivos de diagnóstico e IoT requeridos.

Além dessa nova tecnologia de *edge computing* aplicada, o projeto de dissertação mostrou também, a utilização do Node-RED. Uma ferramenta de programação por fluxos que possibilita a redução da complexidade de desenvolvimento de novos projetos. A ferramenta possibilitou a criação da interface, além de poder vir a potencializar o desenvolvimento de novos projetos a partir deste.

Vale ressaltar que o uso de tecnologias como estas, não só ajudam a melhorar a forma como se desenvolve projetos de *software*, conferindo agilidade, flexibilidade e dinamismo, mas também contribui na difusão e crescimento de novas tecnologias.

Após a validação, percebeu-se que programar o *dashboard* com o Node-RED, necessita previamente de uma pesquisa por forma a ser possível familiarizar com esta forma de programação. Isto porque os conceitos que o Node-RED apresenta são diferentes do que aqueles que estou acostumado, incorrendo em erro e um aumento na curva de aprendizagem.

Por não se tratar do escopo desta dissertação, não foram revelados detalhes de programação em *Javascript* mais aprofundados.

Em matéria de custos, não serão reveladas informações dos valores envolvidos na solução aplicada.

6.2 Trabalhos Futuros

Como perspectiva de trabalhos futuros propõem-se:

- Com base no histórico dos dados e naquilo que vier a ser produzido em diversas operações de maquinaria após esta implementação analisar as vantagens económicas e de gestão da produção trazidas pelo sistema de sensorização incorporado;
- Para chegar a uma conclusão se a análise de vibração é uma ferramenta útil para manutenção preditiva num equipamento CNC, os dados podem ser analisados para encontrar padrões recorrentes e tendências crescentes na frequência e amplitude das vibrações, usando por exemplo o *software* de Matlab. Uma combinação da transformada rápida de Fourier (FFT) e as medidas estatísticas RMS e eventualmente Curtose poderão ser usadas para esta análise.

A FFT é usada porque é a maneira mais rápida de separar as frequências do sinal, o que poderá ajudar no diagnóstico. RMS e Curtose são formas tradicionais e básicas de monitoramento de condições e, como requerem pouca capacidade de computador, também são interessantes do ponto de vista da análise futura. Além disso, RMS foi introduzida neste projeto de dissertação visto ser a medida de monitoramento de condição recomendada pela ISO para motores e outros sistemas.

- Estender o raciocínio e metodologia desenvolvidos neste projeto a outros equipamentos;
- Implementação de algoritmos de *machine learning*;
- Prognóstico e estimativa para a vida útil restante das ferramentas da máquina (RUL).

Nesta dissertação foi feita uma pesquisa e uma breve síntese de análise técnica de vibrações com a perspectiva de usar estas vibrações futuramente para analisar o estado do equipamento e possíveis diagnósticos de falha.

6.2.1 Análise de vibração

O trabalho futuro pode concentrar-se principalmente na implementação de análise de vibração.

Se um diagnóstico pode ser feito quando fornecido apenas pelos dados de vibração, ainda é precoce afirmar neste momento. Por enquanto, a análise de vibração deve atuar apenas como uma entrada extra para acompanhar a manutenção e a condição do equipamento. Isso também significa que o uso da análise de vibração será submetido a tentativa e erro e todos os resultados de análise serão validados. Medir vibrações durante operações de maquinagem relevantes poderá ser provavelmente uma boa escolha.

Durante esse processo, o nível médio das medições mudará de forma acentuada eventualmente entre cada conjunto de medições (entre cada vez que um processo de maquinagem é executado) e torna mais fácil distinguir as alterações.

Outro benefício dessa abordagem é que a aquisição de dados e os cálculos não precisam de ser executados simultaneamente e continuamente. Embora uma solução em nuvem possa ser uma opção viável para armazenamento e tratamento de dados no futuro, provavelmente não será necessário durante a tentativa e erro de medições. Além disso, realizar medições apenas durante o mesmo trabalho eliminará uma variável que pode afetar o resultado, reduzindo a complexidade do problema.

6.2.2 *Machine Learning*

A implementação pode ser feita criando um modelo de *machine learning* para a detecção de falhas utilizando a aquisição de dados realizada nesta dissertação. Isso também pode incluir a construção de um modelo que pode ser usado para diagnóstico futuro.

Os cérebros humanos podem analisar e encontrar padrões nos dados e usá-los para tomar decisões qualificadas e importantes, mas quando a quantidade de dados atinge um certo nível, não somos capazes de processar e compreender todos esses dados com eficácia. O que a metodologia de *machine learning* faz quando é implementada é aprender a tirar conclusões de maneira semelhante a um ser humano, usando dados históricos para treinar determinados algoritmos. Um computador pode armazenar e analisar um grande volume de dados num tempo muito mais curto do que qualquer ser humano.

O fluxo de trabalho de desenvolvimento de um modelo de manutenção preditiva usando aprendizado de máquina pode ser resumido em 4 etapas:

1. Aquisição de dados (já implementado);
2. Pré-processamento de dados (já implementado);
3. Modelo de aprendizagem: O modelo pode ser treinado usando uma aprendizagem supervisionada ou uma aprendizagem não supervisionada. Usar uma aprendizagem supervisionada significa dizer ao modelo se os dados são bons ou maus por exemplo, definir limites para diferentes condições e/ou fornecer estimativas do modelo de vida útil restante real do equipamento. Aprendizagem não supervisionada significa que o próprio modelo encontra padrões ocultos ou estruturas intrínsecas em dados que são posteriormente classificados usando diferentes métodos de classificação.
4. Implementação do algoritmo de *machine learning*: A etapa final é deixar o modelo começar a funcionar implementando-o na plataforma onde será usado.

Integração de *Edge Computing* e IoT em equipamento de 5 eixos.

Integração de *Edge Computing* e IoT em equipamento de 5 eixos.

Referências

- [1] Santos, A., Da Silva, A., Automação Integrada, 2 ed. Publindústria, 2015.
- [2] Nath, C., 2020, “Integrated Tool Condition monitoring systems and their applications: a comprehensive review,” *Procedia Manuf.*, vol. 48, pp. 852–863.
- [3] Pires, J.N., Automação Industrial, 5ed. Lidel, 2012.
- [4] Pires, J.N., Robótica Industrial: INDÚSTRIA 4.0, 1ed. Lidel, 2018.
- [5] “Sistemas Ciber-Físicos (CPS) e Internet das Coisas (IoT).” From <https://www.inesctec.pt/pt/tecnologias/sistemas-ciber-fisicos-cps-e-internet-das-coisas-iot> consultado em 20/01/2021.
- [6] Drath, A., Horch, R., 2014, “Industrie 4.0: Hit or Hype?” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8 (2), pp. 56–58.
- [7] Li, G., Hou, Y. e Wu, A., 2017, “Fourth Industrial Revolution: technological drivers, impacts and coping methods”, *Chinese Geographical Science*, 27(4), pp. 626–637.
- [8] Bauer, W., Hämmerle, M., Schlund, S., Vocke, C., 2015, “Transforming to a hyper-connected society and economy – towards an “Industry 4.0.” *Procedia Manufacturing*, 3 (2015), pp. 417-424.
- [9] Kaivo-oja, J., Roth, S., L. Westerlun, L., 2017, “Futures of robotics. Human work in digital transformation” *International Journal Technology Management*, 73 (2017), pp. 176-205.
- [10] Jankowska, B., Götz, M., 2017, “Clusters and industry 4.0- do they fit together?” *European Planning Studies* 25(9), 25 (2017), pp. 1633-1653.
- [11] Melansen, T., “What Industry 4.0 Means for Manufacturers,” 2018. From <https://aethon.com/mobile-robots-and-industry4-0/>, consultado em 5/01/2021.
- [12] Adolph, S., Tisch, M., Metternich, J., 2014, “Challenges and approaches to competency development for future production” *Journal of International Scientific Publications*, 12 (2014), pp. 1001-1010.
- [13] Erol, S. Jäger, A., Hold, P., Ott, K., Sihm, W., 2016, “Tangible industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production”. *Procedia CIRP*, 54 (2016), pp. 13-18.
- [14] Shamim, S., Cang, S., Yu, H., Li, Y., 2016. “Management approaches for industry 4.0: a human resource management perspective” *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*.
- [15] Karre, H., Hammer, M., Kleindienst, M., Ramsauer, C., “Transition towards an industry 4.0 state of the LeanLab at Graz University of Technology”. *Procedia Manufacturing* (2017), pp. 206-213.
- [16] Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., Sihm, W., “Tangible industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production”. *Procedia CIRP*, 54 (2016), pp. 13-18
- [17] Kiel, D., Arnold, C., Voigt, K. I., “The influence of the industrial internet of things on business models of established manufacturing companies – A business level perspective” *Technovation*, 68 (2017), pp. 4-19.
- [18] Kiel, D., Müller, J., Arnold, C., Voigt, K. I., “Sustainable Industrial Value Creation: Benefits and Challenges of Industry 4.0”. *International Society for Professional Innovation Management (ISPIM)*, Vienna (2017), pp. 1-21.
- [19] Müller, J., Voigt, K. I., “Industrie 4.0 für kleine und mittlere Unternehmen” *Journal of Manufacturing Technology Management*, 3 (2016), pp. 28-30.
- [20] Nagy, J., 2019. “Az ipar 4.0 fogalma és kritikus kérdései – vállalati interjúk alapján. Vezetéstudomány” *Vezetéstudomány - Budapest Management Review*, 50 (1), pp 14–26.
- [21] De Sousa, A., De Sousa, J., Chiappetta, J., Filho, M., “Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations,” *Annals of Operations Research*, Springer, 270(1), pp. 273–286, 2018.

- [22] Löffler, M., Münstermann, B., Schumacher, T., Mokwa, C., Behm, S., 2016, "Insurers need to plug into the Internet of Things – or risk falling behind," Insurers need to plug into the Internet of Things—or risk falling behind, McKinsey & Company, from <https://www.mckinsey.com/industries/financial-services/our-insights/insurers-need-to-plug-into-the-internet-of-things-or-risk-falling-behind>, consultado em 05/01/2021.
- [23] McKinsey & Company, "Industry 4.0 after the Initial Hype: Where Manufacturers Are Finding Value and how they Can Best Capture it", (2016).
- [24] Bauer, H., Patel, M., Veira, J., 2015, "Internet of Things: Opportunities and challenges for semiconductor companies," McKinsey Insights, from <https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/internet-of-things-opportunities-and-challenges-for-semiconductor-companies>, consultado em 05/01/2021.
- [25] Awan, I., Younas, M., Naveed, W., "Modelling QoS in IoT Applications," in Network-Based Information Systems (NBIS), 2014, 17th IEEE International Conference on Network-Based Information systems, NBIS 2014, pp. 99-105.
- [26] Texas Instruments. (2017). "The Internet of Things: Opportunities & Challenges." https://www.ti.com/ww/en/internet_of_things/pdf/14-09-17-IoTforCap.pdf, consultado em 20/01/2021.
- [27] Moldando a quarta revolução Industrial, Klaus, S., 1ed. Levoir, 2019, cap. 7, pp-129.
- [28] Columbus, L. "Roundup of Internet of Things Forecasts and Market Estimates, 2016." From <https://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2016/11/27/roundup-of-internet-of-things-forecasts-and-market-estimates-2016/#290b6abb292d>, consultado em 22/01/2021).
- [29] Bauer, H., Patel, M., Veira, J., "Internet of Things: Opportunities and challenges for semiconductor companies," McKinsey Insights, 2015.
- [30] Davies, R., "The Internet of Things, Opportunities and challenges," European Parliamentary Research Service, 2015, EPRS - European Parliamentary Research Service.
- [31] Manyika, J., Chui, M., Bisson, P., Woetzel, J., "The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype," McKinsey Global Institute, Executive summary 2015.
- [32] Wopata, M., 2019, "5 Industrial connectivity trends driving the IT-OT Convergence". From <https://iot-analytics.com/5-industrial-connectivity-trends-driving-the-it-otconvergence>, consultado em 20/01/2021.
- [33] Lueth, K., "40+ Emerging IoT Technologies you should have on your radar" 2019. From <https://iot-analytics.com/40-emerging-iot-technologies-you-should-have-on-your-radar> consultado em 20/01/2021.
- [34] Grieves, M., Vickers, J., 2017, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer, pp. 85-113.
- [35] Glaessgen, E. H., Stargel, D. S., 2012, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. Structural Dynamics and Materials Conference - Special Session on Digital Twin, Honolulu, US" from <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120008178>, consultado em 20/01/2021.
- [36] Tuegel, E.J., Ingrassia, A.R., Eason T.G., 2011, "Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin" International Journal of Aerospace Engineering, volume 2011.
- [37] "What Is The Difference Between IT and OT?", 2019, from <https://www.coolfiresolutions.com/blog/difference-between-it-ot/>, consultado em 28/01/2021.
- [38] Rinaldi, S. "The IT/OT Network Divide" from <https://www.rtautomation.com/rta/blog/the-it-ot-network-divide> , consultado em 28/01/2021.
- [39] IoT Analytics, "5 Industrial connectivity trends driving the IT-OT Convergence". From <https://iot-analytics.com/5-industrial-connectivity-trends-driving-the-it-ot-convergence>, consultado em 20/01/2021).
- [40] "O que é o I/O LINK?", 2020, from <https://www.atec.pt/artigos-tecnicos/o-que-e-o-i-o-link.html>, consultado em 20/01/2021.

- [41] “Unified Architecture.” From <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua>, consultado em 21/01/2021.
- [42] “Introducing the MQTT Protocol - MQTT Essentials: Part 1”, 2015, from <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-1-introducing-mqtt> consultado em 21/01/2021.
- [43] “Publish & Subscribe - MQTT Essentials: Part 2”, 2015, from <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part2-publish-subscribe>, consultado em 21/01/2021).
- [44] “World Economic Forum Digital Transformation Initiative In collaboration with Accenture”, 2017, Executive Summary, from https://www.accenture.com/t20170116T084450_w/us-en/acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/WEF/PDF/Accenture-DTI-executive-summary.pdf , consultado em 20/01/2021).
- [45] “DIN SPEC 91345:2016-04 - Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0)”, 2016, from <http://blog.murrelektronik.com.br/rami4-0/> , consultado em 10/01/2021).
- [46] “Plattform Industrie 4.0 – RAMI 4.0 - a reference framework for digitalization.” https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.pdf?__blob=publicationFile&v=7 , consultado em 10/01/2021).
- [47] Lydon, B., “RAMI 4.0 Reference Architectural Model for Industrie 4.0.”, Intech, ISA International Society of Automation, from <https://www.isa.org/intech-home/2019/march-april/features/rami-4-0-reference-architectural-model-for-industr> , consultado em 10/01/2021).
- [48] Aydemir, A., Terzioğlu, Y., Akin, T., “A new design and a fabrication approach to realize a high performance three axes capacitive MEMS accelerometer”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 244 (2016), pp. 324-333.
- [49] Shaeffer, D. K., “MEMS inertial sensors: a tutorial overview”, *IEEE Communications Magazine*, 51 (4), 2013, pp. 100-109.
- [50] Chaudhury, B. S., Sengupta, M., Mukherjee, K. "Vibration monitoring of rotating machines using MEMS accelerometer", *International Journal of Scientific Engineering and Research*, 2 (9), pp. 11, 2014.
- [51] "Measuring Vibration with Accelerometers", National Instruments, 2017, from: <http://www.ni.com/white-paper/3807/> , consultado em 21/01/2021.
- [52] Looney, M., "An Introduction to MEMS Vibration Monitoring", Analog Devices, 2014, from <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/intro-to-mems-vibration-monitoring.html> , consultado em 21/01/2021.
- [53] Spence, Ed., "What You Need to Know About MEMS Accelerometers for Condition Monitoring", Analog Devices, from <https://www.analog.com/en/technical-articles/mems-accelerometers-for-condition-monitoring.html> , consultado em 21/01/2021.
- [54] Murphy, C., "Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application", Analog Devices, 2017, from <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/choosing-the-most-suitable-mems-accelerometer-for-your-application-part-1.html> , consultado em 21/01/2021.
- [55] Lu, Y.S., Wang, H.W., Liu, S. H., 2018, “An integrated accelerometer for dynamic motion systems.” *Journal of the International Measurement Confederation*, 125, pp.471-475.
- [56] Roorkee, I. T.,”NPTEL Mechanical Engineering courses: Vibration Control - Chapter 37: Vibration Measurement Techniques: Basics” from <https://nptel.ac.in/courses/112107088/37>, consultado em 28/01/2021.
- [57] Källström, E.,”Data Driven Condition Monitoring for Transmission and Axles,” Luleå University of Technology, Luleå, 2018.
- [58] Almeida, R., Vicente, S., Padovese, L., 2002, “New Technique for Evaluation of Global Vibration Levels in Rolling Bearings,” *Shock Vibrations*, vol. 9, pp. 225-234.

- [59] Swedish Standards Institute, SVENSK STANDARD SS-ISO 10816-3:2009: Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measure, Stockholm, SIS Förlag AB, 2009.
- [60] Jardine, S. K. A., Lin, D., Banjevic, D., 2006, “A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20 (7), pp. 1483-1510.
- [61] Dai, J., Chen, C.L.P., X, X-Y., Hu, P., “Condition Monitoring on Complex Machinery for Predictive Maintenance and Process Control,” 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Singapore, 2008.
- [62] Graney, B. P., Starry, K., 2012, “Rolling element bearing analysis.” *Materials Evaluation*, 70(1), pp.78-85.
- [63] Mehala, N., 2010, “Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis.” Ph. D Thesis, Electrical Engineering Department, National Institute of Technology, Kurushetra, India.
- [64] Relvas, C., *Controlo Numérico Computorizado - Conceitos fundamentais*, 4ed. Engebook, 2018, pp. 90-91.
- [65] IFM, <https://www.ifm.com/>, consultado regularmente.
- [66] WEIDMULLER, <https://www.weidmuller.pt/pt/home>, consultado regularmente.
- [67] BRUEL & KJAER, <https://www.bksv.com/en>, consultado regularmente.

ANEXO A: Normas

A.1 – Norma 13759

ISO/FDIS 17359:2002(E)

Annex A (informative)

Examples of condition monitoring parameters

Table A.1 — Examples of condition monitoring parameters by machine type

Parameter	Machine Type								
	Electric motor	Steam turbine	Aero gas turbine	Industrial gas turbine	Pump	Compressor	Electric generator	RIC engine	Fan
Temperature	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Pressure		*	*	*	*	*		*	*
Pressure (head)					*				
Pressure ratio			*	*		*			
Air flow			*	*		*		*	*
Fuel flow			*	*				*	
Fluid flow		*			*	*			
Current	*						*		
Voltage	*						*		
Resistance	*						*		
Input power	*				*	*	*		*
Output power	*	*	*	*			*	*	
Noise	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Vibration	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Acoustic techniques	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Oil pressure	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Oil consumption	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Oil (tribology)	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Torque	*	*		*		*	*	*	
Speed	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Length		*							
Efficiency (derived)		*	*	*	*	*		*	
* indicates condition monitoring measurement parameter applicable									

ANEXO B: Ligações elétricas

Elementos elétricos

Este anexo tem como objetivo fornecer informação de todos os elementos elétricos necessários ao funcionamento do sistema na integração do armário elétrico da máquina e dos componentes utilizados fixação na estrutura da máquina.

Componente	Entrada		Saída	Borne	Quantidade
L (fase) 230 V AC	1 Entrada		1 Fonte 24-28 V DC	878-7480	1
N (neutro)	1 Entrada		1 Fonte 24-28 V DC	878-7480	1
Disjuntor <i>Siemens B10</i>	2 Entradas 230 V alimentação Corrente de serviço: 10 A Quantidade de polos: 1P+N			Borne de ligação Terra - 4mm 1 via	1
Fonte de Tensão Industrial <i>Traco Power TSP 360-124</i>	115VAC <16 A	230 VAC <25 A	24 – 28 VDC 15.0 A 360 W		1
<i>Edge Computer MCM 100 Adlink</i>	6 - 36 VDC		(I/O) <i>Logic output low:</i> VOL = 0.8 V IIL = 0.2 mA max. <i>Logic output high:</i> VOH = 2.0 V IIH = 24 mA	-	1
Ligações Terra					
Terra (rede)	1			Terra	1
Fonte 24-28 V DC	1			Terra	1
Fusíveis					
<i>Edge Computer</i> (proteção a jusante)	1		1	(Borne porta-Fusíveis) Corrente nominal: 6,3A	2

A fonte de alimentação é um elemento fundamental, que disponibiliza energia para toda a instalação. Os componentes do sistema são todos alimentados por corrente contínua e, por isso, foi usada uma fonte que disponibiliza corrente deste tipo.

O principal fator diferenciador do Edge Computer do sistema diz respeito à tensão que necessita. Do ponto de vista elétrico, o Edge Computer possui dois circuitos, um de comando e

um de potência, através da entrada de alimentação. Esta entrada é constituída por três terminais. Dois destes são afetos à alimentação com uma entrada (6-36 VDC) e uma saída (GND) de 0 V.

Sendo este alimentado por uma tensão entre 6-36 V DC, e com um consumo de potência máxima de 35.2W, a fonte de tensão industrial revelou-se compatível com estas características.

Proteção dos elementos

- **Bornes**

Os bornes são pontos de ligação elétrica que facilitam a instalação elétrica de componentes num armário elétrico. A sua inclusão permite integrar a disposição dos componentes no armário existente da máquina.

É importante ter em conta que o número de bornes utilizados poderia ser maior, dependendo da disposição adotada para a integração no quadro elétrico da máquina e de possíveis constrangimentos na sua montagem já existentes de origem.

Para este efeito, a corrente elétrica da rede foi considerada como sendo um componente, uma fonte de alimentação 230 V AC. Os bornes utilizados são do tipo 878-7487 com apenas dois terminais (uma entrada e uma saída).

- **Disjuntor Siemens**

O fator relevante a ter em conta na escolha de um disjuntor é a sua corrente de disparo (corrente nominal), ou seja, o valor de corrente para o qual o disjuntor interrompe o circuito. Este valor terá de ser sempre superior à corrente de entrada do componente a proteger, acrescido de um fator de cerca de 10% para compensar flutuações da corrente

O disjuntor apresenta uma classe de disparo B (o valor de ajuste da proteção de curto circuito fica entre 3 a 5 x I_n). I_n = corrente nominal do disjuntor. Interruptor de acionamento manual (biestável) com proteção térmica e magnética (a proteção provoca a abertura do contacto elétrico).

À exceção do Edge Computer, todos os elementos são montados em calha DIN, e integrados no armário elétrico da máquina.

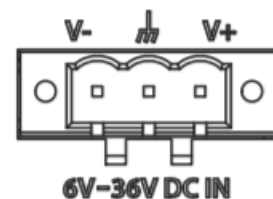


Figura 6.1 - Ligações entre o *Edge Computer* e a Fonte de Tensão e integração no armário da máquina.

Integração de *Edge Computing* e IoT em equipamento de 5 eixos.