



Avaliação da Maturidade Digital de um Caso de Estudo no Contexto da Indústria 4.0

Cristiana Vieira Alves Luís

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Química

Orientadores:

Doutor Renato Henriques de Carvalho

Professora Ana Maria de Figueiredo Brites Alves

Júri

Presidente: Professora Maria Joana Neiva Correia

Vogais: Professora Maria de Fátima Guerreiro Coelho Soares Rosa

Doutor Renato Henriques de Carvalho

Julho, 2020

Agradecimentos

Ao Doutor Engenheiro Renato Carvalho agradeço a oportunidade que me concedeu, o seu incansável apoio, esforço e tempo despendido no desenvolvimento e revisão deste trabalho. Agradeço sinceramente todo o conhecimento que me transmitiu.

À Professora Doutora Ana Maria Alves agradeço o empenho e disponibilidade que demonstrou, bem como todo o trabalho que teve com a revisão desta dissertação.

A todos os trabalhadores que me receberam na empresa agradeço toda a amizade e apoio que me deram ao longo do trabalho e toda a disponibilidade que demonstraram.

Às minhas colegas, Joana Rebanda, Rebeca Oliveira, Ana Rita Mendes, Ana Ferreira e Matilde de Portugal, que tive o privilégio de conhecer no contexto deste trabalho, pelo companheirismo e partilha de momentos de boa disposição. À Joana Rebanda agradeço especialmente toda a amizade, motivação e apoio que me deu ao longo de todo o trabalho.

À Marisa, por todo o apoio incondicional, por todas as palavras de encorajamento e motivação e por acreditar sempre nas minhas capacidades.

À minha mãe, ao meu irmão e à minha avó agradeço todo o amor e apoio que me deram ao longo de todo o meu percurso académico e todo o orgulho que sempre demonstraram por mim.

Resumo

A Indústria 4.0 refere-se à nova geração de sistemas industriais, caracterizados pela elevada integração, flexibilidade, eficiência e adaptabilidade aos objetivos estratégicos. Com a crescente globalização, competitividade de mercados e com os avanços tecnológicos emergentes, o desenvolvimento da Indústria 4.0 tornou-se a principal prioridade para o crescimento económico, pelo que o conceito de Indústria 4.0 deve ser gradualmente introduzido no tecido industrial.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar e promover a maturidade digital da indústria química em estudo, com o intuito de contribuir para a respetiva transição digital. A maturidade digital foi avaliada através de um inquérito aos colaboradores da empresa e da aplicação de um modelo de maturidade proposto. Dessa forma foi possível posicionar a empresa no nível de maturidade 1 (de 0 a 5).

No sentido de contribuir para um processo de produção mais inteligente e eficiente, propôs-se ainda o recondicionamento de três pontos críticos atuais. A primeira proposta incidiu na implementação de um sistema de monitorização e controlo *online*, em tempo real, de um processo de limpeza de oleaginosas. A segunda, na implementação de um espectrofotómetro NIR *inline* visando controlar e retificar, em tempo real, a qualidade de bagaços de soja e colza. A última proposta consistiu na implementação de uma estratégia de manutenção preditiva num equipamento considerado crítico para o processo de produção da empresa.

A análise económica aos investimentos permitiu concluir que a segunda proposta é a única que constitui um investimento rentável. A última proposta apresentou apenas uma rentabilidade condicionada.

Palavras-chave: Indústria 4.0, maturidade digital, oleaginosas, controlo de processos, manutenção preditiva

Abstract

Industry 4.0 is the new generation of industrial production systems, characterized by a high level of integration, flexibility, efficiency, and adaptability to the strategic goals. With the ever-increasing globalization, market competition, and emerging technologies, the development of Industry 4.0 became the top priority for economic growth. Hence, Industry 4.0 must be gradually introduced in industrial enterprises.

The purpose of the present work is to assess and promote the digital maturity of a company in the commodities sector. The digital maturity was assessed through a survey, followed by the application of a proposed maturity model. Through this approach, the company was determined to be at level 1, in a rank ranging from 0 to 5.

To contribute to a more intelligent and efficient production process, a revamping of three critical points was also proposed. The first proposal focused on the implementation of an online real-time monitoring and control system of the oilseed cleaning process. The second, in the implementation of an inline NIR spectrophotometer to control and rectify, in real-time, the quality of soy and rapeseed meal. The last proposal consisted of implementing a predictive maintenance strategy for a piece of equipment considered critical for the company's production process.

The economic analysis of the investments showed that the second proposal is the only one that represents a profitable investment for the company. The last proposal presented conditioned profitability.

Keywords: *Industry 4.0, Industry 4.0 readiness, oilseeds, process control, predictive maintenance*

Índice Geral

1.	Enquadramento e Motivação	1
2.	Indústria 4.0.....	1
2.1.	Tecnologias Fundamentais.....	3
2.1.1.	<i>Big Data</i> e Análise de Dados	3
2.1.2.	<i>Cloud</i> e <i>Edge Computing</i>	5
2.1.3.	Internet Industrial das Coisas.....	6
2.1.4.	Simulações Avançadas (<i>Digital Twin</i>).....	7
2.1.5.	Cibersegurança	8
2.2.	Outras Tecnologias Relacionadas	9
2.2.1.	Manufatura Aditiva	9
2.2.2.	Realidade Aumentada.....	9
2.2.3.	Robôs Autónomos.....	10
2.3.	Sistemas de Produção Ciber-Físicos.....	10
2.4.	<i>Smart Factory</i>	13
2.5.	Indústria 4.0 e Produção <i>Lean</i>	15
2.6.	Desafios à Implementação da Indústria 4.0.....	16
3.	A Indústria Química em Estudo	16
4.	Maturidade Digital da Indústria em Estudo	17
4.1.	Modelos de Maturidade Digital na Literatura	17
4.2.	Modelo de Maturidade Proposto.....	19
4.3.	Metodologia.....	23
4.4.	Resultados	24
4.5.	Conclusões e Linhas Gerais de Atuação.....	25
5.	Exemplos de Pontos Críticos Atuais.....	26
5.1.	Limpeza de Oleaginosas.....	27
5.1.1.	Funcionamento do Peneiro	27
5.1.2.	Controlo e Monitorização do Processo Atual.....	30
5.1.3.	Proposta de Recondicionamento do Processo de Limpeza de Oleaginosas.....	32
5.1.4.	Propostas Técnicas e Orçamentação.....	35
5.1.5.	Investimento e Análise Económica	36

5.2.	Retificação dos Parâmetros de Bagaços de Soja e Colza	37
5.2.1.	Processo de Preparação e Extração de Oleaginosas	38
5.2.2.	Metodologia de Controlo Atual.....	39
5.2.3.	Monitorização em Tempo Real dos Parâmetros dos Bagaços.....	42
5.2.3.1.	Ensaio Industriais	46
5.2.3.1.1.	Metodologia.....	48
5.2.3.1.2.	Resultados e Discussão.....	49
5.2.3.1.3.	Conclusões.....	52
5.2.3.2.	Propostas Técnicas e Orçamentação.....	52
5.2.4.	Investimento e Análise Económica	54
5.2.4.1.	Proveitos Económicos.....	54
5.2.4.2.	Análise de Rentabilidade do Projeto.....	55
5.3.	Manutenção Preditiva	57
5.3.1.	Estratégias de Manutenção e Equipamentos a Monitorizar	58
5.3.2.	Monitorização Contínua de Vibrações	62
5.3.3.	Aquisição de Dados	64
5.3.3.1.	Tipos de Sensores Disponíveis.....	64
5.3.3.2.	Localização dos Sensores	65
5.3.4.	Análise e Utilização de Dados	66
5.3.5.	Propostas Técnicas e Orçamentação.....	67
5.3.6.	Investimento e Análise Económica	69
5.3.6.1.	Proveitos Económicos.....	69
5.3.6.2.	Análise de Rentabilidade do Projeto.....	69
6.	Conclusões.....	71
7.	Proposta de Trabalhos Futuros.....	72
8.	Referências	74

Índice de Figuras

Figura 1 - Cronologia das Revoluções Industriais.	2
Figura 2 - Análise de dados. Etapas, funcionalidades e aplicações.	4
Figura 3 - Arquitetura de um sistema de automação e monitorização industrial, que inclui as tecnologias de edge e cloud computing para o processamento e armazenamento de dados.	6
Figura 4 - Arquitetura geral de uma aplicação de IIoT.	7
Figura 5 – Função do digital twin no controlo e otimização das operações de uma empresa industrial.	8
Figura 6 - Conceito de um CPPS.	11
Figura 7 Arquitetura “dos cinco C” de um Sistema Ciber-Físico.	12
Figura 8 Comparação de hierarquias de automação.	13
Figura 9 Integração vertical numa smart factory e horizontal entre smart factories.	14
Figura 10 - Cadeia de valor em que se insere a indústria química em estudo.	16
Figura 11 - Dimensões e sub-dimensões do modelo de maturidade digital proposto para a indústria química em estudo.	20
Figura 12 - Metodologia com três etapas para a aferição da maturidade digital da indústria química em estudo.	23
Figura 13 - Níveis de maturidade segundo as 5 dimensões do modelo de maturidade proposto.	24
Figura 14 - Resultados suplementares do modelo de maturidade proposto. n=11.	25
Figura 15 - Esquematização do funcionamento de um peneiro Combi Cleaner.	27
Figura 16 - Funcionamento da pré-aspiração de oleaginosas num peneiro Combi Cleaner.	28
Figura 17 – Esquematização do funcionamento dos crivos num peneiro Combi Cleaner. Funcionamento da pós-aspiração.	28
Figura 18 - Diagrama de blocos do funcionamento completo do peneiro tipo Combi Cleaner.	29
Figura 19 - Painel de controlo do peneiro Combi Cleaner.	30
Figura 20 - Amostras de grãos de soja e de sementes de colza à entrada do processo de limpeza.	31
Figura 21 – Desvio face à média aritmética da percentagem de oleaginosas perdidas para a corrente de impurezas face à quantidade total de oleaginosa no caudal de entrada no processo de limpeza.	31
Figura 22 – Desvio da percentagem de impurezas no caudal total de oleaginosas limpas (corrente de saída do processo), face à média aritmética.	32
Figura 23 – Princípio de funcionamento de um analisador de imagem dinâmica. Adaptado de [81].	34
Figura 24 - Esquematização da cadeia de controlo do processo de limpeza de oleaginosas.	35
Figura 25 - Esquematização do fluxo de informação atual e do pretendido.	37
Figura 26 - Diagrama de blocos simplificado da fábrica de óleos e bagaços.	38
Figura 27 - Análises NIR de amostras recolhidas com periodicidade horária, durante uma semana de laboração, para controlo do processo.	40
Figura 28 – Desvio, face à média, do teor de água do bagaço de soja, em armazém. Valores obtidos por análise de espectroscopia NIR a amostras recolhidas a cada turno entre 04/11/2018 a 17/11/2019.	40

Figura 29 – Desvio, face à média, do teor de fibra do bagaço de soja, em armazém. Valores obtidos por análise de espectroscopia NIR a amostras recolhidas a cada turno entre 04/11/2018 a 17/11/2019.	41
Figura 30 – Desvio, face à média, do teor de água do bagaço de colza, em armazém. Valores obtidos por análise de espectroscopia NIR a amostras recolhidas a cada turno entre 01/01/2019 a 13/11/2019.	41
Figura 31 – Desvio, face à média, do teor de fibra do bagaço de colza, em armazém. Valores obtidos por análise de espectroscopia NIR a amostras recolhidas a cada turno entre 01/01/2019 a 17/11/2019.	41
Figura 32 - Princípio de funcionamento de um espectrofotómetro NIR. Análise inline.	43
Figura 33 - Possíveis pontos de controlo dos parâmetros do bagaço na linha de produção da fábrica de óleos e bagaços.	43
Figura 34 - Esquematização da instalação de um espectrofotómetro NIR (1) no transportador sem fim TF1 e (2) à entrada do elevador de alcatruzes TF2.	44
Figura 35 - Esquematização da adaptação a efetuar à espira do transportador sem-fim para a instalação do analisador NIR.	45
Figura 36 – Diagrama de blocos da cadeia de controlo por feedback negativo para a retificação de um dos parâmetros dos bagaços.	46
Figura 37 - Esquematização da metodologia de controlo dos parâmetros dos bagaços.	46
Figura 38 - Esquematização de um modelo de caixa negra.	47
Figura 39 - Respostas do sistema em cadeia aberta, para o processamento de soja, às perturbações em degrau negativo no caudal de água introduzido no DTS. Ajuste de um modelo discreto de primeira ordem com atraso aos pontos experimentais.	50
Figura 40 - Respostas do sistema, para o processamento de colza, às perturbações em degrau negativo no caudal de água introduzido no DTS. Ajuste de um modelo discreto de primeira ordem com atraso aos pontos experimentais.	51
Figura 41 - Proveito económico em função do set-point estabelecido.	55
Figura 42 - Derivada dos proveitos económicos totais em função do set-point. Erro! Marcador não definido.	
Figura 43 - Valor atual líquido em função do set-point definido para a produção de bagaços de soja e colza.	56
Figura 44 – Taxa interna de rentabilidade em função do set-point definido para a produção de bagaços de soja e colza.	56
Figura 45 – Período de retorno do investimento em função do set-point definido para a produção de bagaços de soja e colza.	57
Figura 46 - Monitorização contínua de máquinas para a otimização da estratégia de manutenção (manutenção preditiva).	59
Figura 47 - Relação entre a criticidade dos equipamentos e a respetiva estratégia de manutenção mais adequada.	60

Figura 48 - Funcionamento interno de um redutor universal com três andares de redução. Esquematisação do redutor universal utilizado na indústria em estudo, com quatro andares de redução.	61
Figura 49 - Relação entre velocidade, aceleração e deslocamento a velocidade constante.....	63
Figura 50 - Transdutores de velocidade de bobina fixa ou de íman fixo	64
Figura 51 - Transdutor de aceleração (ou acelerómetro).	65
Figura 52 - Sensor de deslocamento.	65
Figura 53 - Esquemas dos pontos de medição de vibrações (A-J).	66
Figura 54 - Arquitetura geral de uma aplicação de um sistema de manutenção preditiva.....	67
Figura 55 - Valor atual líquido em função do custo de reparação do redutor.....	70
Figura 56 - Taxa interna de rentabilidade em função do custo de reparação do redutor.....	70
Figura 57 - Período de retorno do investimento em função do custo de reparação do redutor.	71

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Resumo e comparação das dimensões que constituem os diferentes modelos de maturidade analisados.	19
Tabela 2 - Contribuição percentual de cada dimensão para o nível de maturidade digital, segundo o modelo de maturidade proposto.	24
Tabela 3 - Comparação de métodos de análise de partículas [73][74][75][70][76].....	33
Tabela 4 - Resumo da análise económica preliminar efetuada.	36
Tabela 5 - Tabela de pontuações para a adequação de três locais distintos considerados para efetuar o controlo dos parâmetros dos bagaços. Verde – Bom; Amarelo – Razoável; Vermelho – Mau.	44
Tabela 6 - Parâmetros do sistema em cadeia aberta no processamento de soja obtidos graficamente e por regressão não linear (RNL).	50
Tabela 7 - Parâmetros do sistema em cadeia aberta no processamento de colza obtidos graficamente e por regressão não linear (RNL).	51
Tabela 8 - Desvio padrão amostral obtido para os valores correspondentes ao primeiro estado estacionário de cada ensaio efetuado.	52
Tabela 9 - Características técnicas das propostas obtidas pelos fornecedores A, B e C..	53
Tabela 10 – Resumo dos investimentos necessários para à implementação do controlo inline dos parâmetros dos bagaços de soja e colza.	53
Tabela 11 - Características técnicas das propostas obtidas pelos fornecedores A, B e C..	68
Tabela 12 – Resumo dos investimentos necessários para à implementação do controlo inline dos parâmetros dos bagaços de soja e colza	69
Tabela 13 - Indicadores de rentabilidade para um período de 8 anos, relativos à hipótese de não ocorrer avaria no equipamento monitorizado.	70

Lista de Abreviaturas

Indústria 4.0

CPPS – Sistemas de Produção Ciber-Físicos (*Cyber-Physical Production Systems*)

CPS – Sistema Ciber-físico (*Cyber-Physical System*)

HMI – Interface Homem-Máquina (*Human-Machine Interface*)

ICT – Tecnologias de Informação e Comunicação (*Information and Communication Technologies*)

IIoT – Internet Industrial das Coisas (*Industrial Internet of Things*)

IoT – Internet das Coisas (*Internet of Things*)

KDD – Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados (*Knowledge Discovery in Databases*)

M2M – Máquina-a-Máquina (*Machine-to-Machine*)

OT – Tecnologias Operacionais (*Operational Technologies*)

Maturidade Digital da Indústria em Estudo

ERP – Sistema de Planeamento de Recursos Corporativos (*Enterprise Resource System*)

KPI – Indicadores de Desempenho (*Key Performance Indicators*)

MES – Sistema de Execução de Manufatura (*Manufacturing Execution System*)

SCM – Sistema de Gestão da Cadeia de Valor (*Supply Chain Management*)

Exemplos de Pontos Críticos Atuais

BI – *Business Intelligence*

DIA – Análise de Imagem Dinâmica (*Dynamic Image Analysis*)

DLS – Difração de Luz Dinâmica (*Dynamic Light Scattering*)

DTS – Dessolventizador-Tostador-Secador

FOPTD – Modelo de um Sistema de Primeira Ordem com Atraso (*First Order Plus Time Delay*)

NIR – Espectroscopia no Infravermelho Próximo (*Near Infra-Red Spectroscopy*)

P&ID – Diagrama de Tubagens e Instrumentação (*Piping and Instrumentation Diagram*)

PLC – Controlador Lógico Programável (*Programmable Logic Controller*)

PRI – Período de Retorno do Investimento

RMS – Raiz do Valor Quadrático Médio (*Root Mean Square*)

RNL – Regressão Não Linear

SCADA – Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition*)

TIR – Taxa Interna de Rentabilidade

VAL – Valor Atualizado Líquido

Alguns termos presentes nesta dissertação não foram sujeitos a tradução da língua inglesa para a portuguesa pelo facto de estarem amplamente aceites, difundidos e até mesmo enraizados na comunidade científica.

1. Enquadramento e Motivação

Com a crescente globalização e competitividade de mercados e com os avanços tecnológicos emergentes, cada vez mais países estão a colocar as tecnologias relacionadas com a Indústria 4.0 como a principal prioridade para o crescimento económico [1]. A transformação digital significa novas oportunidades para muitas indústrias implementarem novas tecnologias que lhes permitem maximizar a eficiência, produtividade e flexibilidade e, conseqüentemente, as suas margens de lucro. Possibilita a produção de lotes cada vez mais pequenos de forma lucrativa, em resposta à atual procura crescente de produtos cada vez mais customizados. Ao fomentar uma gestão de recursos mais eficiente, permite uma produção industrial mais sustentável, com menor consumo energético e impacto no meio ambiente, que é atualmente bastante significativo. Simultaneamente, a transformação digital eleva o desafio da competitividade [2].

O conceito de Indústria 4.0 deve ser gradualmente introduzido no tecido industrial, permitindo a adaptação de sectores menos digitalizados e sem causar disrupções acentuadas na produtividade. Nesse sentido, as empresas devem começar por se posicionar em termos de maturidade digital, podendo de seguida definir um plano estratégico para a implementação dos sistemas digitais. O presente trabalho visa exatamente avaliar e promover a maturidade digital da empresa em estudo, com o intuito de contribuir para a definição de uma estratégia de transição.

A nova revolução industrial está em curso na Europa e no resto do mundo, pelo que todos os países e empresas terão de ajustar as suas estratégias de desenvolvimento industrial, de modo a evitarem um atraso tecnológico significativo para o seu desenvolvimento económico.

2. Indústria 4.0

Desde o advento da industrialização, os avanços tecnológicos têm levado a mudanças de paradigma no sector da indústria. O processo de industrialização teve início no Reino Unido e estendeu-se desde o fim do século XVIII ao início do século XIX (Figura 1, “1ª Revolução”). A emergência da mecanização veio substituir a agricultura pela indústria, como alicerce da economia da sociedade. A invenção da máquina a vapor, por James Watt, propulsionou a extração de grandes quantidades de carvão e o desenvolvimento de todos os processos de produção e comerciais. Outros domínios que se desenvolveram, como a produção de têxteis, a modelagem e a forja de metal, permitiram o desenho dos primeiros projetos para fábricas e cidades tal como as conhecemos hoje [3][4][5].

A segunda revolução industrial (Figura 1, “2ª Revolução”) dá-se praticamente um século mais tarde, no final do século XIX. A utilização de energia elétrica e de combustíveis derivados do petróleo dá, nesta altura, origem às linhas de produção em massa, primeiramente projetadas por Henry Ford [5]. Estes avanços foram possíveis através da reestruturação da investigação científica e do capital em torno de um modelo económico e industrial baseado nas então novas “grandes fábricas” e modelos de produção. Foi ainda neste contexto que surgiu, no Japão, em meados dos anos quarenta, a produção *lean*, originalmente designada por Sistema de Produção Toyota. O método de produção *lean* deu origem ao desenvolvimento de técnicas e ferramentas que permitiram tornar as linhas de produção

mais flexíveis e eficientes, através da eliminação de desperdícios e de atividades que não acrescentam valor ao produto final [6].

Na segunda metade do século XX surge a terceira revolução industrial (Figura 1, “3ª Revolução”). Nesta fase viu-se o advento da eletrónica, com o surgimento do transístor, do microprocessador e do autómato, e das tecnologias informáticas que provocaram um incremento da automação dos processos de fabrico e permitiram reduzir grandemente a quantidade de trabalho manual nas linhas de produção [4]. A terceira revolução industrial continua presente nos dias de hoje. No entanto, encontra-se numa fase de transição importante para numa nova era de industrialização – a quarta revolução industrial ou Indústria 4.0.

O termo “*Industrie 4.0*” surgiu pela primeira vez em 2011, em Hannover (Alemanha), e foi oficialmente apresentado em 2013 como uma iniciativa estratégica tomada pelo governo alemão para revolucionar a indústria através da integração das tecnologias de informação e comunicação (ICT) com as tecnologias operacionais (OT) [7][8]. Outras iniciativas, com o mesmo objetivo, mas com diferentes desígnios, seguiram-se em todo o mundo, como a “*Industrial Internet*” nos Estados Unidos, a “*Made in China 2025*” na China, a “*Industrie du Futur*” em França ou o “Programa Indústria 4.0” em Portugal [9][10][11].

O resultado desta integração das OT com as ICT é o desenvolvimento de uma nova geração de sistemas industriais caracterizados pela elevada integração, flexibilidade, eficiência na utilização de recursos e adaptabilidade aos objetivos estratégicos [12][13]. Na nova geração de sistemas industriais, que têm sido designados por “fábricas inteligentes” ou “*smart factories*”, as máquinas e dispositivos integram sistemas de produção ciber-físicos (CPPS) e possuem a capacidade de cooperar dinamicamente com humanos e entre si (interoperabilidade) utilizando a internet como meio de conectividade. Graças a tecnologias como *cloud* e *edge computing* (computação em nuvem), são ainda capazes de otimizar a operação de forma proactiva com base em análises preditivas e prescritivas que resultam da partilha e processamento de dados, em tempo real, recolhidos em linhas de produção, sistemas de logística e ao longo de todas as restantes atividades da empresa [7][14].

Enquanto a terceira revolução industrial incidiu principalmente na automação de máquinas e processos, a Indústria 4.0 assenta na digitalização de todas as atividades de uma organização e na integração, em ecossistemas digitais, de fornecedores, clientes e parceiros da cadeia de valor [15].



Figura 1 - Cronologia das Revoluções Industriais.

Apesar de ser frequentemente associada à indústria da manufatura, a Indústria 4.0 possui amplas aplicações em diversos setores industriais [16][17]. A sua concretização significará uma reestruturação das arquiteturas empresariais atuais e a criação de novos modelos de negócio, dando origem a cadeias de valor mais eficientes e sustentáveis [17].

2.1. Tecnologias Fundamentais

As tecnologias necessárias à implementação da Indústria 4.0 são introduzidas nos próximos pontos. Estas incluem *big data* e análise de dados, *cloud* e *edge computing*, internet industrial das coisas, simulações avançadas e cibersegurança [1]. É explicitado o papel que cada uma destas tecnologias desempenha no funcionamento de sistemas ciber-físicos de produção, que constituem o conceito principal de uma *smart factory*.

2.1.1. *Big Data* e Análise de Dados

Com os desenvolvimentos tecnológicos que resultaram na maior acessibilidade e disponibilidade de sensores, sistemas de aquisição de dados e redes informáticas, a natureza competitiva da indústria atual força mais empresas a implementarem métodos de produção com tecnologias de ponta. Consequentemente, o crescente uso de sensores e de máquinas em rede tem resultado na geração contínua de grandes volumes de dados, geralmente de vários tipos, que são designados por *big data* [18].

Os dados recolhidos durante o processo de produção trazem transparência e rastreabilidade às operações, através da aplicação de técnicas de análise dos mesmos. A análise de *big data* tem vindo, por isso, a tornar-se num componente crítico do ambiente industrial moderno, e é um alicerce fundamental no conceito de Indústria 4.0. Esta análise refere-se à aplicação de métodos de descoberta de conhecimento em bases de dados (KDD) de forma a extrair informação e conhecimento destes vastos conjuntos de dados recolhidos [1][19][20].

O processo de descoberta de conhecimento compreende as fases de pré-processamento de dados, *data mining* e pós-processamento de conhecimento [20].

O pré-processamento visa caracterizar os dados de forma a prepará-los para a fase seguinte. Inclui vários processos: a integração, a limpeza, a seleção e a transformação dos dados. A integração consiste em reunir dados provenientes de múltiplas fontes numa base de dados coerente. Uma integração cuidada poderá reduzir o número de inconsistências e redundâncias no conjunto de dados final, permitindo a precisão e velocidade de todo o processo seguinte. Posteriormente, é efetuada a limpeza dos dados, que respeita à remoção de inconsistências e/ou correção de erros, seguida da seleção de dados relevantes à fase seguinte e da sua transformação, o que inclui, entre outros, a remoção de ruído [20].

Na fase de *data mining* utilizam-se algoritmos específicos para a extração de padrões dos dados. Os dois principais objetivos desta fase são a descrição e a previsão, através de [20]:

- Classificações, que consistem na identificação de modelos (ou funções) que descrevam e distingam classes de dados e na sua aplicação, de forma a prever a classe de novos dados

adquiridos. Nesta etapa aplicam-se métodos de *machine learning*, nomeadamente redes neuronais, árvores de decisão, *support vector machines*, redes bayesianas, entre outros;

- Regressões, para a previsão de valores de variáveis dependentes a partir de uma ou mais variáveis independentes;
- Regras de associação, i.e., o estabelecimento de correlações entre variáveis; e
- *Clustering*, que visa identificar um conjunto finito de categorias que descreva um conjunto de dados.

A última fase consiste no pós-processamento de conhecimento, cujo objetivo é avaliar, validar e consolidar o conhecimento extraído. A interpretação, recorrendo, por exemplo, à visualização de padrões obtidos ou à tradução de padrões considerados úteis para formas que sejam de fácil compreensão, são modos de efetuar a avaliação dos resultados a que se chegou, de forma a garantir que são fiáveis e estatisticamente significativos [20].

Na Figura 2 apresentam-se algumas das funcionalidades e aplicações da análise de dados.

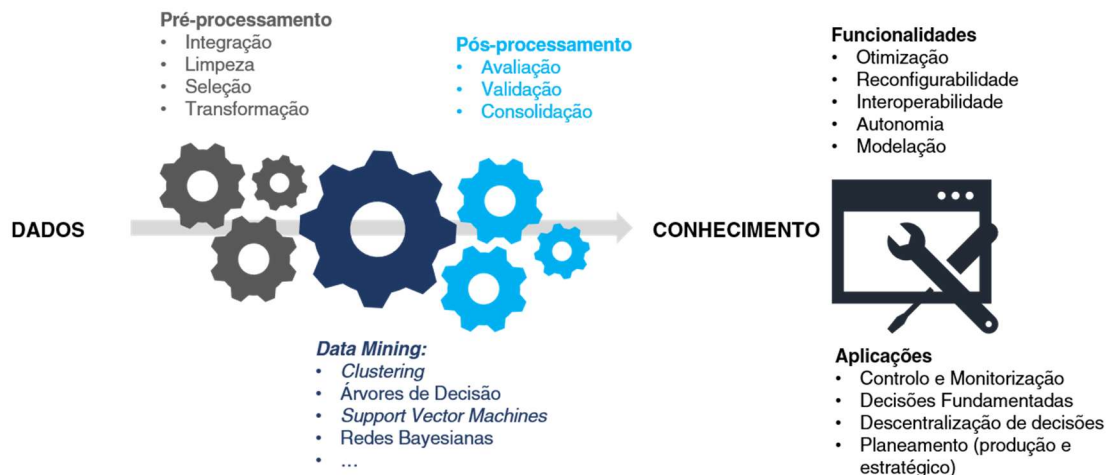


Figura 2 - Análise de dados. Etapas, funcionalidades e aplicações. Adaptado de [21].

O objetivo essencial da análise de *big data* é aumentar a produtividade através da redução de custos sem que se comprometa a qualidade do produto [19]. A abordagem tradicional à análise de dados compreende cinco áreas de aplicação principais [22]:

- análise da qualidade dos produtos, de forma a correlacionar a qualidade com parâmetros processuais e assim otimizar a qualidade final;
- análise de falhas, para aferir a(s) sua(s) causa(s) e prevenir que os mesmos eventos venham a repetir-se;
- análise das atividades de manutenção, para otimizar programações de manutenção e maximizar o tempo de atividade (também designado por *uptime*);
- análise do planeamento da produção, para melhorar, nomeadamente, a capacidade utilizada e a eficiência de recursos; e
- análise do planeamento estratégico, de forma a melhorar a relação com clientes e fornecedores e aumentar as vendas, por exemplo, através da análise das tendências de mercado.

Geralmente, esta abordagem assenta no processamento manual, ou *ad-hoc*, de conjuntos de dados específicos, que permite analisar determinados aspetos operacionais em situações específicas [22]. No entanto, a sua aplicação contínua e em tempo real requer a implementação de tecnologias de processamento e análise de *big data* de forma a criar um ambiente integrativo e, assim, otimizar o processo de forma contínua e mais eficiente [22]. Com o processamento de *big data* industrial é também possível implementar novas soluções de manutenção preditiva, que aumentam a fiabilidade dos sistemas de produção [23].

2.1.2. **Cloud e Edge Computing**

A quantidade crescente de informação industrial digital gerada pelas empresas requer uma plataforma para armazenar, transmitir, processar e analisar os dados [24]. A computação em nuvem, ou *cloud computing*, tem mostrado ser a tecnologia mais adequada para alcançar este fim, uma vez que providencia uma infraestrutura dinâmica e flexível para acomodar recursos computacionais e fornecê-los como um serviço, sob necessidade do cliente [25].

Segundo o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) dos E.U.A., a computação em nuvem é “um modelo para permitir o acesso ubíquo, conveniente e sob demanda a um conjunto compartilhado de recursos de computação configuráveis (*resource pooling*), que podem ser rapidamente provisionados e libertados com o mínimo esforço de gerenciamento ou interação com o provedor de serviços” [26]. A computação em nuvem pode ser providenciada segundo três (principais) modelos de serviço [27]:

- *Infrastructure as a Service* (IaaS) – as empresas utilizam os recursos computacionais que necessitam sem a necessidade de implementar, gerir ou manter o *data center* (*hardware*);
- *Platform as a Service* (PaaS) – as empresas podem usufruir das ferramentas que a plataforma *cloud* oferece (*hardware* e máquinas virtuais) para criar, acomodar e implementar aplicações de forma mais eficiente sem terem de gerir ou configurar sistemas operativos, *middleware* e sistemas de *runtime*;
- *Software as a Service* (SaaS) – as empresas apenas usufruem de *software* sob-demanda, sem a necessidade de gerir e manter todas as infraestruturas físicas ou virtuais inerentes.

Estes modelos de serviço oferecem a capacidade de processamento e armazenamento de dados de forma escalável e as empresas industriais podem, inclusive, optar pelo modelo de serviço que melhor se adequa às respetivas necessidades [28].

Como se mostra na Figura 3, a computação em nuvem permite, de facto, a congregação, gestão, armazenamento e análise de *big data* industrial para inferir informação útil à otimização da produção. No entanto, a tecnologia de *edge computing*, por sua vez, tem ganho atenção notável, porque permite o processamento de dados em tempo real, um requerimento que é mandatário ao controlo e monitorização operacional [28]. Em contraste com a computação em nuvem, em que o armazenamento e análise de dados é efetuado numa plataforma central, o *edge computing* permite a filtragem (*data filtering*) e análise de dados numa plataforma mais próxima das fontes de dados, i.e., de forma

distribuída. Desta forma, é possível poupar em termos de largura de banda e capacidade de armazenamento, garantindo-se simultaneamente a latência necessária ao controlo do processo de produção [28][29].

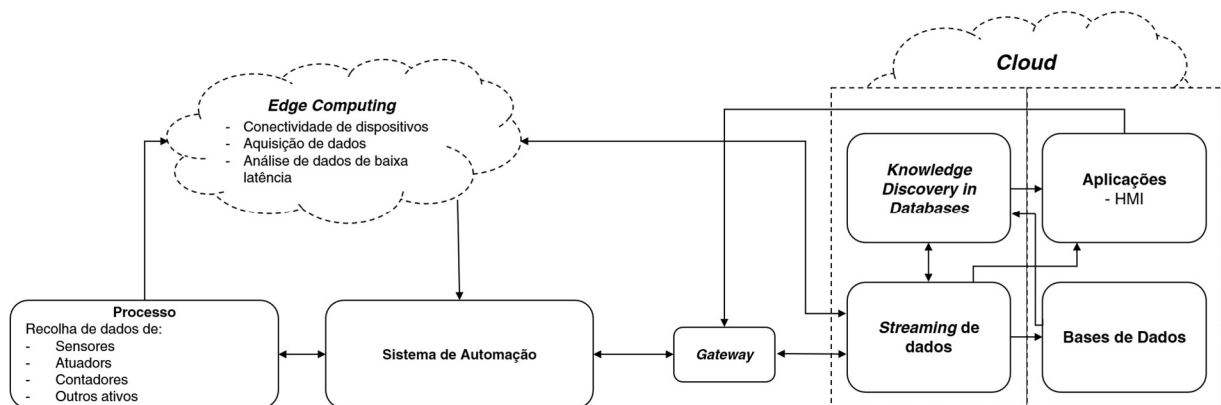


Figura 3 - Arquitetura de um sistema de automação e monitorização industrial, que inclui as tecnologias de *edge* e *cloud computing* para o processamento e armazenamento de dados. Adaptado de [28].

As tecnologias de *cloud* e *edge computing* são, portanto, pré-requisitos à concretização da análise e gestão de *big data* industrial de forma eficiente, no contexto de uma *smart factory* [30]. A combinação de sistemas de automação industrial de ponta, juntamente com a internet industrial das coisas, deverá tornar-se na norma para a automação industrial de acordo com as proponentes da Indústria 4.0 [28].

2.1.3. Internet Industrial das Coisas

Desde o advento da internet que a conectividade entre computadores se tornou uma realidade. Já a internet móvel (sem fios) permitiu a comunicação entre pessoas a grandes distâncias. Ambas redefiniram a forma através da qual as pessoas interagem e rapidamente começaram a influenciar os sistemas industriais modernos [31].

Com a introdução do conceito de internet das coisas (IoT) em 1999, a internet passou a conectar também dispositivos em aplicações de consumidor, domésticas, negociais e industriais [32]. A IoT consiste na extensão da conectividade em rede e da capacidade computacional a objetos, dispositivos, sensores e itens que tradicionalmente não são considerados computadores. Estes objetos inteligentes passam a estar ubiquamente conectados a ferramentas remotas de comunicação, análise e gestão de dados, requerendo intervenção humana mínima para gerar ou trocar informação [32].

Uma das características-chave da Indústria 4.0 é a utilização da internet para estabelecer a comunicação entre pessoas e máquinas e entre máquinas nos processos de produção [31]. Quando o conceito de internet das coisas é transposto para o contexto industrial designa-se por internet industrial das coisas (IIoT). Esta pode definir-se como “um sistema que consiste em objetos inteligentes, ativos ciber-físicos, em rede, tecnologias de informação associadas e, opcionalmente, plataformas *cloud* ou de *edge computing*, que possibilitam a recolha, o acesso, a análise, a comunicação e a troca de informação relativa a um processo, produto ou serviço dentro do ecossistema industrial com o objetivo de otimizar e acrescentar valor à produção. A otimização pode consistir em melhorar a entrega de um

produto ou serviço, aumentar a produtividade, reduzir os custos de produção bem como o consumo energético e reduzir o tempo de produção de um lote” [32].

A Figura 4 apresenta uma arquitetura genérica para a implementação de IIoT.

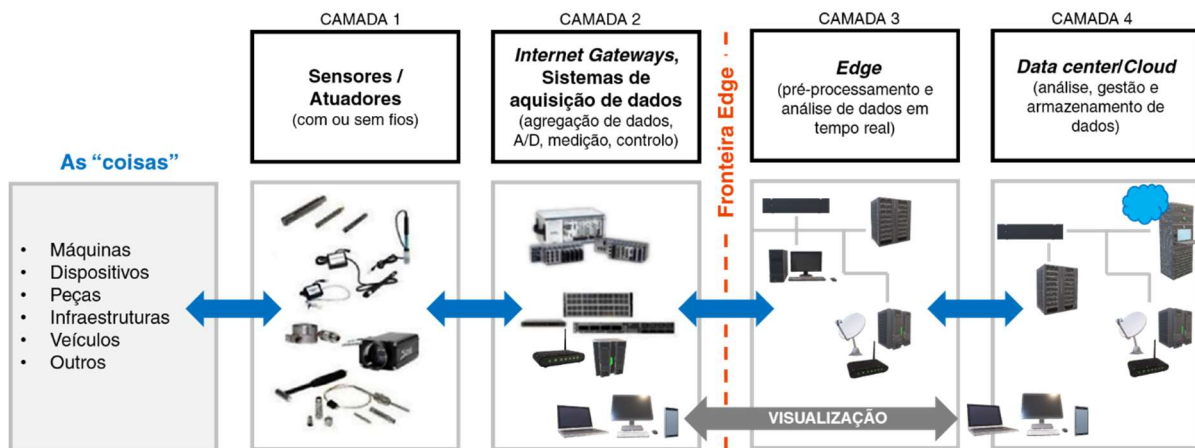


Figura 4 - Arquitetura geral de uma aplicação de IIoT. Adaptado de [32].

A base da IIoT consiste na infraestrutura que permite estabelecer a comunicação entre sensores (formando uma rede de sensores), controladores, atuadores, dispositivos com identificação por radiofrequência e outros dispositivos inteligentes da linha de produção, capazes de recolher dados acerca da envolvente ou interagir com a mesma [33]. A comunicação entre máquinas é designada por *machine-to-machine* (M2M) e é fundamental para que os equipamentos possam ser interoperáveis.

Como mostra a Figura 4, a IIoT estabelece também a ligação entre a aquisição, o armazenamento, o processamento e a visualização de dados, sendo, por sua vez, fundamental para estabelecer uma rede de sistemas inteligentes integrados. Desbloqueando o acesso ao *cloud* e *edge computing*, a IIoT contribui ainda para uma estrutura de controlo distribuído (introduzida no ponto “2.3. Sistemas de Produção Cíber-Físicos”), uma característica necessária ao conceito de *smart factory*. A IIoT é, por conseguinte, uma tecnologia fundamental à concretização da Indústria 4.0 [17].

2.1.4. Simulações Avançadas (*Digital Twin*)

Durante anos, as simulações têm constituído uma ferramenta importante para a otimização em sistemas de produção e de logística, uma vez que permitem entender ou prever o comportamento do sistema modelado de forma dinâmica, em contraste com a abordagem estatística mais tradicional [30][34]. Atualmente, o uso da modelação e simulação em ciência e engenharia encontra-se bem estabelecido. Em engenharia, as técnicas de modelação e simulação permitem reduzir custos, encurtar os ciclos de desenvolvimento e aumentar a qualidade dos produtos [34].

Com a Indústria 4.0, que propõe a utilização de inteligência artificial para otimizar o controlo de processos, torna-se necessária uma nova abordagem às técnicas de modelação e simulação [34]. Esta nova abordagem é representada pelo conceito de *digital twin*. Este conceito pode definir-se como uma representação virtual de um ativo (produto, máquina, serviço ou outro ativo intangível), que altera as suas propriedades, condições e comportamentos através de modelos, dados e informação. Os *digital twins* não são, porém, apenas dados. Incluem também algoritmos que descrevem e otimizam a

sua contraparte física, otimizando o sistema de produção (através da alteração de parâmetros, por exemplo) com base nos dados recolhidos por sensores e outras máquinas inteligentes [35]. Como mostra a Figura 5, e por definição, o processo físico e o virtual encontram-se totalmente integrados, *i.e.*, uma alteração no objeto físico surte uma alteração no objeto virtual e vice-versa [35]. Cria-se desta forma um mecanismo de controlo por *feedback*, que consiste na base dos sistemas de produção ciber-físicos [34].

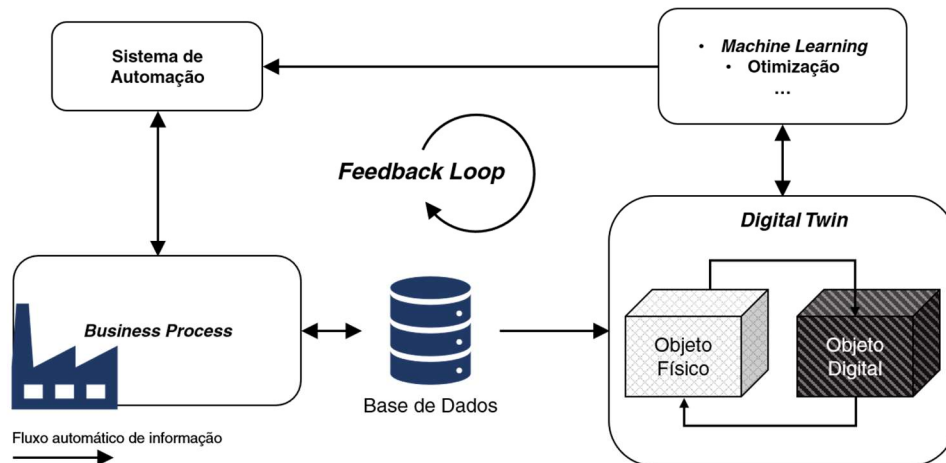


Figura 5 – Função do *digital twin* no controlo e otimização das operações de uma empresa industrial. Adaptado de [34] e [35].

Através do controlo operacional otimizado, combinado com capacidades de *machine learning* avançadas, o *digital twin* pode, por exemplo, ser utilizado para identificar potenciais problemas na sua contraparte física. Atuando em paralelo com um processo físico, este pode evidenciar imediatamente um possível erro ou falha numa máquina real através do desvio entre o desempenho da máquina e o comportamento do modelo. Esta informação pode ser utilizada para parar a máquina e efetuar manutenção ou para compensar, automaticamente, a redução da sua performance sem abrandar ou parar a produção [34]. Os *digital twins* oferecem oportunidades de estimular e otimizar o sistema de produção também nos aspetos logísticos, contribuindo, por exemplo, para a otimização do planeamento da produção através de assunções estatísticas.

Desta forma, as simulações avançadas são uma ferramenta importante na concretização das *smart factories*, no sentido em que alicerçam o controlo operacional e o planeamento estratégico, aumentando a competitividade, produtividade e eficiência das empresas industriais [35].

2.1.5. Cibersegurança

Com a recolha e comunicação de dados de forma intensiva, a necessidade de proteger sistemas industriais críticos aumenta significativamente [36][37].

Os ciberataques podem ter impactos destrutivos nos sistemas de produção e no contexto negocial, podendo colocar em causa o funcionamento de infraestruturas críticas. Consequentemente, a cibersegurança é um pré-requisito à implementação das tecnologias em causa [37]. Com os desenvolvimentos das comunicações em rede, e particularmente em sistemas de rede móvel, a utilização de protocolos de comunicação fidedignos (através de assinaturas digitais e certificados) e

de algoritmos de encriptação é importante para garantir a segurança das empresas. Não só em termos de proteção da informação, mas também, e nomeadamente, em termos de segurança dos sistemas de produção [1].

Cada vez mais empresas estão a desenvolver e a implementar sistemas de cibersegurança interna [1]. Ainda que as soluções em causa possam ser dispendiosas, o custo total é compensatório considerando os potenciais efeitos negativos dos ciberataques [38].

2.2. Outras Tecnologias Relacionadas

Outras tecnologias emergentes como manufatura aditiva, realidade aumentada ou robôs autónomos, são complementares ao desenvolvimento da Indústria 4.0, nomeadamente no sector da manufatura [1].

2.2.1. Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva consiste em produzir objetos tridimensionais diretamente a partir de modelos digitais, pela sobreposição (ou adição) de camadas consecutivas de material até formar o objeto final. Como matérias-primas, podem ser utilizados líquidos, pós ou folhas e são frequentemente constituídos por materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos [37].

Os sistemas e materiais para a manufatura aditiva têm-se desenvolvido significativamente nos últimos anos e o seu crescimento deverá continuar no futuro. A manufatura aditiva representa um grande potencial para melhorar a flexibilidade e a eficiência da produção [31]. Por um lado, porque pode ser utilizada para produzir pequenos lotes de produtos customizados com *designs* complexos [36]. Esta elevada flexibilidade foi evidenciada recentemente no contexto da pandemia de COVID-19, quando indústrias de vários setores adaptaram rapidamente a sua produção para fabricar viseiras e assim apoiar o combate ao vírus. Por outro lado, por utilizar apenas os materiais que constituem o produto final, é um método extremamente eficiente na utilização de recursos, comparativamente à manufatura subtrativa [37].

Com a disponibilidade de novos materiais e com melhoramentos na precisão das máquinas de impressão em 3D, cada vez mais indústrias irão implementar esta tecnologia na sua produção [1].

2.2.2. Realidade Aumentada

A realidade aumentada é definida como uma tecnologia interativa que permite a integração entre o mundo virtual e os seus utilizadores, enquanto o primeiro é utilizado como um componente da envolvente real, enaltecendo a interação entre homem e máquina. Pode ser utilizada em várias aplicações pela combinação de gráficos gerados por computador e objetos físicos [38].

Os sistemas de realidade aumentada alavancam uma variedade de serviços. Por exemplo, no contexto da manutenção, os trabalhadores poderão receber instruções acerca de como montar ou substituir uma peça enquanto olham para o sistema que necessita de reparação, tornando tais procedimentos mais eficientes [36].

2.2.3. Robôs Autônomos

Os robôs são tipicamente utilizados nas indústrias de manufatura para resolver tarefas complexas que não podem ser facilmente executadas por humanos. Várias interfaces homem-máquina criam uma relação próxima de cooperação entre o robô e o humano na linha de produção [38].

A capacidade de colaboração com operadores humanos consiste num benefício único para os sistemas de manufatura [1]. Ao colaborarem e lidarem com situações complexas, a inteligência artificial dos robôs permite que se tornem mais flexíveis e eficientes [38].

Estes equipamentos são cada vez mais utilizados na indústria da manufatura para incrementar o nível de automação e reduzir os custos de produção e, por isso, os robôs autônomos são uma tecnologia que está a ser rapidamente desenvolvida e implementada [1].

2.3. Sistemas de Produção Ciber-Físicos

Os sistemas ciber-físicos (Cyber-Physical Systems – CPS) são a unidade mais elementar do conceito de Indústria 4.0 [30] [31][37][39][40], sendo inclusive frequentemente considerados sinónimos [9][31][41].

Um sistema ciber-físico é um sistema que conecta, via internet, uma infraestrutura física (dispositivos ou máquinas com eletrónica embutida) a uma camada virtual de recursos computacionais avançados que possibilitam a partilha, o acesso e o processamento de *big data* e informação em tempo real [42][43][44].

A capacidade de trocar dados através da IoT é a característica fundamental dos CPS. A comunicação entre os seus componentes físicos, como sensores, atuadores ou outras máquinas ou instrumentações, permite a interoperabilidade com pouca ou nenhuma intervenção humana (M2M) [45]. A comunicação M2M permite ainda a sincronização e a integração de informação, enquanto o acesso à internet desbloqueia serviços de acesso, processamento (*cloud e edge computing*) e modelação de dados em tempo real, garantindo o retorno de informação processual útil ao controlo otimizado da infraestrutura física [14][17][37].

Consequentemente, os campos de aplicação destes sistemas são inúmeros, incluindo manufatura, controlo de processos, produção e distribuição de energia, transportes terrestres e aeroespaciais, dispositivos médicos e construção civil [1][2][46].

Os sistemas de produção ciber-físicos são uma especificação dos CPS aplicada à produção industrial. Através de sensores inteligentes, da IIoT e da análise de *big data*, os CPPS (Figura 6, “Conceito de um CPPS”) otimizam a produção industrial tornando-a mais autónoma e descentralizada [47][48].

Os sensores são utilizados para estabelecer a ligação entre o processo de produção e o domínio virtual do CPPS (ver Figura 6). O estado atual de uma parte, máquina ou processo é transferido para o domínio virtual para dessa forma derivar informação processual, armazená-la em bases de dados e utilizá-la como base para modelos dinâmicos que podem ser adaptados a situações reais, i.e., na execução do *digital twin* [42].

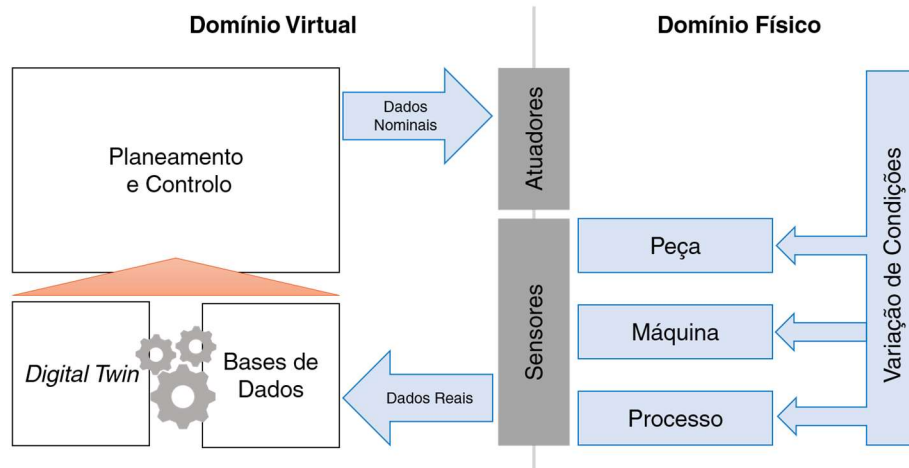


Figura 6 - Conceito de um CPPS. Adaptado de [49].

Uma vez que os CPPS se encontram, ainda, num estágio inicial de desenvolvimento, é importante definir, de forma clara, uma estrutura funcional destes sistemas que facilite o seu desenvolvimento e implementação em aplicações industriais. Propõe-se, de seguida, a designada “arquitetura dos cinco C” (ver Figura 7) [2][18][46][50][51]:

1. Conexão Inteligente

Adquirir dados precisos e confiáveis por parte das máquinas e dos respetivos componentes é o primeiro passo no desenvolvimento de um CPPS. Os dados podem ser diretamente medidos através de sensores ou obtidos de outras fontes de informação, como os sistemas de planeamento de recursos corporativos (ERP), sistemas de execução de manufatura (MES) ou de gestão da cadeia de valor (SCM). A este nível, existem dois fatores a considerar. Por um lado, há que ter em conta os vários formatos possíveis para os dados recolhidos e consequentemente uma metodologia adequada e eficaz para a sua gestão e transferência para um servidor de dados central. Por outro, é crucial a seleção de sensores adequados, em termos de tipologia e especificação, de forma a não comprometer a fiabilidade do conhecimento derivado pelo sistema [2][18].

2. Conversão de dados em informação

É fundamental que informação valorizável seja inferida dos dados recolhidos. Nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidas ferramentas e metodologias para atingir este fim. Nomeadamente, o *edge computing*, ferramenta através da qual se aplicam técnicas de *machine learning*, tais como algoritmos inteligentes de análise para o prognóstico e gestão da condição de ativos. Através da estimativa da sua condição e da restante vida útil, o segundo nível da arquitetura de um CPPS permite tornar as máquinas auto-conscientes e aumentar a produtividade da operação, reduzindo o tempo de paragens não planeadas [18][52]. Estes algoritmos podem ser aplicados não só a dados processuais mas também a dados relativos à gestão comercial e corporativa de uma empresa [2].

3. Ciberespaço

O ciberespaço atua como um *hub* central de dados, cuja infraestrutura consiste numa *cloud*. Os dados são enviados para esta a partir de todas as máquinas. Uma vez possuindo dados suficientes, há que aplicar métodos específicos à sua análise (como o *clustering* em *machine learning*), de forma a extrair informação que forneça um melhor conhecimento sobre o estado individual e relativo de cada

máquina integradora da rede. Esta análise permite, juntamente com a análise de históricos, estimar o comportamento futuro da maquinaria [18].

4. Cognição

Este nível caracteriza-se pela representação da informação inferida acerca do sistema monitorizado a usuários especializados, através de interfaces homem-máquina (HMI), para que possa ser interpretada, o que contribui para uma tomada de decisões mais acertadas [18][48].

5. Configuração

O nível de configuração consiste no feedback de informação do ciberespaço ao processo físico e atua como um controlo de supervisão que permite à maquinaria ser reconfigurável e adaptável de forma autónoma. Este nível atua ainda como um sistema de controlo de resiliência, para aplicar ao sistema monitorizado decisões corretivas e preventivas que terão sido formuladas nos níveis anteriores [18].

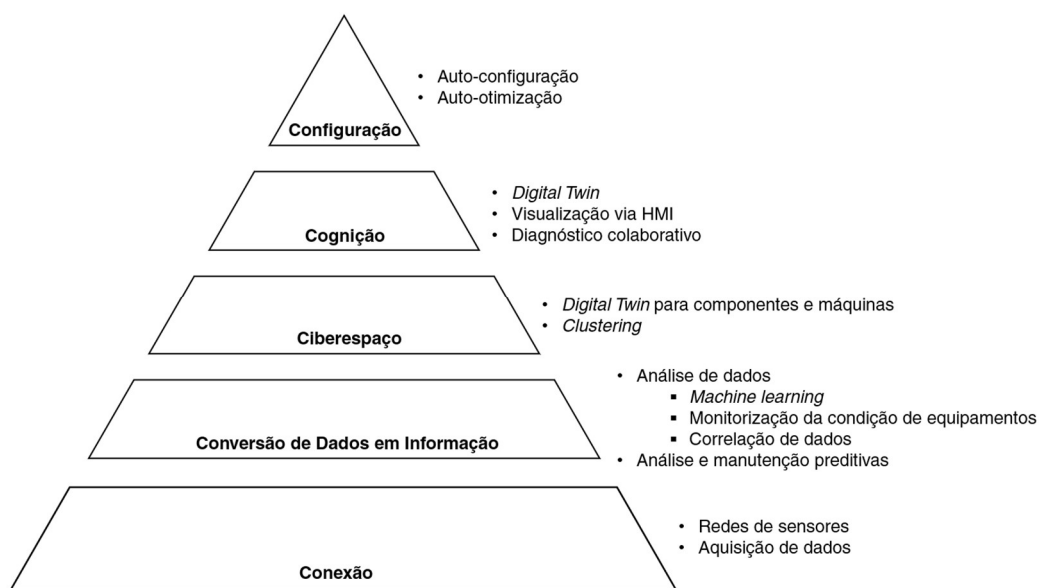


Figura 7 - Arquitetura “dos cinco C” de um Sistema Ciber-Físico. Adaptado de [50].

Ao contrário dos sistemas embutidos tradicionais (sistemas com capacidade de processamento e memória i.e., uma combinação de *hardware* e *software* [53]), que são concebidos como dispositivos independentes, os CPPS foram desenvolvidos para funcionarem em rede [7]. Esta característica provoca uma disrupção na hierarquia tradicional de controlo e gestão (Figura 8, “Hierarquia de Controlo”) em que a aquisição de dados é feita na linha de produção e estes são direcionados para os níveis de gestão e planeamento, e as decisões e ordens de planeamento fluem dos níveis superiores para os inferiores.

Os CPPS originam um esquema de controlo descentralizado (Figura 8, “Controlo baseado em CPPS”) [48].

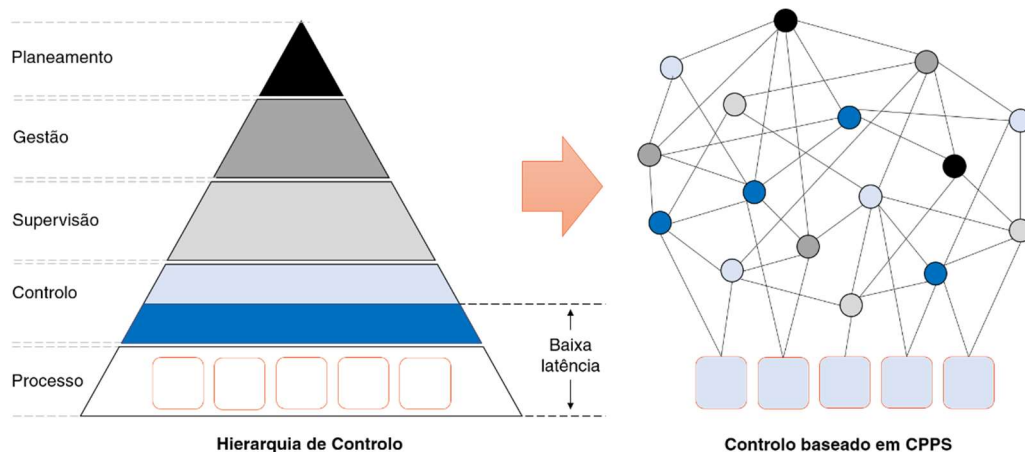


Figura 8 - Comparação de hierarquias de automação. À esquerda, a representação dos níveis hierárquicos de automação tradicionais. À direita, o esquema de controlo descentralizado baseado na utilização de CPPS. Adaptado de [48].

Num esquema de controlo descentralizado, os ativos (como unidades de produção, sistemas de logística e recursos humanos) encontram-se diretamente conectados através de tecnologias de comunicação (*smart networking*), o que permite a acessibilidade a informação de forma recíproca e contribui consequentemente para um controlo mais eficiente dos mesmos [7][27][51].

Através da integração de CPS na produção, logística e serviços nas práticas industriais atuais é possível transformar as fábricas de hoje em fábricas inteligentes com um potencial económico significativo [18].

2.4. Smart Factory

A produção e gestão industrial envolve, dentro dos limites de uma fábrica, vários subsistemas físicos e de informação. Estes subsistemas existem em níveis hierárquicos diferentes, como mostra a Figura 8. A informação é muitas vezes retida entre estes subsistemas, sendo a sua continuidade e consistência difíceis de garantir. Para além disso, as linhas de produção apresentam geralmente pouca flexibilidade em termos de variabilidade do produto final [9][40][55].

De forma a resolver as ineficiências supramencionadas, a Indústria 4.0 propõe a integração destes subsistemas hierárquicos de forma a transformar fábricas tradicionais em fábrica inteligentes (*smart factories*), cuja produção se caracteriza como altamente automatizada, flexível e eficiente na utilização de recursos [9][40][55]. Esta integração é possível graças à implementação de sistemas ciber-físicos, que constituem a base tecnológica de uma *smart factory* [9][31][47]. Estas, por sua vez, constituem o objeto central da Indústria 4.0 [56].

A estrutura funcional de uma *smart factory* assemelha-se, por isso, à de um CPPS [9][57]. A sua estrutura física é constituída por equipamentos inteligentes (como sensores, atuadores e maquinaria) que trocam informação colaborativamente entre si através da IIoT, de forma a atingirem um objetivo que é comum a todo o sistema. A IIoT é, por sua vez, a infraestrutura que, para além de permitir a comunicação entre os equipamentos, também estabelece a ligação da camada física com um ciberespaço responsável pelo armazenamento e processamento de dados. Por fim, uma infraestrutura de supervisão e controlo conecta as pessoas à fábrica através de HMI, onde estas podem visualizar e

aceder a estatísticas, aplicar diferentes configurações ou executar tarefas de manutenção e diagnóstico, mesmo que remotamente, através da internet [9].

A concretização de uma *smart factory*, enquanto conceito de fábrica altamente automatizada e inteligente, pressupõe três tipos de integração: vertical, horizontal e *end-to-end* [1].

A integração vertical (ver Figura 9) refere-se, como referido anteriormente, à integração de informação entre os vários subsistemas hierárquicos da empresa, e.g. nível operacional (linhas de produção), controlo da produção, gestão ao nível do negócio e planeamento ao nível da corporação, tornando a produção mais flexível, reconfigurável e descentralizada [31].

A integração horizontal, por sua vez, diz respeito ao relacionamento inter-organizacional ao longo da cadeia de valor de um produto (ver Figura 9). Através da comunicação M2M entre *smart factories* (entre CPPS), as empresas podem formar um ecossistema automatizado, eficiente e cooperativo, no qual todas as partes laboram em prol da criação de valor para o consumidor final [31].

A integração *end-to-end* consiste, por fim, na integração das várias fases do ciclo de vida de um produto, desde o desenvolvimento à análise de dados gerados na fase de utilização e à reciclagem, através da recolha e processamento de dados relativos a cada fase. Este tipo de integração permite melhorar a qualidade, diminuir o tempo necessário desde o desenvolvimento de um novo produto até à sua colocação no mercado e identificar as características que criam valor para o cliente [31].



Figura 9 - Integração vertical numa *smart factory* e horizontal entre *smart factories*. Adaptado de [58].

Os sistemas de produção inteligentes devem, assim, compreender as seguintes características ou princípios [14][51]:

- Interoperabilidade – pessoas, máquinas e sistemas ciber-físicos de produção trocam informação de forma transparente através da IIoT;
- Capacidade de operar em tempo real – aquisição e processamento de dados (*big data*) de forma instantânea (através de *edge computing*), permitindo a tomada de decisões em tempo real;
- Virtualização – os dados processuais recolhidos por redes de sensores inteligentes são aplicados em modelos virtuais do processo (*digital twins*), contribuindo para a rastreabilidade e monitorização eficiente de todo o processo, mesmo remotamente;
- Descentralização – os CPPS possuem autonomia e capacidade de negociar tarefas com os restantes sistemas, descentralizando a tomada de decisões;

- Modularização – a implementação de sistemas modulares contribui para a flexibilidade da produção.

Apesar das novas técnicas e tecnologias e da sua integração assumirem um papel importante na concretização de *smart factories*, estas não são o foco, são sim um meio para atingir um fim – melhorar a eficiência, competitividade, produtividade e criar de novas oportunidades de negócio.

2.5. Indústria 4.0 e Produção Lean

Nas últimas décadas, a produção industrial ocidental foi caracterizada pela produção e gestão *lean*. Desta perspetiva, a implementação da Indústria 4.0 significa a integração de novas tecnologias nos sistemas de produção *lean* existentes [56].

O sistema de produção *lean* é também designado por produção *Toyota*, por ter sido desenvolvido pela *Toyota Motor Corporation* nos anos setenta. A produção *lean* integra, na sua filosofia de gestão, um conjunto de métodos e ferramentas que visam especificar o valor para o cliente e assim eliminar todas as formas de desperdício (conceito do termo japonês *muda*), manter a produção em modo contínuo (preferencialmente sob uma estratégia *pull*) e evoluir no sentido de melhoria contínua (conceito do termo japonês *kaizen*) [8][56].

A sua eficácia e simplicidade tornaram a produção *lean* na norma dos sistemas de produção, sendo os seus princípios vastamente aceites na indústria desde o seu advento mais pronunciado, no início dos anos noventa. Já nessa altura, emergiram as primeiras abordagens à integração da tecnologia de automação com a produção *lean*, designada por automação *lean*. Porém, atualmente, surgem novas áreas para a aplicação da automação *lean* graças ao potencial das tecnologias da Indústria 4.0 [59].

Por exemplo, a integração vertical, horizontal e *end-to-end* são conceitos propostos pela Indústria 4.0 que vêm contribuir para um sistema *pull* mais eficiente, permitindo minimizar o custo total da produção. A integração *end-to-end*, através da análise de dados (*big data*) relativos à fase de utilização de um produto, permite ainda, especificamente, facilitar a identificação das características que acrescentam valor para o cliente, facilitando a identificação e eliminação de atividades que constituem desperdícios [8]. A análise de *big data* é um conceito que contribui também para o melhoramento contínuo e em tempo-real do processo de produção e da gestão de ativos [60].

Outro exemplo é através da implementação de CPPS [59]. Os CPPS permitem a identificação imediata de falhas ou imperfeições em equipamentos ou produtos, sendo por isso uma nova ferramenta que permite um aumento de eficiência do *jidoka*, um dos métodos mais importantes da produção *lean* que visa a produção sem defeitos através da paragem do processo para a correção de falhas ou imperfeições. O *andon* (que significa “lanterna de papel” em japonês), é um dos principais elementos do *jidoka* e consiste num código de cores (verde, amarelo e vermelho) que informa visualmente os operadores sobre o estado da produção. Com a utilização de dispositivos móveis inteligentes, os operadores podem ser notificados em tempo real da ocorrência de um erro e da localização do mesmo, uma informação que o *andon* não pode fornecer [59][61].

A integração das tecnologias 4.0, que estão, de uma forma geral, associadas a investimentos significativos, é especialmente vantajosa onde os métodos de produção *lean* não satisfazem (ou não

completamente) os requerimentos atuais. Por outro lado, os riscos da implementação da Indústria 4.0 podem ser diminuídos em sistemas de produção que possuem uma metodologia *lean* já estabelecida. Tal sucede porque a produção *lean* é mais normalizada, mais rastreável e mais restringida a atividades que são essenciais, comparativamente com outros tipos de organização [59]. A produção *lean* pode, assim, contribuir para a implementação da Indústria 4.0 [8]. Por sua vez, a Indústria 4.0 constitui um novo conjunto de ferramentas (digitais) *lean*, permitindo alcançar um novo nível de eficiência para os objetivos que esta filosofia de produção representa [62].

2.6. Desafios à Implementação da Indústria 4.0

À medida que as empresas avançam no sentido da transformação digital, enfrentam desafios complexos de natureza científica, tecnológica, económica, política e social, na implementação das tecnologias da Indústria 4.0 [31]. Para além da implementação das tecnologias mencionadas anteriormente para a concretização das *smart factories*, os desafios vão desde a reestruturação das arquiteturas empresariais e das infraestruturas de ICT à necessidade de introdução de novas aptidões em termos de recursos humanos.

A normalização de sistemas e a construção de arquiteturas de referência são aspetos cruciais à integração vertical e horizontal das empresas [31]. Várias normas, como os de comunicação (ou semânticos, que são necessários à interoperabilidade) e de segurança, são mandatórias.

É importante definir normas, modelos de contrato, acordos, auditorias e outros métodos de gestão da atividade empresarial de forma a estabelecer quadros regulamentares que facilitem o controlo e gestão de dados, de empresas e das respetivas relações negociais [31].

3. A Indústria Química em Estudo

A indústria química em estudo é uma empresa do setor das *commodities*. A sua atividade assenta no processamento de oleaginosas (grão de soja e semente de colza) para a produção de biocombustíveis (combustíveis líquidos renováveis), bagaços de soja e colza para incorporação em ração animal e produtos químicos para uso industrial.

A Figura 10 apresenta as atividades mais relevantes do caso de estudo, na cadeia de valor em que se insere.

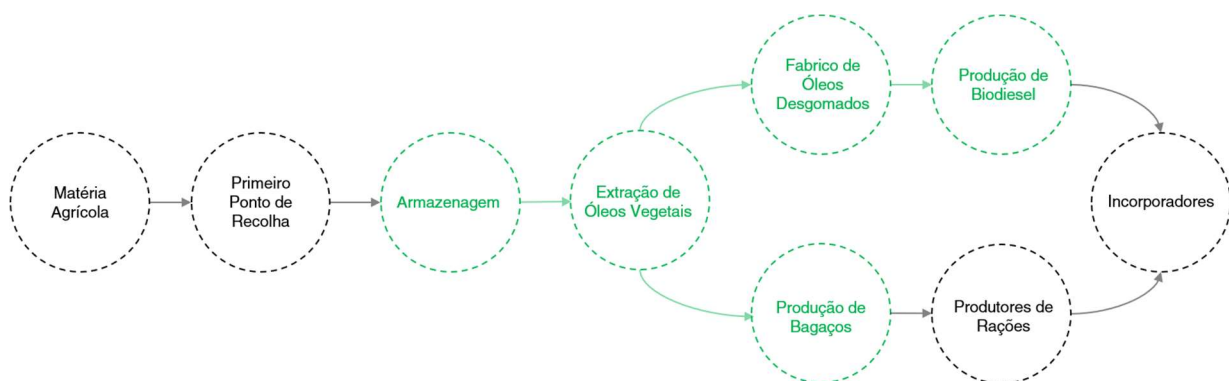


Figura 10 - Cadeia de valor em que se insere a indústria química em estudo.

4. Maturidade Digital da Indústria em Estudo

Os modelos de maturidade têm vindo a ser utilizados por empresas e organizações quer como uma ferramenta para o melhoramento contínuo quer como instrumento para a avaliação (própria ou por terceiros) de pessoas, processos ou objetos em variados domínios [63]. Estes modelos pretendem avaliar, qualitativa ou quantitativamente, a capacidade de alcançar determinados objetivos [63][64]. Constituem uma das ferramentas mais utilizadas para avaliar a maturidade de uma empresa em termos de Indústria 4.0, permitindo o seu posicionamento no processo de transformação digital e a identificação do potencial associado [64][65]. Neste contexto, entenda-se “maturidade” como o estado de avanço ou desenvolvimento das condições internas e externas de uma empresa que suportam os conceitos fundamentais da Indústria 4.0 [66]. Esta avaliação fornece às empresas a base para traçar um caminho para o objetivo pretendido, permitindo identificar e priorizar projetos e oportunidades de transformação digital que acrescentem valor [65].

4.1. Modelos de Maturidade Digital na Literatura

Apesar de existir cada vez mais investigação sobre a Indústria 4.0, existe uma lacuna no desenvolvimento e utilização de modelos de maturidade que avaliem o seu estado de implementação, no sentido em que não existe um modelo *standard* para cada setor industrial [64].

Dos modelos encontrados na literatura, explicitam-se os quatro considerados mais relevantes, por fornecerem detalhes suficientes sobre a sua estrutura e conteúdo que permitam a respetiva análise e comparação [66].

- **IMPULS - Industrie 4.0 Readiness (2015)**

O modelo de maturidade “IMPULS - *Industrie 4.0 Readiness*” consiste numa ferramenta de auto-avaliação (questionário) *online*. As empresas podem avaliar a sua maturidade segundo seis dimensões (ver Tabela 1) [67]. Estas dimensões foram baseadas na definição de Indústria 4.0, dos autores, e foram especificadas através de *workshops* com 289 representantes de empresas (do setor da engenharia mecânica) que já possuíam algum grau de experiência com tecnologias da Indústria 4.0. Estes *workshops* permitiram identificar, através de questionários, os indicadores-chave que, na visão dos representantes, se relacionam diretamente com o sucesso na implementação dos conceitos da Indústria 4.0 [67]. Cada dimensão foi dividida em sub-dimensões. A maturidade de cada dimensão foi definida como a pontuação mais baixa obtida de entre as várias sub-dimensões correspondentes, cujo respetivo cálculo da maturidade não é especificado. O nível de maturidade final da empresa é a média ponderada das maturidades de todas as dimensões [67]. A determinação dos fatores de ponderação foi efetuada através dos *workshops* supramencionados, em que os representantes inquiridos avaliaram a contribuição relativa de cada dimensão para a maturidade digital global de uma empresa. A maturidade global da empresa é classificada segundo 6 níveis (de 0 a 5, em que 0 é o mais baixo e 5 o mais elevado) [67].

O questionário deste modelo contém 23 questões, sendo as três primeiras de carácter geral, que visam identificar o setor (a escolha é limitada a engenharia mecânica ou manufatura) e o tamanho da

empresa em termos de número de trabalhadores e receitas anuais. O modelo devolve, para além dos resultados dos níveis de maturidade (das várias dimensões e global), propostas de ação para a evolução da empresa em cada dimensão avaliada, bem como a comparação do resultado obtido com os de outras empresas [67].

Este modelo é direcionado a empresas do setor da manufatura, pelo que a sua aplicabilidade é limitada.

- **Industry 4.0 / Digital Operations Self-Assessment (2016)**

A consultora PricewaterhouseCoopers propõe um modelo de maturidade que permite às empresas avaliarem o seu nível de maturidade através de um questionário de autoavaliação *online* com 33 questões principais (e 4 questões suplementares acerca do tipo de indústria, região, país e receita anual) cuja resposta é dada numa escala de Likert, de 1 a 5 [68].

O resultado devolvido consiste num nível de maturidade global entre 1 e 4 (em que 1 corresponde ao nível inferior e 4 ao superior) e em níveis de maturidade para cada uma das suas seis dimensões (ver Tabela 1), representados num diagrama de Kiviat (teia ou radar). No entanto, não são fornecidos quaisquer detalhes acerca dos cálculos inerentes a estes resultados nem acerca da formulação do modelo [68].

- **Industry 4.0 Maturity Model (2016)**

Schumacher *et al.* propõem um modelo que avalia a maturidade digital de uma empresa em 5 níveis (em que 1 corresponde ao nível de maturidade mais baixo e 5 ao mais elevado), segundo 9 dimensões (ver Tabela 1), através de um questionário com 62 itens. Cada questão é respondida numa escala de Likert de 1 a 5 [66]. A maturidade de cada dimensão resulta da média ponderada de cada item que a constitui. De forma a determinar os fatores de ponderação, os 123 inquiridos foram convidados a classificar as questões quanto ao nível de relevância, numa escala de 1 (irrelevante) a 4 (muito relevante). Deste inquérito resultaram 23 respostas. No entanto, os fatores de ponderação não são fornecidos [66].

O resultado do modelo é um “relatório de maturidade” que inclui a prescrição de medidas de ação, bem como um diagrama de Kiviat que representa os níveis de maturidade obtidos para cada dimensão [66].

A formulação deste modelo assentou na pesquisa e revisão sistemática da literatura bem como em entrevistas com especialistas, seguindo-se a modelação de conceitos e definição das diferentes dimensões, e por fim a validação do modelo através de duas aplicações práticas. A descrição do modelo não explicita os 62 itens que constituem o questionário, nem as respetivas ponderações.

- **Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy (2018)**

Ustundag *et al.* propõem um modelo de maturidade digital que avalia a maturidade em 4 níveis (de 0 a 3, em que 0 é o nível mais baixo e 3 o mais elevado) e segundo 3 dimensões (ver Tabela 1), que contêm um total de 13 sub-dimensões [37]. A maturidade é avaliada através de um questionário com 68 itens, cujas respostas são de carácter quantitativo e às quais é atribuída uma classificação entre

0 e 3 [37]. A maturidade de cada sub-dimensão é dada pela média das cotações das questões correspondentes. Por sua vez, a maturidade da dimensão é dada pela média das maturidades das sub-dimensões. A maturidade global corresponde à maturidade mínima obtida de entre as respetivas dimensões [37]. Os resultados do modelo são o nível de maturidade global e os níveis de cada dimensão, representados num diagrama de Kiviat.

Na Tabela 1 comparam-se as diferentes dimensões dos modelos de maturidade analisados.

Tabela 1 – Resumo e comparação das dimensões que constituem os diferentes modelos de maturidade analisados.

IMPULS - Industrie 4.0 Readiness	Industry 4.0 Maturity Model	Industry 4.0 / Digital Operations Self-Assessment	Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy
Estratégia e Organização	Estratégia	Organização e cultura	Estratégia e Organização
	Cultura		
	Liderança		
Produtos Inteligentes	Produtos	Modelos de negócio e portfólio de produto e serviços	Produtos Inteligentes e Serviços
Colaboradores	Recursos Humanos	Arquitetura de ICT	Smart Business Process
Fábricas Inteligentes	Clientes	Conformidade e segurança	
Serviços <i>Data-Driven</i>	Conformidade	Acesso ao mercado e clientes	
Operações Inteligentes	Operações	Cadeias de valor, processos e sistemas	

Através da análise da Tabela 1, é possível observar as semelhanças entre os quatro modelos, em termos de conteúdo. A contribuir para a semelhança está o facto de os modelos “*Industry 4.0 Maturity Model*” e “*Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy*” serem formulados através de uma abordagem que visa a extensão ou adaptação de modelos já existentes [66].

O modelo “IMPULS – *Industrie 4.0 Readiness*” é baseado num conjunto de dados abrangente e as dimensões, itens e níveis de maturidade são descritos com detalhe. O modelo é cientificamente bem fundamentado e a sua estrutura e resultados são expostos de forma transparente. Os restantes oferecem relativamente menos informação sobre o respetivo processo de desenvolvimento e as suas dimensões.

4.2. Modelo de Maturidade Proposto

A visão de Indústria 4.0 e o caminho a percorrer para a sua concretização difere de empresa para empresa. Estas definem os seus próprios objetivos a curto e longo prazo com base no seu contexto, histórico e *statu quo* [67]. Para além disso, existem tecnologias ou conceitos da Indústria 4.0 que podem considerar-se inadequadas ou irrelevantes, dependendo do setor industrial em causa. Por exemplo, o conceito de peças ou dispositivos inteligentes, que se podem guiar autonomamente e rastrear em tempo real ao longo da linha de produção, ou a recolha de dados relativos à fase de utilização de um produto, de forma a criar novos serviços e modelos de negócio, são exemplos de

conceitos que não possuem homólogo numa indústria química. Por outro lado, os modelos de maturidade digital encontrados na literatura são, de uma forma geral, maioritariamente direcionados para empresas do setor da manufatura, o que cria a necessidade de formular um modelo que seja adequado à indústria química em estudo.

Da análise dos modelos existentes na literatura, é possível identificar uma estrutura comum que permite abordar de forma eficaz os conceitos fundamentais ao desenvolvimento da Indústria 4.0. Nestes modelos, a maturidade é avaliada de 6 a 9 dimensões, classificada segundo 4 a 6 níveis e os resultados numéricos são convenientemente representados em diagramas de Kiviat.

No modelo proposto, que consiste numa derivação dos modelos supra-analisados, a aferição da maturidade digital é efetuada segundo 5 dimensões e 6 sub-dimensões (ver Figura 11).



Figura 11 - Dimensões (anel interior) e sub-dimensões (anel exterior) do modelo de maturidade digital proposto para a indústria química em estudo.

As dimensões foram definidas da seguinte forma:

Estratégia e Cultura - A dimensão “Estratégia e Cultura” pretende aferir o estado de implementação e operacionalização (através de indicadores) de uma estratégia para a Indústria 4.0, bem como de que forma é feita a gestão da tecnologia na empresa.

Automação da Produção - Esta dimensão avalia o nível de integração e automação digital da produção através da recolha e utilização de dados de produção e arquitetura dos sistemas informáticos atuais.

Integração de Sistemas - Avalia o nível de integração vertical (dos departamentos) e horizontal da empresa (com clientes, fornecedores e parceiros de negócio), bem como os requerimentos técnicos que daí advêm: utilização de serviços *cloud* e segurança de comunicações.

Análise de Dados - Averigua em que medida são utilizados métodos/algoritmos para análise do volume de dados gerado pela empresa.

Recursos Humanos - Avalia a existência ou não de qualificações necessárias às tecnologias da Indústria 4.0 (informática, automação e análise de dados).

A empresa avaliada pode ser classificada segundo 6 níveis de maturidade (0 a 5), dependendo do cumprimento dos critérios enunciados de seguida, considerados mínimos para cada um dos níveis de maturidade. Estes critérios foram definidos com base nos modelos “IMPULS – *Industrie 4.0 Readiness*” e “*Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy*”:

Nível 0:

- Uma empresa neste nível não possui qualquer requerimento para a Indústria 4.0;
- São também incluídas neste nível as empresas para as quais o conceito é desconhecido ou irrelevante.

Nível 1:

- O envolvimento na Indústria 4.0 baseia-se em iniciativas-piloto, não existindo ainda uma estratégia definida;
- Nem todos os processos atuais são suportados por um sistema de informação;
- A partilha e integração de informação interna na empresa (através de sistemas de informação) é limitada a algumas áreas;
- Os equipamentos satisfazem parcialmente os requerimentos futuros (existência de equipamentos obsoletos) e a recolha de dados processuais é maioritariamente manual;
- As soluções de segurança de sistemas informáticos estão em fase de planeamento ou implementação;
- As qualificações necessárias à implementação da Indústria 4.0 são mínimas ou insuficientes.

Nível 2:

- Uma empresa no nível intermédio inclui a Indústria 4.0 na sua orientação estratégica. Apresenta uma estratégia de implementação em desenvolvimento bem como um conjunto de KPI;
- Estão a ser feitos investimentos relevantes para a Indústria 4.0 nalguns departamentos da empresa;
- A partilha de informação dentro da empresa é integrada através de sistemas de informação, até certo ponto, e estão a ser dados os primeiros passos no sentido de integrar a partilha de informação com parceiros de negócio, clientes e fornecedores;
- Parte dos dados de produção são recolhidos de forma automática e são empregues em algumas atividades, de forma limitada;
- A segurança dos sistemas informáticos está implementada e a ser desenvolvida;
- Os recursos humanos existentes possuem qualificações limitadas à implementação de algumas tecnologias da Indústria 4.0.

Nível 3:

- Uma empresa neste nível possui uma estratégia para a Indústria 4.0 formulada e um conjunto de KPI definidos;

- Efetuam-se investimentos relacionados com implementação da Indústria 4.0, em várias áreas da empresa, e com a introdução de novos conceitos, através da gestão da inovação em departamentos específicos;
- A partilha interna e externa de informação está parcialmente integrada através dos sistemas de informação;
- O processo de produção é integrado através de sistemas de informação adjacentes, com dados processuais relevantes a serem recolhidos de forma automática;
- Existem ferramentas de ICT para a aquisição e gestão de dados de forma escalável;
- A segurança necessária aos sistemas informáticos encontra-se implementada;
- Apesar de existirem qualificações limitadas em termos de recursos humanos, são acionadas medidas para expandir as qualificações dos recursos humanos.

Nível 4

- Uma empresa com esta maturidade digital possui uma estratégia para a Indústria 4.0 em vigor e monitoriza a sua implementação através de um conjunto de KPI adequados;
- Estão a ser feitos investimentos em praticamente todas as áreas relevantes e o processo é suportado por uma gestão da inovação interdepartamental;
- Grande parte da partilha de informação, quer interna quer externa, é integrada através de sistemas de informação;
- Os sistemas de informação adjacentes suportam a maioria das unidades de produção, sendo recolhidas grandes quantidades de dados que são empregues na otimização da produção (i.e., a produção é bastante automatizada);
- Os recursos humanos possuem as competências necessárias à manutenção deste nível de maturidade, existindo um esforço para a aquisição de qualificações em falta.

Nível 5

- A estratégia para a Indústria 4.0 encontra-se implementada e é revista de forma regular;
- A empresa efetua sistematicamente uma gestão da inovação, que é transversal a todas as áreas da empresa;
- Encontram-se implementados sistemas de informação abrangentes, que suportam a integração de informação (interna e externa) e os processos de produção;
- Todos os dados relevantes são recolhidos automaticamente para análise e otimização das atividades da empresa;
- O processo de produção é integrado e autónomo, podendo proceder a reconfigurações de sistemas com intervenção humana mínima;
- A segurança dos sistemas de informação é garantida;
- Os recursos humanos existentes possuem as qualificações necessárias à concretização da Indústria 4.0.

A avaliação da maturidade é efetuada através de um questionário de 21 itens de avaliação, adaptados dos modelos de maturidade estudados de acordo com a sua relevância para o caso de estudo. O questionário encontra-se em anexo (Anexo A – Modelo de Maturidade) para consulta.

4.3. Metodologia

A avaliação da maturidade digital da empresa em estudo seguiu uma metodologia com três etapas (ver Figura 12).

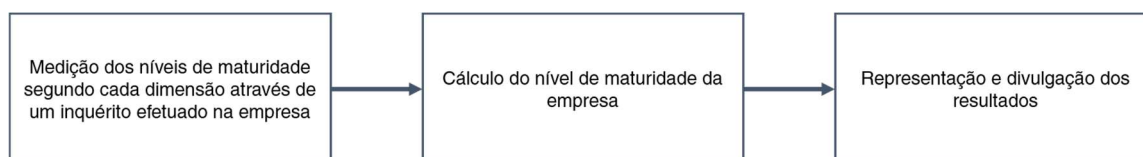


Figura 12 - Metodologia com três etapas para a aferição da maturidade digital da indústria química em estudo.

A medição da maturidade foi efetuada através de um inquérito feito a 11 colaboradores dos diferentes departamentos da empresa em estudo.

Das 21 questões que compõem o questionário, 8 questões são de resposta quantitativa, i.e., pediu-se aos inquiridos que respondessem com um valor numa escala de Likert de 0 a 5. As restantes 17 são de resposta condicionada, pelo que os resultados foram tratados de forma a fazer corresponder cada resposta a um valor quantitativo de 0 a 5, em que “0” corresponde ao caso menos favorável e “5” à situação ideal no âmbito do que a pergunta pretende explorar.

A maturidade de cada sub-dimensão, d_j , é obtida através da média aritmética das pontuações das questões que constituem essa sub-dimensão, q_i (Equação 1). A maturidade de cada dimensão, m_k , corresponde, por sua vez, à maturidade mínima de entre as respetivas sub-dimensões (Equação 2). O nível de maturidade obtido num questionário ao inquirido x , M_x , é a ponderação (com um fator p_k , ver Tabela 2) das maturidades das dimensões (Equação 3). Por fim, a maturidade final da empresa, M_{Final} , é a média aritmética das maturidades obtidas em todos os questionários (Equação 4).

$$d_j = \frac{\sum_{i=1}^m q_i}{n} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$m_k = \min (d_j) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$M_x = \sum_{k=1}^5 (p_k m_k) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$M_{Final} = \frac{\sum_{x=1}^{11} M_x}{n} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que m é o número de questões que constituem a sub-dimensão e n o número total de inquiridos.

Preferencialmente, calcular-se-ia o nível de maturidade ponderando a relevância de cada questão, tal como é calculada a maturidade no modelo proposto por Schumacher *et al.*. No entanto, não tendo acesso a informação com esse nível de detalhe, efetuou-se o cálculo da maturidade assumindo que todas as questões têm a mesma relevância, dentro de cada sub-dimensão, e de seguida contabilizou-se a contribuição de cada dimensão no cálculo de um nível de maturidade final.

Os fatores de ponderação foram adaptados do modelo “IMPULS – *Industrie 4.0 Readiness*” e podem ser consultados na Tabela 2.

Tabela 2 - Contribuição percentual de cada dimensão para o nível de maturidade digital, segundo o modelo de maturidade proposto.

Dimensão	Contribuição para o Nível de Maturidade
Estratégia e Cultura	28,8%
Automação da Produção	17,8%
Integração de Sistemas	13,8%
Análise de Dados	17,8%
Recursos Humanos	21,8%

A Estratégia e Cultura é a dimensão que mais contribui para o nível de maturidade digital, uma vez que corresponde à força motriz para a implementação da Indústria 4.0 em termos de liderança, gestão, investimento e planeamento. Os fatores de ponderação estabelecidos pretendem refletir a importância relativa de características que fazem parte da cultura organizacional e, por isso, são mais dificilmente adquiridas de forma posterior, ao invés de características que se prendem com funcionalidades de equipamentos ou com a adaptação de estruturas de ICT.

4.4. Resultados

O diagrama de Kiviat da Figura 13 mostra os principais resultados obtidos pelo modelo de maturidade aplicado ao caso de estudo. A série “Percepção” corresponde ao tratamento dos resultados de todos os questionários. As “Respostas da especialidade” são um sub-conjunto destes resultados e correspondem às respostas dadas pelos inquiridos com maior conhecimento na área que cada questão trata, pretendendo-se refletir desta forma o nível de maturidade real da empresa.

Os níveis de maturidade globais (percecionado e “real”) foram calculados pelas Equações (1) a (4). O nível de maturidade percecionado foi de 1,7, enquanto o nível de maturidade “real” foi de 1,1.

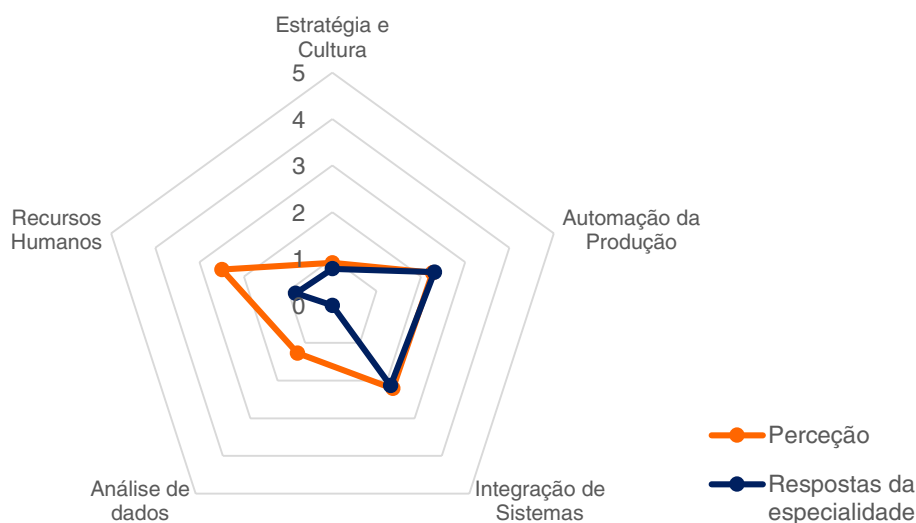


Figura 13 - Níveis de maturidade segundo as 5 dimensões do modelo de maturidade proposto.

Foram incluídas duas questões suplementares para averiguar se os inquiridos conheciam o conceito de Indústria 4.0 e se reconheciam as vantagens em implementar as tecnologias relacionadas, uma vez que a precisão das respostas está diretamente relacionada com o grau de conhecimento do conceito de Indústria 4.0 (Figura 14).

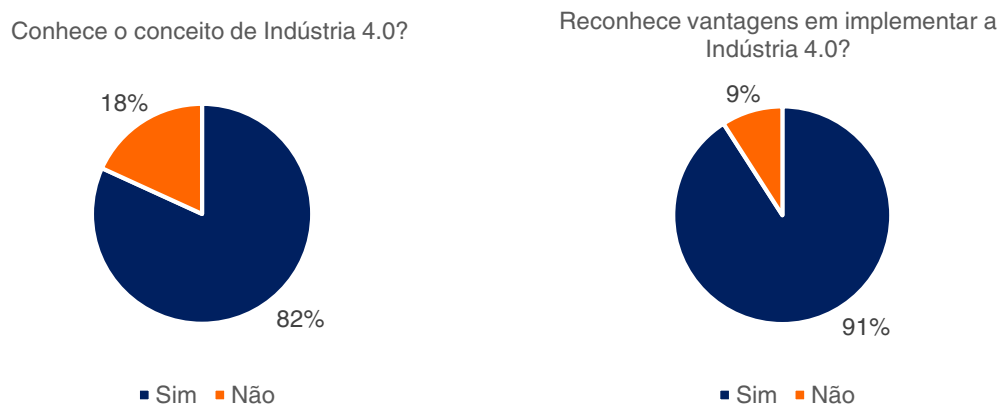


Figura 14 - Resultados suplementares do modelo de maturidade proposto. n=11.

O grupo de inquiridos correspondeu a 12% do total de colaboradores da empresa dos quais: 18,2% administração, 18,2% logística, 9,1% manutenção, 9,1% laboratório, 9,1% desenvolvimento tecnológico e projetos, 9,1% tecnologias de informação, 9,1% produção de biodiesel, 9,1% preparação/extração de oleaginosas, 9,1% comercial. Todos os inquiridos pertencem ao quadro superior da empresa. A média de idades é de 49,8 anos. A percentagem de respostas sem conhecimento foi de 9%.

4.5. Conclusões e Linhas Gerais de Atuação

De acordo com os níveis de maturidade globais obtidos, e tendo em conta os requisitos de cada nível de maturidade proposto no modelo em causa, a empresa avaliada é posicionada no nível 1.

No que diz respeito à discrepância entre os níveis de maturidade percecionados e os níveis de maturidade “reais”, para cada dimensão, esta sugere o grau de entendimento do processo (como um todo) que os inquiridos possuem.

Tendo em conta os resultados para a dimensão Estratégia e Cultura, é possível verificar uma perceção de que não existe estratégia, enquanto planeamento detalhado a médio e longo prazo, para alcançar objetivos bem definidos em termos de Indústria 4.0. Após a caracterização da maturidade digital, a definição desta estratégia deverá ser o primeiro ponto de intervenção.

Automação da Produção é a dimensão com maior nível de maturidade “real” e é a única dimensão em que os dois conjuntos (perceção e respostas da especialidade) se sobrepõem, o que poderá relacionar-se com a maior objetividade das questões (como por exemplo, quais as tecnologias utilizadas ou que dados processuais são recolhidos) e por isso, com uma maior unanimidade de respostas.

A integração de informação entre departamentos foi considerada razoável, enquanto o nível de integração da informação com empresas da cadeia de valor é considerado muito pequeno, ou aproximadamente nulo.

A Análise de Dados surge como a dimensão com menor maturidade “real”, uma vez que não se efetua atualmente nenhum tipo de análise de dados no sentido de aplicar técnicas matemáticas específicas (algoritmos de *data mining*, por exemplo). A discrepância entre os dois conjuntos de respostas poderá ter que ver com a definição mais geral do termo “análise de dados”, entendido pelos inquiridos. O desenvolvimento da recolha e análise de dados foi considerado um ponto crítico atual, uma vez que ainda se recolhe e processa uma grande quantidade de dados processuais importantes de forma manual (ou semi-automática). Os dados são um elemento fundamental para a Indústria 4.0 e uma análise competente dos mesmos é um pré-requisito para uma transformação digital com sucesso [15]. Por isso, é importante criar uma arquitetura integrativa de conectividade entre ativos para, então, de forma eficaz, gerir a recolha e análise dos dados para os tornar acessíveis e visualizáveis. Em seguida, pode efetuar-se a análise e utilização dos mesmos para promover operações mais eficientes.

A dimensão “Recursos Humanos” foi a que apresentou um nível de maturidade percecionado mais elevado, mostrando, por comparação com a maturidade “real”, que a qualificação e formação necessárias às áreas tecnológicas envolvidas (nomeadamente na ciência de dados) é subestimada pelos inquiridos. Dada a maturidade “real” desta dimensão, e a importância que os recursos humanos representam para a implementação da Indústria 4.0, considera-se que adquirir as qualificações necessárias é um ponto crítico atual.

Por fim, os gráficos da Figura 14 mostram que a maioria dos inquiridos conhecia o conceito de Indústria 4.0. No entanto, a percentagem de inquiridos que reconhecia as vantagens em implementar as tecnologias que suportam a Indústria 4.0 mostra-se superior à percentagem de inquiridos que conhecia o conceito de Indústria 4.0, possivelmente por esses inquiridos terem ganho, com o decorrer do inquérito, uma noção mais concreta de que tecnologias estão envolvidas e de que maneira podem fornecer à empresa uma vantagem competitiva.

O número de inquiridos foi limitado pelo tempo de que se dispôs para efetuar a avaliação da maturidade digital da empresa. Uma avaliação mais precisa da maturidade digital da empresa segundo este método passaria por estender o questionário a um maior número de inquiridos. Ainda assim, dado que se verificou um nível de concordância razoável entre respostas dos vários inquiridos na maioria das dimensões, considera-se que a amostragem (12%) terá sido representativa.

5. Exemplos de Pontos Críticos Atuais

A recolha de dados processuais é um pré-requisito fundamental para desbloquear o potencial da Indústria 4.0 [67]. Por este motivo, é necessária uma boa organização dos processos, conseguida através da utilização de metodologias como, por exemplo, as da produção *lean* [26]. Tendo em conta a maturidade digital da empresa em estudo, um passo importante consistirá em garantir a recolha e visualização de dados processuais necessários à rastreabilidade, ao controlo e à qualidade das operações [26]. Apresentam-se, nos próximos pontos, propostas de atuação em exemplos de pontos críticos, que atualmente constituem barreiras à referida rastreabilidade e controlo dos processos de produção de óleos vegetais e bagaços de soja e colza na indústria química em estudo.

5.1. Limpeza de Oleaginosas

O processo de limpeza das oleaginosas é a primeira etapa da produção de óleos vegetais. As oleaginosas começam por ser conduzidas dos silos de armazenamento a um peneiro, onde são separadas das impurezas arrastadas, que constituem maioritariamente cascas, peles e vagens. As impurezas grosseiras são separadas através da peneiração em placas perfuradas e as finas através de um sistema de aspiração do peneiro. A oleaginosa limpa passa por um separador eletromagnético antes de seguir para o processamento subsequente. As impurezas separadas dos grãos de soja são moídas num moinho de martelos e armazenadas num silo de armazenamento de cascas, enquanto as separadas das sementes de colza são diretamente armazenadas.

Atualmente, o funcionamento do peneiro não pode ser monitorizado nem otimizado remotamente de forma automatizada, apesar da importância que a sua operação tem para o bom funcionamento de todo o processo a jusante. Por um lado, o arrastamento de impurezas numa corrente de oleaginosas limpas contribui para a diminuição do rendimento da extração de óleo (com solvente), uma vez que provoca a diminuição da porosidade do bolo no extrator (desfavorecendo a permeação do solvente). Por outro lado, a quantidade de sementes que é arrastada com as impurezas corresponde a uma perda direta de rendimento do processo de extração e corresponde a uma perda económica significativa, dado que o óleo não extraído é vendido ao preço (por tonelada) de bagaço.

5.1.1. Funcionamento do Peneiro

O peneiro é o equipamento nuclear do processo de limpeza das oleaginosas. O peneiro utilizado na indústria em estudo consiste num *Combi Cleaner* cujo funcionamento é esquematizado na Figura 15.

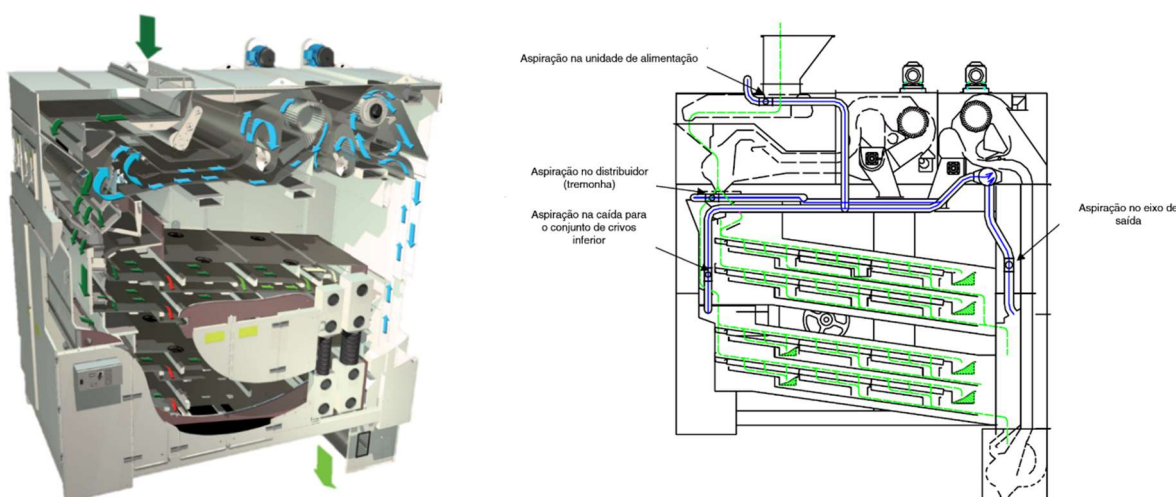


Figura 15 - Esquematização do funcionamento de um peneiro *Combi Cleaner*. A verde: percurso das oleaginosas. A azul: percurso da corrente de ar de aspiração central.

As oleaginosas são alimentadas ao peneiro através de uma tremonha de alimentação. O caudal de entrada varia de acordo com a velocidade de agitação de um tabuleiro, que é provocada pela rotação excêntrica de um eixo e cuja velocidade de rotação pode ser controlada através da HMI do

SCADA, na sala de controlo. Antes de cair no conjunto de crivos abaixo, a corrente de oleaginosas é submetida a uma pré-aspiração, que aumenta a eficiência da separação nos crivos e a capacidade máxima do peneiro. Este sistema de pré-aspiração é esquematizado na Figura 16. Um impulsor gera um caudal de ar que remove, em contracorrente, poeiras e impurezas finas do produto, que são encaminhadas para uma câmara de expansão. Nesta câmara, as impurezas mais pesadas são descarregadas num transportador de parafuso e as poeiras são extraídas por um miniciclone.

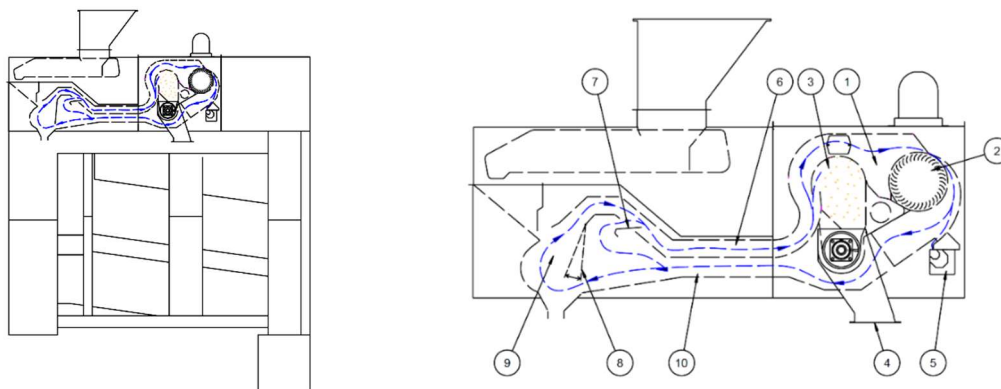


Figura 16 - Funcionamento da pré-aspiração de oleaginosas num *peneiro Combi Cleaner*. 1 – Unidade de recirculação de ar; 2 – Impulsor; 3 – Câmara de expansão; 4 – Saída de impurezas; 5 – Câmara de separação; 6 – Canal de aspiração; 7 – Obturador; 8 – Obturador; 9 – Câmara de pré-aspiração; 10 – Canal de retorno de ar.

A secção dos crivos é composta por dois conjuntos de crivos. Cada conjunto é composto por dois andares, cada um com três crivos adjacentes. Os crivos estão dispostos com uma inclinação de 8° para facilitar o escoamento do produto. A distribuição do caudal de oleaginosas pelos dois conjuntos de crivos é feita através de uma tremonha, que pode encaminhar a oleaginosa apenas para o conjunto de baixo, apenas para o conjunto de cima, ou efetuar uma distribuição equitativa pelos dois conjuntos de crivos. A posição da tremonha é manipulada através do painel de controlo da máquina (ver Figura 19). Os dois conjuntos de crivos são agitados através de um motor de rotação excêntrica cuja velocidade é controlada através da HMI do SCADA na sala de controlo.

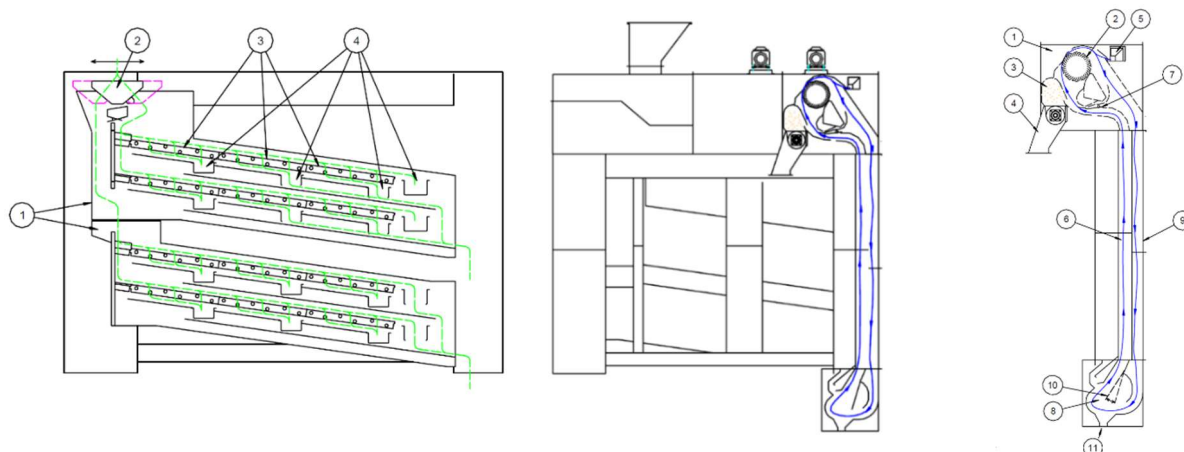


Figura 17 – À esquerda: esquematização do funcionamento dos crivos num peneiro *Combi Cleaner*. 1 – Conjuntos de crivos; 2 – Tremonha de distribuição; 3 – Três crivos por andar; 4 – Saídas opcionais de impurezas. À direita: funcionamento da pós-aspiração. 1 – Unidade de recirculação de ar; 2 – Impulsor; 3 – Câmara de expansão; 4 – Saída de impurezas; 5 – Câmara de separação; 6 – Canal de aspiração; 7 – Obturador; 8 – Câmara de pós-aspiração; 9 – Canal de retorno de ar; 10 – Obturador.

Existem dois crivos disponíveis, de malhas diferentes:

- *Scapling screens* - separam as impurezas mais grosseiras, que são maiores que as oleaginosas e que permanecem no topo do crivo, sendo removidas pela lateral do equipamento.
- *Sifting screens* - separam as impurezas mais pequenas que as oleaginosas e que traspassam o crivo, sendo recolhidas num prato abaixo.

Após a separação nos crivos, as oleaginosas são submetidas a uma passagem de ar em contracorrente (pós-aspiração), que visa separar do produto as partículas leves remanescentes. O funcionamento da pós-aspiração é esquematizado na Figura 17. A Figura 18 apresenta um diagrama de blocos que pretende sumarizar o funcionamento completo do peneiro, evidenciando os três sistemas de aspiração - central, pré e pós-aspiração.

As quantidades de ar de pré e pós-aspiração que passam pelo produto são manipuladas através da posição de dois obturadores (ver Figuras 16 e 17, ponto 7), que são controlados por dois atuadores através do painel de controlo da máquina (ver Figura 19). A posição “mais fechada” corresponde à aspiração máxima, pois todo o ar do sistema atravessa a oleaginosa em contracorrente. As velocidades de passagem do ar também são manipuladas através de dois obturadores (ver Figuras 16 e 17, pontos 8 e 10, respetivamente), cuja posição é controlada através do painel de controlo. Na posição “mais fechada”, a velocidade de passagem do ar é máxima. Desta forma, é possível ajustar os caudais e velocidades do ar de aspiração, de forma a que as impurezas sejam eficazmente separadas das oleaginosas sem que estas últimas sejam arrastadas. Aquando do arranque da produção, são introduzidas as primeiras iterações destas variáveis no painel de controlo, que são baseadas em registos de valores típicos para o processamento de soja e colza.

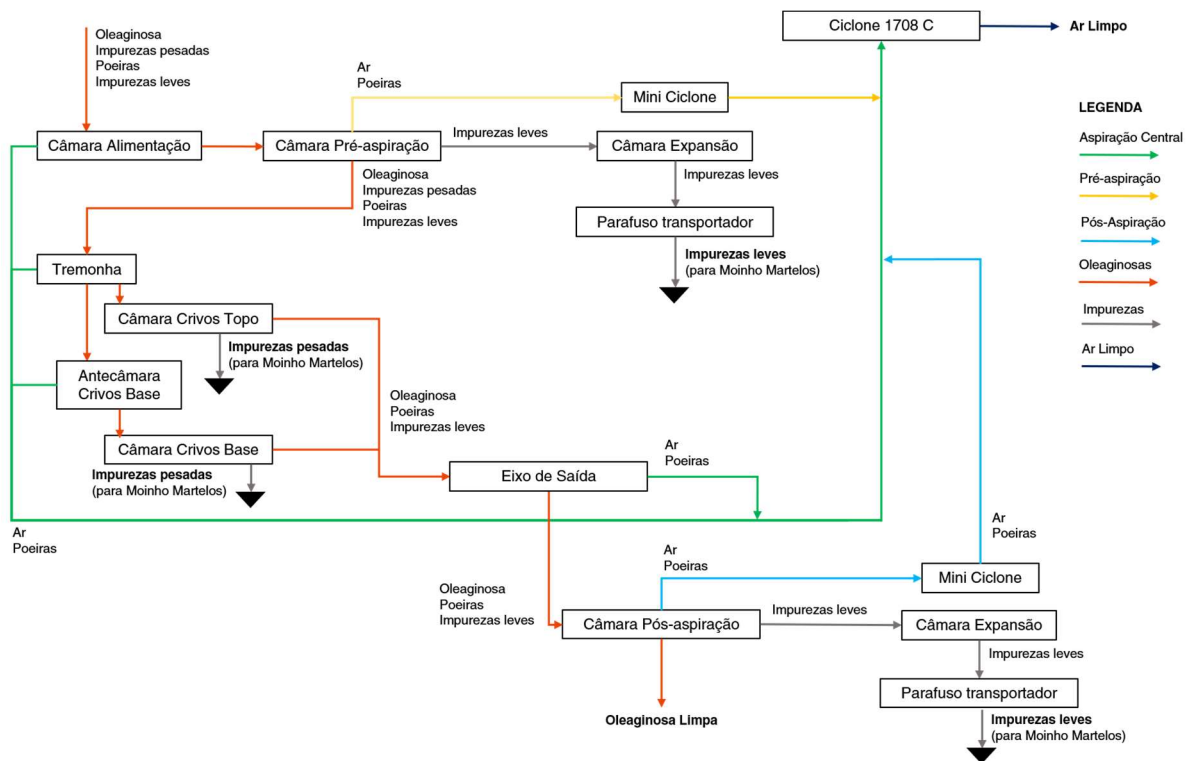


Figura 18 - Diagrama de blocos do funcionamento completo do peneiro tipo *Combi Cleaner*.

5.1.2. Controlo e Monitorização do Processo Atual

Atualmente, a monitorização do processo de limpeza das oleaginosas é feito manualmente no local. Num procedimento por turnos, os operadores da fábrica deslocam-se ao local (o quarto andar de uma torre silar), a cada quatro horas, para verificarem visualmente a eficácia da separação e, quando necessário, procederem ao ajuste das variáveis de funcionamento do peneiro, através do painel de controlo (Figura 19).



Figura 19 - Painel de controlo do peneiro *Combi Cleaner*.

Os operadores retiram amostras da corrente de oleaginosas limpas e da corrente de impurezas separadas, efetuando um controlo visual da eficiência da separação. Este procedimento apresenta vários inconvenientes:

- É pouco rigoroso e é inconsistente, dada a subjetividade da análise visual da separação;
- O controlo é feito periodicamente, podendo ocorrer situações indesejadas, tais como a separação ineficiente das impurezas, ou a avaria da máquina, que se prolonguem por períodos de tempo significativos, sem que haja uma reação adequada por parte dos operadores, comprometendo a eficiência dos processos a jusante;
- A aquisição manual de dados não permite a rastreabilidade das operações em tempo real, nem a correlação das variáveis associadas ao processo de limpeza com as restantes variáveis processuais e com a qualidade da matéria-prima e produtos finais;
- Constitui um risco de segurança acrescido, uma vez que implica o deslocamento de um operador ao terreno.

Em fevereiro de 2017 efetuou-se uma recolha de amostras relativas ao processo atual de limpeza. Determinou-se, por peneiração, a percentagem mássica de impurezas e de oleaginosas em 57 amostras, 27 de soja e 30 de colza, das correntes de entrada (Figura 20) e saída do peneiro. Posteriormente, no âmbito do presente trabalho, efetuaram-se os balanços de massa às oleaginosas, determinando-se a quantidade de oleaginosas arrastadas na corrente de impurezas e a de impurezas não devidamente separadas das oleaginosas. Os resultados são apresentados nos gráficos das Figuras 21 e 22. Determinou-se, também, que a eficiência do processo de limpeza da soja é 2,2 vezes superior ao da colza. Os dados experimentais referentes às amostras recolhidas em 2017, os balanços de massa efetuados, bem como as eficiências absolutas do processo de limpeza, para cada oleaginosas, podem ser consultados em anexo (Anexo B – Limpeza de Oleaginosas).



Figura 20 - Amostras de grãos de soja (à esquerda) e de sementes de colza (à direita) de impurezas à entrada do processo de limpeza.

Os resultados das Figura 21 e 22 mostram que as porcentagens de soja e colza que são arrastadas para a corrente de impurezas são reduzidas. A baixa variabilidade dos valores indica, ainda, que as amostras terão sido recolhidas num período em que o processo de limpeza se encontrava estável. Caso tivessem sido recolhidas durante o período de arranque do processo, seria de esperar que a quantidade de oleaginosas arrastadas fosse mais significativa e que diminuísse à medida que os parâmetros da máquina fossem afinados.

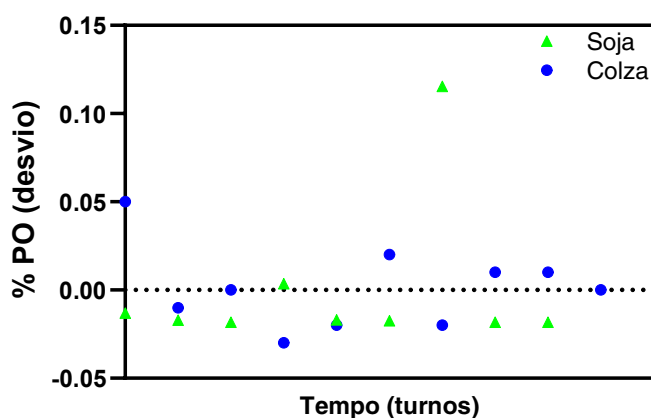


Figura 21 – Desvio face à média aritmética da percentagem de oleaginosas perdidas para a corrente de impurezas face à quantidade total de oleaginosa no caudal de entrada no processo de limpeza (perda de oleaginosa, PO). Os valores absolutos podem ser consultados em anexo (Anexo B – Limpeza de Oleaginosas).

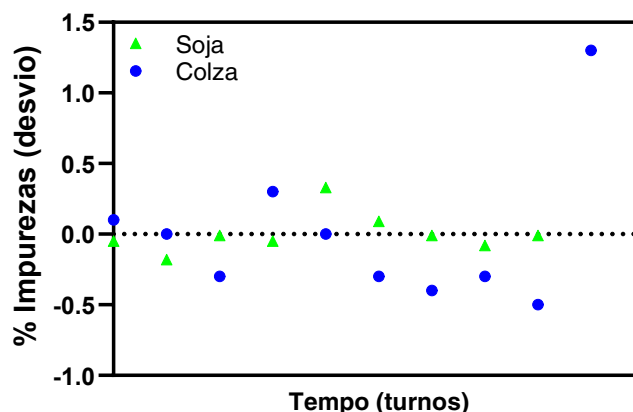


Figura 22 – Desvio da percentagem de impurezas no caudal total de oleaginosas limpas (corrente de saída do processo), face à média aritmética. Os valores absolutos podem ser consultados em anexo (Anexo B – Limpeza de Oleaginosas).

Com base na Figura 21 é possível verificar que a percentagem de oleaginosas arrastadas é superior para o processamento da colza, o que poderá justificar-se pelo facto destas sementes terem um diâmetro cerca de quatro vezes inferior ao dos grãos de soja e, sendo mais pequenas e leves, serem mais facilmente arrastadas pelo sistema de aspiração do peneiro. Em média, a percentagem de oleaginosas arrastadas para a corrente de impurezas no processamento de colza é 5,7 vezes superior à da soja (valores discriminados no Anexo B – Limpeza de Oleaginosas).

Tendo em conta os pontos discutidos, um acondicionamento a este processo deverá ter como foco o controlo e monitorização automáticos, e em tempo real, das variáveis críticas do processo de limpeza. Estas são (i) a quantidade de impurezas na corrente de entrada, de forma a ser possível monitorizar a eficiência do processo, (ii) a quantidade de impurezas na corrente de oleaginosas limpas e (iii) a quantidade de oleaginosas na corrente de impurezas. Através da aquisição automática destes dados, é possível aumentar a rastreabilidade do processo de limpeza.

5.1.3. Proposta de Recondicionamento do Processo de Limpeza de Oleaginosas

A monitorização das variáveis apresentadas no ponto 5.1.2. implica a distinção e quantificação de partículas, de uma corrente processual de oleaginosas e impurezas, de forma representativa. Por sua vez, a distinção de partículas requer a sua classificação de acordo com características distintivas. Neste caso, as oleaginosas processadas (tanto os grãos de soja como as sementes de colza) apresentam uma gama de tamanhos característicos, bem como uma elevada esfericidade, pelo que será através destas duas particularidades que se poderão diferenciar das partículas de impurezas, que são maioritariamente cascas, peles e vagens, com geometrias mais irregulares. Assim, o recondicionamento do processo de limpeza das oleaginosas passará pela implementação de tecnologias de análise de partículas no processo atual. A aquisição automática de dados resultantes destas análises, para fins de controlo, otimização e rastreabilidade do processo implica que a análise seja feita *inline* ou *online*. Estas duas formas de efetuar uma determinada análise distinguem-se pela proximidade do método ao processo, quer em termos de espaço, quer de tempo [69]. A análise *online*

é efetuada no local, a uma amostra de produto que é retirada e devolvida, após análise, ao processo [69]. No modo *inline*, a instrumentação encontra-se diretamente adjacente à tubagem que contém o produto, não interferindo na linha de processo, e é utilizada quando o material tem ser analisado de forma contínua para que os resultados sejam representativos (i.e., as características do produto variam no intervalo de tempo entre a amostragem e a disponibilização dos resultados do método) [69]. Neste caso, de um modo geral, uma vez que a quantidade de impurezas contidas na matéria-prima não varia muito significativamente em curtos espaços de tempo, não é necessário efetuar análises de forma quase-contínua. A variação mais significativa será entre lotes, dependendo da proveniência da matéria-prima a processar. Assim, a escolha entre a análise *inline* ou *online* dependerá maioritariamente das tecnologias disponíveis e dos respetivos requerimentos.

Os métodos de análise de partículas incluem peneiração, difração de laser, dispersão dinâmica de luz (em inglês, *dynamic light scattering* ou DLS), análise de imagem estática e análise de imagem dinâmica (em inglês *dynamic image analysis* ou DIA) [70]. Entre estes, excluem-se à partida os que, pela natureza do método de análise, são inadequados para aplicações *online* ou *inline*. Os restantes são comparados na Tabela 3.

No que tem que ver com o tamanho das partículas a analisar, os grãos de soja têm um diâmetro de 5 a 11 mm enquanto as sementes de colza têm um diâmetro de 1 a 2 mm [71][72]. Uma vez que as impurezas podem apresentar qualquer tamanho, a gama de medições preferível será a mais abrangente que inclua os tamanhos das duas oleaginosas. Para a caracterização morfológica das partículas analisadas, necessária à distinção entre as partículas de oleaginosas e de impurezas, apenas a DIA é considerada adequada, o que permite, por si só, excluir as restantes tecnologias consideradas.

Tabela 3 - Comparação de métodos de análise de partículas [70][73][74][75][76].

	Difração de Laser	DIA	DLS
Análise do Tamanho das Partícula	Sim	Sim	Sim
Distribuição Granulométrica	Sim	Sim	Sim
Análise da Forma Partícula	Não	Sim	Não
Análise de Amostras Secas	Sim	Sim	Não
Análise <i>Inline</i>	Sim	Não	Não
Análise <i>Online</i>	Sim	Sim	Sim
Gama de Medição	10 nm – 5 mm	0,8 µm – 135 mm	0,8 nm – 6500 nm

A análise de imagem dinâmica é um método que permite obter a distribuição de várias características morfológicas num conjunto de partículas em movimento. O analisador gera um efeito estroboscópico através de uma fonte de luz pulsante, enquanto uma câmara associada a um sistema ótico permite captar imagens a alta velocidade. Através de um mecanismo de amostragem automático, no caso dos analisadores *online*, é efetuada a análise *in situ* a amostras de partículas que, ao caírem, vão passando em frente à lente de uma câmara. A admissão controlada de partículas ao analisador minimiza a sobreposição de projeções, garantindo resultados mais precisos. As imagens captadas são,

de seguida, processadas por um *software* de análise, que determina a forma e o tamanho de cada partícula, separadamente [77]. O movimento livre no volume de medição leva a uma orientação aleatória das partículas. Através de diferentes perspetivas, é possível determinar com precisão a distribuição de formas e tamanhos das partículas de uma amostra [75][77]. A alimentação contínua de partículas dispersas garante a representatividade da análise [77]. O resultado nuclear da DIA é a distribuição numérica de um ou mais parâmetros morfológicos, que posteriormente, se tal se revelar conveniente, pode ser convertida em distribuição mássica ou volúmica [75][78][79]. O princípio de funcionamento de um sistema de DIA é esquematizado na Figura 23.

A monitorização do processo de limpeza de oleaginosas e a aquisição de dados relativos às variáveis envolvidas, de forma automatizada, requer a integração do sistema de DIA no sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA) da empresa. Através da implementação de uma cadeia de controlo por *feedback* negativo, pode garantir-se a manutenção das variáveis controladas, explicitadas no ponto 5.1.2., num determinado valor. A Figura 24 apresenta uma esquematização da cadeia de controlo proposta. A utilização de mecanismos de recolha automática de amostras permite que se processem amostras das três correntes pretendidas, de forma alternada, sem que haja a necessidade de implementar três analisadores. Os dados gerados pelo analisador de partículas são comunicados via TCP/IP (*ethernet*) a uma ponte *ethernet* sem fios (*wireless ethernet bridge*), que efetua a ligação entre duas redes LAN (com fios) [80]. Neste caso, a comunicação sem fios é considerada preferível à cablagem, uma vez que o sistema DIA é integrado no terceiro piso de uma torre silar e a distância ao *switch* (comutador) é grande.

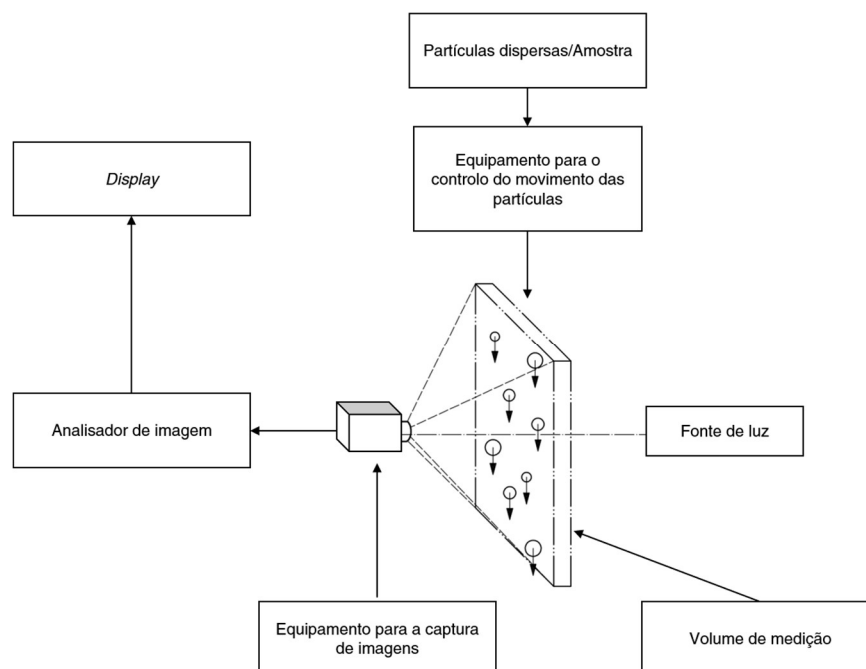


Figura 23 – Princípio de funcionamento de um analisador de imagem dinâmica. Adaptado de [81].

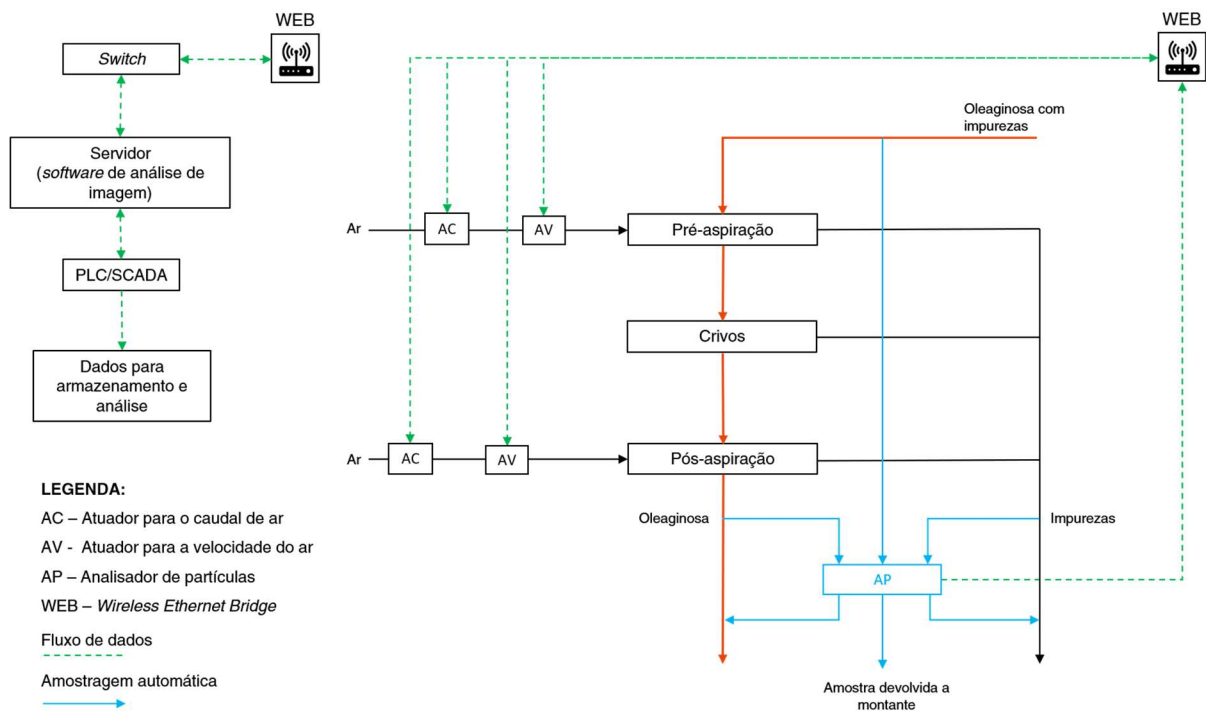


Figura 24 - Esquematização da cadeia de controle do processo de limpeza de oleaginosas.

Os dados do analisador podem, assim, ser tratados no servidor por um *software* de análise de imagem e os resultados transmitidos, através de um protocolo de comunicação adequado, a um controlador lógico programável (PLC). Este último, após efetuar a comparação das variáveis controladas com os valores de *set-point*, devolve, se necessário, comandos para a manipulação dos caudais e velocidade do ar nos sistemas de aspiração do peneiro. Simultaneamente, os dados resultantes da análise de imagem podem ser armazenados na base de dados da empresa para fins de análise e otimização. Através do relacionamento de variáveis processuais e de qualidade, a caracterização das oleaginosas no processo de limpeza pode também contribuir para a otimização das condições operacionais nos equipamentos a jusante.

5.1.4. Propostas Técnicas e Orçamentação

Após definida a tecnologia adequada ao acondicionamento do processo de limpeza de oleaginosas, e uma vez definidos os requisitos técnicos necessários à sua implementação na presente proposta, foram consultados diferentes fornecedores para obter propostas técnicas e respectivas orçamentações. Foram consultados três (A, B e C) fornecedores de sistemas de DIA, dos quais se obteve uma proposta técnica e orçamento preliminares, no sentido de efetuar uma primeira análise de viabilidade do investimento. Caso a viabilidade preliminar do investimento se verifique, é efetuada a especificação de todos os requerimentos necessários à implementação, bem como da proposta técnica e orçamento associados.

5.1.5. Investimento e Análise Económica

De forma a avaliar a rentabilidade do acondicionamento do processo de limpeza de oleaginosas, foi necessário, em primeiro lugar, determinar os proveitos associados. Os resultados da Figura 21 permitem estimar as perdas económicas associadas ao arrastamento de oleaginosas pelas impurezas, com base na diferença de valorizações dos bagaços e dos óleos produzidos. A estimativa dos proveitos é detalhada em anexo (Anexo C – Limpeza de Oleaginosas). Como foi referido no ponto 5.1.2, a baixa variabilidade dos valores indica ainda que as amostras terão sido recolhidas num período em que o processo de limpeza se encontrava estável. Uma vez que o processamento de grãos de soja e sementes de colza é intercalado, o que resulta num número significativo de arranques da produção que são efetuados anualmente, a estimativa das perdas económicas associadas a este conjunto de dados poderá ser subestimada. Apesar dos resultados da Figura 22 também significarem perdas económicas, relacionadas com a diminuição do rendimento do processo de extração de óleo com solvente, estas não são diretamente quantificáveis, pelo que não foram quantificadas. De seguida, efetuou-se a análise de rentabilidade preliminar da proposta recebida com base nos fluxos financeiros (*cash flows*) atualizados e admitindo que o projeto é financiado somente com capital próprio. A partir do mapa de fluxos financeiros, inferiram-se os principais indicadores de rentabilidade económica para um período de 8 anos:

- Valor atualizado líquido (VAL);
- Taxa interna de rentabilidade (TIR) e;
- Período de retorno do investimento (PRI).

O cálculo destes indicadores é explicitado em anexo (Anexo B – Análise Económica).

A Tabela 4 apresenta o resumo da análise económica efetuada, a partir da qual é possível verificar que o valor atualizado líquido é negativo ao fim de 8 anos e, conseqüentemente, o período de retorno do investimento é superior a 8 anos. Já a taxa de atualização máxima que permite obter um VAL nulo ao fim desse período é de -23 %. Pode concluir-se, com base nos resultados para estes indicadores, que projeto não é rentável.

Tabela 4 - Resumo da análise económica preliminar efetuada. Investimento total e proveitos económicos discriminados em anexo (Anexo B – Limpeza de Oleaginosas).

Rúbrica	Fornecedor A
Investimento	
Equipamento	95,2 %
Software	0,6 %
Instalação e Formação	4,2 %
Indicadores de Rentabilidade	
VAL	- 163.057 €
TIR	- 23 %
PRI	>8 anos

5.2. Retificação dos Parâmetros de Bagaços de Soja e Colza

Na realidade atual da indústria em estudo, como já foi aferido, ainda se recolhe e processa uma quantidade significativa de dados processuais de forma manual ou semi-automática. Os provenientes da linha de produção são recolhidos através do SCADA e exportados para uma base de dados SQL. De seguida, o *Business Intelligence* (BI), através de uma rotina, cria ficheiros em Excel® com os dados mais relevantes dos vários turnos. São, posteriormente, importados por macros para outras folhas de cálculo, às quais a empresa denominou “máscaras de secção”, onde são tratados, mas também complementados com a introdução manual de alguns outros dados que não são recolhidos automaticamente. Após o preenchimento e verificação das máscaras, os dados são importados por macros para outra folha de cálculo denominada “mapa de controlo operacional”. Este ficheiro permite compilar a informação recolhida, relativa a produções e consumos provenientes das máscaras das várias unidades, assim como complementar com informação necessária ainda de introdução manual. Este mapa de controlo operacional exporta ficheiros CSV com seguimentos de fabrico. De seguida, a informação é importada para a base de dados do sistema ERP, onde são registados oficialmente os seguimentos de fabrico. O esquema da Figura 25 representa o fluxo de informação descrito.

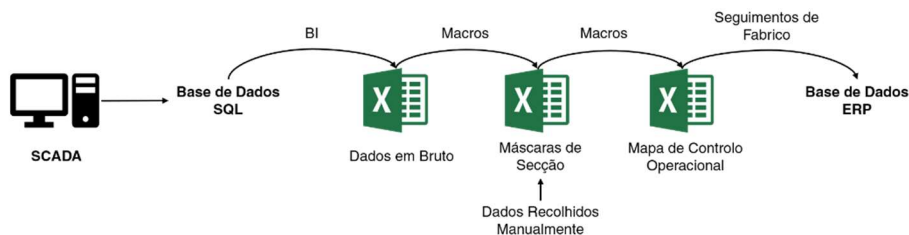


Figura 25 - Esquemática do fluxo de informação atual (em cima) e do pretendido (em baixo).

O processamento manual de dados apresenta desvantagens relativamente a um processamento automatizado no sentido em que existe: (i) maior probabilidade de ocorrerem erros de cálculo ou de preenchimento de campos, (ii) maior probabilidade de se perderem dados, (iii) maior tempo de latência entre a recolha de dados em bruto e a disponibilização dos resultados.

Em específico, um dos conjuntos de dados essenciais para a rastreabilidade e otimização do processo, bem como para o controlo da qualidade final, consiste na composição analítica dos bagaços finais produzidos: teor em água, proteína, fibra e óleo residual. Estas variáveis são muito importantes: por um lado, porque medem a qualidade do produto final e, por isso, a sua monitorização permite garantir a produção dentro das especificações; por outro, são fundamentais ao estabelecimento de correlações entre variáveis processuais. Estas correlações são relevantes para o entendimento da dinâmica do processo de preparação das oleaginosas e extração do óleo, para que posteriormente se possam otimizar essas variáveis de forma eficiente e automatizada. Atualmente, a análise *offline* aos bagaços produzidos e o processamento manual dos dados, segundo o fluxo de informação apresentado na Figura 25, limitam grandemente o controlo e a otimização do processo, para além dos aspetos acima referidos. Neste sentido, surge a proposta de atuação que é apresentada neste ponto e que tem que ver com o controlo *inline* dos parâmetros dos bagaços produzidos (humidade, óleo, fibra e proteína).

5.2.1. Processo de Preparação e Extração de Oleaginosas

Ao processo de limpeza das oleaginosas segue-se o processo de preparação, onde estas são tratadas de forma a melhorar o rendimento da extração de óleo a jusante e a qualidade dos óleos e dos bagaços produzidos (ver Figura 27). Os processos de preparação da semente de colza e do grão de soja diferem devido às diferenças de tamanho e de teor em óleo entre as duas oleaginosas. Os flocos de oleaginosas resultantes da preparação são submetidos a extração sólido-líquido, onde o solvente (hexano) circula em contracorrente com os sólidos. Deste processo resulta uma miscela (mistura de óleo e hexano) e bagaço. Após ser separado do hexano, o óleo bruto é sujeito a uma desgomagem física, processo a partir do qual se removem os fosfatídeos hidratáveis (lecitinas) através da adição de água e centrifugação do óleo. Já o bagaço, impregnado com solvente, tem de passar pela etapa de dessolventização, tostagem e secagem, antes de lhe serem adicionados os subprodutos da limpeza do grão e este estar pronto para o armazenamento com as características pretendidas.

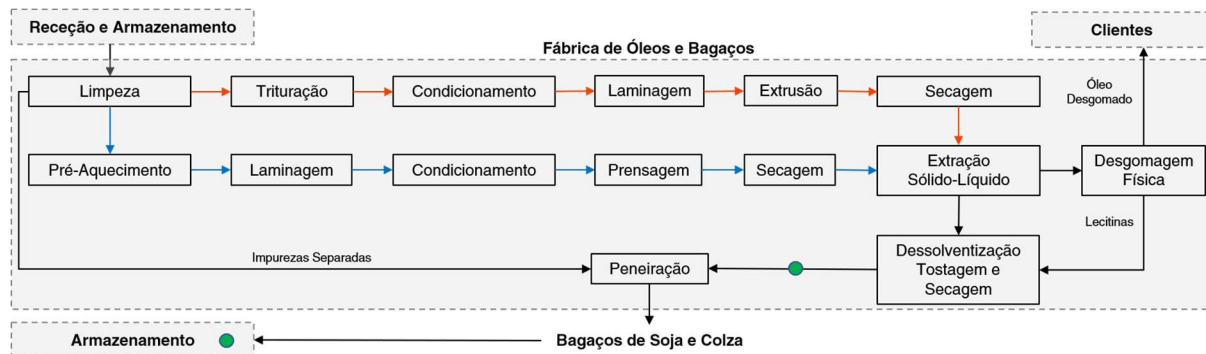


Figura 26 - Diagrama de blocos simplificado da fábrica de óleos e bagaços. A cor de laranja: preparação dos grãos de soja. A azul: preparação das sementes de colza. Pontos de amostragem a verde.

O dessolventizador-tostador-secador (DTS) é o equipamento no qual se procede à remoção do hexano reminiscente no bagaço e ao respetivo cozimento e secagem, através da utilização de vapor direto e indireto e de ar (quente, se for necessário efetuar secagem). Este equipamento é constituído por dez andares perfurados, com um eixo central rotativo, e facões agitadores em cada piso, para promoverem a agitação do material no seu interior. Nos quatro primeiros pisos é feita a evaporação do hexano por ação de vapor indireto. Do quinto ao sétimo piso, o bagaço é cozido sob ação de vapor indireto e dessolventizado com vapor direto em contra corrente e por fim, no oitavo, sob ação de vapor direto em contracorrente. No sétimo piso é ainda introduzida água de processo, juntamente com as lecitinas. No nono e décimo pisos é insuflado ar (quente se necessário) a duas câmaras de ar perfuradas no prato, de forma a secar o bagaço. A descarga do bagaço, a determinada temperatura e com um determinado teor de água, é regulada em função do nível de bagaço no décimo andar.

Do DTS, o bagaço segue ou para um silo pulmão ou diretamente para um peneiro, onde é feito o doseamento das impurezas separadas no processo de limpeza das oleaginosas (casca e semente estranha). Esta etapa é determinante para a obtenção dos valores de proteína e fibra bruta especificados nas fichas de produto, uma vez que a casca possui um teor de fibra mais elevado comparativamente ao bagaço, permitindo efetuar o ajuste. O bagaço resultante é, por fim, armazenado.

Os bagaços são produzidos de forma a possuírem teores de água, fibra e proteína adequados, isto é, de forma a estarem de acordo com a respetiva ficha de especificação do produto (a consultar em anexo (Anexo D – Retificação dos Parâmetros dos Bagaços de Soja e Colza). O teor de proteína é um parâmetro decisivo para a qualidade dos bagaços. Este depende diretamente da qualidade da matéria-prima que se processa e, por isso, não pode ser diretamente controlado. Os teores de água e fibra são controlados pela manipulação de variáveis do processo, através de uma metodologia que se descreve no ponto seguinte.

5.2.2. Metodologia de Controlo Atual

Para monitorizar os parâmetros dos bagaços e garantir que estes são produzidos de acordo com as especificações, efetuam-se análises por espectroscopia NIR a amostras recolhidas no terreno. A espectroscopia NIR é um método não destrutivo, rápido e preciso, adequado para a análise quantitativa ou qualitativa dos constituintes de uma grande quantidade de produtos alimentares, farmacêuticos e agrícolas, entre outros [82][83]. Este método baseia-se na absorção de radiação eletromagnética a comprimentos de onda entre os 780 nm e os 2500 nm [84]. A radiação incidente na amostra é absorvida, dependendo da composição da amostra, e a radiação refletida é detetada por uma matriz de díodos (*diode array* em inglês). Através de equações de calibração, as modificações espectrais são convertidas em informação sobre a composição da amostra (ver Figura 31) [85].

Para controlo de qualidade, efetua-se a recolha de uma amostra, por turno (três vezes por dia), do produto em armazém (ver Figura 26), para que seja analisada em laboratório. Recolhem-se, também, amostras de bagaço de soja e colza uma vez por hora, à entrada do peneiro, onde se misturam os bagaços com o material separado das oleaginosas na fase de limpeza (maioritariamente cascas), para fins de controlo do processo. As amostras recolhidas neste ponto são analisadas num espectrofotómetro NIR de bancada, na fábrica de óleos e bagaços (ver Figura 26). Os teores de água e fibra à entrada do peneiro são ajustados manualmente em função dos resultados destas análises, num controlo manual por *feedback* negativo. O controlo do teor de água é feito através da introdução de água no sétimo piso do DTS. No caso do processamento de soja, a introdução de lecitinas no DTS é constante e a água que é utilizada na desgomagem é a que irá retificar o teor adequado de água no bagaço final. Quando esta não é suficiente, é possível perfazer o caudal de água necessário através da abertura manual de uma válvula que introduz água de processo no mesmo piso do DTS, através da corrente de lecitinas. No caso do processamento de colza, a introdução de lecitinas é intermitente, pelo que quando estas não são adicionadas, introduz-se somente água de processo. Por sua vez, o teor de fibra é controlado através da variação da frequência de rotação do motor de um transportador sem-fim, que é proporcional à quantidade de cascas adicionadas aos bagaços no peneiro.

A Figura 27 apresenta os perfis de variação dos teores de água dos bagaços de soja e colza, obtidos através das análises horárias a amostras recolhidas para controlo do processo.

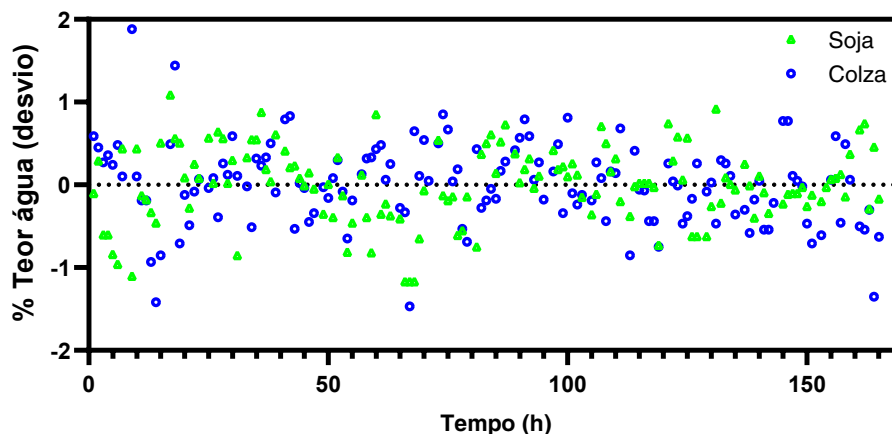


Figura 27 - Análises NIR de amostras recolhidas com periodicidade horária, entre 01/01/2019 e 15/01/2019, para controlo do processo (antes do peneiro). Desvio padrão amostral para as amostras de soja - 0,5%. Desvio padrão amostral para as amostras de colza - 0,5%. Percentagens mássicas.

As análises horárias aos parâmetros dos bagaços mostram uma variabilidade significativa do teor de água dos bagaços de soja e colza, que poderá relacionar-se com o grau de mistura do material no DTS e nos restantes equipamentos e/ou com a incerteza do método de amostragem e análise.

Nas Figuras 28 a 31 apresenta-se a qualidade dos bagaços de soja e colza, em termos de teor de água e de fibra, obtidos pelo *modus operandi* descrito acima.

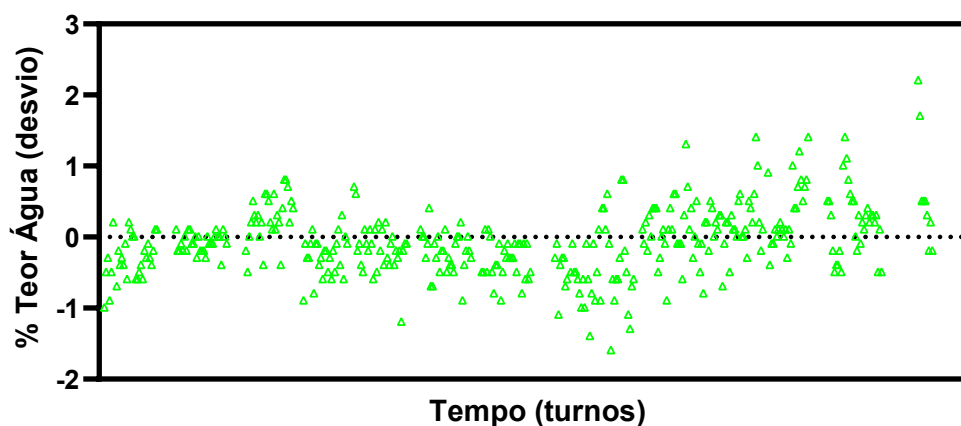


Figura 28 – Desvio, face à média, do teor de água do bagaço de soja, em armazém. Valores obtidos por análise de espectroscopia NIR a amostras recolhidas a cada turno entre 04/11/2018 a 17/11/2019. Percentagens mássicas.

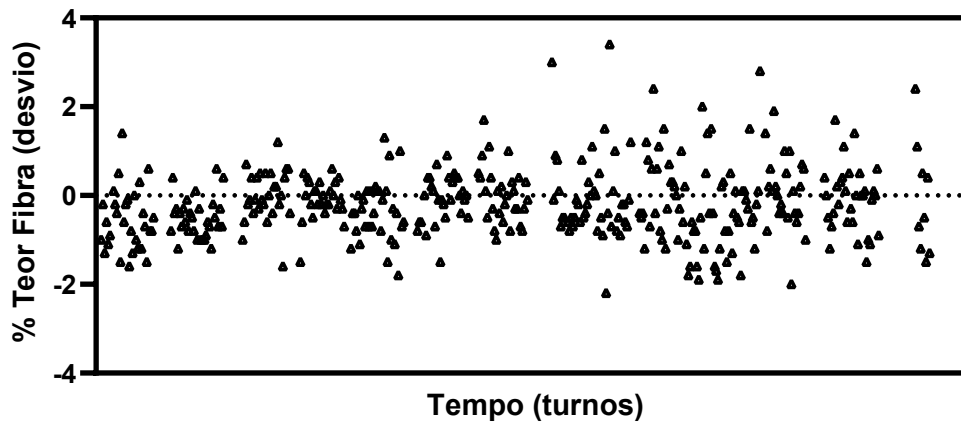


Figura 29 – Desvio, face à média, do teor de fibra do bagaço de soja, em armazém. Valores obtidos por análise de espectroscopia NIR a amostras recolhidas a cada turno entre 04/11/2018 a 17/11/2019. Percentagens mássicas.

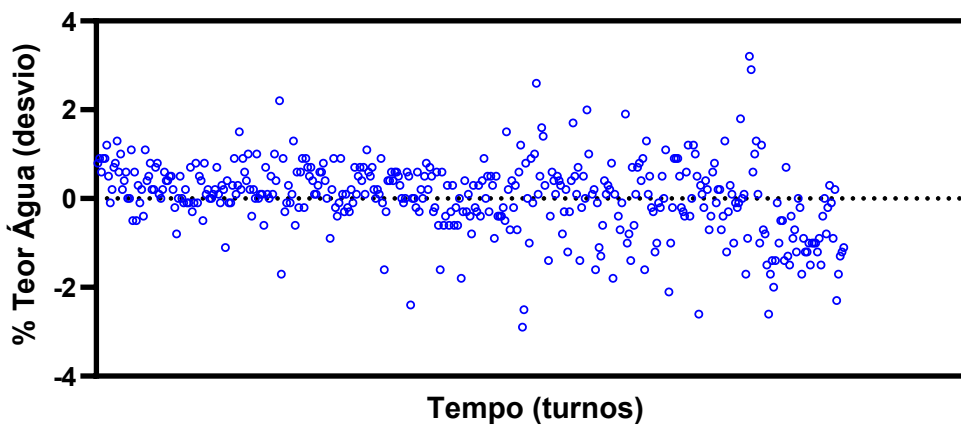


Figura 30 – Desvio, face à média, do teor de água do bagaço de colza, em armazém. Valores obtidos por análise de espectroscopia NIR a amostras recolhidas a cada turno entre 01/01/2019 a 13/11/2019. Percentagens mássicas.

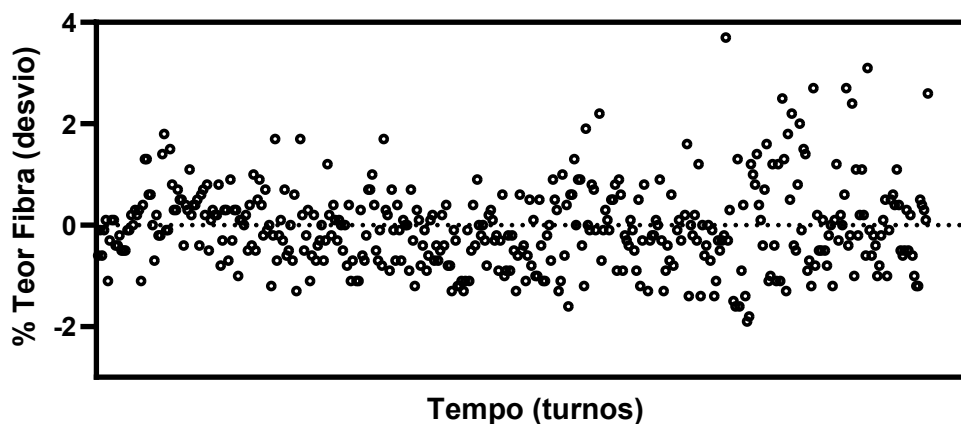


Figura 31 – Desvio, face à média, do teor de fibra do bagaço de colza, em armazém. Valores obtidos por análise de espectroscopia NIR a amostras recolhidas a cada turno entre 01/01/2019 a 17/11/2019. Percentagens mássicas.

A produção de bagaço dentro da especificação é importante para garantir a qualidade consistente do produto vendido. Por um lado, a produção de bagaço com um teor de água acima da especificação pode dar origem a reclamações por parte dos clientes. Por outro lado, a venda de bagaço com o maior teor de água e fibra possível, dentro da especificação, é vantajosa em termos económicos, porque maximiza a produção de bagaço. Os perfis dos teores de água e de fibra para o processamento quer de soja quer de colza, mostram que existe uma margem significativa para incrementar o teor em água e fibra dos bagaços produzidos e diminuir a dispersão dos valores em torno de um *set-point*.

O método descrito para o controlo e retificação dos parâmetros dos bagaços apresenta várias desvantagens:

- O processamento manual destes dados não permite que estes sejam acessíveis em tempo real, impedindo a sua utilização para a otimização e controlo automatizados do processo;
- Requer tempo de laboração aos operadores para recolher, preparar e analisar as amostras;
- O controlo é feito, no máximo, de hora a hora, significando (i) que existe um período de tempo alargado em que se pode produzir bagaço fora de especificação, e (ii) que a recolha de dados é fragmentada, sendo que para a maior parte do tempo de laboração não existe um registo dos parâmetros dos bagaços a serem produzidos;
- Os pontos de amostragem atuais não permitem uma retificação eficiente dos parâmetros. Por um lado, porque a análise do produto armazenado é demasiado tardia. Por outro, a análise do bagaço à entrada do peneiro não corresponde aos parâmetros do produto final, sendo por isso meramente orientadora.

Uma vez que a recolha e gestão de dados processuais de forma eficiente e automatizada se trata de um requisito primário à transição digital da indústria em estudo, torna-se evidente a necessidade de recondicionar o atual processo de controlo dos parâmetros dos bagaços produzidos.

5.2.3. Monitorização em Tempo Real dos Parâmetros dos Bagaços

A transposição do método de monitorização atual (*offline*) para um controlo de qualidade *inline* e em tempo real permitirá, em primeiro lugar, automatizar a retificação dos parâmetros dos bagaços, através da implementação de uma cadeia de controlo. Pretende-se que o controlo *inline* dos parâmetros contribua para a produção de bagaços com teores de água mais constantes (numa gama de teores de água mais limitada) e para a minimização do risco de produzir bagaços fora das especificações. Desta forma, é possível um maior controlo sobre o processo de produção e consequentemente maior qualidade do produto final. Em segundo lugar, e tendo em vista os conceitos da Indústria 4.0, a implementação da análise *inline* possibilita a recolha e processamento automáticos de dados processuais, contribuindo para o aumento da rastreabilidade das operações e traçando caminho para que posteriormente se possam aplicar métodos de análise de dados de forma eficaz, tendo como objetivo alcançar uma produção mais inteligente, autónoma e eficiente.

Com a digitalização gradual das indústrias, a análise NIR *inline* tem vindo a tornar-se uma prática comum, em vários setores, para efetuar o controlo automatizado dos processos, principalmente devido

ao seu baixo custo de operação e à capacidade de medir simultaneamente vários parâmetros químicos dos produtos [86][87]. O princípio da análise NIR *inline* é fundamentalmente o mesmo da análise NIR *offline* (fora da linha da produção, num espectrofotómetro de bancada). No caso do método *inline*, o produto em movimento é analisado no interior da linha de produção por um espectrofotómetro instalado no exterior do sistema de transporte (tubagem, tremonha, caída ou correia transportadora). O princípio de funcionamento do equipamento é esquematizado na Figura 32.

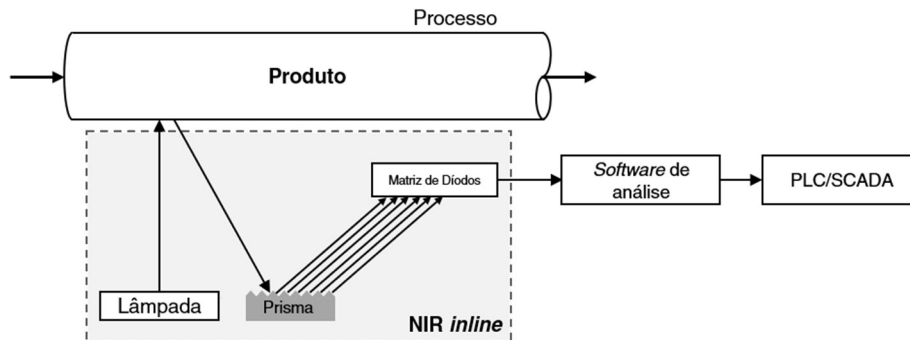


Figura 32 - Princípio de funcionamento de um espectrofotómetro NIR. Análise *inline*.

A primeira questão a ter em conta na implementação do sistema de controlo *inline* é a escolha da localização mais adequada para efetuar a monitorização dos parâmetros dos bagaços. Para tal, consideraram-se os seguintes critérios técnicos:

- Boa homogeneidade do produto para uma boa representatividade das medições;
- Análise de todo o produto produzido;
- Proteção do equipamento face às intempéries;
- Distância de cablagem do ponto de monitorização ao ponto de ligação com o servidor, onde é efetuada a interpretação das medições pelo *software* de análise de espectros;
- Acessibilidade ao local, para fins de manutenção e outros.

Com base nestes critérios, ponderaram-se diferentes localizações ao longo da linha de produção, esquematizados na Figura 33.

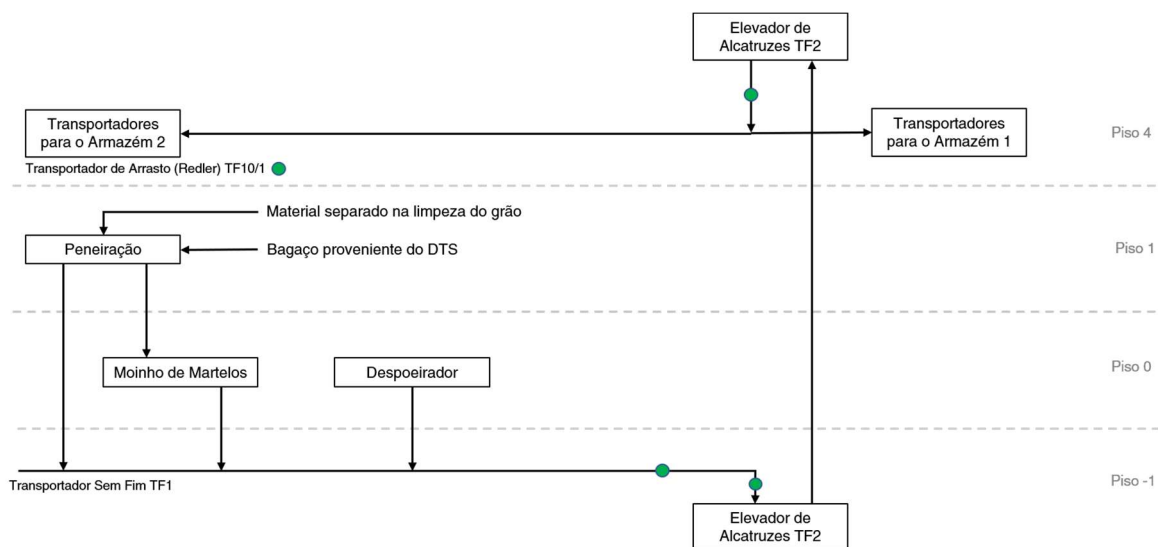


Figura 33 - Possíveis pontos de controlo dos parâmetros do bagaço na linha de produção da fábrica de óleos e bagaços.

De forma a facilitar a comparação das várias hipóteses, elaborou-se uma tabela de pontuações (Tabela 5) através da avaliação no terreno dos vários locais, tendo em conta os critérios apresentados acima.

Tabela 5 - Tabela de pontuações para a adequação de três locais distintos considerados para efetuar o controlo dos parâmetros dos bagaços. Verde – Bom; Amarelo – Razoável; Vermelho – Mau.

Critérios\Opções	TF10/1	Topo TF2	Entrada do TF2	TF1
Homogeneidade do bagaço	●	●	●	●
Análise de todo o bagaço	●	●	●	●
Exposição às intempéries	●	●	●	●
Distância de cablagem	●	●	●	●
Acessibilidade	●	●	●	●

Através destas pontuações é possível verificar que as localizações à entrada do elevador de alcatruzes TF2 (que transporta o produto final do piso -1 ao piso 4) e no final do transportador sem-fim TF1 são as mais adequadas. Na primeira, o produto cai do transportador sem fim para o pé do elevador de alcatruzes, num troço com uma inclinação de 55° (ver Figura 34, (2)). Na segunda, o analisador será instalado na base da caixa em “U” do transportador sem-fim (ver Figura 34 (1)).

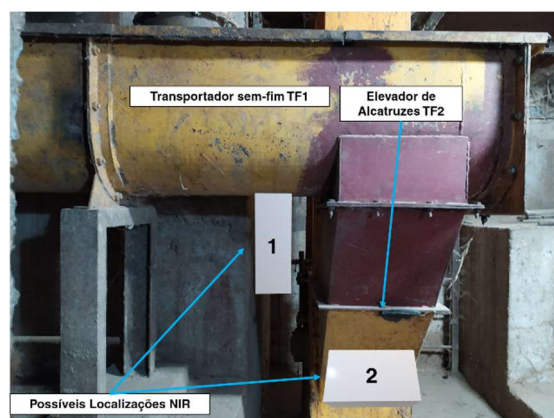


Figura 34 - Esquemática da instalação de um espectrofotómetro NIR (1) no transportador sem fim TF1 e (2) à entrada do elevador de alcatruzes TF2.

O facto da homogeneidade do produto não ser totalmente garantida nestes dois pontos (e por isso terem uma pontuação intermédia segundo este critério) prende-se com a proximidade do local onde é adicionado o material proveniente de um despoeirador. No entanto, como este consiste apenas numa pequena fração do caudal total de produto, considera-se aceitável o controlo dos parâmetros nestas localizações. Por fim, entre estas duas opções, apurou-se a mais adequada de forma colaborativa com os fornecedores da instrumentação a implementar. Assim, considerou-se um critério adicional importante que tem que ver com a compacidade suficiente do produto no local considerado, de forma a não existirem interstícios de ar que comprometam a qualidade das medições. Com base neste critério, pode concluir-se que a instalação no transportador sem-fim é preferível, dado que à entrada do elevador de alcatruzes o produto cai do transportador sem-fim para o elevador de forma pouco compacta. Contornar essa situação implicaria a adaptação do troço, através da instalação de peças

no interior das tubagens (por exemplo, uma eclusa ou uma aba com atuador pneumático, controladas por um sensor), o que significaria aumentar a probabilidade de ocorrerem atravancamentos de produto, que resultam em paragens na produção. Já a instalação do analisador na base do transportador sem-fim implica apenas o corte de uma fração da espira do transportador, como esquematizado na Figura 35, de forma a que o produto passe de forma ininterrupta pela janela de medição do analisador. A avaliação das restantes localizações é discutida em anexo (Anexo D – Retificação dos Parâmetros dos Bagaços de Soja e Colza).

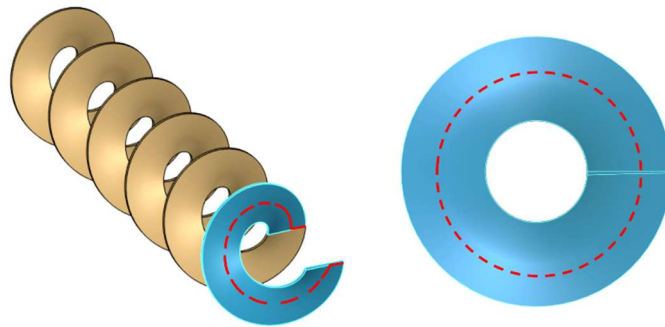


Figura 35 - Esquematização da adaptação a efetuar (corte assinalado a vermelho) à espira do transportador sem-fim para a instalação do analisador NIR.

Após definir o melhor local para a instalação do espectrofotómetro NIR *inline*, é necessário definir a cadeia de controlo para a retificação automatizada dos parâmetros dos bagaços. Para isso, começa-se por definir as variáveis do processo:

- Teor de água, teor de fibra, teor de óleo e teor de proteína dos bagaços: são variáveis controladas pelo espectrofotómetro NIR *inline*;
- Caudal de água de processo introduzida no sétimo piso do DTS: variável manipulada através de uma válvula moduladora de caudal e de um caudalímetro;
- Quantidade de material separado na limpeza das oleaginosas (maioritariamente cascas): variável manipulada através de um variador de velocidade, que controla a rotação de um transportador sem fim responsável pela adição deste material ao bagaço.

A estratégia de controlo por realimentação (*feedback*), apresentada na Figura 36, inclui a medição das variáveis controladas (variáveis de saída, $x(t)$), a comparação dessas medições com os *set-points* correspondentes (valores desejados, x_{sp}), e a atuação $p(t)$ em resposta aos erros $e(t)$ (diferença entre o valor do *set-point* convertido num sinal interno do controlador, através das relações de calibração do analisador, \tilde{x}_{sp} , e da variável medida pelo analisador, x_m) através do ajuste das variáveis manipuladas (variáveis de entrada, $w(t)$) [88]. Neste caso, uma vez que a ação corretiva do controlador força a variável controlada a aproximar-se do valor de *set-point*, a estratégia de controlo designa-se por *feedback* negativo [88].

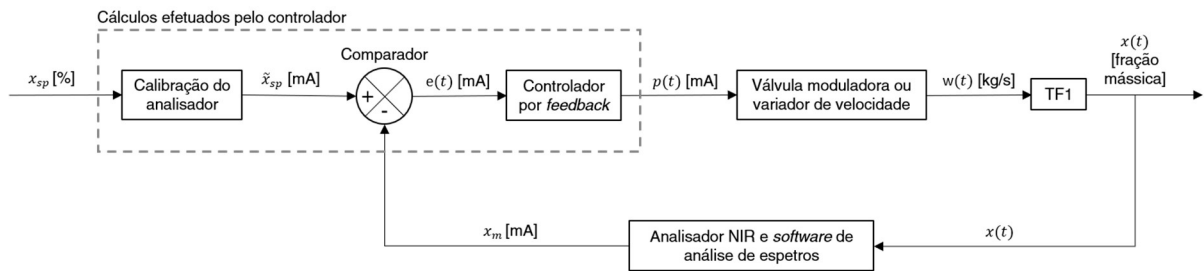


Figura 36 – Diagrama de blocos da cadeia de controlo por *feedback* negativo para a retificação de um dos parâmetros dos bagaços.

Enquanto o diagrama de blocos da Figura 36 representa o fluxo de informação na cadeia de controlo, o esquema da Figura 37 representa das ligações físicas entre os componentes da mesma.

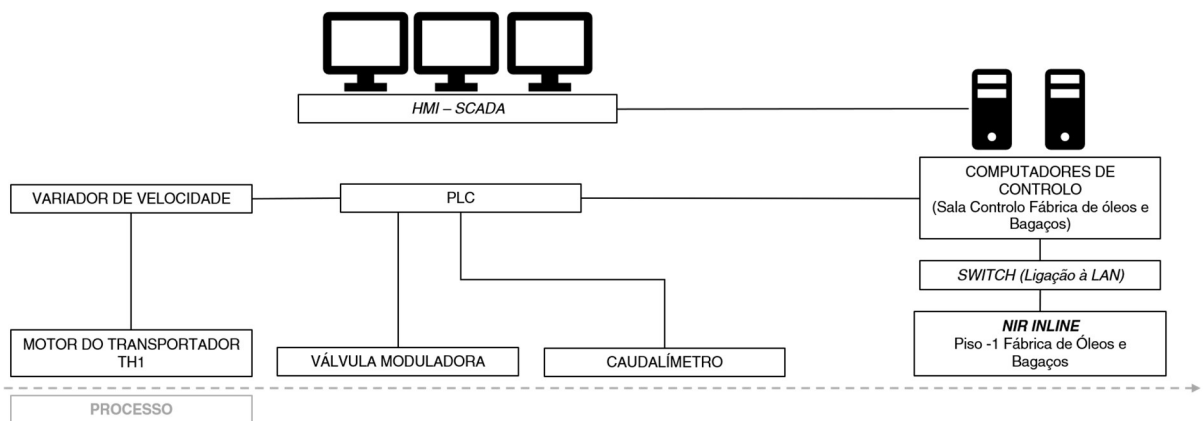


Figura 37 - Esquematização da metodologia de controlo dos parâmetros dos bagaços.

Para a implementação da cadeia de controlo esquematizada na Figura 37 foi necessário efetuar um levantamento, no terreno, da instrumentação existente e da que é necessário introduzir. A válvula atual através da qual se regula o caudal de água de processo que é introduzido no DTS consiste numa válvula manual do tipo macho esférico. Para além de não possuir atuador, é uma válvula do tipo *on/off*, não sendo adequada para a regulação de caudais. Já o caudalímetro existente consiste num caudalímetro analógico calibrado para um fluido orgânico, não fornecendo uma indicação direta do caudal que água a ser debitado. Assim, o controlo *inline* dos parâmetros dos bagaços requer, para além da instalação de um espectrofotómetro *inline*, a instalação de uma válvula moduladora com atuador pneumático e de um caudalímetro novo. As alterações efetuadas no P&ID do processo para a implementação desta cadeia de controlo podem ser consultadas em anexo (Anexo D – Retificação dos Parâmetros dos Bagaços de Soja e Colza).

5.2.3.1. Ensaios Industriais

Com o intuito de contribuir para o entendimento do sistema que se pretende controlar, averiguou-se (i) a dinâmica de resposta do sistema, em cadeia aberta, a perturbações na variável manipulada e (ii) a forma como o teor de água do bagaço final evolui em função do caudal de água que é introduzido no sétimo piso do DTS.

A modelação de um sistema através do desenvolvimento de um modelo teórico rigoroso pode não ser prático, ou mesmo exequível, para processos complexos, se o modelo envolver um grande número de equações com um número significativo de variáveis processuais (e.g. propriedades físicas e químicas de várias correntes de processo). Uma abordagem alternativa consiste no desenvolvimento de um modelo empírico diretamente a partir de dados experimentais. Os modelos experimentais são frequentemente designados por modelos de “caixa negra” porque o processo a ser modelado pode equiparar-se a uma caixa opaca. Neste, as variáveis de entrada e de saída (u e y , respetivamente) são conhecidas, mas a dinâmica ou funcionamento interno da caixa não é (ver Figura 38) [88]. Esta metodologia é adequada ao estudo do sistema de retificação do teor de água dos bagaços, uma vez que, entre outros aspetos, a dinâmica de mistura do produto no interior do DTS é matematicamente complexa de descrever.

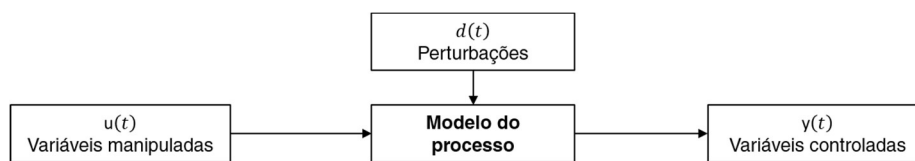


Figura 38 - Esquematização de um modelo de caixa negra.

Os modelos dinâmicos empíricos podem ser utilizados para entender o comportamento do sistema em estados transientes. Também são utilizados para definir uma estratégia de controlo adequada e analisar a sua performance. Estes modelos são tipicamente descritos através de equações diferenciais de ordens reduzidas ou funções de transferência (e.g. modelos de primeira ou segunda ordem, geralmente com atraso), com os respetivos parâmetros a serem determinados através de dados experimentais [88].

A relação entre uma variável de entrada e uma variável de saída, para um sistema com uma dinâmica de primeira ordem, é dada pela Equação 5 [88].

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Ku(t) \quad (\text{em que } y(t) \text{ e } u(t) \text{ são variáveis de desvio}) \quad (\text{Eq. 5})$$

A resposta de um sistema deste tipo a uma perturbação em degrau na variável de entrada, de magnitude M , pode ser caracterizada, no espaço de La Place, pela função de transferência,

$$Y(s) = \frac{KM e^{-\theta s}}{s(\tau s + 1)} \quad (\text{em que } Y(s) = \mathcal{L}(y(t)) \text{ e } U(s) = \mathcal{L}(M) = \frac{M}{s}) \quad (\text{Eq. 6})$$

e a resposta no domínio temporal é dada por:

$$y(t) = KM \left(1 - e^{-\frac{t-\theta}{\tau}}\right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Os parâmetros das Equações 6 e 7 permitem caracterizar um sistema em cadeia aberta [88]. O ganho estacionário, K , corresponde à razão entre a variação da variável de saída e a variável de entrada (em estado estacionário). O tempo característico, τ , para um sistema de primeira ordem, corresponde ao tempo que a resposta da variável de saída leva a completar 63,2% da sua variação total. O atraso temporal, θ , representa o tempo que decorre entre a ocorrência da perturbação à entrada e o início da resposta da variável de saída [88].

O gráfico que ilustra a resposta do processo a uma perturbação em degrau numa variável de entrada é frequentemente designado por curva reacional do processo. Se o sistema em causa puder ser aproximado a um modelo linear de primeira ou segunda ordem, os respetivos parâmetros podem ser obtidos graficamente, de forma aproximada, a partir da curva reacional do processo [88].

Posto isto, efetuou-se um estudo experimental do comportamento dinâmico em cadeia aberta do sistema de retificação do teor de água nos bagaços das oleaginosas X e Y, através do qual se obtiveram curvas reacionais do processo em resposta a perturbações em degrau no caudal de água alimentado ao sétimo piso do DTS. O estudo inclui, também, o ajuste de modelos de primeira ordem com atraso aos dados experimentais, no sentido de averiguar a ordem da dinâmica do sistema em estudo. Estes ajustes permitiram calcular os parâmetros do sistema (K e τ) e compará-los com os obtidos graficamente através das curvas reacionais do processo.

5.2.3.1.1. Metodologia

Efetuaram-se quatro ensaios industriais (dois para cada oleaginosa) através da recolha e análise de amostras de bagaço antes, durante e após ser efetuada uma perturbação em degrau negativo no caudal de água introduzido no DTS. Em primeiro lugar, foi necessário garantir que não houve influência de outras variáveis na resposta do sistema à perturbação efetuada na variável de entrada. Tal implicou garantir uma introdução de lecitinas (fosfatídeos hidratados) constante ou inexistente durante os ensaios. No caso do processamento de grãos de soja, dado que a introdução de lecitinas é constante (e não é adicionada, normalmente, mais água de processo), a perturbação consistiu na interrupção da adição das lecitinas. No caso do processamento de sementes de colza, a introdução de lecitinas é intermitente e, por isso, a perturbação em degrau consistiu na interrupção da adição de água de processo num período em que não eram adicionadas as lecitinas. Já a adição de materiais separados no processo de limpeza também deve ser constante e encontrar-se estabilizada aquando da realização dos ensaios.

Em termos de aproximações efetuadas, é necessário mencionar que o teor de água do bagaço varia em função do caudal de água adicionado, que por sua vez deve ser função do caudal de oleaginosa a ser processado. Dado não existir uma balança de processo à entrada da linha de produção, o caudal processado tem de ser estimado com base na quantidade de óleo vegetal produzido. Outra aproximação tem que ver com o ponto onde serão recolhidas as amostras. Estas não foram recolhidas no local onde se propõe a instalação do analisador NIR, na secção final do transportador sem-fim TF1, por não existir um ponto de amostragem nesse local. As amostras foram recolhidas à saída do elevador de alcatruzes TF2. Este erro será minimizado contabilizando-se o tempo de residência no TF2.

Começou-se cada ensaio com a imposição da perturbação no instante $t=0$ e efetuou-se a primeira recolha de amostra ao fim de cinco minutos. Uma vez que se sabe que o atraso do sistema é superior a pelo menos quinze minutos, quer para o processamento de soja quer para o de colza, as primeiras três amostragens, no mínimo, correspondem ao primeiro estado estacionário do sistema. Foram recolhidas amostras de cinco em cinco minutos até se perfazer um tempo estimado para o alcance do segundo estado estacionário. Após a conclusão do tempo de ensaio, foram analisadas as amostras

recolhidas. Estas foram moídas num moinho ultracentrífugo e introduzidas num espectrofotómetro NIR de bancada. Os teores de água obtidos foram representados graficamente em função do tempo, numa curva reacional de processo. Através destes gráficos foram determinados (graficamente) o ganho estacionário, o tempo característico e o atraso para cada conjunto de pontos experimentais. Os ganhos do sistema em cadeia aberta, K , foram determinados, segundo a abordagem gráfica, através da Equação 8 e os tempos característicos, τ , a partir da Equação 9. O atraso em cada ensaio foi determinado visualmente.

$$K = \frac{y_{ee,f} - y_{ee,i}}{u_{ee,f} - u_{ee,i}} \quad (\text{Eq. 8})$$

$y_{ee,i}$ e $y_{ee,f}$ são os estados estacionários inicial e final da variável controlada, respetivamente;

$u_{ee,i}$ e $u_{ee,f}$ são os estados estacionários inicial e final da variável manipulada, respetivamente.

$$\tau = 0,632KM \quad (\text{em que } M = u_{ee,f} - y_{ee,i}) \quad (\text{Eq. 9})$$

Os dados que resultam destes ensaios são conjuntos de dados discretos. A solução analítica discreta da Equação 5, que corresponde a um modelo discreto de primeira ordem com atraso (FOPTD) é dado pela Equação 10, em que k são os instantes em que foram recolhidas as amostras ($k=1, 2, 3, \dots$). É de notar que na Equação 10, $y(k)$ e $u(k)$ são expressas como variáveis de desvio.

$$y(k) = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} y(k-1) + K(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}) u(k-1 - \theta), \quad \text{com } t = k\Delta t \quad (\text{Eq. 10})$$

O ajuste do modelo da Equação 8 aos pontos experimentais, recorrendo à soma dos mínimos quadrados como critério de ajuste, permite estimar iterativamente os parâmetros τ e K .

No que diz respeito aos ajustes efetuados, utilizaram-se os valores dos parâmetros obtidos graficamente como primeira iterada para o modelo discreto de primeira ordem com atraso. A regressão não linear foi feita recorrendo à ferramenta *Solver* do Excel® (versão 2002). Os atrasos utilizados nos ajustes do modelo foram os atrasos determinados graficamente através das curvas reacionais de processo.

5.2.3.1.2. Resultados e Discussão

As Figuras 39 e 40 apresentam as curvas reacionais obtidas para cada ensaio realizado, bem como o ajuste de um modelo discreto de primeira ordem com atraso (FOPTD), dado pela Equação 8. Os parâmetros do sistema em cadeia aberta obtidos para cada ensaio, através de uma abordagem gráfica e através do ajuste do modelo, são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

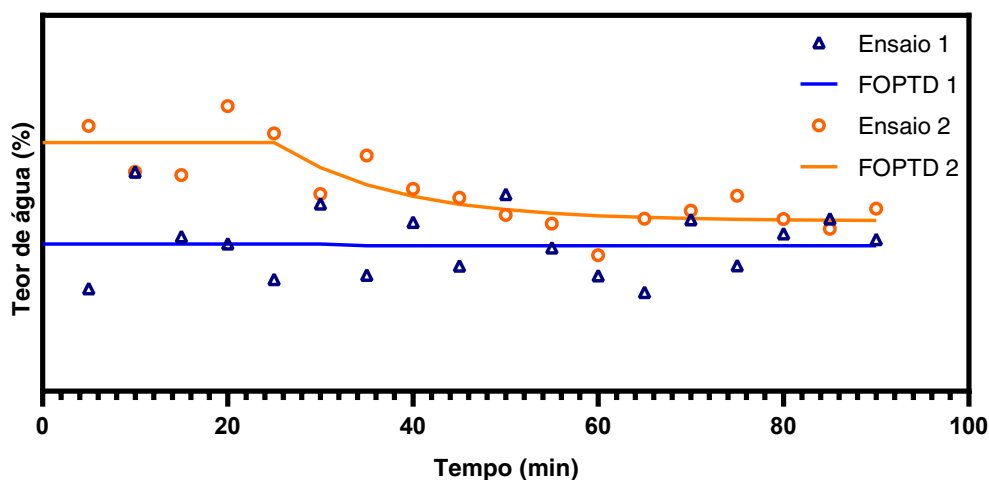


Figura 39 - Respostas do sistema em cadeia aberta, para o processamento de soja, às perturbações em degrau negativo no caudal de água introduzido no DTS. Ajuste de um modelo discreto de primeira ordem com atraso aos pontos experimentais. Ensaio 1 e 2 efetuados a 07/02/2020 e 28/02/2020, respetivamente. Os teores de água são explicitados em anexo (Anexo D – Retificação dos parâmetros dos Bagaços de Soja e Colza).

Tabela 6 - Parâmetros do sistema em cadeia aberta no processamento de soja obtidos graficamente e por regressão não linear (RNL).

	Ensaio 1		Ensaio 2	
	Gráfico	RNL	Gráfico	RNL
θ (min)	30		25	
K (%/l.min)	0,0017	0,0006	0,028	0,028
τ (min)	0,0261	0,2832	0,389	12,91
Soma Mínimos Quadrados	-	1,2487	-	0,497

A análise das curvas reacionais do processo, obtidas para o processamento de soja, permite inferir que o atraso do sistema é de, aproximadamente, 25 a 30 minutos. Os caudais de grão de soja processados diferiram por 4 toneladas por hora. No entanto, uma vez que a magnitude da perturbação no caudal de água foi proporcional ao caudal processado, não seria espectável que os estados estacionários iniciais fossem diferentes e, por isso, poderão refletir a influência de uma ou mais variáveis não contabilizadas (variáveis de distúrbio). Quanto aos parâmetros obtidos para os dois ensaios, os ganhos estacionários determinados pelas equações 9 e 10 são próximos dos obtidos por RNL. São valores reduzidos, como seria de esperar, dado que uma perturbação de 24 L/min e 22 L/min origina uma alteração de 0,04 e 0,6 pontos percentuais na variável controlada, no ensaio 1 e 2, respetivamente. Ainda assim, pode constatar-se a inconsistência entre ensaios, dado que no primeiro uma perturbação maior na variável de entrada surtiu um efeito menor na resposta da variável de saída, comparativamente aos resultados do segundo ensaio. Os tempos característicos apresentam alguma discrepância entre os dois métodos, tendo-se alcançado valores mais elevados para os parâmetros obtidos por RNL. Uma vez que o tempo característico corresponde ao tempo que a resposta da variável controlada leva a completar 63,2% da resposta total à perturbação, pode inferir-se que a esse ponto corresponde uma ordenada $t = \theta + \tau$, pelo que os valores obtidos através da RNL são mais razoáveis ou próximos do valor real, tendo em conta os dados experimentais.

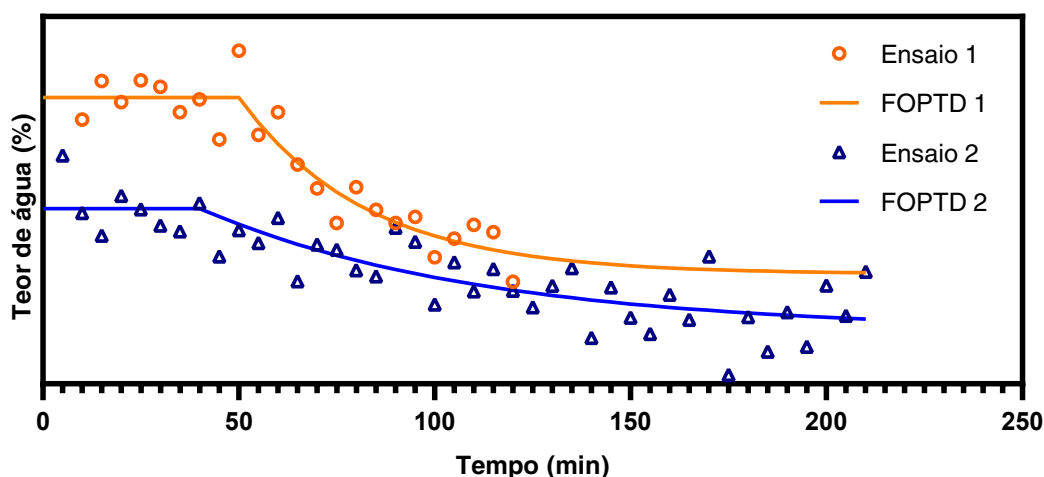


Figura 40 - Respostas do sistema, para o processamento de colza, às perturbações em degrau negativo no caudal de água introduzido no DTS. Ajuste de um modelo discreto de primeira ordem com atraso aos pontos experimentais. Ensaio 1 e 2 efetuados a 28/01/2020 e 13/02/2020, respetivamente. Os teores de água são explicitados em anexo (Anexo D – Retificação dos Parâmetros dos Bagaços de Soja e Colza).

Tabela 7 - Parâmetros do sistema em cadeia aberta no processamento de colza obtidos graficamente e por regressão não linear (RNL).

	Ensaio 1		Ensaio 2	
	Gráfico	RNL	Gráfico	RNL
θ (min)	45		35	
K (%/l.min)	-	0,077	0,046	0,053
τ (min)	-	32,56	0,730	72,32
Soma Mínimos Quadrados	-	1,193	-	3,468

No caso do processamento de colza, obtiveram-se de, aproximadamente, 35 a 45 minutos. São valores superiores aos obtidos para o processamento de soja, como esperado, uma vez que θ relaciona-se com o tempo de residência do bagaço no interior dos equipamentos e o caudal processado de soja é cerca de 1,9 vezes inferior. Uma vez que o caudal de colza processado, a quantidade de casca adicionada e a magnitude da perturbação do caudal de água foram os mesmos para os dois ensaios, tal como para o processamento de soja, a diferença entre os estados estacionários iniciais sugere que poderá ter ocorrido a influência de variáveis não contabilizadas entre os dois ensaios. Quanto aos tempos característicos, os parâmetros obtidos por RNL são significativamente superiores aos obtidos pelas equações 9 e 10. Apesar de não haver comparabilidade com o ensaio 1, os parâmetros obtidos pelos ajustes foram mais razoáveis que os obtidos pelas equações 9 e 10, tendo em conta a definição de tempo característico e o perfil das curvas reacionais de processo obtidas. A recolha de amostras durante o ensaio 1 não foi efetuada durante o tempo necessário por não se saber *a priori* uma estimativa suficientemente precisa do tempo de resposta do sistema e por isso não se alcançou o segundo estado estacionário.

Os gráficos das Figuras 39 e 40 mostram que as medições efetuadas apresentam ruído. Efetuando-se o desvio padrão dos valores correspondentes aos primeiros estados estacionários, apresentados na Tabela 8, verifica-se que o desvio padrão médio é 0,26%.

Tabela 8 - Desvio padrão amostral obtido para os valores correspondentes ao primeiro estado estacionário de cada ensaio efetuado.

	Ensaio	Desvio Padrão (%)
Soja	1	0,24
	2	0,32
Colza	1	0,20
	2	0,28

Este ruído pode surgir da operação normal do processo, por exemplo, devido à mistura inadequada nos equipamentos, que pode resultar em volumes pontuais com maior ou menor concentração [88]. Pode, também, ter que ver com a variabilidade do método de análise (amostragem e moagem das amostras) e do instrumento (neste caso, um espectrofotómetro NIR de bancada). Mesmo apresentando ruído, foi possível obter um ajuste razoável de um modelo de primeira ordem com atraso aos dados experimentais. Em termos da qualidade do ajuste, há-que ter em conta que o processo real dificilmente será de primeira ordem ou linear, pois apenas os processos mais simples apresentam tal dinâmica ideal [88].

Por fim, a estabilização do processo no novo estado estacionário (pelo menos em três dos quatro ensaios efetuados) face a uma perturbação em degrau sustentada até ao fim do ensaio permite verificar que, numa primeira análise, o sistema é estável em cadeia aberta.

5.2.3.1.3. Conclusões

A cadeia de controlo que se pretende implementar baseia-se na medição *inline* dos parâmetros dos bagaços de soja e colza. Neste tipo de cadeias de controlo (baseadas na medição de concentrações), e nesta em específico, dados os desvios padrão obtidos para os ensaios efetuados, a imprecisão do método de medição pode constituir uma limitação significativa ao controlo dos parâmetros, no sentido de dificultar a produção de bagaços dentro de uma gama reduzida de teores de água [88]. Por outro lado, os atrasos significativos nas respostas do sistema podem afetar adversamente a performance da cadeia de controlo, levando à possível produção de produto fora de especificação [88]. Outra limitação importante a ter em conta é que os caudais processados de oleaginosas não são conhecidos com precisão, nem em tempo real e, uma vez que a variável controlada é uma percentagem mássica, não é possível estabelecer uma relação entre esta e o caudal de água manipulado.

Os resultados obtidos nestes ensaios são dados preliminares, que beneficiariam de repetibilidade. Ainda assim, permitem obter um primeiro entendimento da dinâmica do sistema e das limitações associadas à automatização da retificação dos parâmetros dos bagaços.

5.2.3.2. Propostas Técnicas e Orçamentação

Foram consultados diferentes fornecedores para obter propostas técnicas e respetivas orçamentações para espectrofotómetros NIR, para efetuar o controlo automatizado dos parâmetros dos bagaços. Foram consultados três (D, E e F) fornecedores, dos quais se obtiveram duas propostas técnicas e orçamentos. As principais características técnicas das propostas obtidas são apresentadas na Tabela 9. A proposta técnica do fornecedor C não cumpriu o critério fundamental, que consiste na

medição de quatro parâmetros (teor de água, fibra, proteína e óleo) dos bagaços com o mesmo instrumento e por isso, foi excluída à partida. Foram comparadas as dimensões dos instrumentos, de forma a garantir que a sua instalação no local previsto não irá bloquear o acesso dos operadores aos espaços circundantes. A localização do instrumento será num ambiente com poeiras, com uma temperatura que rondará os 20 °C com um máximo, nos meses de verão, que poderá alcançar os 35 °C, pelo que a temperatura de operação suportada pelo instrumento e o seu grau de proteção IP são fatores relevantes a considerar. A instalação do instrumento no local, pelo fornecedor, é um ponto que também merece consideração, uma vez que a instalação por técnicos especializados é sempre preferível de forma a não colocar em causa o correto funcionamento de todo o sistema.

Tabela 9 - Características técnicas das propostas obtidas pelos fornecedores D, E e F. N.E. – Não Especificado.

Características Técnicas	Fornecedores		
	D	E	F
Medição de 4 parâmetros do bagaço	Sim	Sim	Não
Gama espectral NIR	1100 – 1650 nm	950 – 1650 nm	N.E.
Dimensões (CxAxL em cm)	42x42x13,5	34x22x23	N.E.
Instalação no transportado sem-fim	Sim	Sim	N.E.
Grau de proteção IP	IP 69K	IP 65	N.E.
Instalação em zona ATEX	Sim	Sim	Sim
Temperaturas	5 - 40°C	-15 - 40°C	0 - 55°C
Integração no sistema SCADA	Sim	Sim	Sim
Comunicação	Ethernet, Profibus, 4-20 mA	Ethernet, Profibus, 4-20 mA	Ethernet, Profibus, 4-20 mA
Corrente alimentação	100 - 240V AC, 2 A	24V DC, 5 A	80/260V AC ou 24V DC
Instalação do equipamento	Sim	Não	N.E.
Instalação de cablagem, ligações de comunicação e elétricas	Não	Não	N.E.
Possibilidade de utilização das calibrações existentes	Sim	Sim	N.E.
Garantia	1 ano	N.E.	1 ano

As propostas orçamentais são apresentadas na Tabela 10, incluindo o custo da instrumentação necessária à implementação da cadeia de controlo da retificação dos parâmetros dos bagaços.

Tabela 10 – Resumo dos investimentos necessários para à implementação do controlo *inline* dos parâmetros dos bagaços de soja e colza. O investimento total é discriminado em anexo (Anexo D – Retificação dos Parâmetros dos Bagaços de Soja e Colza).

Rúbrica	Fornecedor D	Fornecedor E
Investimento		
Equipamento	83,9 %	80,6 %
Software	2,1 %	3,2 %
Instalação e Formação	N.E.	N.E.
Instrumentação	14,3 %	16,2 %

5.2.4. Investimento e Análise Económica

O custo de investimento e análise económica do sistema de controlo *inline* dos parâmetros dos bagaços de soja e colza passou pela determinação dos proveitos económicos associados à implementação de uma cadeia de controlo, seguida de uma análise de rentabilidade do projeto, tendo em conta os investimentos necessários.

5.2.4.1. Proveitos Económicos

A primeira etapa da análise económica assentou na estimativa dos proveitos económicos que advêm da implementação de um sistema de controlo *inline* dos parâmetros dos bagaços. Os proveitos económicos, como foi referido no ponto 5.2.2., relacionam-se com a venda de bagaços com o maior teor de água e fibra possível, dentro dos limites das especificações de venda dos produtos. Para a estimativa dos proveitos considerou-se apenas a influência do aumento do teor de água na quantidade de bagaço produzido. O proveito corresponde, especificamente, às diferenças de toneladas entre o bagaço efetivamente produzido, $m_{bagaço\ produzido}$, e uma mesma quantidade de bagaço (seco) com um determinado teor de água, $m_{bagaço,x_{SP}}$ (Equação 11). A Equação 11 foi aplicada à média de teores de água do bagaço produzido diariamente (três amostras), durante o ano de 2019. Os cálculos subsequentes são detalhados em anexo (Anexo D – Retificação dos Parâmetros dos Bagaços de Soja e Colza).

Se $m_{bagaço,x_{SP}} < m_{bagaço\ produzido}$ significa que atualmente se produz um bagaço a um teor de água médio superior ao teor de água de comparação (x_{SP}) e por isso, a situação atual é vantajosa face ao *set-point* de comparação, resultando num proveito do investimento negativo. Por exemplo, se num determinado dia se produzir um bagaço com menor teor de água do que o *set-point* de comparação, nesse dia houve uma perda económica, correspondendo a um potencial ganho com a implementação da cadeia de controlo, e vice-versa. De facto, o gráfico da Figura 41 mostra que só é vantajoso implementar a cadeia de controlo se esta permitir a produção de bagaços com um teor de água acima da média atual.

$$Proveito (\text{€/dia}) = (m_{bagaço,x_{SP}} - m_{bagaço\ produzido})(\text{ton/dia}) \times \text{Preço do bagaço}(\text{€/ton}) \quad (\text{Eq. 11})$$

A partir da Equação 11 é possível inferir que o proveito a retirar do presente investimento depende diretamente do teor de água ao qual se estabelece a produção de bagaços, x_{SP} , sendo que quanto mais próximo do limite da especificação de produto, maior será a rentabilidade do

investimento. Os proveitos são apresentados em função do *set-point*, no gráfico da Figura 41.

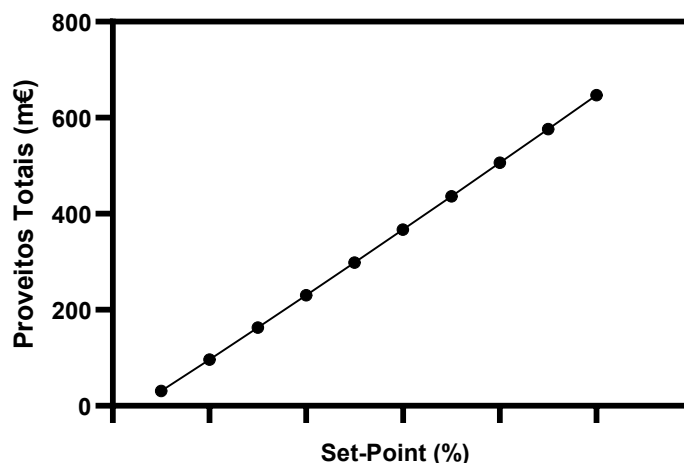


Figura 41 - Proveito económico em função do *set-point* estabelecido. Os valores de *set-point* são omitidos por questões de confidencialidade.

Apesar do gráfico da Figura 41 aparentar uma evolução linear dos proveitos em função do *set-point*, esta variação não é linear. A não-linearidade confirma-se pela variação do declive do gráfico da Figura 41, representada pela sua derivada, na Figura 42. Os valores relativos aos proveitos económicos para cada valor de *set-point* podem ser consultados em anexo (Anexo D – Retificação dos Parâmetros dos Bagaços de Soja e Colza).

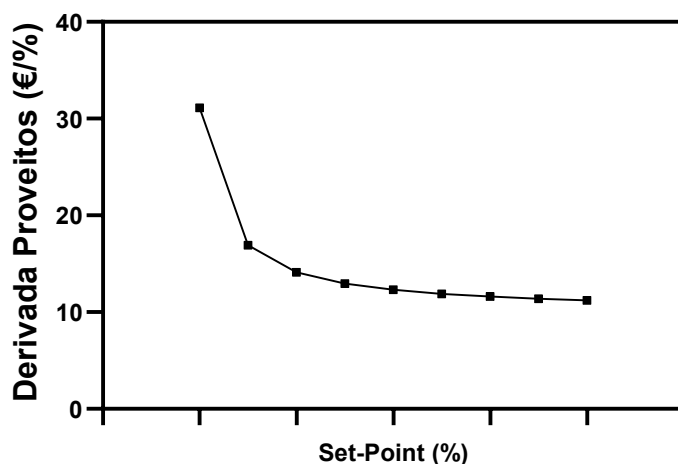


Figura 42 - Derivada dos proveitos económicos totais em função do *set-point*. Os valores de *set-point* são omitidos por questões de confidencialidade.

5.2.4.2. Análise de Rentabilidade do Projeto

Efetuiu-se a análise de rentabilidade das propostas recebidas com base nos fluxos financeiros (*cash flows*) atualizados e admitindo que o projeto é financiado somente com capital próprio. A partir

do mapa de fluxos financeiros, inferiram-se os principais indicadores de rentabilidade económica para um período de 8 anos:

- Valor atualizado líquido (VAL);
- Taxa interna de rentabilidade (TIR) e;
- Período de retorno do investimento (PRI).

O cálculo destes indicadores é explicitado no Anexo B – Análise Económica.

Da mesma forma que o proveito do investimento varia em função do teor de água do bagaço com o qual se efetua a comparação com o teor atual, os indicadores VAL, TIR e PRI vão também depender dessa variável e são apresentados nos gráficos das Figuras 43 a 45.

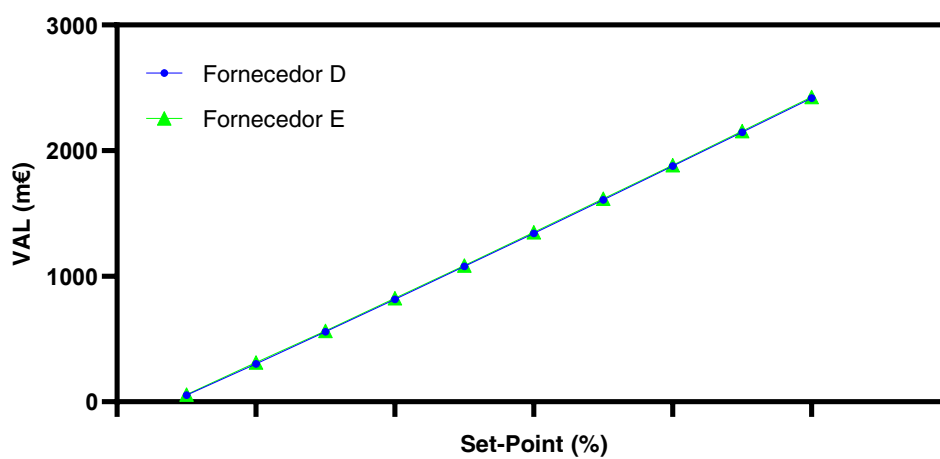


Figura 43 - Valor atual líquido em função do *set-point* definido para a produção de bagaços de soja e colza. Os valores de *set-point* são omitidos por questões de confidencialidade.

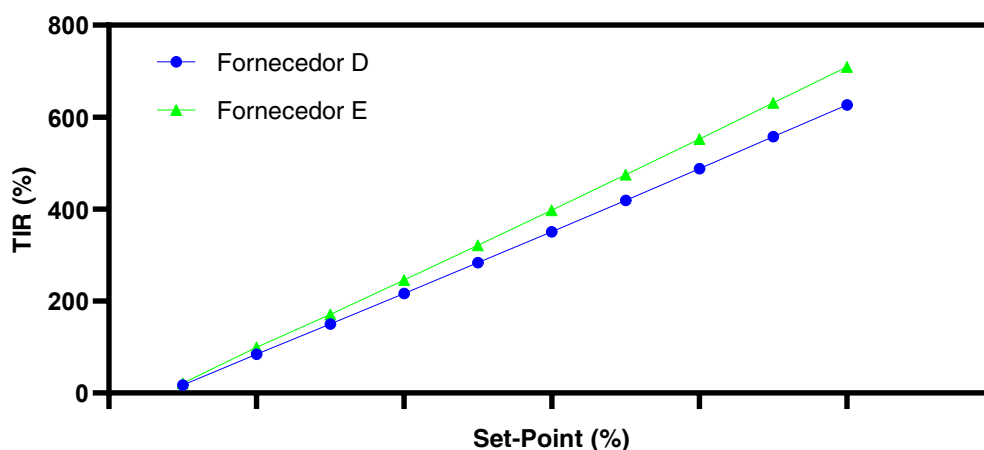


Figura 44 – Taxa interna de rentabilidade em função do *set-point* definido para a produção de bagaços de soja e colza. Os valores de *set-point* são omitidos por questões de confidencialidade.

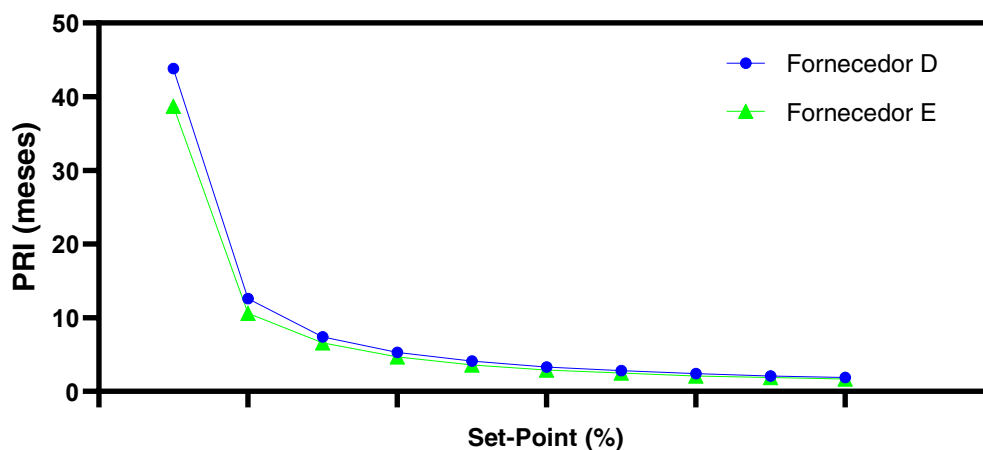


Figura 45 – Período de retorno do investimento em função do *set-point* definido para a produção de bagaços de soja e colza. Os valores de *set-point* são omitidos por questões de confidencialidade.

A variação dos indicadores de rentabilidade para os investimentos no sistema de controlo *inline* revelou-se semelhante para os dois fornecedores, sendo apenas ligeiramente mais favorável ao fornecedor E.

A análise de sensibilidade dos indicadores de rentabilidade relativamente ao *set-point* para o teor de água dos bagaços permite avaliar o risco e a incerteza associados ao controlo deste parâmetro. Por um lado, como se concluiu com os ensaios industriais efetuados, o sistema em causa apresenta um atraso considerável na resposta à manipulação do teor de água dos bagaços, o que pode resultar num desvio significativo deste parâmetro face ao pretendido, sendo esta uma incerteza que não pode ser desprezada. Por outro lado, tenha-se em conta que os indicadores de rentabilidade apresentados não contabilizam os proveitos que poderão advir no controlo *inline* do teor de fibra dos produtos, pelo que são subestimados nesse sentido.

Os gráficos das Figuras 43 a 45 permitem concluir que, aumentando-se o *set-point* em apenas 0,2 pontos percentuais para a soja e em 0,3 pontos percentuais para a colza, alcança-se um VAL de cerca de 560.000 €, uma TIR média de 160% e um período de retorno do investimento de aproximadamente 7 meses. Assim, de um modo geral, pode concluir-se que a implementação do controlo *inline* dos parâmetros dos bagaços apresenta bons indicadores de rentabilidade tendo em conta o risco de investimento associado.

Os resultados obtidos para os indicadores de rentabilidade em função do *set-point* podem ser consultados em Anexo (Anexo D – Retificação dos Parâmetros dos Bagaços de Soja e Colza).

5.3. Manutenção Preditiva

Um dos pilares fundamentais da Indústria 4.0 consiste na análise de *big data* para desenvolver processos de produção inteligentes, capazes de prever e antecipar o comportamento de diferentes sistemas envolvidos na produção industrial, através do ajuste automático das operações a diferentes níveis [89]. No sentido de aumentar a produtividade dos processos, a aplicação de redes de sensores, para recolher dados sobre a condição dos equipamentos, e de técnicas de inteligência artificial, para

os processar, permite precisamente antecipar a ocorrência de falhas, minimizando significativamente os tempos de paragens para manutenção [37][90]. Devido ao potencial que a manutenção preditiva representa para o aumento da eficiência dos processos industriais, esta é uma aplicação importante dos conceitos da indústria 4.0 [22]. Apesar de não ser um conceito novo, a manutenção preditiva foi fomentada pela emergência de tecnologias como os CPS, a IIoT, *big data* e análise de dados, que permitiram a sua aplicação de forma otimizada nos sistemas de produção modernos [22][89][91].

Trata-se de um conceito novo para a indústria em estudo, pretendendo-se com este ponto de atuação definir a aplicação de uma estratégia de manutenção preditiva num dos seus equipamentos, marcando o exemplo para que posteriormente se estenda a aplicação da mesma estratégia a outros equipamentos da linha de produção.

5.3.1. Estratégias de Manutenção e Equipamentos a Monitorizar

A manutenção pode ser definida como a combinação de ações técnicas e administrativas que visam manter o estado funcional de um equipamento durante o seu ciclo de vida útil [91]. As estratégias de manutenção são usualmente divididas em quatro categorias [92]. A manutenção corretiva (também frequentemente designada em inglês por “*run to failure*”) é a mais simples e consiste em reparações ou substituições quando os equipamentos já avariaram ou apresentam falhas óbvias [91][93]. Esta abordagem é aplicada quando a paragem dos equipamentos não afeta significativamente a produção e os custos de mão de obra e materiais não são relevantes [92]. Acarreta desvantagens, como a necessidade de possuir um grande número de peças em inventário para que a ação de reparação decorra o mais rapidamente possível [92]. Para além disso, é proibitiva para as indústrias modernas, uma vez que a paragem inesperada dos processos tem consequências graves em termos de custos [89]. A manutenção preventiva pretende evitar essas paragens não programadas através da programação de ações de manutenção em intervalos de tempo pré-determinados ou baseados na condição do equipamento, com o intuito de diminuir a probabilidade da ocorrência de uma avaria ou da degradação de certas funções de um equipamento [89][93]. Nesta estratégia, é efetuada a reparação ou substituição de peças (ou outros) danificadas antes da ocorrência de uma avaria óbvia. Trata-se de uma abordagem adequada para equipamentos que não operam continuamente, quando existe tempo e mão de obra especializada para efetuar os trabalhos de manutenção preventiva. A sua principal desvantagem é o facto de as ações de manutenção poderem ser feitas prematura ou tardiamente. A manutenção prematura pode resultar na substituição de peças que ainda possuem alguma vida útil e na paragem da produção para trabalhos de manutenção desnecessários [92]. A manutenção preditiva (ver Figura 46), por sua vez, é uma estratégia que pode ser desagregada em duas sub-categorias: em manutenção preditiva estatística, em que a informação gerada acerca de paragens relacionadas com avarias é utilizada para desenvolver modelos estatísticos que visam prever novas avarias e assim desenvolver estratégias de manutenção preventiva; e em manutenção preditiva condicionada, na qual são programadas atividades de manutenção apenas quando são detetados sintomas de uma falha [22]. As condições mecânicas e operacionais são monitorizadas e analisadas de forma contínua, através de sensores, o que permite detetar atempadamente tendências anómalas ou indicadoras de uma avaria subsequente. Os equipamentos podem então ser parados quando for

mais conveniente, por exemplo, quando a avaria é iminente, para que as peças desgastadas ou danificadas sejam substituídas, podendo nesse caso equiparar-se a uma estratégia de manutenção “*just in time*” [91]. É a estratégia mais aplicada em indústrias de processo em que produção é contínua e cuja paragem, ainda que por um curto período de tempo, acarreta custos económicos muito importantes. A principal vantagem desta metodologia é o aumento do tempo de atividade e de vida útil dos equipamentos e, por conseguinte, o aumento de produtividade do processo. Para além disso, a capacidade de poder alocar períodos de manutenção de forma planeada e organizada permite uma gestão mais eficiente de peças em inventário [92].

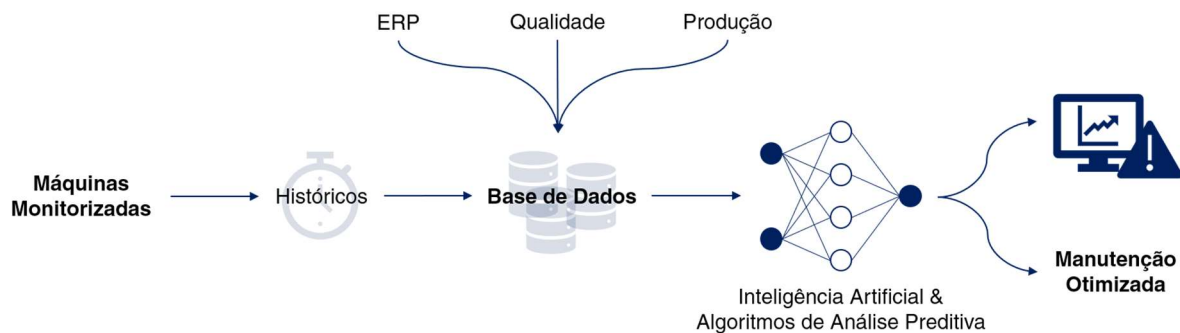


Figura 46 - Monitorização contínua de máquinas para a otimização da estratégia de manutenção (manutenção preditiva).

Por fim, a manutenção proativa caracteriza-se pela ênfase na determinação das causas que levam à ocorrência de avarias. Cada avaria é analisada e são tomadas medidas proativas para garantir que estas não se repetem. Esta estratégia emprega as técnicas de manutenção preventiva e preditiva, juntamente com análises à causa de avarias (*root cause failure analysis*). As vantagens desta abordagem são, por isso, semelhantes às de uma estratégia preditiva em termos de planeamento otimizado das atividades de manutenção e de gestão de inventário. As análises às causas de avarias e a prescrição de medidas que daí advêm permitem ainda aumentar a confiabilidade dos equipamentos. A principal desvantagem é a necessidade de mão de obra especializada [92].

Comparativamente às estratégias corretivas e preventivas, a manutenção preditiva, atualmente a mais empregue nas indústrias modernas, permite assegurar o intervalo máximo entre manutenções e assim minimizar o número e o custo de paragens não planeadas que afetam a produtividade, a qualidade do produto e a eficiência global do processo de produção [22]. No entanto, esta estratégia apresenta vários desafios:

- O acesso, a qualidade e a integração de dados de diversas fontes, como sensores e histórico de manutenções [91];
- A capacidade de lidar com *big data* industrial, o que implica suportar vários tipos de dados estruturados e não estruturados, possuir uma infraestrutura que acomode estes vastos conjuntos de informação e gerir os dados eficientemente, para que se possa empregar a análise de dados e alavancar a análise preditiva em tempo real [91];
- A precisão suficiente das previsões de manutenção, dado que a informação preditiva pouco precisa pode resultar em manutenções desnecessárias ou na paragem do processo devido a avarias inesperadas. Por isso, é essencial ao pleno desenvolvimento

do potencial da estratégia preditiva obter estimativas precisas acerca do restante tempo de vida útil, particularmente a longo prazo, fornecendo tempo suficiente ao planeamento das operações de manutenção [91].

As estratégias de manutenção supramencionadas apresentam as suas próprias vantagens e desvantagens e são implementadas após ser avaliada a criticidade dos equipamentos da linha de produção. Como se pretende mostrar com a Figura 47, os equipamentos podem usualmente classificar-se como críticos, secundários ou não-essenciais. Os equipamentos considerados críticos são aqueles dos quais depende a operação de todo o processo [92]. Incluem-se equipamentos para os quais não existem sobresselentes em inventário e conjuntos de motores e engrenagens com elevadas potências. São equipamentos com elevado custo capital, cuja reparação pode também ser dispendiosa e demorada. Para além disso, a avaria pode afetar a segurança da produção. Usualmente são os equipamentos críticos que são candidatos à monitorização constante das suas condições operacionais no contexto de estratégias de manutenção preditiva [92][94]. Os equipamentos considerados secundários podem, por exemplo, ser essenciais apenas para uma parte do processo [92]. A estes, são usualmente aplicadas estratégias de manutenção preventiva ou até mesmo estratégias corretivas [92]. Por último, os equipamentos não-essenciais são aqueles dos quais o processo não depende diretamente e aos quais é aceitável aplicar estratégias de manutenção corretiva [92].

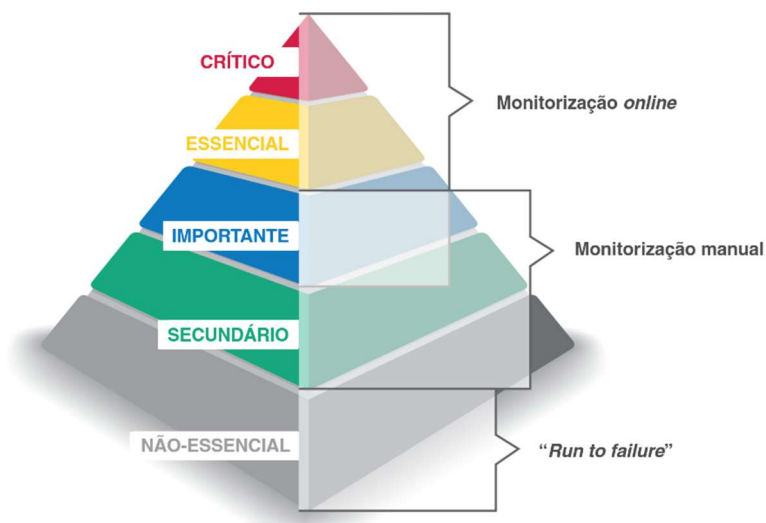


Figura 47 - Relação entre a criticidade dos equipamentos e a respetiva estratégia de manutenção mais adequada. Adaptado de [94].

No caso da indústria em estudo, averiguou-se, de forma colaborativa com a equipa de manutenção, quais os equipamentos considerados críticos para a produção e qual a estratégia de manutenção utilizada. Concluiu-se que um dos equipamentos críticos para a produção e ao qual faria sentido aplicar uma estratégia de manutenção preditiva é um redutor universal de engrenagens, responsável pela rotação do eixo central do DTS (ver ponto 5.2.1.).

Os redutores de engrenagens são sistemas conversores de binário [95]. Estes sistemas consistem em transmissões mecânicas que permitem modificar as características dinâmicas de diferentes tipos

de energia disponibilizada (através de máquinas motrizes como, por exemplo, motores elétricos ou de combustão interna), de modo a que, no final, se obtenham as forças e os movimentos necessários à efetivação das operações requeridas nos diferentes processos de transformação de produtos [95]. Nos casos de transmissões que necessitam de grandes razões de transmissão (quociente entre a velocidade angular de entrada e a de saída), recorre-se a mais do que um andar de redução, de modo a que a razão de transmissão total seja o produto das razões dos diferentes andares [95]. Os redutores são, de uma forma geral, constituídos por um corpo único que aloja e suporta conjuntos de engrenagens, para além de servir de reservatório de óleo lubrificante [95]. No seu interior, os veios de suporte das rodas dentadas são apoiados em rolamentos, que se encontram alojados e posicionados axialmente [95]. A Figura 48 mostra um exemplo de um redutor universal de engrenagens com três andares de redução e a esquematização do redutor utilizado na indústria em estudo, que possui uma razão de transmissão de 138,1, distribuída por quatro andares de redução, convertendo a velocidade de rotação de entrada de 1450 min^{-1} em $10,5 \text{ min}^{-1}$. Este equipamento foi considerado crítico para o processo de produção de biodiesel e de bagaços de soja e colza porque é essencial à etapa de dessolventização dos bagaços. A produção de óleos vegetais e de bagaços é interdependente, por isso, se o DTS parar, a produção para sequencialmente para trás.

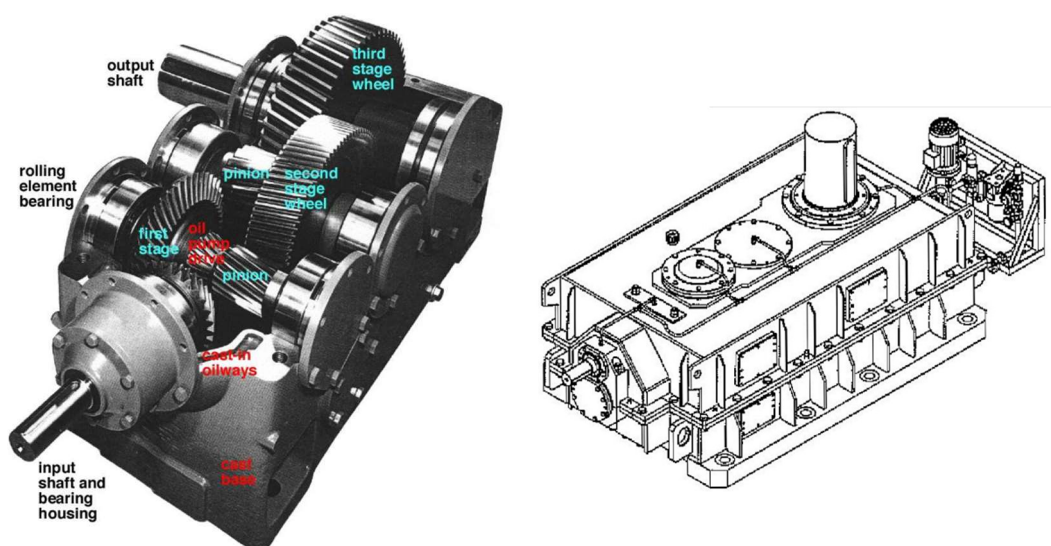


Figura 48 - À esquerda: Funcionamento interno de um redutor universal com três andares de redução. Retirado de [95]. À direita: esquematização do redutor universal utilizado na indústria em estudo, com quatro andares de redução.

A manutenção efetuada a este equipamento é atualmente feita com base numa estratégia preventiva condicionada periódica. São efetuadas inspeções semestrais por terceiros, nas quais são efetuadas medições das vibrações do equipamento, bem com uma inspeção visual. Destas inspeções resultam relatórios das análises de vibrações, em que é efetuada a avaliação da severidade vibratória segundo a norma ISO 10816-1:1995. Estes relatórios permitem inferir a condição operacional do redutor e dos respetivos veios de engrenagens e, com base nessa informação, planear as atividades de manutenção. As principais desvantagens desta estratégia prendem-se com (i) a probabilidade de ocorrência de falhas aleatórias; (ii) os largos períodos de tempo em que não é feita a monitorização do equipamento e; (iii) o custo significativo e regular das análises de vibrações [93]. Dado o custo capital

do redutor e da sua manutenção e a criticidade deste equipamento para a operação da fábrica, é justificável explorar a implementação de uma estratégia de manutenção preditiva contínua que mitigue o risco da ocorrência de avarias inesperadas. As consequentes paragens não programadas, já experienciadas no passado, resultaram em perdas económicas muito prejudiciais para a empresa.

5.3.2. Monitorização Contínua de Vibrações

A manutenção preditiva baseia-se na monitorização das condições dos equipamentos através de técnicas como a análise de vibrações, de emissões acústicas, de partículas em óleos lubrificantes, de níveis de corrosão e de performance, entre outros. As vibrações são diretamente relacionáveis com a dinâmica de funcionamento de uma máquina rotativa, pelo que as vibrações anormais são o sintoma mais comum de desequilíbrios, desalinhamentos e outras anomalias. Por essa razão, a monitorização de vibrações é o método mais eficaz de detetar defeitos em máquinas rotativas [92].

A vibração pode ser definida como o movimento de uma máquina ou de um respetivo componente em torno da sua posição de repouso. O movimento de uma dada massa desde a sua posição de repouso até ao seu limite máximo e desde a sua posição de repouso até ao limite mínimo representa um ciclo de movimento. Este será, naturalmente, um movimento periódico e harmónico, e a relação entre o deslocamento de uma dada massa e o tempo é expressa sob a forma de onda sinusoidal, dada pela Equação 12 [92].

$$X = X_0 \sin(\omega t) \quad (\text{Eq. 12})$$

- X é o deslocamento a um determinado instante t (s);
- X_0 é o deslocamento máximo;
- $\omega = 2\pi f$, f = frequência (Hz).

A distância total percorrida pelo corpo, desde um limite ao outro do movimento oscilatório, é referida como deslocamento entre picos. A unidade desta medição é usualmente o micrómetro (μm) [92].

A velocidade a que o deslocamento ocorre pode obter-se derivando a equação do deslocamento:

$$\text{Velocidade} = \frac{dX}{dt} = X_0 \omega \cos(\omega t) \quad (\text{Eq. 13})$$

A velocidade (m/s) é a medida mais comum para a vibração de um equipamento [96]. A organização internacional de padronização (ISO) sugere a raiz da velocidade quadrática média (RMS, ver Equação 14 [97]) como a unidade padrão da velocidade de vibração.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (\text{x é o sinal recolhido}) \quad (\text{Eq. 14})$$

A velocidade-RMS traduz a área correspondente a um pico numa onda sinusoidal, equivalendo, por isso, à energia contida numa vibração. Permite, deste modo, inferir o quão destrutiva é uma determinada vibração anómala [92].

De forma similar à velocidade, a aceleração de um corpo também se obtém derivando a velocidade:

$$Acelaração = \frac{d(velocidade)}{dt} = -X_0\omega^2 \sin(\omega t) \quad (\text{Eq. 15})$$

Uma unidade de medição da aceleração não pertencente ao sistema internacional é g (cuja unidade que equivale a 9,80665 m/s²) [96].

O deslocamento, a velocidade e a aceleração característicos de um movimento oscilatório são medidos de forma a determinar a severidade da vibração e são frequentemente referidos como “amplitude” da vibração. Em termos de operação de uma máquina, a amplitude da vibração é o primeiro indicador da condição em que a máquina está a operar. De uma forma geral, a amplitudes elevadas corresponde um maior nível de severidade de uma falha mecânica. Uma vez que a amplitude de vibração poderá expressar-se em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração, é importante definir que parâmetro utilizar para monitorizar a condição de uma máquina. Como se pretende evidenciar na Figura 48, movimentos abaixo de 10 Hz produzem pouca vibração em termos de aceleração, uma vibração moderada em termos de velocidade e vibrações relativamente grandes em termos de deslocamento. Por isso, a amplitude do deslocamento é utilizada para caracterizar vibrações de baixas frequências. Na gama de altas frequências, os valores de aceleração são mais significativos relativamente aos de deslocação ou velocidade. Logo, para frequências acima dos 1000 Hz é preferível efetuar a medição da amplitude da aceleração. Na gama entre os 10 e os 1000 Hz a amplitude da velocidade fornece uma boa indicação da severidade da vibração. Uma vez que a maioria das máquinas rotativas (e as respetivas falhas) opera na gama entre os 10 e os 1000 Hz, a amplitude da velocidade é geralmente utilizada para a medição e análise de vibrações [92].

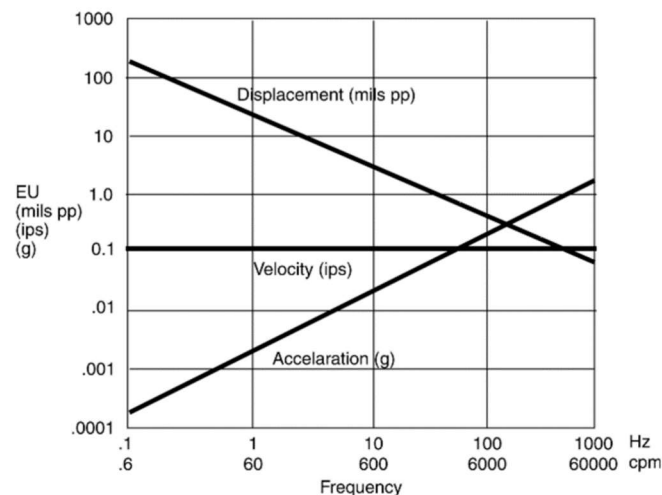


Figura 49 - Relação entre velocidade, aceleração e deslocamento a velocidade constante. Unidades de engenharia (EU): ips – polegada por segundo; mils pp – milésima de polegada de pico a pico; cpm – ciclos por minuto. Retirado de [92].

5.3.3. Aquisição de Dados

Neste ponto, pretende-se introduzir o domínio prático da monitorização e análise de vibrações com a apresentação dos principais instrumentos de recolha de sinais. A medição da vibração de uma máquina é efetuada através de transdutores (sensores) de vibração mecânica. Estes são instrumentos que convertem um tipo de energia, como a vibração, noutra tipo de energia, usualmente sinais elétricos, cuja forma de onda se relaciona com o movimento mecânico. Uma das considerações mais importantes para a eficácia do sistema de monitorização é a seleção do transdutor adequado para cada aplicação [92].

5.3.3.1. Tipos de Sensores Disponíveis

Os sensores de velocidade de vibração são transdutores comumente empregues na monitorização da vibração em máquinas rotativas. O seu princípio de funcionamento baseia-se na indução de corrente elétrica a partir do movimento relativo de um íman ou de uma bobina, provocado pela vibração mecânica do equipamento, como é esquematizado na Figura 50. Este tipo de sensor não requer dispositivos adicionais para gerar o sinal elétrico, sendo este diretamente proporcional à velocidade do movimento relativo dos seus componentes internos (não necessitando do fornecimento de corrente elétrica). A medição é feita segundo apenas um eixo. De forma a medir a vibração segundo três eixos, devem ser instalados três sensores de velocidade, um segundo cada eixo. A gama de frequências de vibração vai, aproximadamente, dos 0,2 aos 1000 Hz, sendo as medições abaixo dos 10 Hz pouco precisas [92].

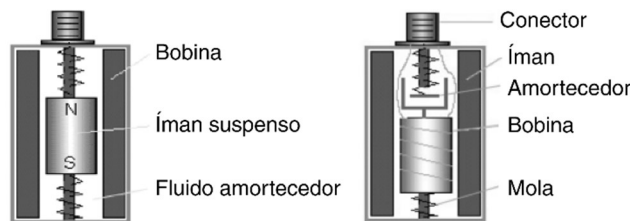


Figura 50 - Transdutores de velocidade de bobina fixa (à esquerda) ou de íman fixo (à direita). Adaptado de [92].

O tipo de transdutor mais utilizado na monitorização de máquinas rotativas é o acelerómetro (ou sensor de aceleração). Através do efeito piezoelectrico, converte o movimento mecânico num sinal elétrico que é proporcional à aceleração da vibração. A sua constituição inclui, portanto, um cristal piezoelectrico e uma pequena massa, usualmente contida numa estrutura metálica protetora (ver Figura 51). Quando o acelerómetro é sujeito a vibrações, a massa exerce uma força no cristal piezoelectrico que, de acordo com a segunda lei de Newton, é diretamente proporcional à aceleração da vibração. A carga elétrica produzida pelo cristal é, por sua vez, proporcional à força exercida pela massa, segundo a terceira lei de Newton. A medição da vibração pode ser efetuada segundo um ou mais eixos, dependendo do design do sensor. De um modo geral, os acelerómetros permitem monitorizar de forma precisa vibrações com frequências entre os 0,2 e os 12000 Hz [92].

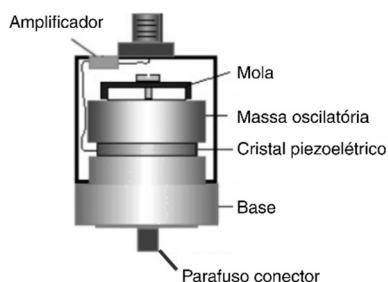


Figura 51 - Transdutor de aceleração (ou acelerómetro). Adaptado de [92].

Por fim, os sensores de deslocamento (ver Figura 52), utilizados para a medição de movimentos a baixas frequências, baseiam-se no princípio da formação de correntes de Foucault. O sensor emite um campo magnético estacionário. Quando o material condutor (neste caso a peça a monitorizar) se movimenta relativamente ao sensor, é gerada uma corrente de Foucault no interior do material condutor, alterando o campo magnético estacionário. Assim, quanto maior a alteração do campo magnético aplicado, maior o deslocamento do sensor relativamente ao material condutor [92].

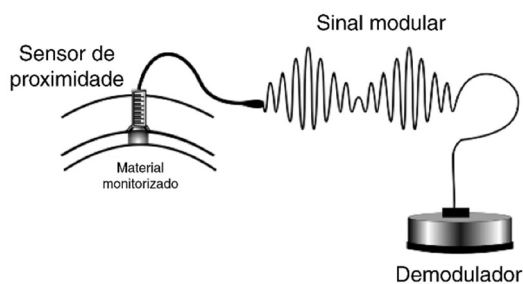


Figura 52 - Sensor de deslocamento. Adaptado de [92].

O equipamento que se pretende monitorizar continuamente possui velocidades de rotação que vão desde os 10,5 aos 1450 min^{-1} , pelo que a gama de frequências correspondente é de 24 a 0,2 Hz. Esta gama de frequências permite excluir, à partida, a utilização de sensores de velocidade. Já os sensores de deslocamento poderão ser adequados para a monitorização das vibrações nos veios de saída do redutor, dada a baixa frequência de rotação. Os acelerómetros, por sua vez, permitem monitorizar uma gama de frequências alargada, podendo optar-se por este tipo de sensor para a monitorização das vibrações não só nos veios de saída, mas também nos restantes veios de engrenagens do redutor.

5.3.3.2. Localização dos Sensores

É necessário identificar, na máquina a monitorizar, as posições onde a recolha de sinais deve ser efetuada. Da mesma forma que as correntes elétricas têm tendência a serem conduzidas à terra, as vibrações mecânicas em equipamentos rotativos têm tendência a dispersarem-se pelos respetivos suportes. A dispersão dos movimentos vibracionais desde o veio rotativo até ao suporte da máquina é feita através dos rolamentos, pelo que é nestes que se recolhem os melhores sinais para a monitorização da condição da máquina [92]. Por esta razão, considerou-se que os pontos mais indicados à instalação dos sensores de vibração serão as estruturas mais próximas dos rolamentos.

Nesse sentido, consideraram-se também os pontos nos quais se recolhem (através de sensores portáteis) sinais de vibração no contexto da manutenção periódica efetuada atualmente, que estão de acordo com este critério (ver Figura 53). É importante referir também que, para cada veio de engrenagens, devem, idealmente, ser monitorizadas as vibrações segundo cada um dos três eixos cartesianos.

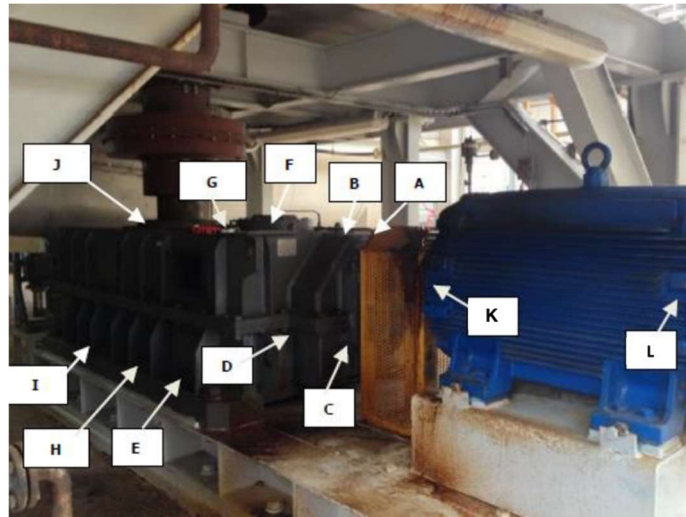


Figura 53 - Esquemas dos pontos de medição de vibrações (A-J).

Os pontos A e B correspondem à medição de vibrações do eixo de entrada, que se encontra na horizontal. Neste veio, recolhem-se as vibrações segundo os eixos horizontal e axial no ponto A e segundo o eixo vertical no ponto B. Idem para o primeiro veio intermédio (pontos C e D), também na horizontal. Nos veios intermédios seguintes e final, medem-se os níveis de vibração segundo os eixos horizontal e axial nos pontos F, G e J e segundo o eixo horizontal nos pontos E, H e I. A estratégia de manutenção preventiva atual inclui também a medição das vibrações do motor associado nos pontos K e L.

5.3.4. Análise e Utilização de Dados

Os equipamentos críticos, como se referiu nos pontos anteriores, são quase sempre alvo de monitorização contínua *online*. Os sensores são instalados de forma permanente nas máquinas, em pontos adequados à medição das vibrações, e ligados a equipamentos de aquisição, processamento e análise de dados. O processamento de dados consiste no tratamento do sinal de forma a obter os parâmetros mais convenientes à avaliação da condição de uma máquina. Um dos parâmetros mais relevantes consiste na amplitude da vibração, proporcional à energia nela contida e por isso, fornece uma indicação da sua severidade, que é vantajoso expressar em função das diferentes frequências. A medição das vibrações é sempre efetuada no domínio temporal e, por essa razão, tem que ser transposta para o domínio de frequências através da aplicação de transformadas de Fourier (FFT). Os espetros de amplitude de vibração em função das frequências (espetros de frequências) permitem facilmente identificar a que frequências ocorrem vibrações mais ou menos relevantes e inferir que partes específicas da máquina poderão estar na origem de tais vibrações. A análise de dados recolhidos pelos sensores de vibração, em termos de análise de tendências e diagnóstico, é efetuada

por um *software* dedicado, cujo resultado pode ser visualizado em HMI pelos utilizadores, facilitando a monitorização em tempo real, a identificação atempada de falhas, aleatórias ou não, na máquina. Os resultados que advêm deste processamento podem, ainda, ser sujeitos a análise em base de dados através de técnicas de KDD para derivar mais informação valorizável para a tomada de decisões.

A integração da manutenção preditiva com outras aplicações da Indústria 4.0 traz vantagens adicionais em termos de eficiência. Os dados obtidos na operação de um sistema de manutenção preditiva podem ser utilizados em simulações avançadas (*digital twin*) dos equipamentos, permitindo dessa forma obter previsões sobre o seu comportamento futuro. As informações preditivas acerca das máquinas (como estimativas de tempo de vida útil restante) podem ser integradas com planeamentos e ordens de produção, considerando assim as restrições práticas decorrentes da operação do processo, a fim de alocar os períodos de manutenção de forma otimizada e automatizada, e maximizar a eficiência global dos equipamentos. A manutenção preditiva pode ainda ser combinada com aplicações de realidade aumentada, para suportar as atividades de manutenção no terreno.

5.3.5. Propostas Técnicas e Orçamentação

Em suma, como esquematizado na Figura 54, o sistema de manutenção preditiva que se propõe compreende:

1. Recolha de dados vibracionais da máquina a monitorizar, através da instalação permanente de sensores em localizações adequadas;
2. Integração dos dados recolhidos no sistema SCADA;
3. Armazenamento e análise dos dados;
4. Visualização de informação acerca da condição do equipamento em tempo real para suportar as atividades de manutenção da máquina.

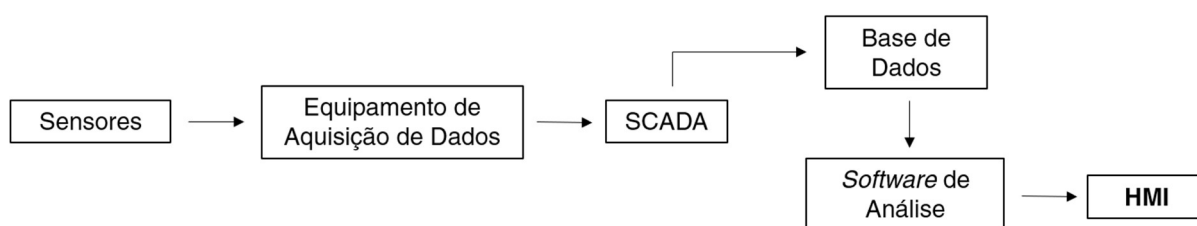


Figura 54 - Arquitetura geral de uma aplicação de um sistema de manutenção preditiva.

Foram consultados diferentes fornecedores para obter propostas técnicas e respetivas orçamentações para a instalação de um sistema de manutenção preditiva como o descrito acima. Foram consultados três (G, H e I) fornecedores, dos quais se obtiveram três propostas técnicas e orçamentos. As principais características técnicas das propostas obtidas são apresentadas na Tabela 11.

Em termos de tipos de sensores, pode verificar-se que todos os fornecedores sugerem a aplicação de acelerómetros, ainda que seja necessária a medição de vibrações a baixas frequências. No que diz respeito às gamas de frequências medidas pelos sensores, os acelerómetros propostos pelo fornecedor H indicam, em geral, estar mais próximas das gamas de frequências a medir no redutor a monitorizar. As propostas incluem a instalação de 7 a 9 sensores uniaxiais, no entanto, não foram

especificadas, em nenhuma das propostas recebidas, as localizações específicas mais adequadas à instalação de cada sensor, pelo que também não é possível especificar segundo que eixos são efetuadas as medições de vibração. No que toca ao tipo de comunicação, a comunicação sem fios é preferível, ainda que não constitua um critério de exclusão. Em termos de proteção IP dos diferentes equipamentos, verifica-se que são todos equiparáveis e que permitem a instalação junto do redutor a monitorizar. A instalação dos equipamentos (sensores e restantes) já consiste num critério mais importante a ter em conta e segundo este, o fornecedor I é o único que inclui a instalação dos equipamentos na sua proposta. Quanto ao fornecimento de software de análise, verifica-se que todas as propostas o incluem.

Tabela 11 - Características técnicas das propostas obtidas pelos fornecedores G, H e I. N.E. – Não Especificado.

Características Técnicas	Fornecedores		
	G	H	I
Tipo de sensor	Acelerómetro	Acelerómetro	Acelerómetro
Tipo de medição	Uniaxial	Uniaxial	Uniaxial
Número de sensores propostos	9	6 (standard) 2 (para baixas frequências)	7
Gama de frequências medida	2 – 10000 Hz	0,2 – 15000 Hz	2 – 15000 Hz
Grau de proteção IP dos sensores	IP 68	IP 68	IP 67
Equipamento de aquisição de dados	Instalação em trilho	IP 65	IP 66
Comunicação de sensores com equipamento de aquisição de dados	Cabo	Cabo	Comunicação sem fios (<i>Zigbee</i>)
Instalação de equipamento de aquisição de dados	Não	Não	Sim
Comunicação do sistema de aquisição de dados com o servidor	Ethernet	Ethernet ou WiFi/4G	Ethernet ou WiFi/4G
Fornecimento de <i>software</i> de análise	Sim	Sim	Sim
Integração no sistema SCADA	N.E.	Sim	N.E.
Instalação de sensores e restantes equipamentos pelo fornecedor	Não	Não	Sim
Instalação da comunicação e ligações elétricas	Não	Não	Sim

Relativamente aos equipamentos de aquisição de dados, há-que mencionar que os sistemas propostos pelos fornecedores H e I são de instalação em qualquer lugar apropriado, sujeito às intempéries ou não, enquanto o mesmo equipamento proposto pelo fornecedor G é de montagem em trilho, pelo que necessita de ser montado num quadro elétrico, numa localização consideravelmente mais distante dos sensores e cuja comunicação é efetuada por cabo.

As propostas orçamentais de cada fornecedor são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Resumo dos investimentos necessários para à implementação do controlo *inline* dos parâmetros dos bagaços de soja e colza. N.E. – Não Especificado. O investimento total é discriminado em anexo (Anexo E – Manutenção Preditiva).

Rúbrica	Fornecedor G	Fornecedor H	Fornecedor I
Investimento			
Equipamento	64,4 %	71,2 %	64,8 %
Software	4,0 %	14,4 %	N.E.
Montagem e formação ou outros serviços	31,6 %	14,5 %	35,2 %

5.3.6. Investimento e Análise Económica

O custo de investimento e análise económica do sistema de manutenção preditiva para o redutor de engrenagens passou pela determinação dos proveitos económicos associados, seguida de uma análise de rentabilidade do projeto, tendo em conta os investimentos necessários.

5.3.6.1. Proveitos Económicos

Os proveitos económicos foram estimados com base:

- Nos custos das inspeções semestrais que integram a estratégia atual de manutenção preventiva condicionada;
- Nos prejuízos económicos que advêm de uma paragem não programada durante um período de tempo suficiente para a reparação do redutor;
- No custo de reparação do redutor.

O cálculo foi efetuado segundo a Equação 15.

$$\text{Proveitos (€/ano)} = \text{Custo Man. Prev. (€/ano)} + \text{Custo Downtime (€/ano)} + \text{Custo Reparação (€/ano)} \text{ (Eq.15)}$$

Os proveitos irão variar de acordo com a ocorrência, ou não, de uma avaria durante o tempo considerado para o projeto e de acordo com o custo de reparação que essa avaria acarreta. Os proveitos correspondentes à não ocorrência de uma avaria correspondem somente ao custo das inspeções periódicas ao redutor. Os prejuízos económicos associados a uma paragem não programada foram considerados constantes, assumindo-se que o tempo de inatividade (para reparação) é de 12 dias e não depende da severidade da avaria. A estimativa dos proveitos é detalhada em anexo (Anexo E – Manutenção Preditiva).

5.3.6.2. Análise de Rentabilidade do Projeto

Efetuuou-se a análise de rentabilidade das propostas recebidas com base nos fluxos financeiros (*cash flows*) atualizados e admitindo que o projeto é financiado somente com capital próprio. A partir do mapa de fluxos financeiros, inferiram-se os principais indicadores de rentabilidade económica para um período de 8 anos (VAL, TIR e PRI). Em primeiro lugar efetuou-se uma análise de rentabilidade considerando que não ocorrem avarias no equipamento, tendo-se obtido os indicadores sumarizados na Tabela 13.

Tabela 13 - Indicadores de rentabilidade para um período de 8 anos, relativos à hipótese de não ocorrer avaria no equipamento monitorizado.

Fornecedor	VAL (8 anos)	TIR (8 anos)	PRI
G	- 2.348 €	-9 %	> 8 anos
H	- 9.280 €	-20 %	> 8 anos
I	- 2.889 €	-10 %	> 8 anos

Posteriormente considerou-se que ocorre uma avaria no primeiro ano de investimento, à qual está associada um tempo de paragem da fábrica. Dado que o proveito do investimento varia em função do custo de reparação de uma avaria no redutor, os indicadores VAL, TIR e PRI vão também depender dessa variável. Por essa razão é vantajoso efetuar uma análise de sensibilidade à rentabilidade do investimento, face ao custo de reparação do redutor. Os resultados são apresentados nos gráficos das Figuras 55 a 57. O cálculo dos indicadores de rentabilidade é explicitado no Anexo B – Análise Económica.

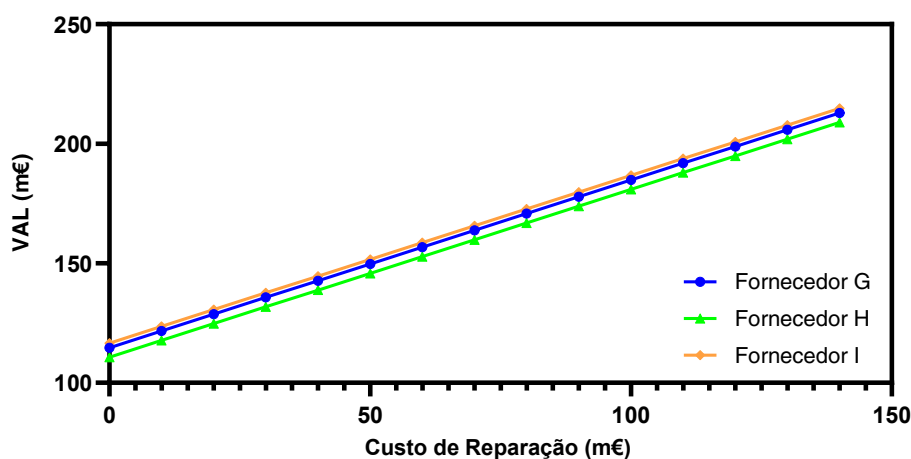


Figura 55 - Valor atual líquido em função do custo de reparação do redutor.

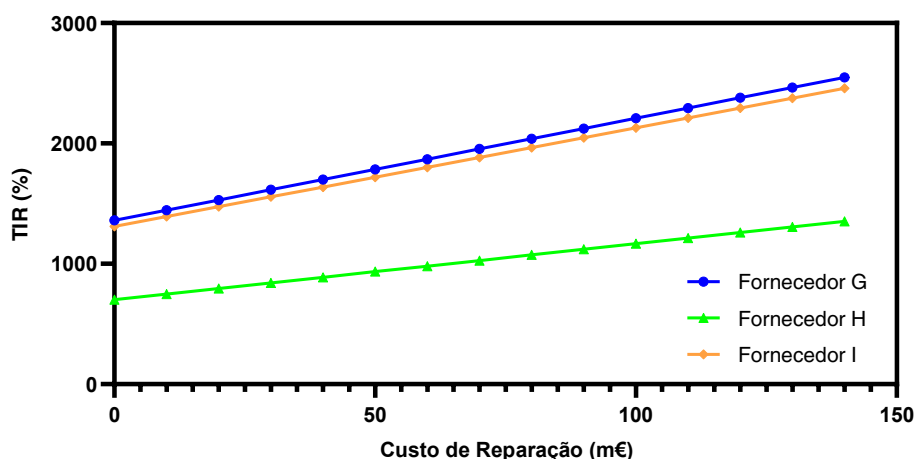


Figura 56 - Taxa interna de rentabilidade em função do custo de reparação do redutor.

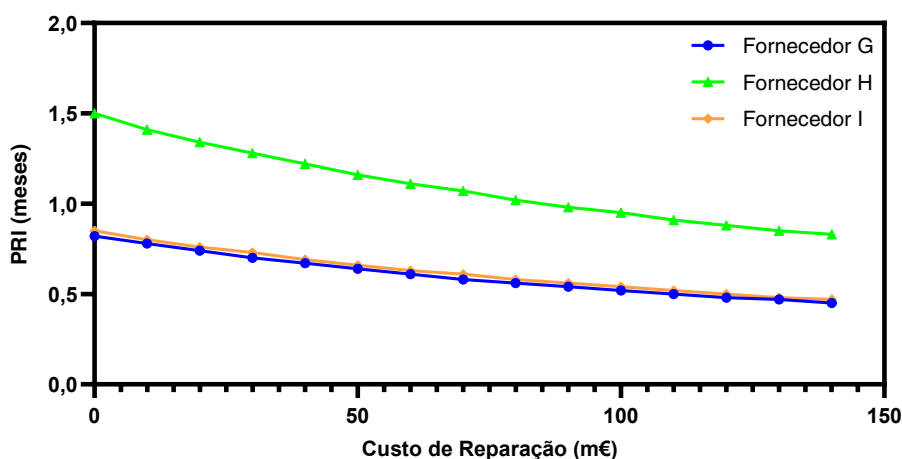


Figura 57 - Período de retorno do investimento em função do custo de reparação do redutor.

Na análise de sensibilidade efetuada, o ponto relativo ao custo de reparação nulo representa a rentabilidade do investimento com base somente no tempo de paragem não programada da fábrica. Assim, a baixa variabilidade dos indicadores sugere que a rentabilidade é suportada maioritariamente pelo prejuízo associado ao tempo de paragem não programada. Tendo em conta os resultados da Tabela 13, pode concluir-se que o investimento não se justifica pelo custo atual na estratégia de manutenção preventiva, mas é rentável se permitir mitigar a probabilidade de ocorrência de uma paragem não programada.

6. Conclusões

O presente trabalho propôs-se a avaliar a maturidade digital do caso de estudo, com o intuito de identificar as principais medidas necessárias a uma transição para a Indústria 4.0. Para o efeito, realizou-se um inquérito sobre o *modus operandi* da empresa a vários colaboradores da mesma, e posteriormente efetuou-se o cálculo da maturidade, com base nos resultados obtidos, de acordo com o modelo proposto. Segundo esse modelo, foi possível inferir que a indústria em estudo possui um nível de maturidade digital de 1 (de 0 a 5). Os resultados permitiram concluir que a inexistência de uma estratégia para a implementação da Indústria 4.0, bem como a atual falta de qualificações para lidar com a sua implementação, constituem pontos críticos atuais para o desenvolvimento da maturidade digital da empresa. Concluiu-se, também, que a recolha e a análise de dados são aspetos que atualmente carecem de desenvolvimento, existindo uma quantidade significativa de dados que são recolhidos e processados manualmente e que não sofrem qualquer tipo de análise que permita a otimização de processos.

No sentido de promover a maturidade digital do caso de estudo, propuseram-se três recondiçamentos em exemplos de pontos críticos atuais. O primeiro teve que ver com a monitorização *online* e automação do processo de limpeza das oleaginosas. Nesse sentido, propôs-se a implementação de um sistema de análise de imagem dinâmica que permitisse monitorizar a eficiência do processo e automatizar, em tempo real, a otimização das variáveis associadas. A análise económica

ao investimento permitiu concluir que a sua implementação não representa uma vantagem económica para a empresa, embora contribuísse para um maior controlo e rastreabilidade de todo o processo.

A segunda proposta de acondicionamento incidu na implementação de um espectrofotómetro NIR para o controlo *inline* e retificação automatizada dos parâmetros dos bagaços de soja e colza produzidos. Efetuou-se um estudo da dinâmica do sistema em cadeia aberta, de forma a inferir as principais limitações associadas a uma cadeia de controlo para retificação do teor de água dos bagaços. Concluiu-se que, numa primeira iteração, o processo é estável em cadeia aberta e que tanto a imprecisão do método de medição como os atrasos consideráveis do sistema podem levar à produção de bagaço fora da especificação. A análise económica ao investimento mostrou que, para aumento do set-point em 0,2 pontos percentuais para a soja e 0,3 pontos percentuais para a colza, se obtém um VAL médio de 561.209 €, uma TIR média de 160% e um PRI médio de sete meses. Conclui-se que são bons indicadores de rentabilidade, tendo em conta o risco de investimento associado.

Por fim, a terceira e última proposta de acondicionamento consistiu na implementação de uma estratégia de manutenção preditiva para um redutor de engrenagens considerado crítico para o processo de produção da empresa em estudo. A análise do investimento em sensores de vibração, eletrónica para a recolha de dados e *software* para a análise (preditiva e de diagnóstico) dos mesmos permitiu concluir que, dados os custos atuais associados à manutenção preventiva desse equipamento, o investimento é rentável apenas se permitir, no mínimo, mitigar a probabilidade de ocorrência de uma paragem não programada, situação segundo a qual se obtém um VAL médio de 113.976 €, uma TIR média de 1124% e um PRI médio de um mês, sendo indicadores de rentabilidade bastante positivos.

7. Proposta de Trabalhos Futuros

Tendo em conta os resultados e conclusões que o presente trabalho permitiu traçar, propõem-se algumas medidas de atuação futuras. Em primeiro lugar, propõe-se a formulação de uma estratégia (e de um conjunto de KPI's) de transição para uma Indústria 4.0, que deve ser suportada pela existência de qualificações necessárias à sua implementação. Deve garantir-se, ainda, a futura recolha e processamento automático de todos os dados fundamentais à caracterização das operações da empresa. Destaca-se, neste sentido, a importância da instalação de uma balança de processo, nomeadamente à entrada da linha de produção, de forma a permitir maior rastreabilidade e controlo dos processos. Este equipamento permitirá também, e de encontro com as conclusões do presente trabalho, melhorar a performance de uma cadeia de controlo para a automação da retificação dos parâmetros dos bagaços produzidos. Por fim, ainda no âmbito da retificação dos parâmetros dos bagaços, sugere-se a avaliação de alternativas à localização onde atualmente se efetua a introdução de água no processo para a retificação do teor de água do produto. Por um lado, porque a introdução de água no sétimo piso do DTS constitui uma ineficiência energética (a água de processo introduzida é parcialmente evaporada nos andares seguintes do equipamento). Por outro, porque a vantagem económica e em termos de qualidade do produto final que advém da retificação eficaz destes parâmetros é bastante significativa. Apesar de já terem sido verificadas várias localizações no histórico da empresa, a falta de homogeneidade é um fator muito importante que compromete o processo de

retificação do teor de água dos bagaços. A boa homogeneidade do produto é a principal razão pela qual a introdução de água é atualmente feita no DTS. Não obstante, é importante ponderar outra localização que garanta boa homogeneidade.

8. Referências

- [1] Y. Chen, «Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers», *Engineering*, vol. 3, n. 5, pp. 588–595, Out. 2017.
- [2] J. Lee, H. D. Ardakani, S. Yang, e B. Bagheri, «Industrial Big Data Analytics and Cyber-physical Systems for Future Maintenance & Service Innovation», em *Procedia CIRP*, 2015, vol. 38, pp. 3–7.
- [3] C. J. Bartodziej, «The Concept Industry 4.0 An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics».
- [4] «Industrial revolutions: the 4 main revolutions in the industrial world». [Em linha]. Disponível em: <https://www.sentryo.net/the-4-industrial-revolutions/>. [Acedido: 03-Set-2019].
- [5] «The third industrial revolution - Manufacturing». [Em linha]. Disponível em: <https://www.economist.com/leaders/2012/04/21/the-third-industrial-revolution>. [Acedido: 03-Set-2019].
- [6] T. Melton, «The benefits of lean manufacturing: What lean thinking has to offer the process industries», *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 83, n. 6 A, pp. 662–673, Jun. 2005.
- [7] N. Jazdi, «Cyber physical systems in the context of Industry 4.0», em *2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, 2014, pp. 1–4.
- [8] M. Sony, «Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions», *Prod. Manuf. Res.*, vol. 6, n. 1, pp. 416–432, Jan. 2018.
- [9] S. Wang, J. Wan, D. Li, e C. Zhang, «Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook», *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 12, n. 1, p. 3159805, Jan. 2016.
- [10] «Industrie du Futur : transformer le modèle industriel par le numérique | economie.gouv.fr». [Em linha]. Disponível em: <https://www.economie.gouv.fr/lancement-seconde-phase-nouvelle-france-industrielle>. [Acedido: 06-Abr-2020].
- [11] «Direção-Geral das Atividades Económicas». [Em linha]. Disponível em: <https://www.dgae.gov.pt/comunicar-as-empresas/financiamento/industria-40.aspx>. [Acedido: 16-Abr-2020].
- [12] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, e S. A. Gawankar, «Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 117, pp. 408–425, Jul. 2018.
- [13] M. Marques, C. Agostinho, G. Zacharewicz, e R. Jardim-Gonçalves, «Decentralized decision

- support for intelligent manufacturing in Industry 4.0», *J. Ambient Intell. Smart Environ.*, vol. 9, n. 3, pp. 299–313, Abr. 2017.
- [14] M. Y. Santos *et al.*, «A Big Data system supporting Bosch Braga Industry 4.0 strategy», *Int. J. Inf. Manage.*, vol. 37, n. 6, pp. 750–760, Dez. 2017.
- [15] PwC, «2016 Global Industry 4.0 Survey What we mean by Industry 4.0 / Survey key findings / Blueprint for digital success», 2016.
- [16] X. Xu e Q. Hua, «Industrial Big Data Analysis in Smart Factory: Current Status and Research Strategies», *IEEE Access*, vol. 5, pp. 17543–17551, Ago. 2017.
- [17] L. Da Xu, E. L. Xu, e L. Li, «Industry 4.0: state of the art and future trends», *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, n. 8, pp. 2941–2962, Abr. 2018.
- [18] J. Lee, B. Bagheri, e H. A. Kao, «A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems», *Manuf. Lett.*, vol. 3, pp. 18–23, Jan. 2015.
- [19] P. Lade, R. Ghosh, e S. Srinivasan, «Manufacturing Analytics and Industrial Internet of Things», *IEEE Intell. Syst.*, vol. 32, n. 3, pp. 74–79, Mai. 2017.
- [20] P. Miguel da Silva Ferreira, «Aplicação de Algoritmos de Aprendizagem Automática para a Previsão de Cancro de Mama», Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, 2010.
- [21] L. A. C. De Filippis, L. M. Serio, F. Facchini, e G. Mummolo, «ANN Modelling to Optimize Manufacturing Process», em *Advanced Applications for Artificial Neural Networks*, InTech, 2018.
- [22] L. Spendla, M. Kebisek, P. Tanuska, e L. Hrcka, «Concept of predictive maintenance of production systems in accordance with industry 4.0», em *SAMI 2017 - IEEE 15th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, Proceedings*, 2017, pp. 405–410.
- [23] J. Yan, Y. Meng, L. Lu, e L. Li, «Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance», *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23484–23491, Out. 2017.
- [24] T. W. Wlodarczyk, C. Rong, e K. A. H. Thorsen, «Industrial cloud: Toward inter-enterprise integration», em *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2009, vol. 5931 LNCS, pp. 460–471.
- [25] O. Givehchi, H. Trsek, e J. Jasperneite, «Cloud computing for industrial automation systems - A comprehensive overview», em *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, 2013.

- [26] R. Bonnard, S. Arantes, R. Lorbieski, M. C. Nunes, e P. Mattei, «A Big Data / Analytics Platform for industry 4.0 Implementation in SMEs», *EasyCharir Prepr. No 1031*, n. May, 2019.
- [27] «What is Industrial Cloud Computing? | Siemens». [Em linha]. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/industrial-cloud-computing/58773>. [Acedido: 13-Abr-2020].
- [28] J. C. Kabugo, S. L. Jämsä-Jounela, R. Schiemann, e C. Binder, «Industry 4.0 based process data analytics platform: A waste-to-energy plant case study», *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 115, p. 105508, Fev. 2020.
- [29] A. Diez-Olivan, J. Del Ser, D. Galar, e B. Sierra, «Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0», *Inf. Fusion*, vol. 50, pp. 92–111, Out. 2019.
- [30] T. H. J. Uhlemann, C. Lehmann, e R. Steinhilper, «The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0», em *Procedia CIRP*, 2017, vol. 61, pp. 335–340.
- [31] K. Zhou, Taigang Liu, e Lifeng Zhou, «Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges», em *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 2015, pp. 2147–2152.
- [32] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, e T. Watson, «The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework», *Comput. Ind.*, vol. 101, pp. 1–12, Out. 2018.
- [33] Zhuming Bi, Li Da Xu, e Chengen Wang, «Internet of Things for Enterprise Systems of Modern Manufacturing», *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, n. 2, pp. 1537–1546, Mai. 2014.
- [34] B. Rodič, «Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm», *Organizacija*, vol. 50, n. 3, pp. 193–207, Ago. 2017.
- [35] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, e W. Sihn, «Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification», *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, n. 11, pp. 1016–1022, Jan. 2018.
- [36] M. Rüßmann *et al.*, «Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries», 2015.
- [37] A. Ustundag e E. Cevikcan, *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. 2018.
- [38] G. Erboz, «How To Define Industry 4.0: Main Pillars Of Industry 4.0», Hungary, 2017.
- [39] N. Kumar e J. Kumar, «Efficiency 4.0 for Industry 4.0», *Hum. Technol. An Interdiscip. J. Humans ICT Environ.*, vol. 15, n. 1, pp. 55–78, 2019.

- [40] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, e C. Zhang, «Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination», *Comput. Networks*, vol. 101, pp. 158–168, Jun. 2016.
- [41] B. Vogel-Heuser e D. Hess, «Guest Editorial Industry 4.0–Prerequisites and Visions», *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 13, n. 2, pp. 411–413, Abr. 2016.
- [42] D. Imkamp *et al.*, «Challenges and trends in manufacturing measurement technology - The “industrie 4.0” concept», *J. Sensors Sens. Syst.*, vol. 5, n. 2, pp. 325–335, Out. 2016.
- [43] S. H. Bonilla, H. R. O. Silva, M. T. da Silva, R. F. Gonçalves, e J. B. Sacomano, «Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges», *Sustain.*, vol. 10, n. 10, Out. 2018.
- [44] F. E. P. Januário, J. Leitão, A. Cardoso, e P. Gil, «Resilience Enhancement in Cyber-Physical Systems: A Multiagent-Based Framework», em *Multi-agent Systems*, InTech, 2017.
- [45] X. G. *et al.*, «Cyber-physical-social system in intelligent transportation», *IEEE/CAA J. Autom. Sin.*, vol. 2, n. 3, pp. 320–333, 2015.
- [46] J. R. Jiang, «An improved cyber-physical systems architecture for Industry 4.0 smart factories», *Adv. Mech. Eng.*, vol. 10, n. 6, Jun. 2018.
- [47] J. H. Lee, S. Do Noh, H. J. Kim, e Y. S. Kang, «Implementation of cyber-physical production systems for quality prediction and operation control in metal casting», *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, n. 5, Mai. 2018.
- [48] L. Monostori, «Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges», em *Procedia CIRP*, 2014, vol. 17, pp. 9–13.
- [49] D. Imkamp *et al.*, «Challenges and trends in manufacturing measurement technology - The “industrie 4.0” concept», *J. Sensors Sens. Syst.*, vol. 5, n. 2, pp. 325–335, Out. 2016.
- [50] J. H. Kim, «A Review of Cyber-Physical System Research Relevant to the Emerging IT Trends: Industry 4.0, IoT, Big Data, and Cloud Computing», *J. Ind. Integr. Manag.*, vol. 02, n. 03, p. 1750011, Set. 2017.
- [51] W. Lidong e W. Guanghui, «Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0», *Int. J. Eng. Manuf.*, vol. 6, n. 4, pp. 1–8, Jul. 2016.
- [52] M. Mikusz, «Towards an understanding of cyber-physical systems as industrial software-product-service systems», em *Procedia CIRP*, 2014, vol. 16, pp. 385–389.
- [53] J. G. Ganssle e M. Barr, *Embedded systems dictionary*. CMP Books, 2003.

- [54] V. Alcácer e V. Cruz-Machado, «Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems», *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, n. 3. Elsevier B.V., pp. 899–919, 01-Jun-2019.
- [55] D. Vuksanović, J. Ugarak, e D. Korčok, «Industry 4.0: the Future Concepts and New Visions of Factory of the Future Development», 2016, pp. 293–298.
- [56] T. Wagner, C. Herrmann, e S. Thiede, «Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems», em *Procedia CIRP*, 2017, vol. 63, pp. 125–131.
- [57] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee, e B. Yin, «Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges», *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6505–6519, Dez. 2017.
- [58] «Factories of the future: Meeting the challenge of Industry 4.0 - Microsoft Industry Blogs». [Em linha]. Disponível em: <https://cloudblogs.microsoft.com/industry-blog/manufacturing/2017/12/12/the-factory-of-the-future-meeting-the-challenge-of-industry-4-0/>. [Acedido: 01-Mai-2020].
- [59] D. Kolberg e D. Zühlke, «Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies», em *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 28, n. 3, pp. 1870–1875.
- [60] R. Automation, «The Connected Enterprise Maturity Model».
- [61] A. S. Sohal, «Individual Involvement and Intervention in Quality Improvement Programmes: Using the Andon System», *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 8, n. 2, Fev. 1991.
- [62] «Industry 4.0 demystified--lean's next level | McKinsey». [Em linha]. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/industry-4-0-demystified-leans-next-level>. [Acedido: 15-Abr-2020].
- [63] T. Mettler, «Maturity assessment models: a design science research approach», *Int. J. Soc. Syst. Sci.*, vol. 3, pp. 81–98, 2011.
- [64] M. Sony e S. Naik, «Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review», *Benchmarking*. Emerald Group Publishing Ltd., 2019.
- [65] A. Behrendt, N. Müller, P. Odenwälder, e C. Schmitz, «Industry 4.0 demystified-lean's next level», 2017.
- [66] A. Schumacher, S. Erol, e W. Sihn, «A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises», em *Procedia CIRP*, 2016.
- [67] K. Lichtblau *et al.*, «INDUSTRIE 4.0 READINESS».

- [68] PricewaterhouseCoopers, «Industry 4.0 / Digital Operations Self-Assessment». 2016.
- [69] M. Paul, «Classification of process analysis: offline, atline, online, inline», *Cem. Int.*, vol. 7, pp. 72–81, Mai. 2009.
- [70] «Particle Size & Shape Analysis - Products - Microtrac». [Em linha]. Disponível em: <https://www.microtrac.com/products/particle-size-shape-analysis/>. [Acedido: 30-Abr-2020].
- [71] «Soybean seeds | Feedipedia». [Em linha]. Disponível em: <https://www.feedipedia.org/node/42>. [Acedido: 24-Out-2019].
- [72] «Rapeseeds | Feedipedia». [Em linha]. Disponível em: <https://www.feedipedia.org/node/15617>. [Acedido: 02-Mai-2020].
- [73] «Dynamic Light Scattering». [Em linha]. Disponível em: <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/glossary/dynamic-light-scattering/>. [Acedido: 01-Mai-2020].
- [74] «Laser Diffraction». [Em linha]. Disponível em: <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/glossary/laser-diffraction/>. [Acedido: 01-Mai-2020].
- [75] «Dynamic Image Analysis». [Em linha]. Disponível em: <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/glossary/dynamic-image-analysis/>. [Acedido: 14-Out-2019].
- [76] «Zetasizer AT | On-line DLS System for Real-time Particle Size Analysis | Malvern Panalytical». [Em linha]. Disponível em: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/zetasizer-range/zetasizer-at>. [Acedido: 02-Mai-2020].
- [77] T. Gawenda, D. Krawczykowski, A. Krawczykowska, A. Saramak, e A. Nad, «Application of Dynamic Analysis Methods into Assessment of Geometric Properties of Chalcedonite Aggregates Obtained by Means of Gravitational Upgrading Operations», *Minerals*, vol. 10, n. 2, p. 180, Fev. 2020.
- [78] «Particle Size Essentials Guidebook». [Em linha]. Disponível em: https://www.horiba.com/en_en/en-en/products/by-segment/scientific/particle-characterization/particle-guidebook/. [Acedido: 05-Mai-2020].
- [79] «ISO - ISO 14488:2007 - Particulate materials — Sampling and sample splitting for the determination of particulate properties». [Em linha]. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/39988.html>. [Acedido: 05-Mai-2020].
- [80] R. Piggin e D. Brandt, «Wireless ethernet for industrial applications», *Assembly Automation*, vol. 26, n. 3. pp. 205–215, 2006.
- [81] «ISO - ISO 13322-2:2006 - Particle size analysis — Image analysis methods — Part 2: Dynamic

- image analysis methods». [Em linha]. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/38665.html>. [Acedido: 04-Mai-2020].
- [82] «NIR technology for routine analysis of food and agricultural products». [Em linha]. Disponível em: <https://www.fossanalytics.com/en/news-articles/technologies/nir-technology>. [Acedido: 08-Jan-2020].
- [83] A. E. Cervera-Padrell *et al.*, «Monitoring and control of a continuous Grignard reaction for the synthesis of an active pharmaceutical ingredient intermediate using inline NIR spectroscopy», *Org. Process Res. Dev.*, vol. 16, n. 5, pp. 901–914, Mai. 2012.
- [84] L. Chablani, M. K. Taylor, A. Mehrotra, P. Rameas, e W. C. Stagner, «Inline real-time near-infrared granule moisture measurements of a continuous granulation-drying-milling process», *AAPS PharmSciTech*, vol. 12, n. 4, pp. 1050–1055, Dez. 2011.
- [85] «Near Infrared Spectroscopy». [Em linha]. Disponível em: <https://www.zeiss.com/spectroscopy/solutions-applications/measuring-principle/near-infrared-spectroscopy.html#the-science>. [Acedido: 02-Jan-2020].
- [86] P. Tatzert, M. Wolf, e T. Panner, «Industrial application for inline material sorting using hyperspectral imaging in the NIR range», *Real-Time Imaging*, vol. 11, n. 2, pp. 99–107, Abr. 2005.
- [87] C. Pasquini, «Near infrared spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications», *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 14, n. 2. Sociedade Brasileira de Quimica, pp. 198–219, Abr-2003.
- [88] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, e F. J. (Francis J. . Doyle, *Process Dynamics and Control*, 4.^a ed. 2017.
- [89] J. R. Ruiz-Sarmiento, J. Monroy, F. A. Moreno, C. Galindo, J. M. Bonelo, e J. Gonzalez-Jimenez, «A predictive model for the maintenance of industrial machinery in the context of industry 4.0», *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 87, p. 103289, Jan. 2020.
- [90] E. Sezer, D. Romero, F. Guedea, M. MacChi, e C. Emmanouilidis, «An Industry 4.0-Enabled Low Cost Predictive Maintenance Approach for SMEs», em *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2018 - Proceedings*, 2018, pp. 1–8.
- [91] Z. Li, K. Wang, e Y. He, «Industry 4.0-Potentials for Predictive Maintenance», 2016.
- [92] P. Girdhar e C. (Cornelius) Scheffer, *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*. Elsevier, 2004.
- [93] C. K. M. Lee, Y. Cao, e K. K. H. Ng, «Big data analytics for predictive maintenance strategies»,

em *Supply Chain Management in the Big Data Era*, IGI Global, 2016, pp. 50–74.

- [94] Emerson, «Measurement Types in Online Machinery Monitoring», 2020.
- [95] J. A. Almacinha, «Redutor de Engrenagens Cilíndricas de Dentado Exterior», Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade do Porto, 2016.
- [96] B. Cahyono, D. Priyanta, F. Rizqullah, e F. Ramadhan, «Vibration Spectrum Analysis for Indicating Damage on Turbine and Steam Generator Amurang Unit 1», Dez. 2017.
- [97] P. J. Rzeszucinski, J. K. Sinha, R. Edwards, A. Starr, B. Allen, e J. K. Sinha, «Normalised Root Mean Square and Amplitude of Sidebands of Vibration Response as Tools for Gearbox Diagnosis», *Strain*, vol. 48, n. 6, pp. 445–452, 2012.