



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA E INDUSTRIAL

JOÃO OLIVEIRA BENCATEL

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Efeitos da Manutenção no Rendimento de Motorreductores Industriais

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2023



Efeitos da Manutenção no Rendimento de Motorreductores Industriais

João Oliveira Bencatel

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientadora: Helena Victorovna Guitiss Navas,
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa - DEMI

Coorientadora: Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado
Professora Adjunta, ISEL - IPL

Júri:

Presidente: Rui Fernando dos Santos Pereira Martins,
Professor Associado, FCT-NOVA / DEMI

Arguente: Rosa Maria Marquito Marat Mendes,
Professora Coordenadora, Escola Superior Náutica Infante D. Henrique (ENIDH) / DEM

Orientadora: Helena Víctorovna Guitiss Navas,
Professora Auxiliar, FCT-NOVA / DEMI

Vogal: David Figueiredo Nunes Braga,
Diretor de Serviços e Redutores Industriais, SEW-EURODRIVE Portugal

Efeito da Manutenção no Rendimento de Motorreductores Industriais

Copyright © João Oliveira Bencatel, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVA thesis Word [11].

Aos meus avós, Bernarda Rosa do Paraíso, Joaquim António Saboga Bencatel, Manuel de Matos Oliveira e Maria de Deus da Silva Queimado Oliveira, por terem criado as fundações que me permitiram chegar até este momento.

AGRADECIMENTOS

Ao longo desta dissertação tive o apoio técnico e moral de diversas pessoas sem o qual este não teria sido possível.

Começo por manifestar os meus sinceros agradecimentos à Professora Doutora Helena Navas, cuja orientação durante o desenvolvimento desta dissertação foi imensurável. Agradeço pela sua paciência e disponibilidade que foram fundamentais para este projeto.

Ao Engenheiro David Braga, agradeço por ter tornado esta dissertação possível e pelo seu apoio e disponibilidade que foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação. Ao Telmo Ambrósio agradeço pelo acompanhamento na recolha de dados e por se ter disponibilizado a responder a questões durante todo o processo. À SEW-EURODRIVE agradeço pelo apoio oferecido nesta dissertação, nomeadamente ao Francisco Rego e ao Rogério Oliveira, que foram elementos cruciais na análise e identificação de falhas nos equipamentos. À empresa do caso de estudo quero agradecer ao Engenheiro Marco Silva e à Engenheira Mariana Simões, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e pelo apoio durante a realização das leituras.

Agradeço à Professora Cândida Coelho pelo apoio e orientação que me deu ao longo do meu percurso académico.

Quero também agradecer aos meus amigos mais próximos, António Monteiro, Diogo Naré e Pedro Vieira, por me terem apoiado moralmente durante o processo, ao criarem momentos de distração que me ajudaram a descontrair nos meus momentos mais tensos.

Agradeço também aos meus avós e ao meu irmão, pelo apoio constante e incondicional que me proporcionaram quer nos momentos de felicidade e de tristeza.

Por fim queria expressar a minha profunda gratidão aos meus pais que não apenas me educaram, como também me apoiaram, ao longo de toda a minha vida, para alcançar os meus objetivos, quaisquer que eles fossem.

Apenas através do apoio que recebi foi possível alcançar esta etapa tão importante.

RESUMO

A eficiência energética é um tema crucial nos dias de hoje, pois é uma forma importante de combate às alterações climáticas e à escassez de recursos naturais. Na indústria, qualquer melhoria na eficiência energética pode resultar em reduções significativas no consumo de energia e, por conseguinte, de combustíveis fósseis.

A manutenção de equipamentos é importante na melhoria da eficiência energética, pois não se limita à reparação dos mesmos, como também garante a preservação do seu funcionamento adequado e consequentemente resulta numa eficiência do equipamento, ao longo da sua vida útil, mais próxima do seu valor inicial.

Em muitas indústrias, os acionamentos eletromecânicos são elementos fundamentais para a operação adequada e as falhas destes equipamentos resultam em perdas financeiras decorrentes de paragens das linhas de produção. Além disso, uma manutenção adequada é importante para garantir que o equipamento esteja em boas condições, de forma a minimizar as suas perdas de potência e prolongar os seu tempo de vida útil.

O presente estudo foi realizado com o apoio da SEW-EURODRIVE Portugal. Foram desenvolvidos um modelo e um procedimento para a sua aplicação que ajudam a determinar o rendimento de motorreductores. Foram avaliados os ganhos energéticos obtidos com a manutenção adequada de motorreductores. Foi recolhida informação técnica e científica sobre as perdas típicas de potência em cada um dos componentes destes equipamentos.

Foi realizado um estudo de caso numa empresa fabricante de bebidas onde foram analisados os consumos de equipamentos antes e depois da sua manutenção e as falhas que levaram ao surgimento de perdas. Adicionalmente foram desenvolvidas sugestões para a melhoria da gestão da manutenção da empresa estudada.

O modelo e o procedimento propostos poderão ser facilmente adaptados a outros tipos de motorreductores, a outras aplicações dos mesmos e a outros equipamentos industriais.

Palavras chave: Acionamentos eletromecânicos, eficiência energética, manutenção, rendimento de motorreductores, perdas de potência, método de Ipinza

ABSTRACT

Energy efficiency is a crucial topic in today's world, as it is an important way to combat climate change and the scarcity of natural resources. In the industry, any improvement in energy efficiency can result in significant reductions in energy consumption and, consequently, fossil fuel consumption.

Equipment maintenance is important in improving energy efficiency, as it not only involves repairing the equipment, but also ensures the preservation of their proper functioning, thereby resulting in equipment efficiency over its lifespan closer to its original value. In many industries, electromechanical drives are fundamental elements for proper operation, and failures of these equipment lead to financial losses due to production line stoppages. Furthermore, proper maintenance is essential to ensure that the equipment is in good condition, minimizing power losses and extending its useful lifespan.

This study was conducted with the support of SEW-EURODRIVE Portugal. A model and a procedure were developed for its application, which help determine the efficiency of gear motors. The energy gains achieved through proper maintenance of gear motors were also evaluated. Technical and scientific information on typical power losses in each of the components of these devices was collected.

A case study was conducted in a beverage production company, where equipment consumption before and after maintenance, as well as the failures that led to losses, were analysed. Additionally, suggestions were developed to improve the maintenance management of the studied company.

The proposed model and procedure can be easily adapted to other types of gear motors, other applications of the same, and other industrial equipment.

Keywords: Electromechanical drives, energy efficiency, maintenance, motor-reducer efficiency, power losses, Ipinza method

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos do Estudo	2
1.3	Metodologia do Estudo	2
1.4	Estrutura da Dissertação	3
2	MANUTENÇÃO INDUSTRIAL	5
2.1	Contextualização Histórica	5
2.2	Tipos de Manutenção.....	6
2.3	Níveis de Manutenção	8
2.4	KPI's de Gestão da Manutenção.....	9
2.5	Método de Ipinza.....	12
2.6	Manutenção Preventiva e Preditiva em Motorreductores	14
3	FALHAS E AVARIAS EM MOTORREDUTORES.....	15
3.1	Tipos de Motorreductores.....	15
3.2	Falhas e Avarias em Motores Eléctricos.....	17
3.3	Falhas e Avarias em Rodas Dentadas.....	21
3.4	Falhas e Avarias em Chumaceiras de Rolamento.....	23
3.5	Falhas e Avarias em Retentores.....	25
3.6	Falhas e Avarias em Veios.....	26
3.7	Falhas e Avarias em Acoplamentos Mecânicos	26
3.8	Degradação e Contaminação de Lubrificantes.....	28

3.8.1	Óleo Mineral vs Sintético.....	29
3.8.2	Lubrificação de Redutores para Impedir Falhas e Avarias	30
3.9	Desalinhamentos entre Componentes.....	33
4	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E RENDIMENTO DE MOTORREDUTORES	35
4.1	Normalização de Eficiência Energética	35
4.2	Perdas de Potência Mecânica em Motorredutores	36
4.2.1	Perdas de Potência em Motores.....	38
4.2.2	Perdas de Potência em Chumaceiras de Rolamento	40
4.2.3	Perdas de Potência em Rodas Dentadas	41
4.2.4	Perdas de Potência em Retentores	43
4.2.5	Perdas de Potência na Lubrificação	44
4.3	Avaliação dos Ganhos Energéticos da Manutenção.....	47
5	PROPOSTA DE MODELO DE DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MOTORREDUTORES.....	49
6	MOTORREDUTORES DA SEW-EURODRIVE	53
6.1	SEW-EURODRIVE em Portugal e Pelo Mundo.....	53
6.2	Gama de Motorredutores	54
7	ESTUDO DE CASO – EMPRESA PRODUTORA DE BEBIDAS	57
7.1	Apresentação da Linha em Estudo	57
7.2	Tipos de Motorredutores em Estudo.....	59
7.3	Identificação de Problemas	62
7.4	Processo de Avaliação de Eficiência Energética Aplicado	82
7.5	Análise dos Problemas Identificados.....	84
7.6	Análise da avaliação energética.....	86
7.7	Propostas de Melhoria	88
7.8	Discussão de Resultados	89
8	CONCLUSÕES	91
	BIBLIOGRAFIA	95
	ANEXOS	105
	Anexo A	105

Anexo B.....	105
Anexo C	109
Anexo D.....	110
Anexo E.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de manutenção (Adaptado de [7], [8])	7
Figura 2.2 - Curva de Banheira [7]	10
Figura 3.1 - Motorreductor em linha [21].....	16
Figura 3.2 - Motorredutores de reductor planetário [22].....	16
Figura 3.3 - Motorreductor com saída a 90° [23].....	16
Figura 3.4 - Rotor de gaiola de esquilo [27]	17
Figura 3.5 - Fontes de falha externas a motores elétricos (Adaptado de [36])	20
Figura 3.6 - Representação de <i>pitting</i> e <i>spalling</i> [44].....	22
Figura 3.7 - Representação de desgaste não uniforme [45]	23
Figura 3.8 - Componentes de uma chumaceira de rolamento [48].....	24
Figura 3.9 - Exemplo de <i>pitting</i> na pista externa de uma chumaceira de rolamento [52]	25
Figura 3.10 - Estrutura molecular do óleo mineral vs sintético (Adaptado de [67]).....	30
Figura 3.11 - Tipos de desalinhamentos [70]	33
Figura 4.1 - Potência dissipada num motorreductor [4].....	37
Figura 4.2 - Perdas de potência independentes e dependentes de carga	38
Figura 4.3 - Momento de atrito da chumaceira de rolamento (Adaptado de [89])	40
Figura 4.4 - Exemplos de danos nos elementos de uma chumaceira de rolamento [91].....	41
Figura 4.5 - Relação entre a eficiência e o ângulo de inclinação da hélice (Adaptado de [96])	43
Figura 4.6 - Perdas por atrito em retentores convencionais da SKF (Adaptado de [98])	44
Figura 4.7 - Representação de lubrificação por chapinhagem (Adaptado de [101]).....	45
Figura 4.8 - Representação de lubrificação por banho de óleo	45
Figura 4.9 - Representação de lubrificação por pressão (Adaptado de [102])	46
Figura 4.10 - Variação da viscosidade do lubrificante em função da temperatura (Adaptado de [105]).....	47
Figura 5.1 - Perdas em motorredutores.....	50
Figura 5.2 - Procedimento de contabilização das perdas em motorredutores.....	52

Figura 6.1 - Séries de motorreduzores fabricados pela SEW-EURODRIVE (Adaptado de [114])	55
Figura 7.1 - Identificação de circuitos transportadores - linha 5.....	58
Figura 7.2 - Secções da linha 5	59
Figura 7.3 - Estrutura geral dos redutores série S [116]	60
Figura 7.4 - Adaptação do modelo à série de motorreduzores em estudo	61
Figura 7.5 - Retentor de uma chumaceira de rolamentos do MT3	62
Figura 7.6 – Lubrificante contaminado no fundo cárter do MT3	63
Figura 7.7 - <i>Pitting</i> na roda coroa do MT3	63
Figura 7.8 - Desgaste e corrosão no cubo do acoplamento do MT3.....	63
Figura 7.9 – Bobine do freio do MT3.....	64
Figura 7.10 - Potência consumida pelo MT3 antes e depois da manutenção.....	64
Figura 7.11 - Desgaste no retentor de uma chumaceira de rolamento do MT7.....	65
Figura 7.12 - Desgaste na roda coroa do MT7	65
Figura 7.13 - Desgaste parafuso sem-fim do MT7	66
Figura 7.14 - Vinco na zona dos retentores do acoplamento do MT7.....	66
Figura 7.15 - Estator do MT7 com infiltração de lubrificante.....	66
Figura 7.16 - Potência consumida pelo MT7 antes e depois da manutenção.....	67
Figura 7.17 - Vinco na zona do retentor no acoplamento do MT9	67
Figura 7.18 - <i>Pitting</i> e desgaste na roda coroa MT9.....	68
Figura 7.19 - Desgaste no parafuso sem-fim do MT9.....	68
Figura 7.20 - Lubrificante contaminado no fundo do cárter do MT9.....	69
Figura 7.21 - Marca de sobreaquecimento no rotor do MT9	69
Figura 7.22 - Sujidade na proteção do ventilador do MT9	69
Figura 7.23 - Potência consumida pelo MT9 antes e depois da manutenção.....	70
Figura 7.24 - Dano na extremidade do veio oco do MT13.....	70
Figura 7.25 - <i>Pitting</i> e desgaste na roda 2 do MT13.....	71
Figura 7.26 - Desgaste no sem-fim do MT13	71
Figura 7.27 - Oxidação no cubo do acoplamento do MT13	72
Figura 7.28 - Dano na caixa da chumaceira de rolamento do MT13	72
Figura 7.29 - Corrosão na proteção do ventilador do MT13	72
Figura 7.30 - Potência consumida pelo MT13 antes e depois da manutenção.....	73
Figura 7.31 - Oxidação na extremidade do veio oco do MT79.....	73
Figura 7.32 - Lubrificante contaminado no fundo do cárter do MT79.....	74
Figura 7.33 - <i>Pitting</i> na roda coroa do MT79	74
Figura 7.34 - Desgaste no sem-fim do MT79	75
Figura 7.35 - Desgaste no anel externo de uma chumaceira de rolamento do MT79	75

Figura 7.36 - Dano no cubo do acoplamento do MT79	76
Figura 7.37 - Dano na caixa da chumaceira de rolamento do MT79	76
Figura 7.38 - Sujida e corrosão na proteção do ventilador do MT79.....	76
Figura 7.39 - Potência consumida pelo MT79 antes e depois da manutenção.....	77
Figura 7.40 - Pitting, desgaste e escatel rebatido no MT96.....	77
Figura 7.41 - Desgaste, no sem-fim, pinhão e na roda de transmissão do MT96	78
Figura 7.42 - Lubrificante contaminado no interior do cárter do MT96	78
Figura 7.43 - Vinco na zona dos retentores do veio de acoplamento do MT96	79
Figura 7.44 - Dano na caixa da chumaceira de rolamento do MT96	79
Figura 7.45 – Bobine de freio queimada do MT96	79
Figura 7.46 - Potência consumida pelo MT96 antes e depois da manutenção.....	80
Figura 7.47 - Vinco na zona dos retentores e dano na extremidade do veio oco do MT622....	80
Figura 7.48 - Pitting inicial e desgaste severo na roda coroa do MT622.....	81
Figura 7.49 - Vinco na zona dos retentores do veio de acoplamento do MT622.....	81
Figura 7.50 - Anel excêntrico do MT622 partido.....	81
Figura 7.51 - Dano no cubo do acoplamento do MT622	82
Figura 7.52 - Potência consumida pelo MT622 antes e depois da manutenção.....	82
Figura 7.53 - C.A. 8333 Simplified Three-phase power analyser.....	83
Figura 7.54 - Montagem para medição do consumo elétrico de um motorreductor	84
Figura A.1 - IEC60034-30-1:2014 para equipamentos de 50Hz.....	105
Figura D.1 – Consumos de dois equipamentos ao longo do tempo.....	110

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Pontuação do Método de Ipinza	13
Tabela 2.2 - Resultados da Pontuação do Método de Ipinza	13
Tabela 3.1 - Causas de falha em veios	26
Tabela 3.2 - Falhas típicas e causas em acoplamentos.....	27
Tabela 3.3 - Fatores que afetam a escolha de lubrificantes em redutores.....	30
Tabela 3.4 - Lubrificantes usados para diferentes tipos de engrenagens	32
Tabela 4.1 - Perdas médias de motores, resultados do estudo de EASA/AEMT	39
Tabela 4.2 - Eficiência de diferentes tipos de engrenagens.....	42
Tabela 6.1 - Intervalos de Inspeção/Manutenção de redutores.....	55
Tabela 6.2 - Intervalos de Inspeção/Manutenção de motores SEW-EURODRIVE.....	56
Tabela 6.3 - Intervalo de Inspeção/Manutenção de freio	56
Tabela B.1 – <i>Checklist</i> para manutenção de motorreductores	103
Tabela C.1 - Valores da variação de consumo de potência	109
Tabela E.1 – Aplicação do método de Ipinza	110

SIGLAS E ACRÓNIMOS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i>
MTBF	Média dos tempos de bom funcionamento
MTTR	Média dos tempos de reparação
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
VSD	<i>Variable Speed Drive</i>

SÍMBOLOS

D	Disponibilidade intrínseca
D_V	Diâmetro do veio
E_G	Energia ganha
E_O	Eficiência antes do processo de manutenção ser aplicado
E_N	Eficiência depois do processo de manutenção ser aplicado
$F(t)$	Fiabilidade em função do tempo
H_V	Fator de perda de engrenagens
i	Relação de transmissão
i_m	intervalo de fator de carga incremental para o motor
LF	Fator de carga
n	Velocidade de rotação
N_{av}	Número de avarias no período
n_{LF}	Número total de compartimentos de fator de carga
P	Potência
P_d	Potência dissipada
P_{dD}	Potência dissipada dependente das cargas em retentores
P_{dDa}	Potência dissipada por atrito no retentor
P_{dL}	Potência dissipada nas chumaceiras de rolamento
P_{dZO}	Potência dissipada independente das cargas nas engrenagens
P_{dZP}	Potência dissipada dependente das cargas nas engrenagens

P_{dX}	Potência dissipada dependente das cargas em outros componentes
P_{dZT}	Potência total dissipada em engrenagens
P_e	Potência no veio de entrada da máquina
P_f	Potência fornecida
P_G	Potência ganha
P_S	Potência no veio de saída da máquina
P_U	Potência útil
$R(t)$	Não fiabilidade em função do tempo
t_a	Tempo de operação anual
T_{bft}	Período de bom funcionamento
T_{ri}	Tempo de reparação
β	Ângulo de inclinação da hélice do sem-fim
η	Rendimento
η_{en}	Rendimento do estágio n
λ	Taxa de avarias
μ	Coeficiente de atrito
v	Velocidade linear

INTRODUÇÃO

O presente capítulo contém o enquadramento, objetivos e metodologia do estudo e a estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento

Com a deterioração do clima e com a escassez de recursos naturais, o mundo tem trabalhado em formas de produzir energia de forma mais sustentável, mas não só a produção da energia é importante, a forma como esta é utilizada é relevante para o alcance de um futuro sustentável.

A manutenção no setor industrial é de extrema importância de tal modo que na Europa em 2018 gastou-se aproximadamente 2,4 triliões de euros em manutenção [1]. Associado também ao tópico da sustentabilidade a manutenção é de extrema importância uma vez que a manutenção correta dos equipamentos resulta diretamente no aumento da sustentabilidade das empresas não só de um ponto de vista energético, mas também no consumo de recursos naturais, uma vez que a correta manutenção, leva a equipamentos que duram mais tempo que por sua vez resulta em se ter de comprar menos partes novas, desnecessariamente. Adicionalmente a manutenção adequada de equipamentos tem efeitos diretos nos lucros das empresas, uma vez que reduz custos a longo prazo e evita paragens inesperadas.

Os motorreductores são um elemento fulcral de diversas indústrias, utilizados para reduzir a velocidade e aumentar o binário produzido pelos motores. O melhoramento da eficiência energética de motorreductores não só beneficia o ambiente como também as empresas uma vez que, o consumo energético destes equipamentos podem ser responsáveis por cerca de 90% dos custos do seu ciclo de vida [2], [3].

Neste âmbito, a SEW-EURODRIVE, sendo uma empresa líder de mercado na indústria de motorreductores, em Portugal, e uma empresa que se preocupa com a sustentabilidade e com o rendimento dos seus equipamentos durante o seu ciclo de vida, oferecem uma

variedade de serviços de manutenção para apoiar os seus clientes durante todo o período de operação dos equipamentos fornecidos.

A temática do estudo surgiu da colaboração entre a SEW-EURODRIVE e o Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da NOVA School of Science and Technology, no seguimento da dissertação do Engenheiro Pedro Figueiredo [4].

1.2 Objetivos do Estudo

A SEW-EURODRIVE é uma empresa líder de mercado em Portugal, especializada na produção de motorreductores de elevada eficiência. Demonstrando um compromisso contínuo com a satisfação dos seus clientes, a empresa prioriza a manutenção da qualidade de seus equipamentos ao longo do tempo. Com essa finalidade, a SEW-EURODRIVE investe significativamente em meios técnicos e humanos de forma a garantir uma manutenção adequada dos seus produtos após a venda, garantindo assim a eficiência duradora dos seus equipamentos e promovendo a sustentabilidade.

O objetivo primordial deste estudo foi determinar o efeito da manutenção adequada em motorreductores e determinar quais as falhas que mais influenciam a perda de eficiência em motorreductores.

Também foi desenvolvido um modelo para avaliar a eficiência dos equipamentos durante a sua vida útil através de dados disponibilizados pelos fabricantes dos diferentes componentes ou de estudos de perdas de potência sobre os diferentes componentes. O procedimento desenvolvido apoia este modelo de modo a apresentar uma forma de o aplicar na obtenção do rendimento de motorreductores. Este foi aplicado na gama de equipamentos do estudo de caso de modo a mostrar a sua aplicação prática.

Durante o estudo de caso surgiu também a necessidade de desenvolver sugestões de apoio à gestão da manutenção, para a empresa do estudo de caso, dos motorreductores. Estas sugestões visam criar políticas dentro da empresa que evitem a degradação acentuada dos equipamentos em estudo.

1.3 Metodologia do Estudo

De forma a alcançar o objetivo inicial, começou-se por estudar o tipo de equipamentos que foram alvo de estudo. Um mês antes da data marcada para a manutenção dos motorreductores foram efetuadas leituras ao longo de dois dias, numa empresa produtora de bebidas, cliente da SEW-EURODRIVE. Com a chegada dos equipamentos à SEW-EURODRIVE Portugal, foram analisadas e registadas as falhas presentes nos diferentes componentes dos equipamentos. Passado um mês dos equipamentos estarem montados na linha de produção, após a

manutenção, foram feitas novamente medições à potência consumida pelos equipamentos. Deste modo pode-se avaliar a evolução dos consumos após a manutenção com base no estado dos equipamentos.

Durante o processo de recolha de dados, foram encontradas diversas falhas na gestão da manutenção da empresa onde os equipamentos se encontravam. Com o objetivo apoiar a empresa na sua gestão da manutenção, foram desenvolvidas sugestões com base em métodos e indicadores existentes.

Por fim, foi também desenvolvido um modelo de avaliação do rendimento de motorreductores, com base em estudos já desenvolvidos ou na informação fornecida por fabricantes de componentes individuais.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é dividida em oito capítulos.

No presente capítulo apresenta-se um breve introdução sobre a temática, das motivações do estudo colaborativo entre a SEW-EURODRIVE e a NOVA School of Science and Technology e expõe-se os objetivos propostos.

No segundo capítulo é feita uma contextualização histórica da manutenção industrial, apresenta-se conceitos de gestão de manutenção industrial e é apresentado um método de decisão para a aplicação de diferentes tipos de manutenção, bem como o que diferentes tipos de manutenção envolvem em motorreductores.

O terceiro capítulo começa-se por apresentar os motorreductores. Nos seis subcapítulos seguintes apresenta-se os diferentes componentes que compõem estes equipamentos bem como as falhas típicas que surgem em cada. No penúltimo subcapítulo são apresentados os diferentes modos de lubrificação, tipos de lubrificantes e como a sua degradação afeta estes equipamentos. Apresenta-se também os diferentes tipos de desalinhamentos, bem como os seus efeitos nos diferentes componentes.

No quarto capítulo é feito um enquadramento de alguns conceitos relacionados com eficiência energética, bem como atualidade das normas e legislações que regulam a eficiência em motorreductores. Em seguida são apresentadas as perdas que ocorrem nos diferentes componentes derivadas do seu funcionamento normal ou de falhas. Este capítulo é concluído com a apresentação de uma forma de avaliar os ganhos de eficiência com a manutenção.

No quinto capítulo são utilizados os conhecimentos adquiridos para desenvolver um modelo de determinação do rendimento de motorreductores e é apresentado um procedimento para a utilização do mesmo neste tipo de equipamentos.

O capítulo seis, apresenta a SEW-EURODRIVE e os diferentes equipamentos e serviços que fornecem, bem como os planos de manutenção aconselhados pela empresa para os seus motorreductores.

No sétimo capítulo é apresentada a empresa em que foi efetuado o estudo de caso, a linha em que este se focou e os equipamentos estudados. Após esta apresentação são expostos os problemas encontrados nos equipamentos, as leituras feitas na linha em estudo e o processo que levou à obtenção das mesmas. Em seguida são analisados em pormenor os problemas identificados anteriormente e os resultados das análises de consumo dos equipamentos. Com base nas análises efetuadas são feitas propostas de melhoria da gestão da manutenção da empresa e são discutidos o modelo desenvolvido e as análises feitas aos equipamentos.

Por fim, no capítulo oito são apresentadas as conclusões finais do trabalho, o contributo do mesmo e são apresentadas algumas reflexões do estudo. Concluindo com propostas para estudos futuros que poderão expandir sobre os resultados deste estudo.

O presente capítulo contém a revisão bibliográfica relativa a manutenção industrial.

2.1 Contextualização Histórica

Durante um longo período da história, a manutenção continha uma conotação negativa uma vez que implicava paragens na produção, mais uma despesa e o maior problema é que todos os mecanismos terão de ser alguma vez durante o seu funcionamento sujeitos a este tipo de ações uma vez que todos os equipamentos acabam por se degradar com o passar do tempo. Mas com a competitividade entre empresas e a permanente evolução tecnológica, as indústrias foram obrigadas a adaptar-se e otimizar processos.

Durante a segunda metade do séc. XIX a reparação dos equipamentos era facilmente efetuada, uma vez que estes tinham uma vida útil longa, derivado da sua baixa complexidade, por serem muitas vezes subestimados e também devido à desatualização tecnológica dos equipamentos ser lenta, adicionalmente as paragens na produção não se apresentavam como estrangimentos relevantes devido à baixa produção [5]. Com a Revolução Industrial, o advento da automação e o aumento do controlo de qualidade, começou a surgir a necessidade de ter operários dedicados à manutenção [6].

Após a 1ª Guerra Mundial surgiu oficialmente o conceito de Manutenção Corretiva e começaram a ser constituídas equipas especializadas na área da manutenção [6].

Mais tarde, a partir dos anos 50, no período pós-guerra com os avanços tecnológicos, que aumentaram a dependência das máquinas, com o aumento das necessidades e com o aumento da produção, tornou-se mais importante que nunca impedir paragens na produção através da prevenção de avarias fazendo surgir manutenção preventiva. Com o aparecimento destes novos desafios e necessidades, a manutenção passou a ser encarada como uma parte do processo de produção [5].

Com os anos 80, vieram vários avanços tecnológicos, nomeadamente na microeletrónica, e maiores exigências de produtividade. Estas mudanças aumentaram a complexidade e a responsabilidade do trabalho das equipas de manutenção, fazendo com que não só impedir paragens se tornou crítico como também aumentar a eficiência das linhas e dos equipamentos associados tornou-se numa prioridade, adicionando à responsabilidade de gestor de

manutenção a necessidade de otimizar estas atividades. Originando assim a importância crescente da manutenção preditiva que pretende manter o funcionamento dos equipamentos o mais próximo possível do funcionamento ótimo [5]. Com a introdução dos sistemas informáticos, surgiu a possibilidade de organizar grandes quantidades de informação, recolher dados em tempo real e utilizar estas informações para apoio das equipas de manutenção permitindo a utilização da Investigação Operacional na Gestão da Manutenção.

2.2 Tipos de Manutenção

A manutenção não é apenas a reparação de equipamentos, como também a preservação dos mesmos e da respetiva capacidade de trabalho. De forma a garantir que este serviço é efetuado da forma correta existem diversos tipos de manutenção.

Conforme apresentado na Figura 2.1 existem dois grupos:

Manutenção não planeada

Dentro do grupo da manutenção não planeada encontra-se a manutenção corretiva que consiste na reparação de peças/componentes após a ocorrência de falhas/avarias que ocorrem de forma súbita e imprevisível [7].

Manutenção planeada

No grupo da manutenção planeada encontram-se a manutenção preventiva, manutenção preditiva, manutenção de melhoria e manutenção corretiva [8].

A manutenção preventiva consiste em intervenções periódicas ditadas pelos dados estatísticos da velocidade de deterioração dos diferentes componentes dos equipamentos como lubrificantes e peças [7].

As atividades da manutenção preditiva são despoletadas por sinais emitidos por sensores relativos à deterioração de componentes, que venham a surgir nos equipamentos, que necessitem de manutenção de forma a prevenir uma possível avaria. Utilizando equipamentos que não perturbem o funcionamento do mecanismo, podem ser efetuadas inspeções periódicas que permitem prever futuras ocorrências bem como traçar gráficos de tendências dos parâmetros controlados. Na manutenção preditiva, a utilização de sensores é importante, uma vez que pode auxiliar na adaptação da periodicidade das intervenções com a taxa de deterioração de elementos do dispositivo, ou até mesmo detetar falhas antes que estas se tornem grandes o suficiente e tenha de ser efetuada uma intervenção não planeada [7].

Para aplicar este tipo de manutenção pode-se aplicar o plano de ações seguinte [9]:

- Conhecer/Estudar a instalação (fiabilidade dos sistemas e máquinas, perceber a viabilidade económica e a manutenibilidade dos equipamentos);
- Selecionar os equipamentos a monitorizar;

- Selecionar os parâmetros a monitorizar (perceber a as falhas típicas do equipamento, perceber a viabilidade económica de se aplicar cada tipo sensor);
- Implementar o sistema selecionado.

A manutenção de melhoria, consiste em efetuar alterações no equipamento de forma a melhorar o mesmo e reduzir ou eliminar operações de manutenção, melhorando assim a sua fiabilidade e manutenibilidade [7], [10].

Esta organização é representada pela Figura 2.1.

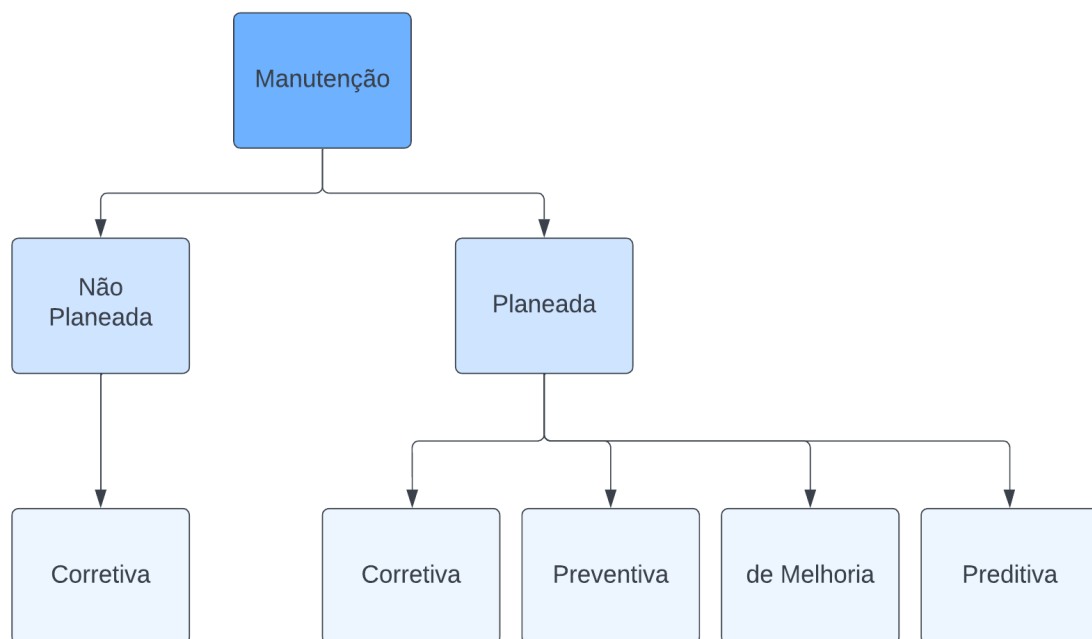


Figura 2.1 - Tipos de manutenção (Adaptado de [7], [8])

A manutenção corretiva em Portugal é o tipo de manutenção mais utilizado para a reparação de acionamentos eletromecânicos [9]. Este tipo de manutenção pode ser subdividido em:

- Manutenção corretiva paliativa, que tem como objetivo repor o funcionamento do sistema, mesmo que não fique perfeito, ou seja, "desenrascar" o cliente, até se poder, no futuro, efetuar uma manutenção mais profunda que não atrapalhe o cliente/utilizador final [7], [9];
- Manutenção corretiva curativa, implica a determinação da causa de o equipamento ter deixado de funcionar e repor o mesmo às condições de funcionamento originais;

Aquando se optar conscientemente pela manutenção corretiva é muito importante ter em atenção que esta deve ser bem planeada e preparada de forma a não resultar em

desnecessariamente longos períodos de paragem e consequente perdas superiores de produção. De forma a tornar as paragens tão pequenas quanto pode-se aplicar as seguintes ações[9]:

- Levantamento exaustivo dos acionamentos existentes;
- Identificar componentes críticos e criar stock;
- Solicitar propostas de equivalências ao fornecedor que consegue prazos mais curtos de entrega;
- Estabelecer com o fornecedor um acordo quanto aos prazos de entrega mínimos;
- Formar os técnicos de como instalar e retirar as unidade das aplicações;

2.3 Níveis de Manutenção

Os vários níveis de manutenção referem-se a diferentes tipos de atividades realizadas para garantir a disponibilidade e fiabilidade de equipamentos e sistemas organizados segundo a sua complexidade. Esses níveis são caracterizados por diferentes habilidades e recursos técnicos, bem como por diferentes objetivos e abrangência [7].

O primeiro nível de manutenção é o operacional, que é realizado pelos próprios operadores do equipamento ou sistema, seguindo as regulações previstas pelo construtor através de elementos acessíveis sem desmontagem ou abertura dos equipamentos e substituição de elementos consumíveis, acessíveis de forma segura [7].

Já o segundo nível é a manutenção técnica, que exige conhecimentos especializados e pode incluir operações simples de manutenção preventiva, como reparos, lubrificação e troca de peças standard de forma a manter o bom funcionamento do equipamento [7].

O terceiro nível é a manutenção avançada, que é realizada por técnicos mais especializados e envolve solucionar problemas complexos como substituição de componentes ou elementos funcionais e operações de manutenção preventiva como regulações gerais e calibração do equipamento [7].

O quarto nível é a manutenção de suporte, que é fornecida por uma equipa especializada como fornecedores ou fabricantes, que envolve trabalhos de manutenção corretiva e preventiva e calibração dos aparelhos de medida utilizados em operações de manutenção.

O quinto nível é a manutenção estratégica, que é realizada com base em uma estratégia de longo prazo, que envolve renovação, reconstrução ou execução de reparações que apenas podem ser executadas numa oficina especializada, obrigando assim à realocação do equipamento [7], [11].

Os níveis de manutenção são importantes porque garantem que os equipamentos e os sistemas estão sempre nas condições ideais de funcionamento. Permitem a identificação de problemas em estágios iniciais, antes que causem grandes prejuízos ou interrupções nas operações, e ajudam a maximizar o tempo de vida útil do equipamento ou sistema.

2.4 KPI's de Gestão da Manutenção

Enquanto a maioria das indústrias apostava na manutenção preventiva no final dos anos 70 início dos anos 80, a indústria aeronáutica, influenciada por Nowlan e Heap [12], desenvolveu um processo de manutenção que se focava nas funcionalidades dos mecanismos, as consequências de falhas e os modos de falha. Fazendo mais tarde surgir, com o apoio do Assistente do Secretário da Defesa dos Estados Unidos da América, estudos sobre Manutenção Focada na Fiabilidade (RCM) em 1978. Mais tarde em 1982, a Marinha dos Estados Unidos expandiu esta metodologia para equipamentos mais comuns, notando a diferença entre a vida útil de projeto e a vida útil intrínseca. Com o apoio de *softwares* computadorizados de gestão de manutenção, a RCM tem vindo a melhorar e a ser muito utilizada na indústria aeronáutica, aeroespacial e nuclear [13].

A RCM é definida pela fiabilidade, a manutenibilidade e a disponibilidade dos equipamentos.

Taxa de Avarias

Primeiramente para se poder falar de fiabilidade deve-se escolher uma população a observar durante um certo período. Com estes parâmetros pode-se obter a **Taxa de Avarias, λ** , dada pela Equação 3.1, que relaciona o número de avarias com o período determinado, quer em tempo, distância ou revoluções [7], [14].

$$\lambda = \frac{N_{av}}{\sum T_{bfi}} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

- λ – taxa de avarias
- N_{av} - número de avarias no período
- T_{bfi} - Período de bom funcionamento

No entanto é importante definir claramente os critérios de escolha e a definição dos diferentes parâmetros. É necessário tornar claramente evidente o período de funcionamento definido, por exemplo, se se definir este período como um ano, tem de se especificar se o equipamento trabalha 24 h por dia todos os dias ou caso contrário quantas horas por dia e quantas vezes por semana ou quantos dias ao longo de um ano e também em que condições se encontram a população estudada.

Outro fator que é bastante relevante é o que se define como uma avaria e não deixar espaço para ambiguidades como erros de utilização ou outros problemas relacionados. De tal forma que é necessário deixar evidente quais as falhas que se está a estudar, fazendo suposições

de forma a ser possível efetuar o estudo e possíveis cálculos, uma vez que na realidade pode existir uma infinidade de falhas possíveis [15].

Evolução da taxa de manutenção

A fiabilidade (F) e não fiabilidade (R) de um equipamento variam com o tempo, uma vez que ambos os fatores dependem dos cuidados que se tem com o mesmo, quer seja desgaste ou envelhecimento.

Estes fatores são inversamente proporcionais e sua soma é sempre igual a um, como é apresentado na Equação 3.2.

$$R(t) + F(t) = 1 \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

- R(t) – Não Fiabilidade
- F(t) – Fiabilidade

A fiabilidade de um equipamento pode ser descrita por uma curva que apresenta a taxa de falhas em função do tempo, criando assim uma curva denominada de "Curva da Banheira", conforme apresentada na Figura 2.2 [7].

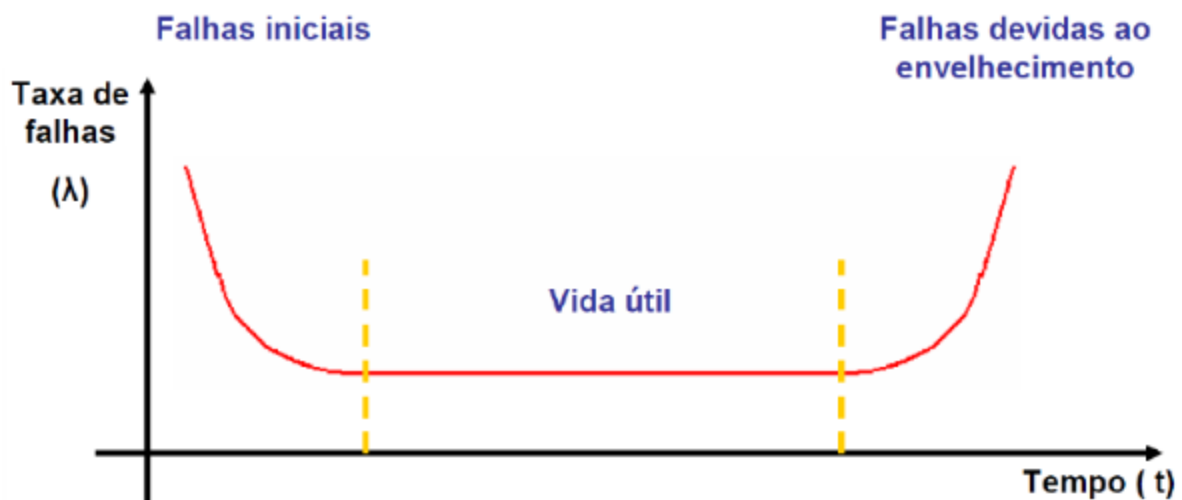


Figura 2.2 - Curva de Banheira [7]

Esta curva pode ser decomposta em três fases:

- A fase inicial, é caracterizada por falhas de início de atividade, relacionadas com problemas de montagem e instalação. Para evitar que os consumidores recebam os equipamentos nesta fase certos equipamentos são sujeitos ao desgaste inicial e teste, como variações de potência, variações de temperatura, vibrações e testes de esforços, sendo que o período a que cada produto é sujeito depende das características do mesmo [7] [16].

- A fase de vida útil caracterizado por uma taxa de falhas reduzida e constante. Este valor pode ser menor se for efetuada a correta utilização e manutenção, se estas boas práticas forem constantes ao longo do tempo é possível que esta fase venha a durar mais [7].
- A fase final é por sua vez definida pelo fim de vida do equipamento e consequentemente um aumento de avarias e falhas [7]. A degradação nesta fase dá-se normalmente devido à degradação dos componentes eletrónicos que estão sujeitos a desgaste físico, elétrico e térmico [15].

É importante salientar que componentes mecânicos como redutores têm um comportamento diferente a componentes eletrónicos uma vez que tendem a não ter tantas falhas na fase inicial. No entanto para os consumidores a fase mais importante e a que interessa que seja tão grande quanto possível é a fase de vida útil [14].

MTBF

A média dos tempos de bom funcionamento, MTBF, é uma métrica da fiabilidade, ou probabilidade de bom funcionamento, ou seja, a probabilidade de um equipamento manter um funcionamento adequado, sob condições específicas durante um período pré-determinado [7], [14].

A fiabilidade de um equipamento é bastante relevante quer para produtores como para consumidores e cada vez mais é utilizado no marketing e vendas dos mesmos. Este depende bastante dos fatores escolhidos para o prever e se não estiver correto, pode resultar na perda de confiança na marca por parte dos clientes e investidores, de tal forma que, os parâmetros usados para o obter devem ser bem avaliados [14], [16].

Então a MTBF será dada pela Equação 3.3.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{\sum T_{bf_i}}{N_{av}} \quad \text{Equação 3.3}$$

Deve-se ter em atenção que os componentes que não estejam diretamente envolvidos com a transferência de momento, como parafusos, não devem ser contabilizados uma vez que a sua influência na vida útil dos equipamentos é praticamente impossível de calcular. Sendo que na maior parte dos casos componentes como estes falham devido a erro humano [14].

MTTR

A média dos tempos de reparação, MTTR, é um indicador da manutenibilidade que indica a capacidade de um equipamento ser mantido nas devidas condições operacionais e a capacidade de efetuar reparações corretamente do mesmo no menor tempo possível, este tempo inclui não só o processo, mas poderá também contar com o tempo de chegada de um técnico e o diagnóstico do problema [7], [15]. Esta métrica é dada pela Equação 3.4.

$$MTTR = \frac{\sum T_{ri}}{N_{av}} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

- T_{ri} = tempo de reparação

Disponibilidade Intrínseca

Este parâmetro resulta da combinação dos níveis de fiabilidade e manutenibilidade de um equipamento, que representa a probabilidade de assegurar a função requerida a um determinado equipamento. Este parâmetro pode ser obtido através da Equação 3.5.

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

- D – Disponibilidade Intrínseca

A Disponibilidade é a probabilidade de o equipamento garantir a função pretendida aquando da sua aquisição [7].

2.5 Método de Ipinza

A fim de se poder definir planos de manutenção é importante considerar-se a importância que a falha de cada componente ou equipamento pode ter não só no equipamento em questão, mas também o efeito do mesmo no processo de produção, nomeadamente, qualidade dos produtos ou custos de produção, ou seja, avaliar a importância de cada componente de uma linha de produção.

Um método simples que pode ser aplicado é o Método de Ipinza, proposto por D'Aléssio Ipinza em 1991 [17].

Este método pretende de forma simples avaliar a importância de cada componente/equipamento de forma a poder definir a importância de aplicar manutenção preventiva ou pelo menos apresentar ao utilizador a importância que esse componente tem na sua linha de produção ou equipamento. De forma a aplicar este método começa se por atribuir uma pontuação a cada componente, conforme apresentado na Tabela 2.1. Em seguida, a partir da Tabela 2.2, atribui-se a importância desse mesmo componente.

Tabela 2.1 - Pontuação do Método de Ipinza [17]

Características	Estado	Pontuação
Efeito na Produção	Para	4
	Reduz	2
	Não Para	0
Valor Técnico-Económico do Equipamento	Alto	4
	Médio	2
	Baixo	1
Prejuízo – à máquina em si	Sim	2
	Não	0
Prejuízo – ao processo	Sim	3
	Não	0
Prejuízo – ao pessoal	Risco	1
	Sem Risco	0
Dependência Logística	Estrangeiro	2
	Local	0
Dependência de Mão-de-Obra	Terceiros	2
	Própria	0
Probabilidade de Avaria (Fiabilidade)	Alta	1
	Baixa	0
Facilidade de Reparação	Alta	1
	Baixa	0
Flexibilidade e Redundância	Simple	2
	By-Pass	1
	Dupla	0

Tabela 2.2 - Resultados da Pontuação do Método de Ipinza [17]

Nº de Pontos		
19 a 22	Crítica	Manutenção Preventiva
13 a 19	Importante	Manutenção Preventiva
6 a 13	Conveniente	Manutenção Corretiva
0 a 6	Opcional	Manutenção Corretiva

2.6 Manutenção Preventiva e Preditiva em Motorreduutores

A definição de um plano de manutenção preventiva em motorreduutores é uma tarefa complexa, devido à variedade de componentes que estes incorporam. Uma forma simples de efetuar este planeamento é seguir as recomendações dos fabricantes. Estes planos normalmente envolvem sugestões de intervalos de inspeção ou manutenção para os diferentes componentes e pormenores a ter em atenção durante os processos. É de realçar que os intervalos indicados não são universais, mas sim uma sugestão inicial que através de estudos e da experiência deve ser, progressivamente, adaptado para as condições de operação dos equipamentos.

A manutenção preditiva aplicada a motorreduutores é cada vez mais utilizada com o surgimento de novas técnicas menos intrusivas e com o melhoramento de sensores já utilizados. Com o advento da Indústria 4.0, nomeadamente IoT (*Internet of Things*), inteligência artificial, realidade aumentada e outras tecnologias conseguiu-se descentralizar processos de monitorização dos sistemas e facilitar os processos de manutenção, minimizando assim o tempo de paragens e reduzindo custos [18].

IoT são dispositivos que estão conectados, nomeadamente sensores, atuadores e outros equipamentos eletrónicos, que recolhem dados sobre os sistemas dos quais fazem parte e através da internet comunicam entre si, permitindo uma constante monitorização do sistema. Através da análise destes dados são capazes de retirar informações, tendências e previsões em tempo real como possíveis problemas que possam vir a ocorrer ou o estado de consumíveis, como lubrificantes, auxiliando assim a manutenção preventiva condicionada dos equipamentos. Existe uma grande variedade de possíveis parâmetros e conseqüentemente sensores a utilizar, mais especificamente para motorreduutores os mais comuns são [9]:

- A análise de vibrações, que é utilizada para a análise de possíveis desequilíbrios, desalinhamentos, folgas e danos, em engrenagens e/ou rolamentos;
- A termografia, que inspeciona a temperatura do banho de óleo e possíveis sobre-aquecimentos, localizados nos rolamentos pro exemplo;
- Análise do lubrificante, que analisa o envelhecimento do lubrificante, a quantidade de humidade e a presença de partículas metálicas;
- *Motor Current Signature Analysis*, MCSA, que monitoriza os sinais elétricos que alimentam os motores de corrente alternada, CA, e com o apoio de inteligência artificial faz-se uma análise dos equipamentos [19].

É importante de referir que os equipamentos não precisam de ter sido projetados para este tipo de sensores e que estes podem ser adicionados na maior parte dos casos à posteriori [20].

FALHAS E AVARIAS EM MOTORREDUTORES

O presente capítulo apresenta motorredutores, destacando os diferentes tipos que existem, assim como apresenta os componentes dos mesmo em pormenor e as falhas típicas que ocorrem nos mesmo.

3.1 Tipos de Motorredutores

Motorredutores são sistemas compostos por um motor e uma caixa redutora, onde a rotação do motor é transmitida por via de um acoplamento ou diretamente, por um pinhão montado no veio de saída do motor, para uma caixa redutora.

Pode-se subdividir os diversos componentes/elementos em dois grupos, o primeiro sendo dos componentes críticos com vida finita, cuja falha influência a deterioração prematura da unidade, nomeadamente retentores, chumaceiras de rolamento, lubrificantes e discos de ferôdo. E o segundo grupo, sendo elementos com uma vida teoricamente infinita, com a correta manutenção, sendo estes engrenagens, o cárter e os veios [9].

O fator primário que determina os diferentes tipos de motorredutores é a direção da força do redutor. Há três tipos principais de redutores: Redutores de eixos paralelos redutores em linha/coaxiais e de redutores de ângulos retos.

Em motorredutores com redutores em linha/coaxiais e redutores planetários, o veio de entrada e o veio de saída encontram-se alinhados na mesma direção, conforme representados na Figura 3.1 e Figura 3.2.



Figura 3.1 - Motorreductor em linha [21]



Figura 3.2 - Motorredutores de redutor planetário [22]

Redutores a 90° , por outro lado, têm os eixos de entrada e de saída perpendiculares entre si assim como apresentado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Motorreductor com saída a 90° [23]

Alguns destes redutores podem ser obtidos com diferentes tipos de rodas dentadas organizadas de diversas formas, resultando em diversos tipos de redutores para diferentes situações.

Estes diferentes redutores podem ser acoplados a motores de corrente alternada, CA, ou motores de corrente contínua, CC, enquanto os CA são mais usados em ambientes industriais.

3.2 Falhas e Avarias em Motores Elétricos

Existe uma grande variedade de motores elétricos, mas podem ser divididos em dois grandes grupos com base no tipo de corrente que os alimenta podendo esta ser CA ou CC, onde os mais comuns em motorreductores são os motores CA [24].

Motores CA

Estes motores geram rotação através da interação entre o campo magnético girante criado pelas bobinas do estator e o rotor, que por sua vez tem o seu próprio campo magnético. Esta máquina pode ser classificada por sua vez em:

- Máquina assíncrona de indução, tem este nome pois o rotor é puxado pelo campo magnético girante, mas nunca chega à mesma velocidade, caso contrário não iria ser possível induzir corrente no rotor e o motor não iria produzir trabalho [25], [26]. Este equipamento por sua vez pode apresentar vários tipos de construção para o rotor, sendo que a mais usada é a de gaiola de esquilo. Onde o rotor apresenta uma estrutura que consiste em barras condutoras curto-circuitadas por anéis condutores, assim em vez de se usar bobinas para induzir o campo magnético utiliza-se as barras conforme representado na Figura 3.4 [24], [26].



Figura 3.4 - Rotor de gaiola de esquilo [27]

Alternativamente existem ainda rotor de anel deslizante, onde as bobinas estão em contacto com anéis deslizantes que são ligados a resistores que permitem controlar a corrente do rotor, e motores de ímãs permanentes [24], [26].

- Motores síncronos, contrariamente ao motor assíncrono, têm uma velocidade constante que depende apenas da frequência da fonte de alimentação, usando um estator igual ou parecido ao da máquina assíncrona e um rotor que cria o seu próprio campo magnético através de uma fonte de tensão CC separada [24], [25]. De forma a variar a velocidade destes equipamentos recorre-se à utilização de inversores de frequência variável.

Motores CC

Os motores CC foram os primeiros motores a serem inventados, e são equipamentos alimentados apenas por dois cabos e facilmente controlado pela variação da tensão da sua

fonte de alimentação [24], [25]. Este por sua vez pode ser separado em três tipos principais, com escovas, sem escovas e sem núcleo de ferro. Os três tipos de motores apresentam um estator e um rotor. A diferença principal surge entre o motor com escovas e o sem escovas ou com o sem núcleo de ferro, onde o primeiro tem um rotor eletromagnético e os restante têm um rotor composto por ímãs permanentes [24], [25], [28]. No caso do motor sem núcleo de ferro, cuja composição é semelhante à do motor sem escovas, mas com a diferença de que não possui ferro, sendo o estator feito a partir das próprias bobinas, suportadas em si mesmas numa estrutura de resina, este equipamento surgiu de forma a reduzir perdas de potência causadas pelo ferro [24].

Adicionalmente aos componentes referidos anteriormente os motores CA e CC são compostos também por:

- As chumaceiras de rolamento, que são componentes que permitem a rotação livre dos componentes do motor;
- O sistema de refrigeração por sua vez, permite manter o funcionamento ideal do motor. Este processo pode ser efetuado por via de ventoinhas, dissipadores de calor ou refrigeração líquida;
- O sistema de controlo não está presente em todos os sistemas deste tipo, mas quando utilizado serve para desligar e ligar o motor, como também para controlar a velocidade e direção de rotação;
- A carcaça é o invólucro exterior que protege todo o sistema de grande parte das trocas térmicas indesejadas, humidade e detritos;
- Tampas laterais são componentes que fecham o motor, que impede a entrada de contaminantes no motor [26].
- Eixo do rotor é um componente de aço que liga as tampas laterais e suporta o rotor [26].

Conhecendo a anatomia dos motores elétricos pode-se discutir as falhas que podem surgir nos mesmo, sendo que estas podem ser de duas fontes, internas ou externas. Falha pode ser definida como uma alteração em qualquer componente do equipamento que impeça o normal funcionamento do mesmo e podem ser originadas por defeitos ou fraquezas nos materiais, no projeto, na manufatura, por utilização inadequada ou por degradação do equipamento [29], [30].

A classificação da causa das falhas dentro do motor pode ser separada em elétricas e mecânicas, conforme apresentado na **Error! Reference source not found.** [29]–[38].

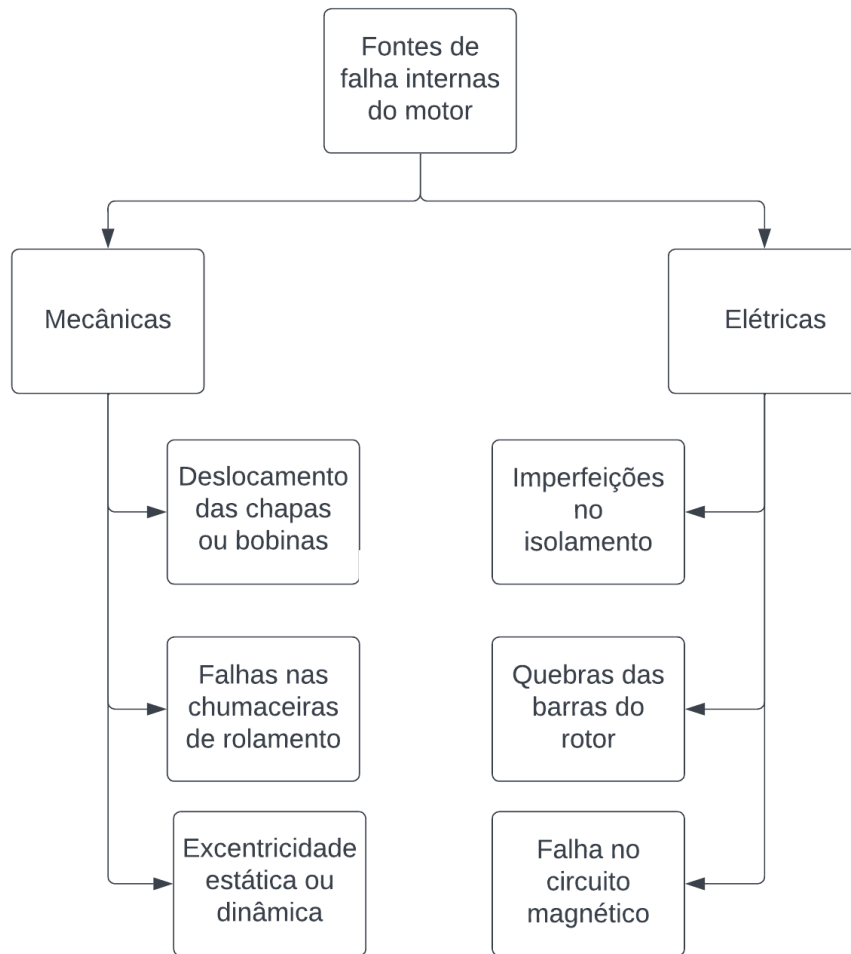


Figura 3.5 – Fontes de falha internas do motor

A classificação da causa das falhas externas dos motores pode ser separada em três categorias mecânicas, elétricas e do ambiente de trabalho, assim como representado na Figura 3.5 [36].

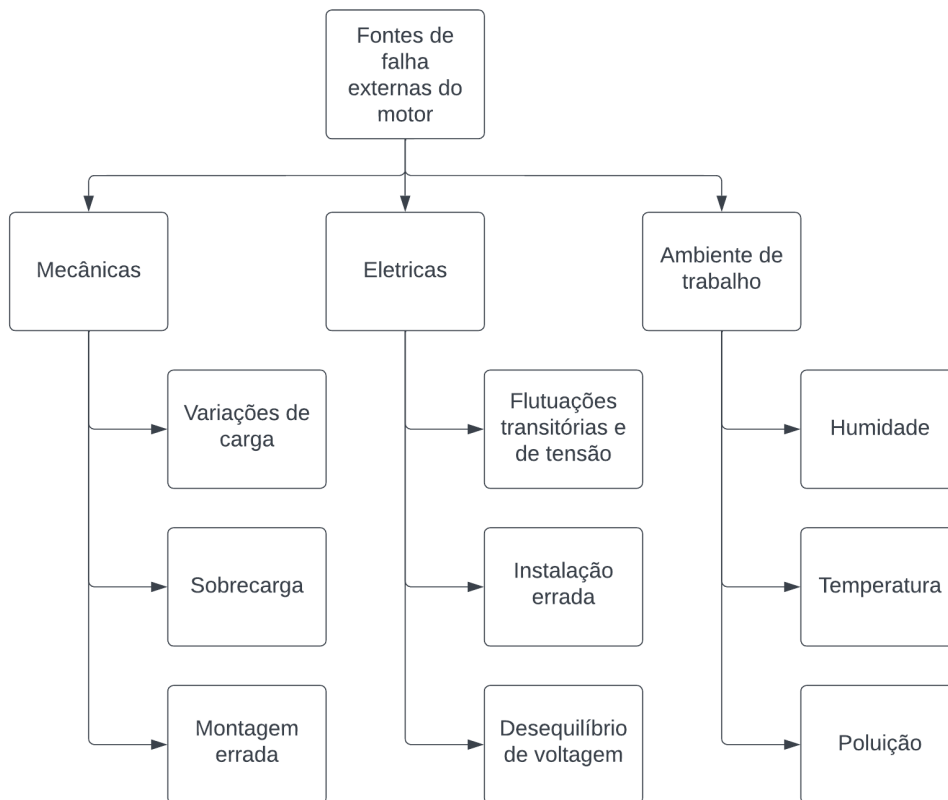


Figura 3.5 - Fontes de falha externas a motores elétricos (Adaptado de [36])

Vários estudos foram efetuados sobre as razões de falhas de motores, autores indicam que em motores elétricos as avarias são cerca de 45 a 69% derivadas de avarias nas chumaceiras de rolamento, 21 a 35% derivadas de avarias no estator, 7 a 10% derivadas do rotor, como quebras nas barras da gaiola de esquilo e 3 a 10% de outras causas [31], [33], [37], [38].

A maioria das falhas no estator são provocadas por solicitações térmicas, elétrico ou condições do meio de trabalho menos favoráveis. As falhas mais frequentes, entre outras são associadas a vibrações, problemas de refrigeração, perdas de rigidez do núcleo, perdas de isolamento nas bobinas, humidade, contaminações de óleo ou outros elementos, defeitos de manufatura e quebra nas barras na gaiola de esquilo, embora o defeito mais comum nos estatores está associado às extremidades das bobinas ou os anéis do rotor [36], [39].

As falhas devido a solicitações térmicas podem estar associadas a envelhecimento térmico ou sobreaquecimento. Como regra geral pode-se assumir que por cada aumento de 10° C o isolamento térmico perde metade da sua vida útil, com a exceção dos casos em que a temperatura de operação é relativamente alta. Com o desgaste do isolamento o estator perde a capacidade de resistir solicitações elétricas, mecânicas e ambientais. Sobreaquecimento pode

ocorrer devido a variações de voltagem, sobrecarga do equipamento, ventilação obstruída ou temperatura ambiente demasiado elevada.

As solicitações elétricas podem desencadear falhas nas bobinas, muitas vezes provenientes do desgaste do isolamento das mesmas. Esse desgaste pode, por sua vez, ser originado pelo chamado "*tracking* elétrico," um fenómeno indesejado que ocorre quando correntes elétricas percorrem caminhos inesperados. Isso resulta em descargas localizadas causadas pela ionização transitória no sistema de isolamento, onde a solicitação da tensão ultrapassa um valor crítico. Esse excesso de tensão está associado ao sobreaquecimento, erosão ou deterioração do isolamento, culminando em potenciais problemas nas bobinas.

Solicitações mecânicas podem originar devido a contactos entre o rotor e o estator, vibrações, falhas nas chumaceiras de rolamento, desalinhamentos, contaminações no lubrificante, entre outras causas associadas a falhas em outros componentes.

Solicitações ambientais estão associadas à presença de contaminantes no equipamento como humidade, químicos, poeiras, entre outros, que podem causar concentrações de tensões, sobreaquecimentos e outras falhas.

Em conclusão, observamos que cerca de 70% das falhas em equipamentos têm origem mecânica. Isso realça a importância crítica da instalação e manutenção adequadas destes componentes. As falhas elétricas, por outro lado, geralmente estão ligadas a uma manutenção inadequada dos equipamentos. Isso pode levar ao aumento da temperatura de operação, ao envelhecimento dos componentes e, em casos mais extremos, a curto-circuitos. Portanto, é fundamental garantir uma manutenção adequada para evitar falhas elétricas potencialmente prejudiciais [36].

3.3 Falhas e Avarias em Rodas Dentadas

Falhas em rodas dentadas, podem ser causadas por diversas razões, mas os modos de falha podem variar dependendo do material ou do tipo de roda dentada [40].

Fadiga da superfície é uma falha do material quando é sujeito a cargas superficiais ou subsuperficiais além do limite de resistência do material [40], [41].

Pitting é uma forma de fadiga que pode ocorrer no início de vida dos componentes. E pode-se apresentar em três estágios, inicial, corrigível através de polimento, que pode ser causado por concentrações de tensões nas superfícies dos dentes dos elementos, como deformações ou inclusões subsuperficiais e *pitting* destrutivo, que ocorre normalmente abaixo da linha primitiva e aumenta progressivamente até destruir a superfície do dente da roda dentada, este tipo de *pitting* resulta normalmente de sobrecargas. *Pitting* normal, cobre toda a superfície do dente com diversas fissuras pequenas, que ocorre devido a excesso de carga na superfície dos

dentes. *Pitting* pode também ocorrer devido a lubrificação inadequada ou desalinhamento dos veios do redutor, que contribui para o surgimento de concentrações de tensões [40]–[43].

Desagregação ou *spalling*, esta é uma falha que pode ocorrer, em metais macios, devido à acumulação de *pitting* e em metais endurecidos, devido à perda de material ou fraturas numa área do dente.

No entanto estudos em engrenagens de parafuso sem-fim apresentam que mesmo com *pitting* ou até mesmo desagregação o funcionamento deste tipo de engrenamentos não é muito afetado [40]–[43]. Estes fenómenos podem ser observados na Figura 3.6.

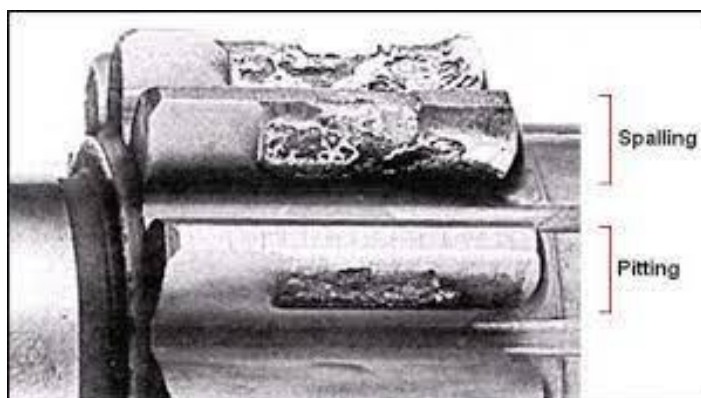


Figura 3.6 - Representação de *pitting* e *spalling* [44]

Desgaste, é uma forma de descrever perda de material através do contacto entre superfícies. Esta perda de material pode ser progressiva, por desgaste abrasivo ou adesivo e pode apenas afetar parte do dente criando um desgaste não uniforme, como representado na Figura 3.7, ou mesmo a superfície completa do dente. Causas para este fenómeno podem derivar da lubrificação, da carga aplicada e contaminantes presentes no lubrificante. Desgaste abrasivo ocorre quando partículas escorregam entre as superfícies dos dentes sob pressão. Desgaste por adesão ocorre quando ocorre escorregamento entre as superfícies dos dentes resulta das forças atrativas elevadas dos átomos que compõem as superfícies de contacto. Este desgaste pode ser causado por má lubrificação, utilização errada do equipamento ou desalinhamento [40]–[43].



Figura 3.7 - Representação de desgaste não uniforme [45]

Deformação plástica, causado pelas tensões elevadas de contacto, normalmente associado a rodas dentadas de metais macios. Resulta de interações que causam que as tensões ultrapassem as tensões de cedência. Por vezes pode-se observar pelo arredondamento na cabeça dos dentes e depressões nos pontos de contacto dos dentes [40]–[43].

Fratura, pode ser causada por cargas de flexão e por fadiga nos dentes da roda dentada. Tais situações podem ocorrer à utilização dos equipamentos em condições adversas, como desalinhamento, impactos ou desgaste inadequado. Que facilmente pode ser prevenido com a aplicação de manutenção adequada [42].

Uma forma de classificar falhas pode ser relacionada com a qualidade da lubrificação, uma vez que certas falhas podem ser evitadas ou atenuadas com correta lubrificação, com o seguimento dos processos corretos de substituição de lubrificante ou com a correta limpeza do mesmo [40]–[43].

3.4 Falhas e Avarias em Chumaceiras de Rolamento

Chumaceiras de rolamento são compostas por diversos elementos, conforme representado na Figura 3.8, sendo estes o anel exterior que não só terá a função de proteger os elementos rolantes como também será uma das pistas onde estes vão rolar, a outra será o anel interior, que irá assentar sobre o veio, em cada anel existe uma ranhura que funciona como estrada para os elementos rolantes. Os elementos rolantes, são encarregues de diminuir o atrito do movimento do veio e permite que os anéis se movam de forma suave e independente. Pode-se separar os diferentes tipos de chumaceiras de rolamento pelo tipo de elemento rolante. Por fim cada elemento rolante é posicionado pela gaiola [46], [47]. Adicionalmente as chumaceiras de rolamento podem ter retentores se estiverem em contacto com outros líquidos ou se houver a necessidade de impedir a passagem de algum fluido pelas chumaceiras de rolamento.

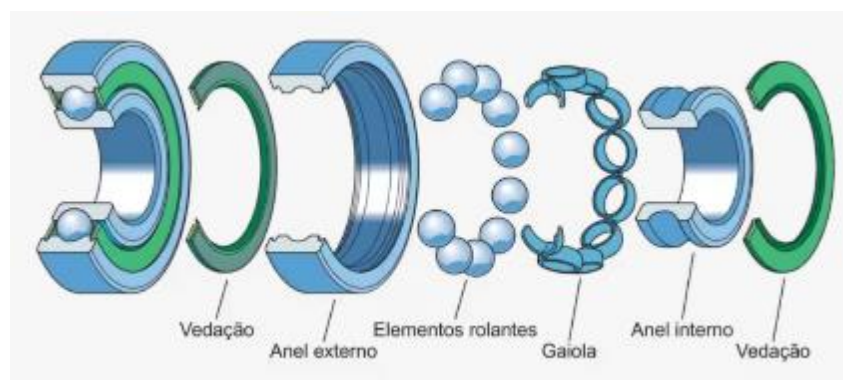


Figura 3.8 - Componentes de uma chumaceira de rolamento [48]

A escolha de um rolamento pode depender do tipo de cargas, direção e magnitude, que serão aplicadas, pois podem causar deformação nos elementos rolantes, da velocidade de rotação de funcionamento, da temperatura de funcionamento, das vibrações a que será sujeito, dos possíveis impactos, do espaço disponível, da capacidade de tolerar desalinhamentos de cada anel, do atrito permitido, do ruído permitido e do meio ambiente, temperatura, possibilidade de corrosão, possíveis níveis de contaminação e quantidade de lubrificação [47], [49].

O tipo de elemento rolante é um dos primeiros fatores que se deve ter em atenção, uma vez que existem esferas e rolos, que têm aplicações diferentes, sendo que os elementos esféricos apresentam uma superfície de contacto que se assemelha a um ponto e que se torna elíptico quando está sobre carga, são mais indicados para aplicações com binários baixos, velocidades elevadas e situações em que o ruído é um fator relevante. Por outro lado, os rolos apresentam uma superfície de contacto que se assemelha a uma linha e sobre carga se transforma num retângulo, tornando estes indicados para situações de elevada carga, variando o tipo de rolo para diferentes aplicações [47].

Como referido anteriormente, grande parte das falhas nos motores elétricos são derivadas de falhas nas chumaceiras de rolamento [36]. Corrosão, presença de contaminantes na massa lubrificante ou má lubrificação, sobreaquecimento, vibrações e desalinhamentos são alguns dos fatores que contribuem para o surgimento de falhas em chumaceiras de rolamento [42], [50].

Existem diversas formas de desgaste tais como desgaste abrasivo e desgaste por corrosão. Mesmo antes da chumaceira de rolamento ser montada pode já estar corroída, devido a armazenamento indevido. A corrosão, assim como, a fadiga axial nos veios pode causar *pitting* nas pistas das chumaceiras de rolamento o que por sua vez resulta na falha deste componente [42], [51]. Deformação plástica geral pode ocorrer devido ao deslizamento entre superfícies o que pode incorrer em fraturas e *pitting*. Este tipo de falha encontra-se representado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Exemplo de *pitting* na pista externa de uma chumaceira de rolamento [52]

Contaminantes sólidos no lubrificante podem causar deformações plásticas que por sua vez se tornam em pontos de concentração de tensões ou desgastar as pistas e ou anéis causando o aumento da folga da chumaceira de rolamento e por sua vez desalinhamentos. A presença de água por sua vez causa o aceleração da fadiga, reduzindo a vida útil dos elementos 30 a 80% [42].

Falta de lubrificação e folgas apertadas podem causar sobreaquecimento do elemento e conseqüentemente o mau funcionamento do mesmo [42].

Vibrações e desalinhamentos podem causar que os anéis sejam sujeitos a mais carga do que pretendido, que por sua vez aplica sobrecargas na gaiola dos elementos rolantes, que por sua vez pode causar a falha deste componente [42].

3.5 Falhas e Avarias em Retentores

Retentores são elementos que têm como objetivo selar um espaço quer seja o interior de um redutor ou de uma chumaceira de rolamento. Pode ser utilizado em combinação com massa lubrificante que também desempenha esta função. Impede a passagem de óleos ou contaminantes, mantendo a lubrificação no espaço que está a selar inalterada. São elementos com uma vida finita que pode ser diminuída por serem mal armazenados ou manuseados [42], [53].

A causa de fugas ou falhas em retentores podem ser cortes, originados por mau manuseamento ou montagem. Manutenção adequada é a melhor forma de manter as retentores, pois sujidade ou manutenção descuidada podem causar acumulação de detritos no retentor impedindo que esta efetue a sua função adequadamente. A manutenção também evita que deterioração devido a exposição ao meio ambiente e que a manutenção não seja esquecida antes dos vedantes começarem a apresentar fratura radiais e circunferenciais [42].

3.6 Falhas e Avarias em Veios

Veios mecânicos são componentes utilizados para transmitir binário, rotação ou movimento entre diferentes partes de um sistema mecânico.

As falhas em veios podem ser causadas por diversas razões, tal como apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Causas de falha em veios [54]

Causa da falha no veio	Porcentagem
Corrosão	29%
Fadiga	25%
Fratura frágil	16%
Sobrecarga	11%
Corrosão devido a sobreaquecimento	7%
Fragilização por hidrogénio	6%
Deformação	3%
Desgaste, abrasão e erosão	3%

Mas no caso de veios acoplados a motores cerca, de 90% das falhas são causadas por fadiga. Onde houver descontinuidades na secção do veio, como secções para chumaceiras de rolamento ou rasgos para chavetas [55]–[57].

A fadiga nos veios pode ser fadiga por flexão, por torsão ou axial. A falha ocorre quando a fadiga leva à fratura inicial e esta propaga-se até ao ponto que a secção do veio não é suficiente para suportar os esforços e quebra. Outras razões de falha comuns, em certos ambientes, é corrosão que fragiliza o veio ao criar *pitting* que causa concentrações de tensões e consequentemente fratura, outra forma de surgirem concentrações de tensões é por cargas residuais, devido a operações de manutenção ou na manufatura [55], [56].

3.7 Falhas e Avarias em Acoplamentos Mecânicos

Acoplamentos mecânicos podem ser classificados entre rígidos, elásticos e flexíveis. Acoplamentos são usadas para transmitir potência entre veios, compensar desalinhamentos de eixos, vibrações excessivas, choques, pancadas, evitar transferência de calor para o lado acionado, entre outros [58].

Em acoplamentos o desalinhamento provoca que as tensões nos mesmos ultrapassem os valores para os quais foram projetados, mesmo em acoplamentos flexíveis que embora sejam projetados para desalinhamentos, esta flexibilidade tem limites. Estas sobrecargas provocam

desgaste acelerado ou até mesmo falha do componente [59]. Outras causas de falha podem ser má seleção deste elemento ou montagem incorreta. Em alguns casos a lubrificação adequada destes componentes é relevante para situações de elevadas cargas ou situações com condições de trabalho adversas que promovam desgaste prematuro como corrosão. Alguns sinais que permitem perceber se o acoplamento está em risco é através da medição de vibrações e vedantes com danos, que permitam a passagem de lubrificante ou contaminantes [60]. Na Tabela 3.2 encontram-se algumas das falhas típicas e as respetivas causas em acoplamentos

Tabela 3.2 - Falhas típicas e causas em acoplamentos (Adaptado de [60])





Falha	Causa
<p>Rutura do elemento elástico</p> 	Binário excessivo devido a acoplamento inadequado ou escolha de acoplamento inadequado
<p>Fraturas no elemento elástico</p> 	O elemento enrijeceu devido a contaminações químicas.
<p>Cubo partido</p> 	Instalação inadequada
<p>Rasgo da chaveta danificado</p> 	Seleção incorreta do cubo

Tabela 3.2 - Falhas típicas e causas em acoplamentos (Adaptado de [60]) (Continuação)

<p>Cubo fraturado</p> 	<p>Escolha incorreta do acoplamento</p>
<p>Ligações alongadas</p> 	<p>Vibrações e carregamento excessivo.</p>
<p>Falha prematura devido a desgaste excessivo</p> 	<p>Falta de manutenção</p>

3.8 Degradação e Contaminação de Lubrificantes

A lubrificação adequada e cuidada é um fator relevante para impedir ou mitigar falhas em motorreductores. Falta de lubrificação pode causar sobreaquecimento e desgaste prematuro de componentes, mas excesso de lubrificação pode também causar sobreaquecimento e desgaste prematuro, deste modo é importante efetuar a lubrificação conforme indicado pelo fabricante e se necessário efetuar estudos para adaptar a lubrificação ao meio ambiente de trabalho do equipamento. Adicionalmente o armazenamento e manuseamento dos lubrificantes deve ser efetuado de forma a não ocorrer oxidação do lubrificante ou não serem introduzidos contaminantes como água ou outros contaminantes sólidos que possam danificar ou acelerar o desgaste de componentes.

O método de lubrificação de um redutor varia dependendo das condições a que o equipamento estará exposto bem como o funcionamento do equipamento, velocidade tangencial e a velocidade de rotação [61]–[64].

Lubrificação com massa está em desuso, mas pode ser utilizado para velocidades e cargas mais baixas. É importante realçar que usar demasiada massa pode causar aumento da resistência bem como outros problemas [61]–[64].

Lubrificação por chapinhagem, é utilizada apenas em sistemas com velocidades de rotação tangencial maiores ou iguais a 3m/s. Neste método as engrenagens ao rodarem, lubrificam outras engrenagens e chumaceiras de rolamento. O nível do óleo deve ser calculado de forma a garantir a correta lubrificação dos componentes internos, uma vez que neste método o excesso de lubrificante pode resultar em perda de eficiência devido ao aumento da resistência ou diminuição da capacidade de o lubrificante dispersar calor e por outro lado falta de óleo pode ocorrer logo após o arranque do equipamento, quando o nível do óleo desce devido a parte do mesmo ser movido, as engrenagens e restantes componentes não são devidamente lubrificadas.

Semelhante ao método de lubrificação anterior existe ainda lubrificação por banho de óleo que lubrifica as rodas dentadas e as chumaceiras de rolamento elevando o nível de óleo. É de realçar que redutores completamente preenchidos de lubrificante também são usados, normalmente em aplicações subaquáticas, onde é necessário compensar a pressão externa de forma a prevenir colapso estrutural, ou em aplicações com veio de saída vertical, em que é necessário garantir a lubrificação das chumaceiras de rolamento superiores [61]–[66].

Lubrificação forçada, é preferencialmente usado para máquinas de alta velocidade e pode ser efetuada por spray de óleo, gota de óleo ou por névoa de óleo. O primeiro método implica uma bomba de óleo e é usada para pulverizar óleo nos pontos de contacto, o segundo método o óleo é elevado e gotejado sobre os pontos de contacto, por fim a lubrificação por névoa de óleo mistura o óleo com ar comprimido e é pulverizado sobre as regiões de contacto das engrenagens [61]–[64].

3.8.1 Óleo Mineral vs Sintético

Os óleos sintéticos surgem devido a certas aplicações que os óleos minerais não podem ser aplicados. Mas mesmo em situações em que ambos podem ser aplicados, os óleos sintéticos podem por vezes ser a melhor escolha.

Começando pela distribuição de carga quer nos dentes de uma engrenagem ou em outra situação qualquer, a partir da Figura 3.10 consegue-se perceber que o óleo sintético consegue proporcionar uma distribuição de carga melhor devido a apresentar uma estrutura molecular mais consistente.

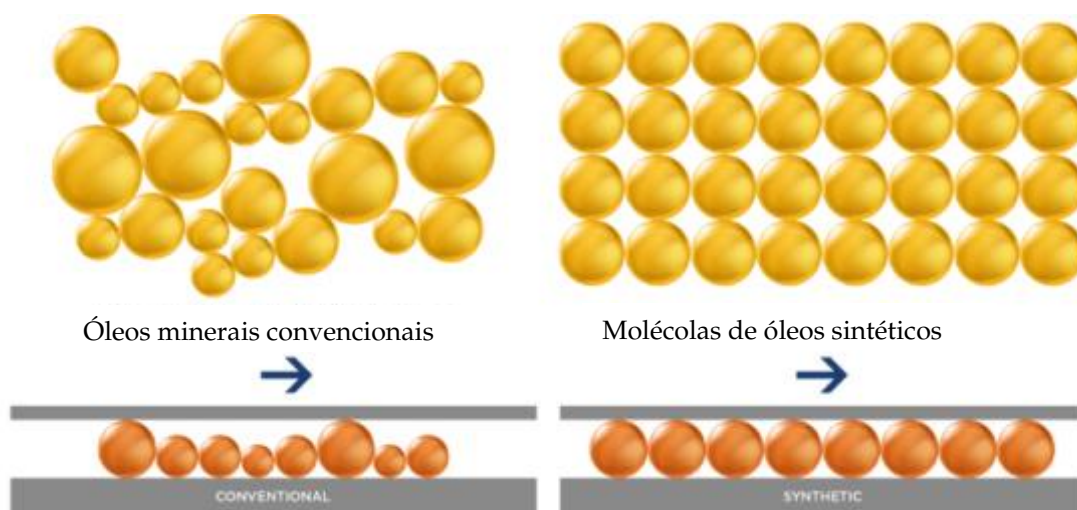


Figura 3.10 - Estrutura molecular do óleo mineral vs sintético (Adaptado de [67])

Os sintéticos apresentam também pontos de fluxão e inflamação mais extremos que os óleos minerais, fornecendo-lhes um maior espectro de aplicações. Associado ao ponto anterior, uma vez que os óleos sintéticos suportam temperaturas superiores, estes apresentam uma maior resistência à degradação e permitem assim ser utilizados em aplicações sujeitas a temperaturas mais elevadas e garantem um maior tempo de vida útil [67]. No caso dos motorreductores, utilizem lubrificantes minerais até temperaturas de banho de óleo de 80 a 85 °C. A partir desta temperatura é obrigatório o uso de lubrificantes sintéticos.

3.8.2 Lubrificação de Redutores para Impedir Falhas e Avarias

Na escolha de um lubrificante para um redutor existem diversos fatores que influenciam a escolha dos lubrificantes e a forma de lubrificar. A Tabela 3.3 apresenta os fatores que influenciam a escolha de lubrificantes [68].

Tabela 3.3 - Fatores que afetam a escolha de lubrificantes em redutores (Adaptado de [68])

Fator	Requisitos
Tipo de engrenagens: <ol style="list-style-type: none"> 1. Cilíndricas e cónicas de dentes retos; 2. Cilíndricas de dentes helicoidais e cónicas de dentes espiroides; 3. Hipóides; 4. Parafuso sem-fim. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baixo deslizamento e baixas velocidades; 2. Deslizamento intermédio, carregamento intermédios a elevados; 3. Elevado deslizamento, carregamento elevadas;

	4. Deslizamento excessivo, carregamento intermédios a elevados.
--	---

Tabela 3.3 - Fatores que afetam a escolha de lubrificantes em redutores (Adaptado de [68]) (Continuação)

Carregamento	Redutores para elevadas cargas utilizam lubrificantes para pressões extremas.
Acabamento superficial	Engrenagens com acabamentos superficiais grosseiros exigem óleos com maior viscosidade, contrariamente a engrenagens com acabamentos superficiais com melhor acabamento superficial que precisão de lubrificantes com menos viscosidade.
Potência transmitida	Quanto maior a carga a ser movida, maior deve ser a viscosidade do lubrificante.
Velocidade das engrenagens	Para velocidades elevadas é necessário que a viscosidade dos lubrificantes seja mais baixa.
Compatibilidade dos materiais	Certos aditivos de lubrificantes podem reagir com certos metais dentro do redutor.
Temperatura	Deve ter se em atenção na seleção do lubrificante, as temperaturas de trabalho e ambiente em que o equipamento irá ser utilizado.

Existem quatro tipos de lubrificantes que podem ser usados para a lubrificação de redutores industriais, que são óleos de engrenagens com inibição de ferrugem e oxidação, óleos de engrenagens para pressões extremas, óleos de engrenagens compostos e óleos sintéticos.

Óleos de engrenagens com inibição de ferrugem e oxidação, apresentam um bom desempenho para diversas dimensões de engrenagens, para temperaturas entre -15°C a 121°C , velocidades no ponto primitivo de 17.5 m/s e sujeitos a cargas baixas a intermédias. São normalmente utilizados em engrenagens cilíndricas de dentes retos e cónicas de dentes direitos ou espiroides [68].

Óleos de engrenagens para pressões extremas, normalmente utilizados em engrenagens cilíndricas e cónicas de dentes retos, ou cónicas de dentes espiroides, helicoidais, espinha de peixe ou hipóides que estão sujeitas a carregamentos elevados e elevadas potências transmitidas. Estes óleos podem operar a temperaturas entre os -15°C e 121°C , devem ser utilizados em ambientes de lubrificação por chapinhagem ou com circulação uma vez que não adere às engrenagens. Este tipo de lubrificante dispersa bem o calor, mas reage com certos tipos de metais como latão e bronze devido a certos aditivos que contem. Este óleos podem também conter

lubrificantes sólidos, suspensos para melhorar as suas capacidades para suportar cargas elevadas [68].

Óleos de engrenagens compostos, são muito usados para redutores de parafuso sem-fim, pois permitem deslizamentos elevados, reduzindo a atrito entre os dentes e potenciam uma boa dispersão de calor. Estes lubrificantes podem operar em temperaturas até 180°C e idealmente em ambiente com lubrificação por chapinhagem ou com circulação do lubrificante [68], [69].

Sintéticos, estes lubrificantes são usados em redutores de engrenagens cilíndricas e cónicas de dentes retos, helicoidais, espinha de peixe, hipóides e parafuso sem-fim. Normalmente em situações em que as propriedades dos óleos minerais já não capazes de suportar. A estes lubrificantes podem ser adicionados aditivos que permitem comportamentos como óleos de engrenagens com inibição de ferrugem e oxidação ou anti desgaste ou para pressões extremas [68].

Assim, através da análise daquilo que foi apresentado anteriormente e da informação apresentada na Tabela 3.3 pode-se fazer uma seleção de lubrificantes para diferentes tipos de engrenamentos com apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Lubrificantes usados para diferentes tipos de engrenagens (Adaptado de [68])

Lubrificante	Cilíndricas de dentes diretos	Helicoidal	Parafuso sem-fim	Cónicas	Hipóides
Com inibição de ferrugem e oxidação	Cargas normais	Cargas normais	Cargas e velocidades baixas	Cargas normais	Não é recomendado
Para pressões extremas	Cargas elevadas ou choques	Cargas elevadas ou choques	Satisfatório maioria das situações	Cargas elevadas ou choques	Utilizado na maioria das aplicações
Compostos	Não é recomendado	Não é recomendado	Ideal para a maioria da aplicações e solução preferida pelo produtores	Não é recomendado	Para situações de cargas pequenas
Sintéticos	Cargas elevadas ou choques	Cargas elevadas e preferido pelos produtores principalmente em situações com temperaturas superiores a 82°C	Preferível para situações com choques	Cargas elevadas ou com aditivos de pressão extrema	Pode ser utilizado em qualquer situação

3.9 Desalinhamentos entre Componentes

O desalinhamento de veios em ligações diretas pode ser desalinhamento angular, que ocorre quando dois veios não estão paralelos, desalinhamento paralelo, quando dois veios embora paralelos não estão coincidentes, ou desalinhamento combinado, como representado na Figura 3.11 [36], [57].

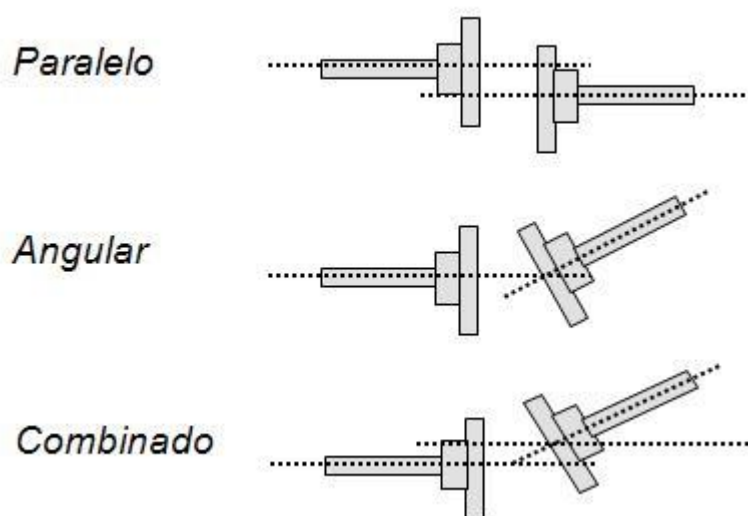


Figura 3.11 - Tipos de desalinhamentos [70]

Mau alinhamento pode levar ao aumento das vibrações mecânicas, assim como ao aumento de cargas axiais e/ou radiais transmitidas aos veios. Desalinhamento pode ser detetado através de inspeção visual e do uso de equipamentos como alinhadores a laser. É de realçar que mesmo após um motorreductor ser alinhado, as vibrações e o funcionamento normal do equipamento podem sempre levar a que surjam desalinhamentos, por exemplo, se houver alguma falha numa chumaceira de rolamento ou no acoplamento, de tal forma que é importante fazer verificações periódicas [57].

Os desalinhamentos em si também podem contribuir para o aumento dos danos em outros componentes, nomeadamente chumaceiras de rolamento, tal como apresentado num estudo de 1970, [71], onde se analisa o efeito de diferentes níveis de desalinhamento e o seu efeito na redução da vida útil de chumaceiras de rolamento, neste estudo foi concluído que desalinhamentos de 10, 20 e 70% reduzem a vida destes componentes em 10, 20 e 50%, respetivamente [71].

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E RENDIMENTO DE MOTORREDUTORES

O presente capítulo expõe a atualidade das leis de eficiência energética na Europa, apresenta as perdas em motorredutores e nos respectivos componentes e apresenta um método existente de avaliar o ganho energético com a manutenção.

4.1 Normalização de Eficiência Energética

A 12 de Dezembro de 2015 na COP21 em Paris foi assinado o Acordo de Paris, onde se estabeleceu que se deverá reduzir substancialmente as emissões globais de gases de efeito estufa para limitar o aumento da temperatura global neste século a 2 °C, ao mesmo tempo em se tenta limitar o aumento ainda mais a 1,5 °C [72], [73]. À data, este acordo envolve 194 países. De acordo com a IEA (Agência Internacional de Energia), motores elétricos, compõe 45% do consumo energético em todo o mundo, nesse sentido melhorar a eficiência de motores elétricos e de mecanismos a eles associados, por mais pequena que esta diferença seja, irá resultar num aproveitamento substancial de energia que era perdida, se se melhora se a eficiência de todos os motor em 1% resultaria numa redução de consumo energético equivalente a 3.5 milhões de barris de petróleo, que por sua vez são aproximadamente 556 milhões de litros de petróleo, apenas nos EUA, o que pode ser multiplicado por 4 para o mundo inteiro [2], [73]–[76].

Uma vez que motores elétricos representam 2/3 do consumo energético da indústria, com o intuito de classificar os diferentes motores elétricos de forma a se poder ter um standard internacional relativamente à sua eficiência energética, a Comissão Internacional Eletrotécnica (IEC) desenvolveu classes para motores trifásicos [2].

Em 2009 foram definidos os regulamentos relativamente ao "Ecodesign" de motores elétricos e o uso de unidades de velocidade variável (VSD), com o regulamento 640/2009, que define os níveis mínimos de eficiência destes equipamentos no mercado europeu, este regulamento foi atualizada a 21 de julho de 2021 pelo regulamento 2019/1781 [2][77].

Este regulamento define que a forma de calcular a eficiência de um motor elétrico é calculado pela proporção de potência mecânica à saída e a potência mecânica à entrada. Com este regulamento os motores elétricos de 2,4,6 ou 8 polos devem pertencer a uma das classes IE2,

IE3 ou IE4, dependendo da sua potência nominal e outras características. Este regulamento implica também que unidades de velocidade variável devem todas alcançar nível IE2. A versão mais atualizada desta regulamentação é atualmente 2021/341, que procura esclarecer pontos definidos em 2019/1781 [2], [78], [79]. Nesta nova versão do regulamento aumentou-se o alcance da mesma de 0.75-375 kW para 0.12-1000kW e iniciou a aplicação de requisitos de rendimento em unidades de velocidade variável (VSD) [80].

Esta atualização introduz uma nova classe IE5, Eficiência Ultra-Premium que reduz as perdas 20% relativamente a IE4, também impõe que motores entre 75kW e 200kW devem pertencer IE4, tornado a União Europeia os primeiros a tornar a classe IE4 obrigatória [77].

4.2 Perdas de Potência Mecânica em Motorreductores

Pensando em motoredutores estes sistemas são compostos por motores elétricos e uma caixa redutora que apresentam uma grande variedade de componentes que consequentemente podem incorrer em perdas de energia. Adicionalmente existe uma grande variedade de cada componente, uma infinidade de configurações e de aplicações tornando a tarefa de analisar as perdas de potência complexa.

A ineficiência destes equipamentos pode ocorrer devido a dois fatores. O primeiro é a utilização inadequada do equipamento, ou seja, o equipamento é acoplado a um sistema com uma exigência de binário que sai daquela que é adequada para o equipamento em questão, quer esforços demasiado baixos quer demasiado elevados. A segunda possibilidade é a utilização de equipamentos, chamados, pouco eficientes. A utilização de motores elétricos pouco eficientes surge principalmente do facto do custo inicial ser mais baixo, quando na realidade ao longo da vida dos equipamentos o principal custo, acima de 90%, está associado ao consumo energético dos equipamentos, logo um custo inicial superior leva a custos mais baixos a longo prazo [2], [76], [81].

Em equipamentos já existentes pode-se garantir que a eficiência não baixa evitando perdas de eficiência, que podem ser reduzidas ou anuladas através de manutenção adequada.

A eficiência ou rendimento energético de motorreductores pode ser expressa através da Equação 4.1:

$$\eta = \frac{P_u}{P_f} = \frac{P_s}{P_e} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

- η – Rendimento do equipamento
- P_u – Potência útil, W

- P_f – Potência fornecida, W
- P_s – Potência no veio de saída da máquina, W
- P_e – Potência no veio de entrada da máquina, W

O rendimento indica a percentagem de energia elétrica aproveitada para efetuar trabalho mecânico à saída. À energia perdida chama-se energia dissipada que pode ser obtida através da Equação 4.2:

$$P_d = P_f - P_u \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

- P_d – Potência dissipada, W

Estas perdas de rendimento podem surgir em diversos pontos no motorreductor como representado na Figura 4.1.

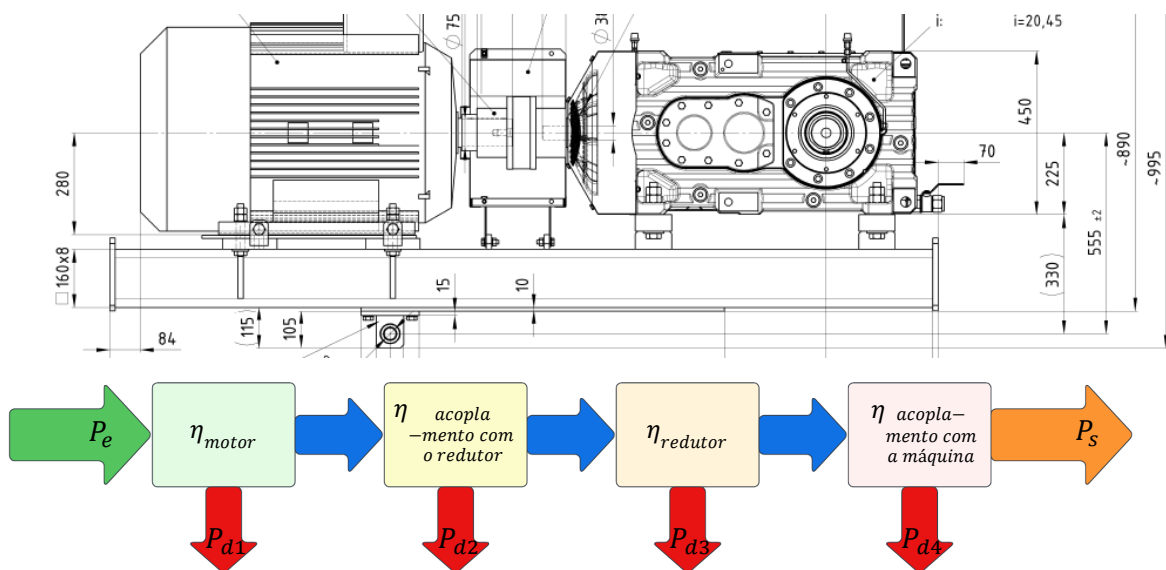


Figura 4.1 - Potência dissipada num motorreductor [4]

As perdas de potência em redutores por sua vez podem ser divididas entre perdas dependentes da carga e independentes da carga, como representado na Figura 4.2 [65], [82]–[84].

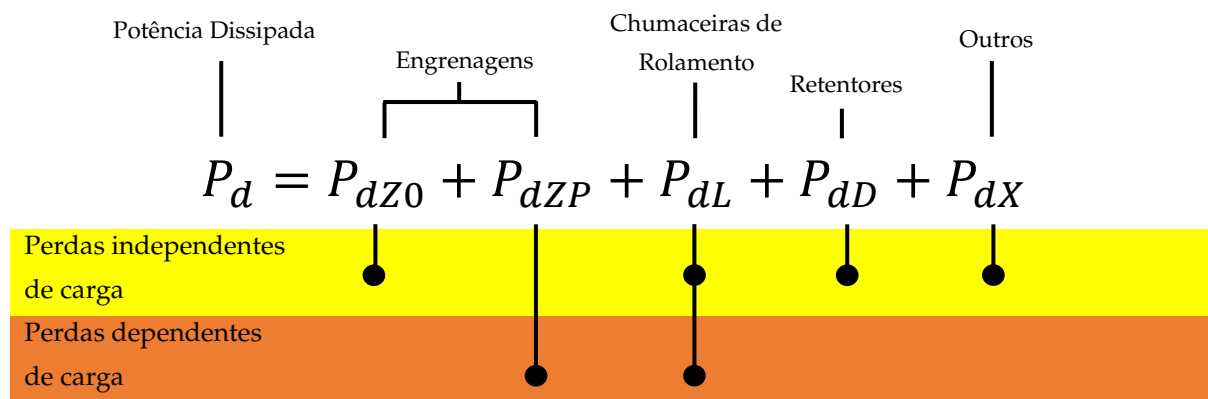


Figura 4.2 - Perdas de potência independentes e dependentes de carga

As perdas dependentes de carga são influenciadas pelas cargas que são aplicadas no equipamento durante o seu funcionamento as perdas independentes por outro lado estão associadas principalmente à velocidade de rotação do equipamento, às propriedades do lubrificante, ao tipo e configuração de equipamentos [84][66]. As perdas dependentes das cargas em engrenagens e chumaceiras de rolamento representam a maioria das perdas em situações em que o equipamento é utilizado nas condições adequadas enquanto as perdas independentes de carga apenas se tornam mais relevantes em casos de velocidades de rotação elevadas com lubrificação por chapinhagem [84].

4.2.1 Perdas de Potência em Motores

As falhas e avarias apresentadas anteriormente representam perdas de rendimento nos equipamentos, estas perdas podem ser perdas ferro no núcleo, perdas por atrito ou falta de ventilação, perdas por efeito de Joule ou perdas parasitas [85].

Perdas de ferro no núcleo podem aumentar se pressão excessiva for aplicada no núcleo do estator, se o isolamento das bobinas for danificado, danos por manutenção inadequada ou oxidação das lâminas devido a sobreaquecimento, entre outras falhas [85].

Perdas por efeito de Joule no estator podem ocorrer devido à área e comprimento dos condutores, problemas de dissipação de calor e rebobinagens feitas de forma incorreta. Perdas no rotor também podem ocorrer devido a alterações ou danos no estator ou danos nos anéis ou barras da gaiola de esquilo. Estas falhas no estator podem representar perdas de 22 a 46%.

Perdas por atrito ou falta de ventilação, podem ser agravadas por falhas nas chumaceiras de rolamento, lubrificação contaminada ou inadequada e falhas na ventilação. É de salientar

que se houver perdas por efeito de Joule, estas são agravadas por perdas por atrito ou por ventilação inadequada [85].

Perdas parasitas, são causadas por fatores que não estão diretamente relacionadas com a conversão de energia elétrica em energia mecânica. São principalmente causadas por interações magnéticas entre o estator e o rotor que criam correntes parasitas que criam campos magnéticos secundários que causam perdas adicionais. Também podem surgir devido a desalinhamentos ou danos no rotor ou no estator devido a manutenção inadequada. Estas falhas podem representar 10 a 20% das perdas totais dos motores [85].

As perdas de rendimento em motores elétricos podem ser resumidas na Tabela 4.1, onde se apresenta a sua percentagem face ao valor total de polos.

Tabela 4.1 - Perdas médias de motores, resultados do estudo de EASA/AEMT (Adaptado de [85])

Perdas	Média para 2 polos	Média para 4 polos	Fatores que afetam os diferentes tipos de perdas
Perdas de ferro no núcleo	19%	21%	Estado do isolamento e do estator.
Perdas por atrito e má ventilação	25%	10%	Eficiência da ventilação e da lubrificação, estado dos retentores e das chumaceiras de rolamento.
Perdas de Joule no estator	26%	34%	Área e comprimento do condutor e dissipação de calor.
Perdas de Joule no rotor	19%	21%	Barras e anéis da gaiola de esquilo.
Perdas parasitas	11%	14%	Estado do rotor e do estator bem como as tolerâncias dos componentes.

É de notar que o número de polos, apresentado na Tabela 4.1, afeta as perdas pois, a frequência do motor é proporcional ao número de polos que este tem, assim o aumento do número de polos aumenta a frequência do motor, que tem efeitos negativos como o aumento de perdas parasitas devido à rápida mudança do campo magnético e também induzirá perdas

por histerese, que resulta da agitação magnética das moléculas de materiais ferromagnéticos, o que causa geração de calor e consequentemente perdas.

4.2.2 Perdas de Potência em Chumaceiras de Rolamento

As chumaceiras de rolamento não são 100% eficientes sendo que a eficiência destes elementos varia dependendo do tipo de chumaceira de rolamento, variando entre 95 e 99% nos tipos mais comuns [86].

Em condições normais as perdas em chumaceiras de rolamento são resultado de perdas por atrito de rolamento, associadas a deformação e histerese elástica, perdas por atrito deslizante que ocorrem principalmente a velocidades baixas, devido a micro deslizamento e deslizamento, em casos em que não há desalinhamento este acontecimento não devia ocorrer, mas dependendo das propriedades elásticas dos corpos em contacto e o coeficiente de atrito pode ocorrer. Adicionalmente arrasto pode ocorrer devido a excesso de lubrificante ou devido ao contacto entre os retentores e os elementos rolantes [87], [88]. Na Figura 4.3 é apresentado um gráfico da SKF que relaciona a velocidade de rotação de um veio com as perdas numa chumaceira de rolamento para um determinado lubrificante.

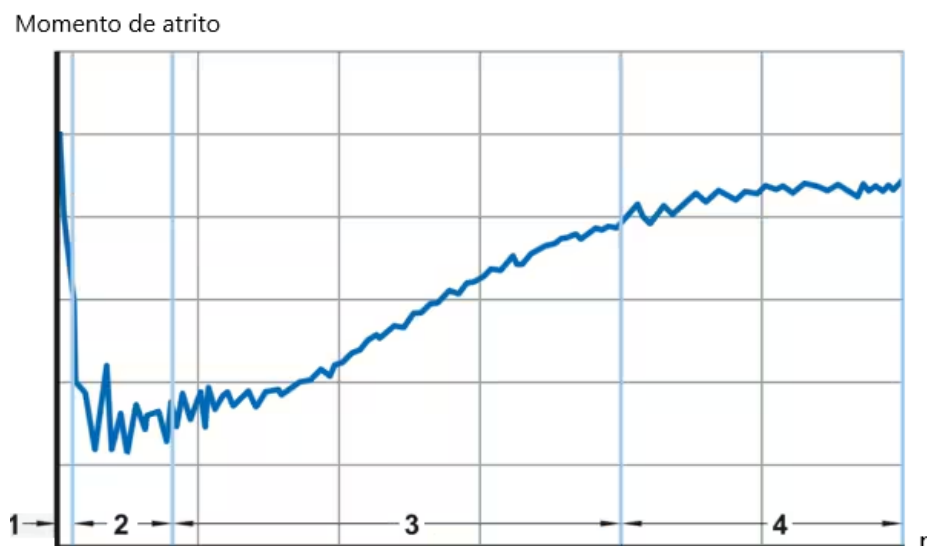


Figura 4.3 - Momento de atrito da chumaceira de rolamento (Adaptado de [89])

Um estudo de 2013 analisou os efeitos de falhas em chumaceiras de rolamento no desempenho de motorreductores em estações de bombeamento no Egito [90]. Os defeitos detetados, através de análise de vibrações e mais tarde a partir de uma inspeção visual, nestes elementos foram os elementos rolantes desgastados e desgaste nas pistas. Os problemas

detetados neste estudo foram associados a desgaste prematuro derivado de lubrificação inadequada ou lubrificação com presença de contaminantes. Os autores analisaram o consumo dos equipamentos antes e depois da substituição das chumaceiras de rolamento e detetaram uma grande redução nas vibrações do mesmo e um aumento de eficiência dos motorreductores entre 10 e 14% [90].

Outro estudo sobre a eficiência de motores de indução a operar sobre diferentes condições de falha, sendo as chumaceiras de rolamento responsáveis por cerca de 40% das avarias em motores de indução é importante perceber o efeito que estas têm sobre a eficiência destes equipamentos, o estudo aponta o efeito de defeitos e falhas em chumaceiras de rolamento na eficiência energética dos equipamento, os defeitos detetados neste estudo foram degradação na pista externa, detetada através do corte do anel externo conforme apresentado na Figura 4.4 (a), e a gaiola dos elementos rolantes danificada, detetada conforme representado na Figura 4.4 (b), concluindo que estas falhas reduzem a eficiência em 3% [91].



(a)

(b)

(a) - Exemplo dano na pista externa

(b) – Exemplo dano na gaiola da dos elementos rolantes

Figura 4.4 - Exemplos de danos nos elementos de uma chumaceira de rolamento [91]

4.2.3 Perdas de Potência em Rodas Dentadas

As perdas de potência ou binário em rodas dentadas podem ser divididas em perdas dependentes da carga e independentes da carga.

As perdas independentes da carga estão associadas aos diferentes tipos de configurações das rodas dentadas e dos reductores, perdas de potência em engrenamentos estão associados principalmente a problemas de lubrificação, nomeadamente a quantidade de lubrificante presente e a viscosidade do mesmo [92].

As perdas dependentes da carga surgem no contacto entre os dentes das rodas dentadas sendo esta a principal fonte de perda de potência, principalmente em casos em que as

velocidades de rotação não são muito elevadas. Em 1949 Buckingham [93] introduziu uma aproximação que permitia calcular a eficiência das engrenagens, que mais tarde veio a ser desenvolvida por Ohlendorf [94] apresentada na Equação 4.3 [66], [95].

$$P_{dZP} = P_f H_V \mu \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

- H_V = Fator de perda da engrenagem
- μ = coeficiente de atrito

Perdas por atrito não estão diretamente associadas aos tipos de engrenamentos. A Tabela 4.2 apresenta a gama de eficiências para um estágio de diferentes tipos de engrenagens [96].

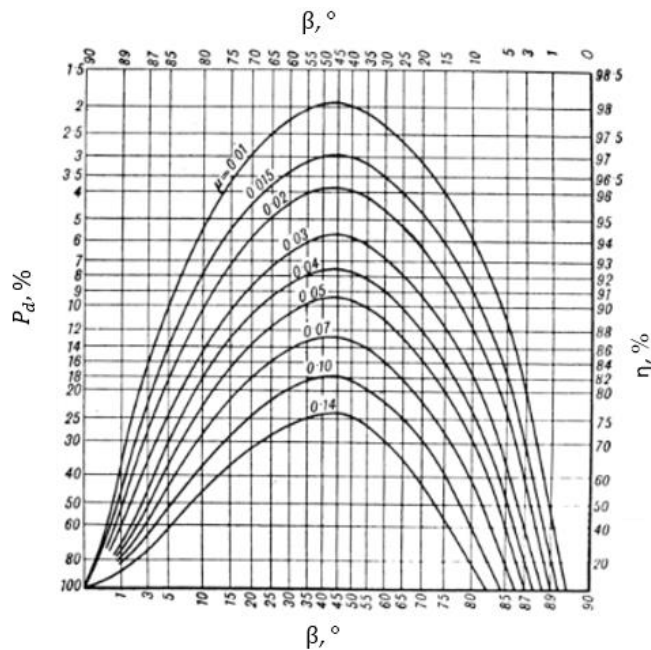
Tabela 4.2 - Eficiência de diferentes tipos de engrenagens (Adaptado de [96])

Tipo de engrenagem	i	v (m/s)	η (%)
Dentes retos	1:1 a 6:1	25	98-99%
Dentes Helicoidais	1:1 a 10:1	50	98-99%
Dentes Cónicos	1:1 a 4:1	20	98-99%
Parafuso sem-fim	5:1 a 75:1	30	20-98%

Onde:

- i – Relação de transmissão
- v – Velocidade linear, m/s
- η – Rendimento, %

No caso das engrenagens de parafuso sem-fim o rendimento está associado ao ângulo de inclinação da hélice do sem-fim, conforme representado na Figura 4.5.



Onde:

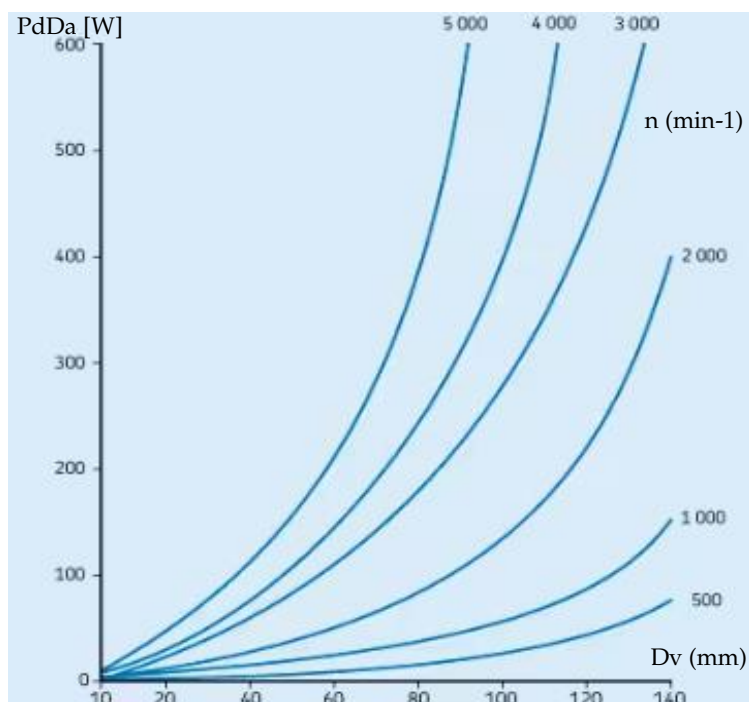
- β – Ângulo de inclinação da hélice do sem-fim, °

Figura 4.5 - Relação entre a eficiência e o ângulo de inclinação da hélice (Adaptado de [96])

Adicionalmente às perdas por atrito existem ainda as *rolling losses*, que são muitas vezes ignoradas devido a produzirem perdas desprezáveis [97].

4.2.4 Perdas de Potência em Retentores

As perdas por atrito nos retentores em motorreductores podem ser influenciadas pela viscosidade do lubrificante e a velocidade de rotação dos veios. Conforme a viscosidade do lubrificante varia devido à temperatura do óleo ou devido ao seu desgaste, a força radial dos retentores também se altera, sendo que esta força determina o atrito causado pelo elemento. Com a diminuição da viscosidade do lubrificante dá-se o aumento do atrito causado pelos retentores. O aumento da velocidade de rotação do veio está associado a um aumento de atrito entre os elementos, devido à maior circulação de óleo no contacto e ao aumento da temperatura no contacto, tal como se pode observar na Figura 4.6 [53], [98], [99].



Onde:

- D_v - Diâmetro do veio, mm
- P_{dDa} – Potência dissipada por atrito no retentor, W
- n – Velocidade de rotação, min^{-1}

Figura 4.6 - Perdas por atrito em retentores convencionais da SKF (Adaptado de [98])

Um estudo feito sobre as perdas por atrito em motores de carros a diesel, conclui que a influência de cada retentor nas perdas nestes equipamentos pode ser entre 37 W e 250 W [99].

Outros fatores que influenciam as perdas nos retentores também são o estado da superfície de contacto e o diferencial da pressão no contacto do retentor com o veio [98].

4.2.5 Perdas de Potência na Lubrificação

Lubrificante pode ser considerado um dos elementos que afeta mais a eficiência energética dos equipamentos, conforme apresentado anteriormente a má aplicação, falta de cuidado no armazenamento e falta de manutenção do lubrificante pode causar danos ou falhas que comprometam o funcionamento do equipamento ou causem perdas de eficiência. Adicionalmente a quantidade de lubrificante no redutor é também um fator que influencia o rendimento.

A lubrificação é um fator importante nas perdas independentes de carga nas engrenagens. Algumas das formas de lubrificação mais usadas são por chapinhagem, por banho de óleo, representado na Figura 4.7 e Figura 4.8, respectivamente, utilizadas em aplicações de velocidades baixas a intermédias e lubrificação por pressão, conforme representado na Figura 4.9, comum em aplicações de velocidades mais elevadas [100].

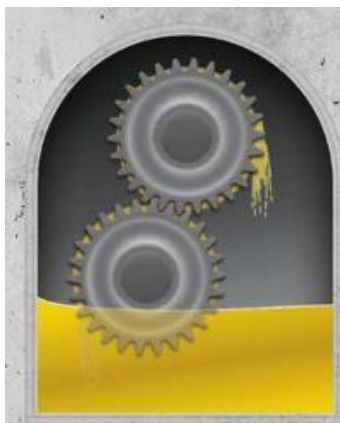


Figura 4.7 - Representação de lubrificação por chapinhagem (Adaptado de [101])

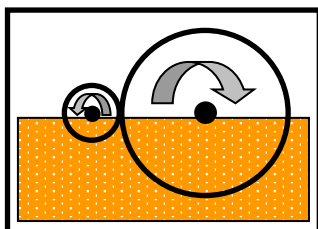


Figura 4.8 - Representação de lubrificação por banho de óleo

Na lubrificação por chapinhagem e por banho de óleo, as perdas ocorrem devido à interação entre as rodas dentadas em movimento e os fluidos, bem como na interação entre os dentes das engrenagens, a este tipo de perdas chama-se perdas hidrodinâmicas. No caso da lubrificação por pressão, as perdas surgem da interação entre a mistura de lubrificante e ar, e as rodas dentadas durante o processo de compressão do ar. Assim, estas perdas independentes de carga tornam-se um tema associado a fenómenos hidrodinâmicos complexos e difíceis de descrever analiticamente, e embora existam autores que tenham chegado a equações que tentam calcular aproximações das perdas reais, a forma mais adequada atualmente é através de simulação computacional [100].

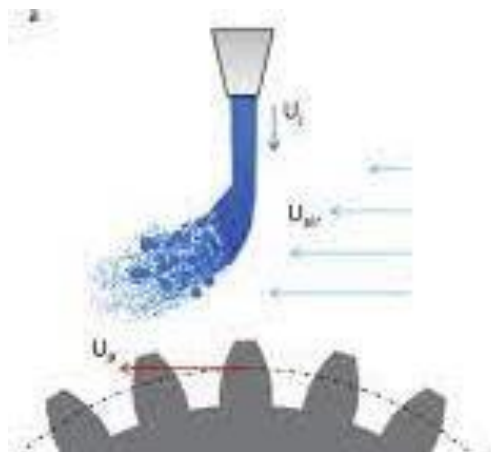


Figura 4.9 - Representação de lubrificação por pressão (Adaptado de [102])

Num estudo de 2015, [103], através de simulação computacional avaliou-se a relação entre a quantidade de lubrificante num redutor específico. Neste estudo o redutor foi inicialmente preenchido com o fluido, em seguida reduziu-se a quantidade lubrificante em metade o que revelou uma redução de perdas de 60%. Em seguida reduziu-se em 25% a quantidade de lubrificante o que incorreu numa redução de perdas de 70% em relação ao caso do redutor preenchido em 50% [66]. Assim, através deste estudo pode-se concluir que a adição de lubrificante e o controle de fugas deve ser cuidado, seguindo as especificações do fabricante e possíveis estudos efetuados com o intuito de avaliar se a quantidade de lubrificante usada no ambiente de trabalho do equipamento é correta, pois lubrificante em excesso pode causar perdas de potência e falta de lubrificante pode incorrer na ocorrência de falhas e avarias.

A viscosidade do lubrificante utilizado tem muita influência sobre as perdas de atrito em engrenagens, de tal modo que estudos devem ser efetuados para escolher o óleo e possíveis aditivos de forma obter e manter a viscosidade ótima para o equipamento nas condições ambientais (temperatura, humidade, ...) onde este se encontra [104]. A viscosidade de lubrificantes, varia de forma inversamente proporcional ao seu uso e também converge de forma exponencial com o aumento da temperatura de funcionamento [105].

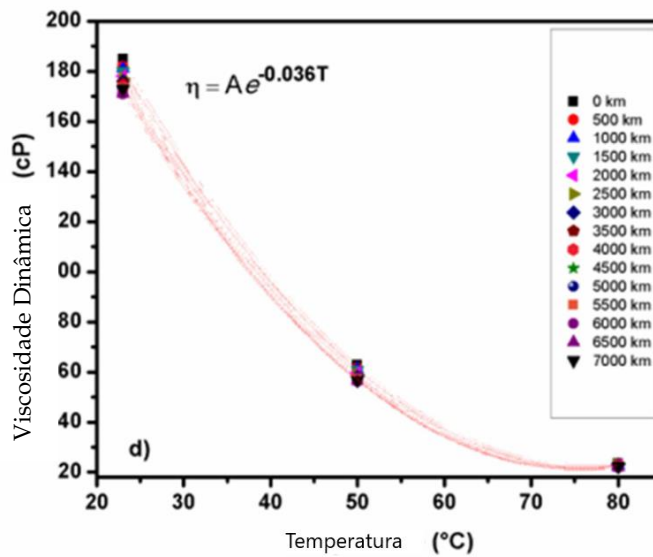


Figura 4.10 – Variação da viscosidade do lubrificante em função da temperatura (Adaptado de [105])

A influência dos diferentes tipos de lubrificantes foi avaliada por diversos autores, nomeadamente em óleos biodegradáveis, de baixa toxicidade, à base de éster em relação a óleos minerais, o que resultou numa melhoria da eficiência de 0,25% [104], adicionalmente outros tipos de óleos sintéticos também foram comparados com óleo mineral, que resultaram numa redução das perdas de potência. Tais óleos sintéticos como óleo polialfaolefina e óleo poliglicol que reduziram perdas por atrito nas engrenagens em 10% e 20%, respetivamente [92], [104], [106].

É importante realçar com base naquilo que foi apresentado anteriormente que os reten- tores em motorreductores devem ser alvo de inspeções regulares uma vez que estes elementos garantem que o volume de lubrificante não varia e impede a passagem ou entrada de conta- minantes que possam alterar propriedades dos lubrificantes, nomeadamente a viscosidade.

4.3 Avaliação dos Ganhos Energéticos da Manutenção

No setor da indústria automóvel uma paragem chega a custar 42000 euros por minuto e sendo cerca de 20 a 25% dos motores elétricos componentes decisivos em operações industri- ais, deve-se garantir que estes sofrem o menor número possível de avarias e que funcionem com a maior eficiência possível durante o maior período possível [19].

De forma a perceber quais as vantagens de efetuar manutenção é necessário apresentar valores de energia que não é gasta com a correta manutenção dos equipamentos. De forma a obter um valor mais próximo possível da realidade é necessário saber quanta energia é

consumida sem manutenção ou má manutenção e com a manutenção adequada. Este valor pode ser obtido através da Equação 4.4 e 4.5 segundo de [107].

$$P_G = 0,746 \times P \times \sum_{i_m=1}^{n_{LF}} \left[LF \times \left(\frac{E_N - E_O}{E_O} \right) \right]_{i_m} \quad \text{Equação 4.4}$$

$$E_G = \sum_{i_m=1}^{n_{LF}} (P_{G,i_m} \times t_{a,i_m}) \quad \text{Equação 4.5}$$

Onde:

- P_G = Potência ganha, kW
- E_G = Energia ganha, kWh
- **0,746** = Fator de conversão HP para kW
- P = Potência do motor, HP
- LF = Fator de Carga
- E_N = Eficiência depois dos processos de manutenção serem aplicados
- E_O = Eficiência antes dos processos de manutenção serem aplicados
- t_a = tempo de operação anual, h
- i_m = intervalo de fator de carga incremental para o motor
- n_{LF} = número total de compartimentos de fator de carga

Se o motor tiver esforços variáveis devem-se fazer vários intervalos de esforços de operação e efetuar o cálculo para cada um desses intervalos $i \in (1, \dots, n_{LF})$, e somar os valores finais [107].

PROPOSTA DE MODELO DE DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MOTORREDUTORES

Considerando o que foi apresentado anteriormente e tendo presente a complexidade dos motorredutores e a infinidade de possibilidades que podem existir destes equipamentos, neste capítulo pretende-se apresentar primeiramente um processo simples universal para obter o rendimento real dos mesmos de forma a se poder obter um valor aproximado do real destes equipamentos.

O rendimento dos motorredutores é obtido subtraindo ao caso ideal de eficiência o total das perdas de potência dos elementos que compõe o motorredutor. Estes valores podem ser obtidos através da aplicação dos modelos apresentados ou através de resultados empíricos obtidos por estudos independentes ou de fabricantes dos diferentes componentes.

Conforme apresentado na Figura 5.1, o processo começa por descobrir a potência elétrica consumida pelo equipamento, em condições ideais, se o consumo elétrico do equipamento for regido pela potência de saída então deve-se executar o processo inverso ao apresentado.

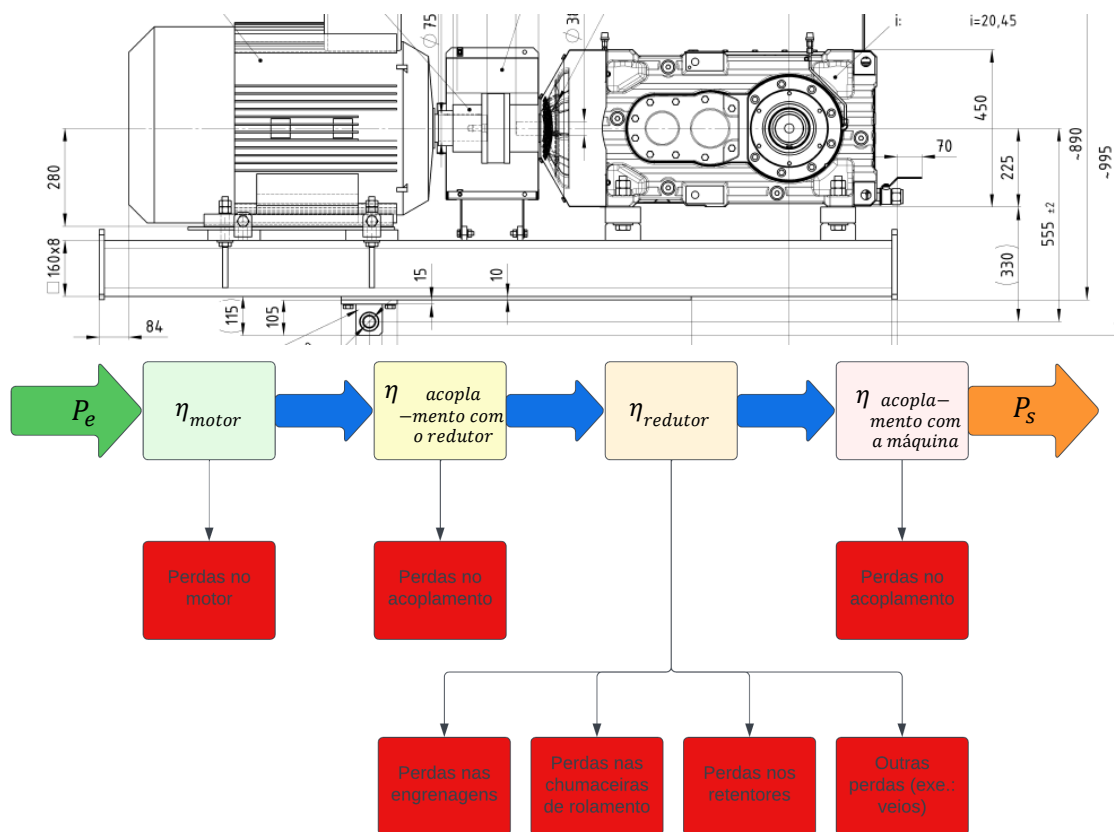


Figura 5.1 - Perdas em motorreductores

Idealmente não haveria perdas em nenhum dos componentes de um motorreductor, mas na prática existem várias possibilidades de perdas, umas maiores que outras, em todos os componentes destes equipamentos.

Começando pelo motor, diferentes tipos de motores apresentam perdas diferentes e mesmo dentro do mesmo tipo de motores as suas eficiências variam entre si, consoante o número de polos, potência e classe de eficiência ou conforme explicado na secção 4.2.1.

Existindo sempre algum desalinhamento, mesmo com o alinhamento mais rigoroso, os fabricantes dos acoplamentos apresentam tolerâncias de desalinhamento, que resultam em perdas de rendimento baixas e muitas vezes desprezáveis tal como explicado por Jesse et al. [108]. Sendo que a análise dos acoplamentos apenas deve ser adicionada em casos em que surjam desalinhamentos mais acentuados.

Acoplado ao motor encontra-se o reductor, que é composto por componentes comuns ao motor anteriormente não mencionados, mas que podem ser adicionados às perdas do reductor.

Começando pelas engrenagens o processo passa por saber o tipo de engrenamento em cada estágio de transmissão e a respetiva razão de transmissão, sabendo a percentagem

perdida em cada estágio o processo para saber a perda total nos engrenamentos é conforme apresentado na Equação 5.1.

$$P_{dZT}(\%) = \left(1 - \frac{\eta_{e1}}{100}\right) \times \left(1 - \frac{\eta_{e2}}{100}\right) \dots \times \left(1 - \frac{\eta_{en}}{100}\right) \times 100 \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

- P_{dZT} - Potência total dissipada nas engrenagens, %
- η_{en} - Rendimento no estágio n, %

Em seguida são analisadas as perdas nas chumaceiras de rolamento cuja eficiência, caso este não apresente qualquer falha, é facilmente obtida através dos respectivos fabricantes, a lubrificação dos mesmos pode ser um fator caso esta não tenha sido efetuada da forma correta ou não seja a adequada para a aplicação, por exemplo se se utilizar lubrificação por massa para situações de elevada velocidade de rotação.

Logo depois pode-se analisar os retentores, cujo processo de obtenção das perdas pode ser feito, também, com o auxílio dos fabricantes, conforme representado na Figura 4.6, onde sabendo o velocidade de rotação, o diâmetro do veio e o tipo de retentor que é usado pode-se obter facilmente a potência perdida em cada um destes elementos.

Algumas das perdas em engrenagens, chumaceiras de rolamento e retentores estão associadas ao tipo, estado e quantidade de lubrificante. Adicionalmente a estas perdas a escolha do tipo de lubrificação e o tipo de lubrificante também têm influência, de tal forma que para reduzir as perdas num equipamento deve-se escolher o lubrificante adequado, tendo em conta as condições de ambiente e de operação do equipamento. A influência da lubrificação apenas deve ser aplicada, neste procedimento, na eventualidade de se pretender perceber o efeito de excesso ou falta de lubrificante, de se querer comparar tipos de lubrificação ou de lubrificantes, tal como apresentado na secção 4.2.5 [104].

Este procedimento é resumido na Figura 5.2, onde após se obter o rendimento em cada um dos componentes, pode-se calcular a potência à saída.

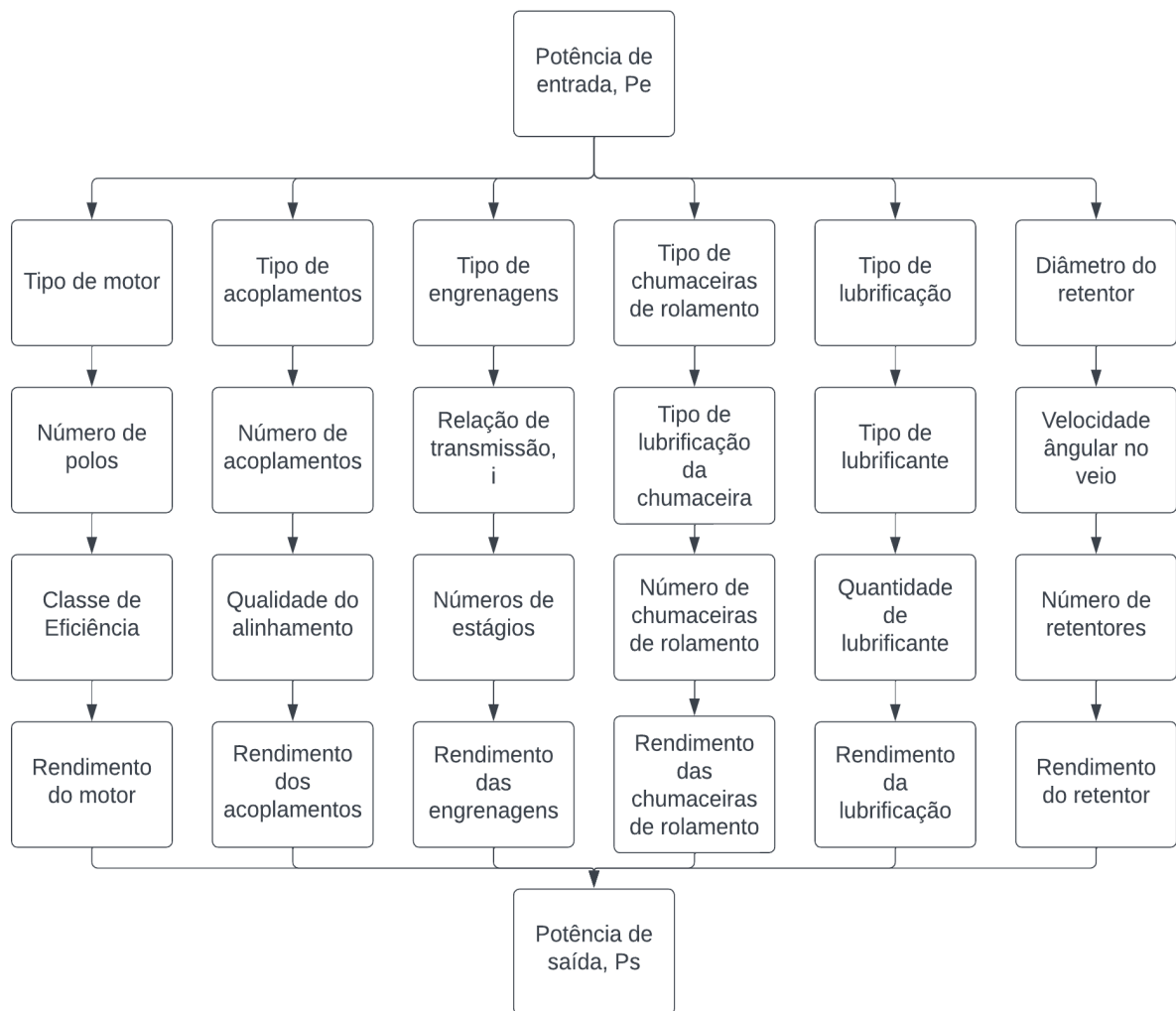


Figura 5.2 - Procedimento de contabilização das perdas em motorreduzores

Assim, para se calcular a potência de saída aplica-se a Equação 5.2.

$$P_s = \eta_m \times \eta_{ac} \times \eta_{en} \times \eta_{cr} \times \eta_{lub} \times \eta_{re} \times P_e$$

Equação 5.2

Onde:

- η_m – Rendimento do motor
- η_{ac} – Rendimento dos acoplamentos
- η_{en} – Rendimento das engrenagens
- η_{cr} – Rendimento das chumaceiras de rolamento
- η_{lub} – Rendimento da lubrificação
- η_{re} – Rendimento dos retentores

MOTORREDUTORES DA SEW- EURODRIVE

O presente capítulo apresenta a SEW-EURODRIVE, os motorreductores que a empresa comercializa, a sugestão de manutenção preventiva da empresa para estes equipamentos e a adaptação do modelo desenvolvido ao motorreductor em estudo.

6.1 SEW-EURODRIVE em Portugal e Pelo Mundo

Fundada a 13 de junho de 1931 por Christian Pähr em Bruchsal, no Sudoeste da Alemanha em Bruchsal, com o nome Süddeutsche Elektromotoren Werke. A empresa começou por produzir motores elétricos, motorreductores, entre outros equipamentos [109].

Após a segunda guerra mundial, em 1948, sobre a liderança de Ernst Blickle, a empresa iniciou a sua expansão em Graben, Alemanha, devido a um aumento da procura de motorreductores [109]. De 1950 a 1960, a empresa conseguiu aumentar as suas receitas de 1.4 milhões para 20 milhões e abriu a primeira subsidiária num país estrangeiro em Haguenau, França [109].

Mais tarde, em 1965, a SEW-EURODRIVE inovou o mercado ao desenvolver motorreductores modulares que permitiam responder a uma grande variedade de necessidades sem ter de fazer uma unidade específica para cada cliente, reduzindo assim os custos e aumentando a variedade de produtos e mercados que forneciam [109].

Em 1975 começa a expansão para fora da Europa para a América do Sul, Brasil. Sobre a direção dos filhos de Ernst Blickle, em 1994 a empresa voltou a inovar com engrenamentos SPIROPLAN®, que são praticamente isentos de manutenção e com velocidade variável [109], [110].

A empresa, à data deste documento, trabalha com um grande espectro de setores, nomeadamente a indústria automóvel, onde oferecem sistemas automatizados para a secção de prensagem e carroçaria, bebidas e líquidos, onde trabalham com todas as empresas de referência, de transporte e logística, manuseamento de bagagem em aeroportos, e outros setores como a indústria naval, mineira, cimenteira, logística de portos, madeira entre outros[111].

Tendo uma grande panóplia de setores com que trabalha e embora tenha começado com a produção de motores elétricos, ao longo de 92 anos aumentou significativamente o seu portfólio de produtos e de serviços [111]. À data a firma produz motorreductores, reductores, motores, componentes de instalação descentralizada, variadores eletrónicos, de velocidade, soluções globais de automação como *factory automation* e *machine automation* e ainda todos os serviços complementares como assistência técnica no local, serviços de reparação, monitorização da condição entre outros serviços.

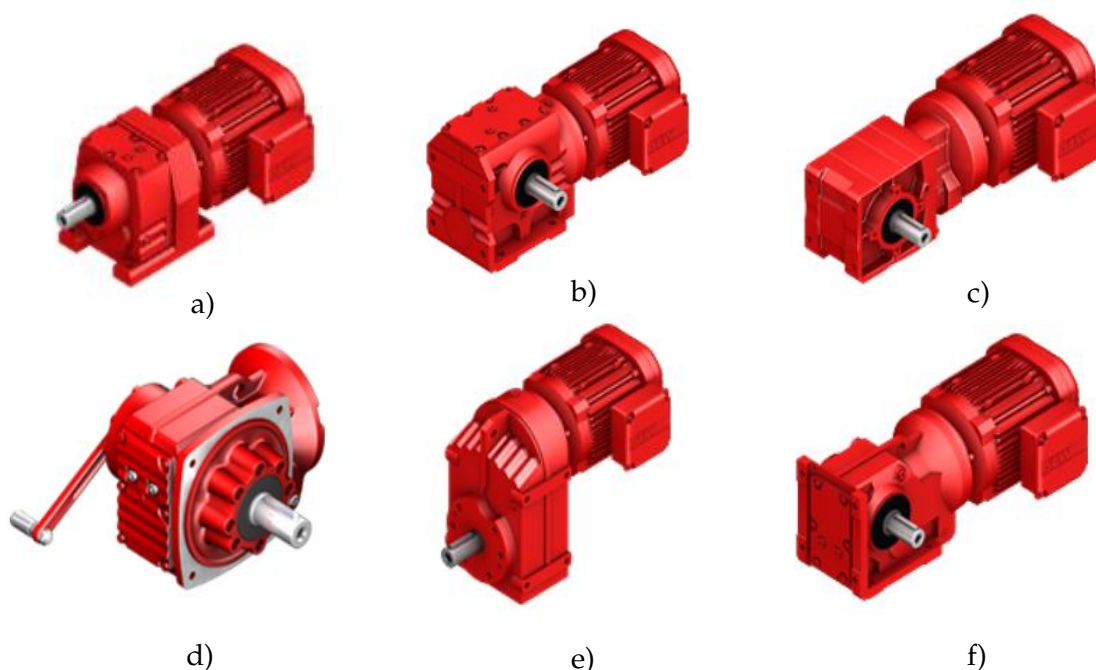
De modo a poder responder, com a melhor qualidade, às necessidades dos seus clientes contam atualmente com o apoio de mais de 17,000 colaboradores [112], [113].

A empresa encontra-se em Portugal à 33 anos, nas suas instalações na Avenida Fonte Nova 86, 3050-379 Mealhada. Nestas instalações efetuam a montagem de diferentes dimensões das várias séries de moto reductores R, S, K, F e W e a reparação dos equipamentos em Portugal [114].

6.2 Gama de Motorreductores

A SEW-EURODRIVE produz uma grande variedade de motorreductores, de forma possibilitar modularidade nos seus equipamentos. Atualmente a empresa produz seis tipos de motorreductores, que são a série R, Figura 6.1 a), de engrenagens helicoidais, a série S, Figura 6.1 b), que usa reductores de parafuso sem-fim de elevada eficiência, devido à utilização de um primeiro andar de engrenagens helicoidais, a série W, Figura 6.1 c), de engrenagens Spiroplan[®], série F, Figura 6.1 d), de engrenagens helicoidais e de veios paralelos, série H, Figura 6.1 e), de acionamentos para transportadores aéreos e série K, Figura 6.1 f), de engrenagens cónicas [114].

As diferentes séries estão disponíveis em diversos tamanhos, conforme explicado anteriormente, de forma a promover uma grande variedade de opções com o mesmo produto.



a) motorreductor série R, b) motorreductor série S, c) motorreductor série W, d) motorreductor série F, e) motorreductor série H, f) motorreductor série K

Figura 6.1 - Séries de motorredutores fabricados pela SEW-EURODRIVE (Adaptado de [114])

Para a manutenção dos motorredutores da SEW-EURODRIVE a empresa fornece uma forma simples de garantir que a manutenção preventiva é efetuada corretamente, seguindo os intervalos de inspeção dos redutores, Tabela 6.1, motores, Tabela 6.2, e do freio, Tabela 6.3. Estes intervalos devem ser otimizados ao longo do tempo de acordo com as exigências das condições reais de operação de cada equipamento.

Com a execução destes planos pretende-se principalmente efetuar a substituição dos componentes com vida finita e garantir o desempenho adequado do equipamento [9].

Tabela 6.1 - Intervalos de Inspeção/Manutenção de redutores (Adaptado de [9])

Intervalos de Inspeção/Manutenção	Ações a executar
Diariamente ou com a maior frequência possível	Verificar existência de ruídos ou vibrações anormais
Mensalmente	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar temperatura do cárter • Verificar nível de lubrificante
A cada 3.000 horas de funcionamento, ou pelo menos de seis em seis meses	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar o estado do lubrificante • Controlo visual dos retentores • Em redutores com braço de binário, verificar os sinoblocos e substitua-os, se necessário

Tabela 6.1 - Intervalos de Inspeção/Manutenção de redutores (Adaptado de [9]) (Continuação)

Anualmente	Executar uma inspeção completa à unidade
Dependendo das condições de operação, pelo menos a cada 3 anos, e de acordo com a temperatura do óleo	<ul style="list-style-type: none"> • Substitua o lubrificante mineral • Substitua a massa das chumaceiras de rolamento (recomendação) • Substitua os retentores (não volte a montar na mesma zona de trabalho)
Dependendo das condições de operação, pelo menos a cada 5 anos, e de acordo com a temperatura do lubrificante	<ul style="list-style-type: none"> • Substitua o lubrificante sintético • Substitua a massa das chumaceiras de rolamento (recomendação) • Substitua os retentores (não volte a montar na mesma zona de trabalho)
Variável (dependente de fatores externos)	Retoque ou renove a pintura anticorrosiva

Tabela 6.2 - Intervalos de Inspeção/Manutenção de motores SEW-EURODRIVE (Adaptado de [9])

Intervalos de Inspeção/Manutenção	Ações a executar
A cada 10.000 horas de funcionamento	<ul style="list-style-type: none"> • Inspeccione o motor • Verifique as chumaceiras de rolamento e, se necessário, substitua-os • Substitua os retentores de óleo • Limpe as passagens do ar de arrefecimento
A cada 10.000 horas de funcionamento, em motores com antirretorno	Mude a massa lubrificante de baixa viscosidade do antirretorno
Variável (dependente de fatores externos)	Retoque ou renove a pintura anticorrosiva

Tabela 6.3 - Intervalo de Inspeção/Manutenção de freio (Adaptado de [9])

Intervalos de Inspeção/Manutenção	Ações a executar
Se for usado como freio de serviço	Meça a espessura do disco de freio
Pelo menos a cada 3.000 horas de funcionamento	<ul style="list-style-type: none"> • Meça o ajuste do entreferro • Verifique o prato de pressão • Inspeccione o carreto • Verifique o estado das molas
Se for usado como freio de sustentação	Remova a matéria abrasiva
Cada 2 a 4 anos, dependendo das condições de operação	Inspeccione os contadores, e em caso de desgaste substitua-os

ESTUDO DE CASO – EMPRESA PRODUTORA DE BEBIDAS

O presente capítulo apresenta o caso de estudo prático, que, neste trabalho, consistiu em analisar o equipamento em estudo bem como a aplicação do procedimento apresentado anteriormente, o estado geral de vários equipamentos instalados, lista os problemas identificados nos equipamentos e na linha, o processo utilizado para avaliar potência consumida dos equipamentos, propostas de melhoria para a empresa produtora de bebidas e a discussão dos resultados obtidos.

7.1 Apresentação da Linha em Estudo

A empresa cliente da SEW-EURODRIVE, na qual os equipamentos estudados se encontram, é uma empresa de grande dimensão que produz diversas bebidas em diversos tipos de recipientes. A empresa em questão tem uma fábrica de enchimento de garrafas e outros recipientes em Lisboa.

Os equipamentos em estudo encontram-se dispostos ao longo de uma linha denominada de Linha 5, esta engarrafa 60000 L/h de diversas bebidas em garrafas de vidro de 33 cL. Conforme se pode observar na Figura 7.1, esta linha faz a receção de paletes de grades de garrafas vazias, usadas, retirando as grades das paletes e as garrafas das grades, também efetua a lavagem e desrotulagem, verificação do estado das garrafas, enchimento, rotulagem, engradamento e empalamento. Nesta linha também é efetuada a lavagem e tratamento de grades.

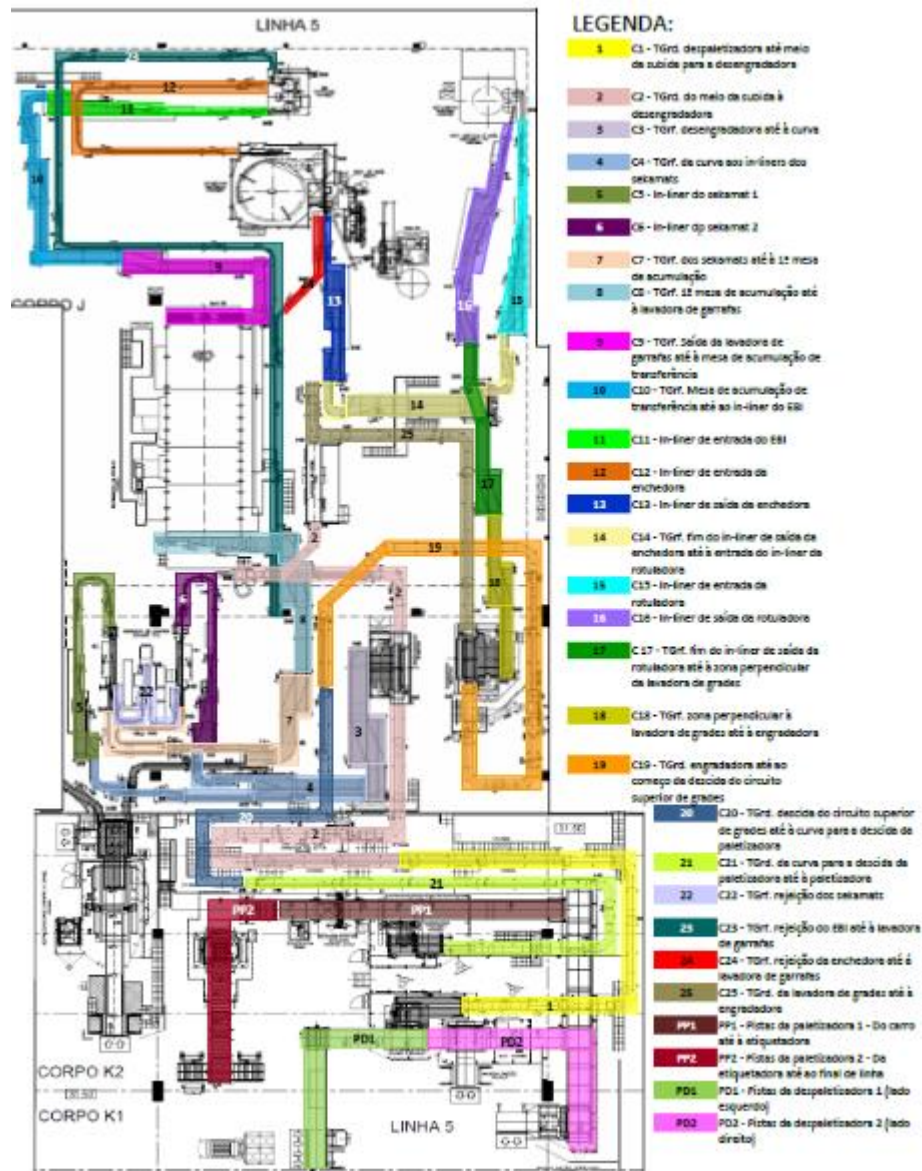
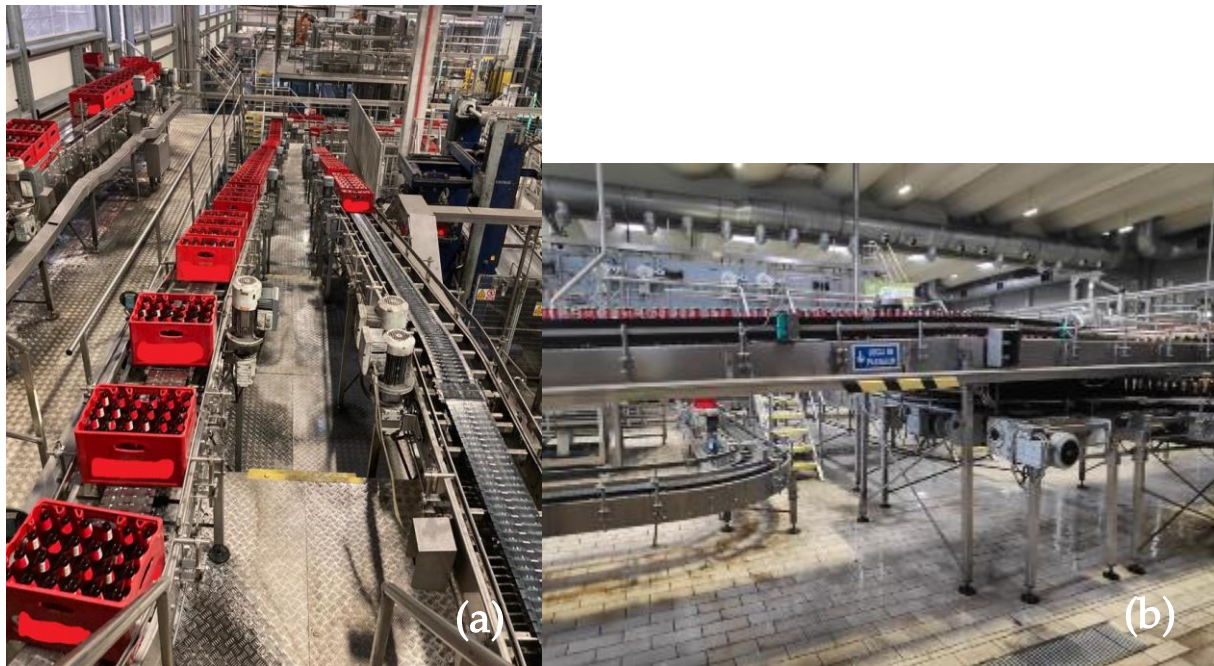


Figura 7.1 - Identificação de circuitos transportadores - linha 5

Os equipamentos estudados encontravam-se em diversas fases deste processo, nomeadamente na receção de grades de garrafas vazias, representado na Figura 7.2 (a), na lavagem das garrafas, no transporte entre a entrada e a saída da rotuladora, representado na Figura 7.2 (b), e no transporte de grades com garrafas cheias e rotuladas, representado na Figura 7.2 (a).



(a) – Secção de receção e envio de grades vazias e cheias, respetivamente

(b) – Secção de entrada e saída de garrafas da rotuladora

Figura 7.2 - Secções da linha 5

7.2 Tipos de Motorreductores em Estudo

Os equipamentos que foram alvo de estudo neste trabalho são da série S de diversas dimensões, com um adaptador para motor universal que inclui um acoplamento elástico do tipo “ROTEX”.

O redutor do tipo S utiliza um primeiro andar com engrenagens helicoidais e um segundo andar de redução com uma roda coroa e um parafuso sem-fim. É um redutor a 90° mais económico que os redutores a 90° com engrenagens cónicas. Ao contrário dos equipamentos mais recentes no mercado os equipamentos em análise não são de ligação direta entre o motor e o redutor, mas sim, conforme exposto anteriormente, através de um adaptador e acoplamento. O funcionamento dos equipamentos analisados, começa no motor elétrico, que por sua vez está ligado ao veio do adaptador conectado a um acoplamento elástico, este veio tem um pinhão na extremidade que transmite a rotação a uma engrenagem helicoidal que se encontra no veio do parafuso sem-fim, que provoca rotação no mesmo. Consequentemente o parafuso sem-fim ao rodar engrena com uma roda de coroa, que por sua vez provoca a rotação no veio que se vai ligar ao equipamento, conforme representado na Figura 7.3 [115].

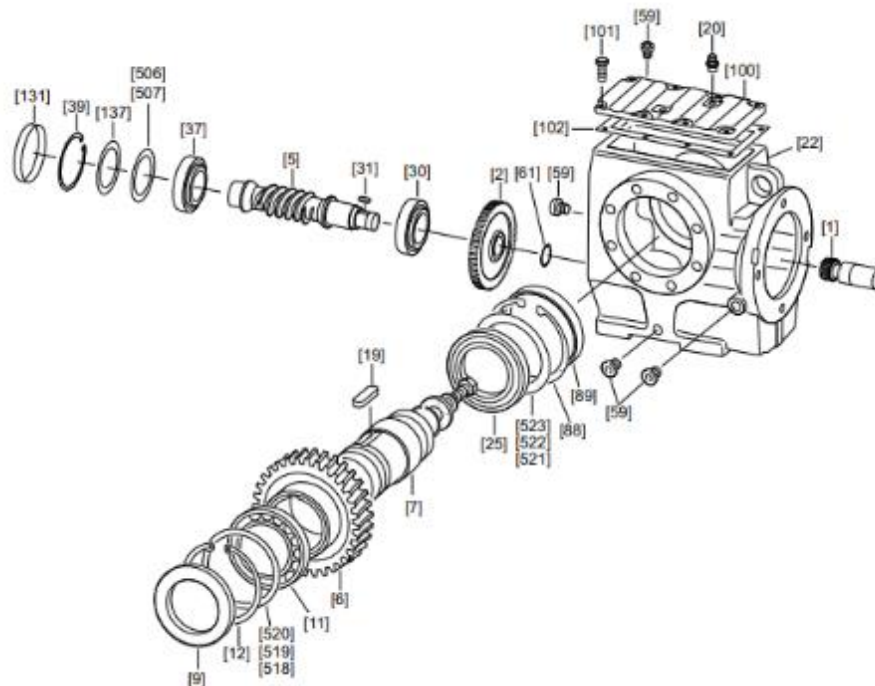


Figura 7.3 - Estrutura geral dos redutores série S [116]

Apresentado o equipamento, pode-se passar à aplicação do modelo.

Começando pelo motor que é do tipo assíncrono pela sua placa de características pode-se retirar o número de polos e a respetiva classe de eficiência. Nos equipamentos estudados o motor é de 50Hz, quatro polos, com uma classe de eficiência IE3 e com um potência entre 0,3 e 1,5 kW que corresponde a um rendimento de aproximadamente 77,3 a 85,3%, respetivamente, de acordo com a norma IEC 60034-30-1:2014 apresentada no Anexo A [117].

Considerando que neste caso o equipamento é novo, não deverão existir desalinhamentos consideráveis, que por sua vez resultam em perdas desprezáveis [108]. Caso existam desalinhamentos mais acentuados então irão surgir perdas em outros componentes, como chumaceiras de rolamento, tal como apresentado por Jesse et al. [108].

As engrenagens deste motorreductor, como explicado anteriormente, começam num primeiro estágio com um par de engrenagens helicoidais que terá uma eficiência de 98 a 99% e um segundo estágio que tem uma roda de coroa e um parafuso sem-fim, onde, embora não se saiba o ângulo de hélice para se poder utilizar a Figura 4.5, de acordo com a SEW-EURODRIVE tem uma eficiência de 78% [96].

Nas chumaceiras de rolamentos esféricos, que são 4, cada elemento apresenta uma eficiência de 95 a 99%, assim como apresentado na secção 4.2.2 [86]. Sendo o equipamento novo, assume-se que o tipo de lubrificação é o adequado, este parâmetro deve ser considerado quando a lubrificação não é a adequada ou se encontra em mau estado como nos casos descritos na secção 4.2.2.

No caso dos retentores, o equipamento tem 3 retentores, sabendo que os veios são de 80, 90 e 100 mm e que no veio de entrada do redutor a rotação a velocidade de rotação dos veios é 1420 min^{-1} e no veio de saída uma velocidade de rotação de são aproximadamente 44 min^{-1} , resultando em perdas aproximadamente de 43, 68 e 85 W à entrada e aproximadamente 2 W à saída, pela análise da Figura 4.6, para os diferentes diâmetros de veios [98].

As perdas associadas à lubrificação já são consideradas nos componentes anteriores, sendo este um caso em que se considera que o equipamento é novo, considera-se que o lubrificante é o adequado e que o tipo de lubrificação é o mais adequado.

Na Figura 7.4 é representada a aplicação do procedimento apresentado anteriormente na Figura 5.2.

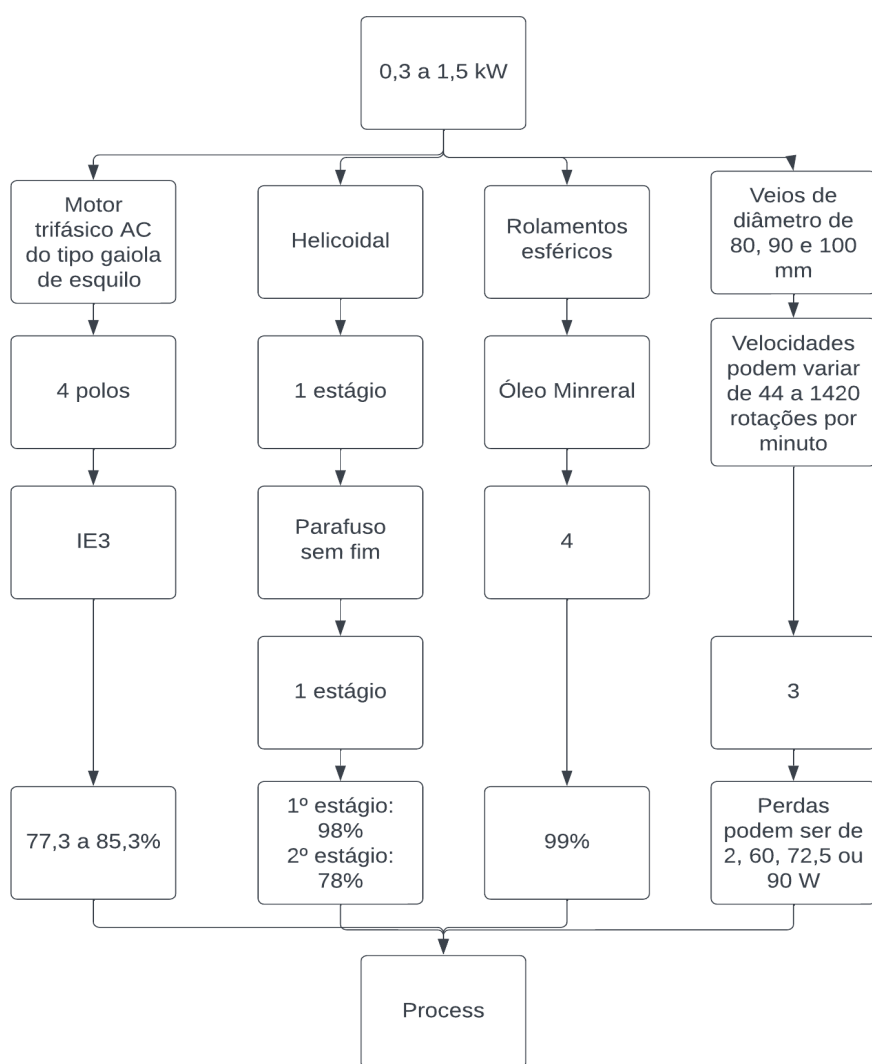


Figura 7.4 - Adaptação do modelo à série de motorredutores em estudo

7.3 Identificação de Problemas

Durante o decorrer deste estudo foram observados 7 equipamentos. As falhas nestes equipamentos foram detetadas durante a desmontagem em oficina dos mesmos para sua manutenção na Sede da SEW-EURODRIVE em Portugal. Os equipamentos foram transportados das instalações do cliente para as do fabricante, SEW-EURODRIVE, onde, após serem inseridos no sistema informático, da empresa, são sujeitos uma série de testes para classificar o estado do equipamento, após esta avaliação os equipamentos são abertos e inspecionados e é efetuado um orçamento para o cliente onde são apresentadas as falhas detetadas, que são assinaladas seguindo uma *checklist* semelhante à apresentada no Anexo B. Após o orçamento apresentado ser aceite os equipamentos são limpos e as peças que necessitem de ser trocadas são descartadas. Com os novos componentes, os equipamentos são enviados para a linha de montagem e passam pelo mesmo processo a que são sujeitos os novos equipamentos. Já reparados e pintados os motorreductores são enviados de volta para o cliente.

As falhas em cada equipamento são em seguida apresentadas, juntamente com a potência consumida pelo respetivo equipamento, para uma variedade de intensidades de corrente, antes e depois da manutenção efetuada pelo fabricante. O registo das falhas nos equipamentos foi efetuado com auxílio da *checklist* apresentada no Anexo B, esta lista foi concebida com o apoio dos técnicos e engenheiros da SEW-EURODRIVE.

Motorreductor - MT3

Falhas detetadas:

- Desgaste nas chumaceiras de rolamento;
- Retentores desgastados, Figura 7.5;



Figura 7.5 - Retentor de uma chumaceira de rolamentos do MT3

- Escatel rebatido;
- Lubrificante em mau estado, contaminado e com viscosidade deficiente, Figura 7.6;



Figura 7.6 – Lubrificante contaminado no fundo cárter do MT3

- Roda coroa com *pitting*, Figura 7.7;



Figura 7.7 - *Pitting* na roda coroa do MT3

- Veio do acoplamento vincado na zona do retentor;
- Anel excêntrico partido;
- Cubo do acoplamento rebatido/com desgaste, Figura 7.8;



Figura 7.8 - Desgaste e corrosão no cubo do acoplamento do MT3

- Chumaceira de rolamento fora das tolerâncias;

- Caixa da chumaceira de rolamento danificada;
- Freio com desgaste no disco de ferôdo e bobine do freio com sinais de sobreaquecimento, Figura 7.9;



Figura 7.9 – Bobine do freio do MT3

- Sujidade e corrosão na proteção do ventilador;
- Resultados das leituras do consumo do MT3 são apresentados na Figura 7.10.

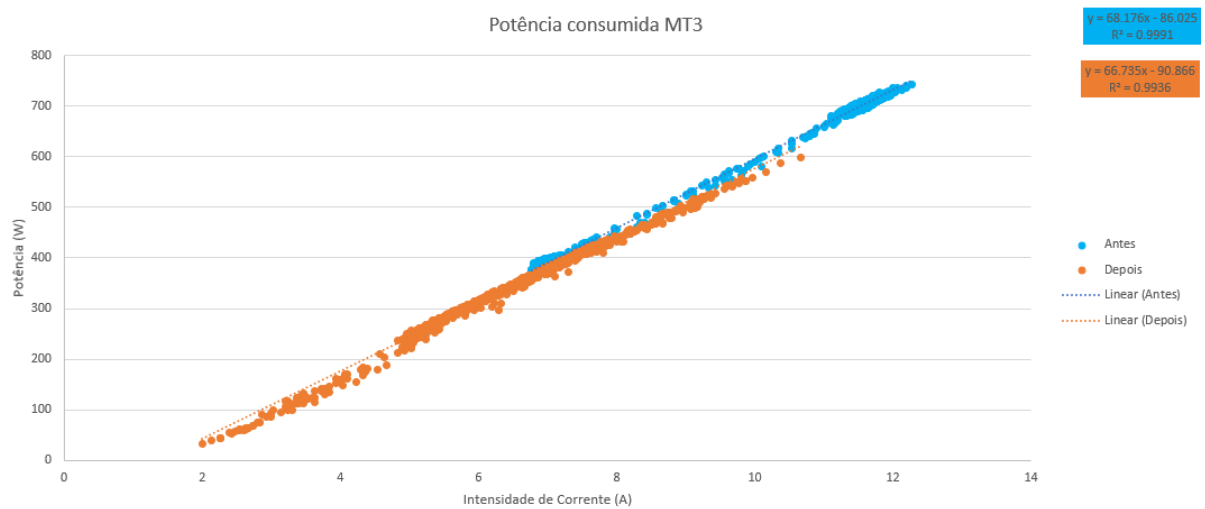


Figura 7.10 - Potência consumida pelo MT3 antes e depois da manutenção

Motorreductor - MT7

Falhas detetadas:

- Desgaste nas chumaceiras de rolamento, Figura 7.11;



Figura 7.11 - Desgaste no retentor de uma chumaceira de rolamento do MT7

- Retentores ressequidos;
- Veio oco com vinco na zona de trabalho do retentor;
- Lubrificante muito mau estado e contaminado;
- Roda coroa com *pitting* e com desgaste não uniforme, Figura 7.12;



Figura 7.12 - Desgaste na roda coroa do MT7

- Restantes rodas dentadas com desgaste, Figura 7.13;

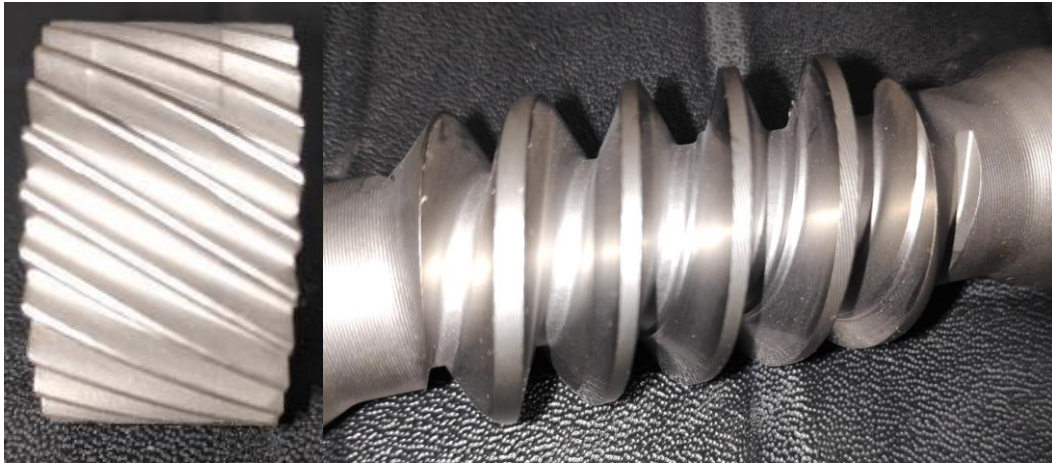


Figura 7.13 - Desgaste parafuso sem-fim do MT7

- Cárter danificado;
- Veio do acoplamento de entrada vincado na zona do retentor, Figura 7.14;



Figura 7.14 - Vinco na zona dos retentores do acoplamento do MT7

- Cubo do acoplamento danificado;
- Flange do acoplamento danificada;
- Estator com óleo, Figura 7.15;



Figura 7.15 - Estator do MT7 com infiltração de lubrificante

- Resultados das leituras do consumo do MT7 são apresentados na Figura 7.16.

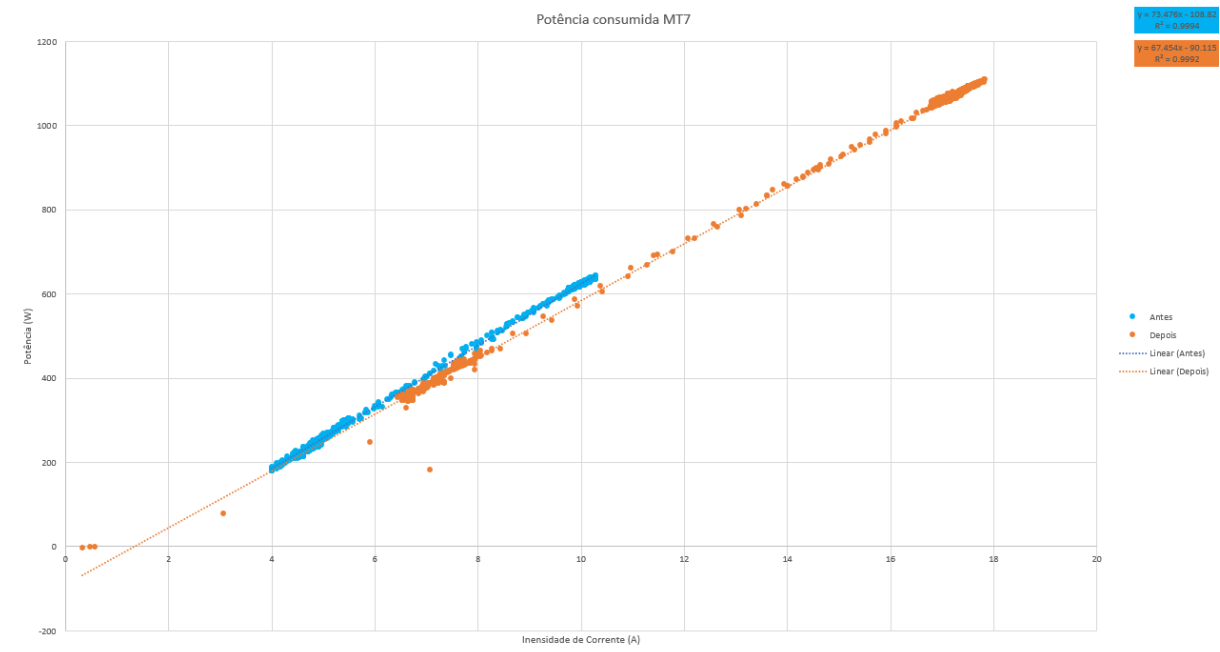


Figura 7.16 - Potência consumida pelo MT7 antes e depois da manutenção

Motorreductor – MT9

Falhas detetadas:

- Chumaceiras de rolamento com desgaste;
- Retenores ressequidos;
- Veio oco com vinco na zona dos retenores e com mossas / marcas, Figura 7.17;

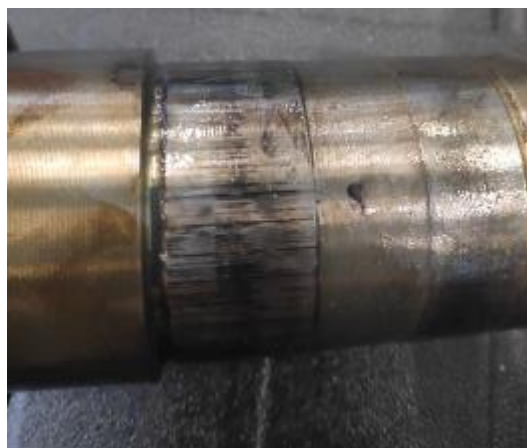


Figura 7.17 - Vinco na zona do retentor no acoplamento do MT9

- Roda coroa com *pitting* e desgaste acentuado, Figura 7.18



Figura 7.18 - *Pitting* e desgaste na roda coroa MT9

- Parafuso sem-fim com desgaste, Figura 7.19;



Figura 7.19 - Desgaste no parafuso sem-fim do MT9

- Lubrificante em muito mau estado, Figura 7.20;



Figura 7.20 - Lubrificante contaminado no fundo do cárter do MT9

- Rotor sobreaquecido com marcas de sobreaquecimento, Figura 7.20;



Figura 7.21 - Marca de sobreaquecimento no rotor do MT9

- Caixa da chumaceira de rolamento rebatida;
- Freio com desgaste acentuado;
- Proteção do ventilador com bastante sujeira, Figura 7.22;



Figura 7.22 - Sujidade na proteção do ventilador do MT9

- Resultados das leituras do consumo do MT9 são apresentados na Figura 7.23.

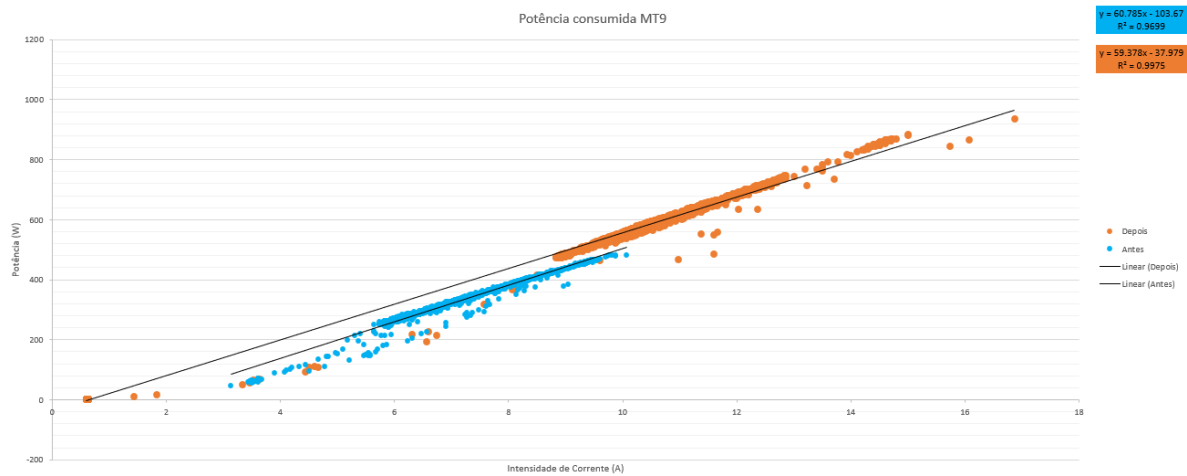


Figura 7.23 - Potência consumida pelo MT9 antes e depois da manutenção

Motorreductor – MT13

Falhas detetadas:

- Chumaceiras de rolamento com desgaste;
- Retentores ressequidos;
- Veio oco com dano nas zonas de trabalho do retentor, com o escatel danificado, Figura 7.24;



Figura 7.24 - Dano na extremidade do veio oco do MT13

- Roda 2 com *pitting* e desgaste, Figura 7.25;



Figura 7.25 - *Pitting* e desgaste na roda 2 do MT13

- Desgaste do parafuso sem-fim, Figura 7.26;



Figura 7.26 - Desgaste no sem-fim do MT13

- Lubrificante contaminado e em mau estado;
- Oxidação elevada e vinco na zona do retentor do veio do acoplamento;
- Anel excêntrico destruído;
- Cubo do acoplamento com oxidação, Figura 7.27;



Figura 7.27 - Oxidação no cubo do acoplamento do MT13

- Caixa da chumaceiras de rolamento rebatida com elementos fora das tolerâncias, Figura 7.28;



Figura 7.28 - Dano na caixa da chumaceira de rolamento do MT13

- Proteção do ventilador com bastante corrosão, Figura 7.29;



Figura 7.29 - Corrosão na proteção do ventilador do MT13

- Resultados das leituras do consumo do MT13 são apresentados na, Figura 7.30.

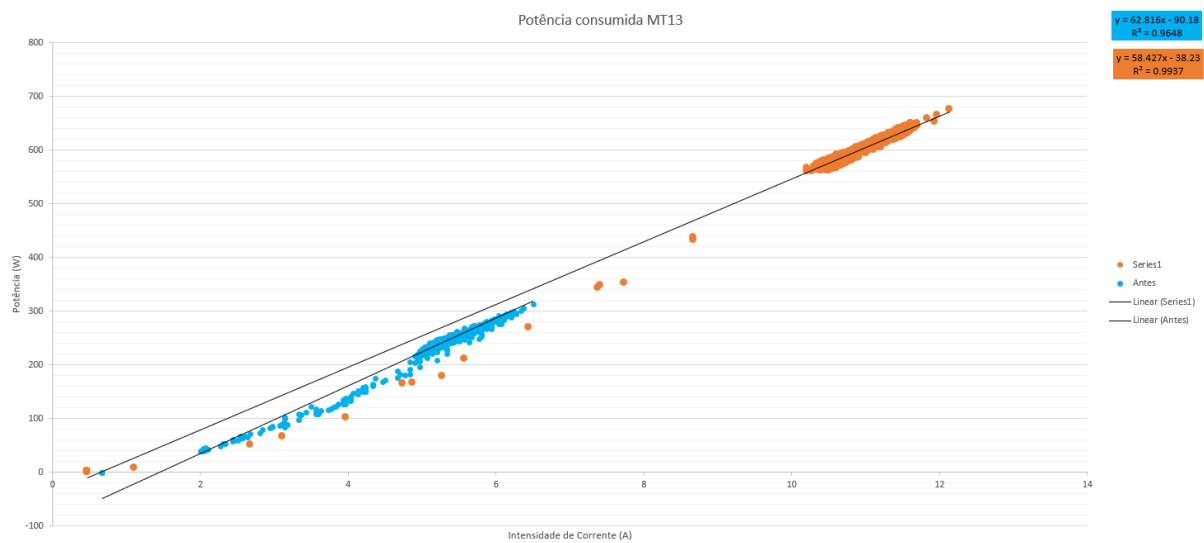


Figura 7.30 - Potência consumida pelo MT13 antes e depois da manutenção

Motorreductor - MT79

Falhas detetadas:

- Desgaste nas chumaceiras de rolamento;
- Retentores ressequidos;
- Veio oco com elevada oxidação, Figura 7.31;

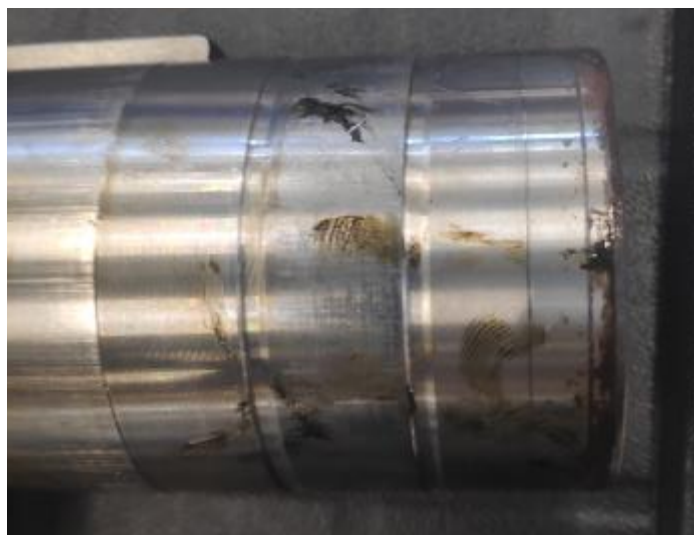


Figura 7.31 - Oxidação na extremidade do veio oco do MT79

- Lubrificante em mau estado, Figura 7.32;



Figura 7.32 - Lubrificante contaminado no fundo do cárter do MT79

- Roda coroa com *pitting*, Figura 7.33;



Figura 7.33 - *Pitting* na roda coroa do MT79

- Parafuso sem-fim com desgaste, Figura 7.34;



Figura 7.34 - Desgaste no sem-fim do MT79

- Veio do acoplamento danificado, Figura 7.35;



Figura 7.35 - Desgaste no anel externo de uma chumaceira de rolamento do MT79

- Anel excêntrico desfeito;
- Cubo rebatido, Figura 7.36;



Figura 7.36 - Dano no cubo do acoplamento do MT79

- Flange do acoplamento rebatida na zona da chumaceira de rolamento, Figura 7.37;



Figura 7.37 - Dano na caixa da chumaceira de rolamento do MT79

- Sujidade e corrosão na proteção do ventilador, Figura 7.38;



Figura 7.38 - Sujidade e corrosão na proteção do ventilador do MT79

- Resultados das leituras do consumo do MT79 são apresentados na Figura 7.39.

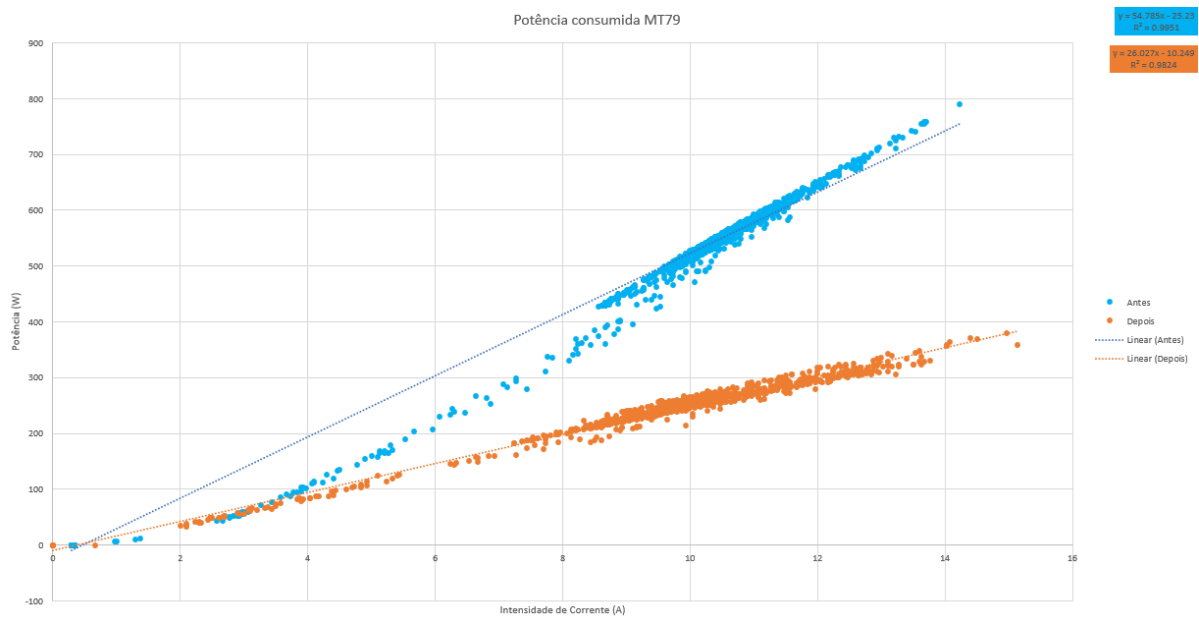


Figura 7.39 - Potência consumida pelo MT79 antes e depois da manutenção

Motorreductor – MT96

Falhas detetadas:

- Desgaste nas chumaceiras de rolamento;
- Retenores ressequidos;
- Vinco na zona de trabalho do retentor do veio oco;
- Roda coroa com *pitting* e com o escatel partido, Figura 7.40;



Figura 7.40 - Pitting, desgaste e escatel rebatido no MT96

- Desgaste em todas as engrenagens, Figura 7.41;



Figura 7.41 - Desgaste, no sem-fim, pinhão e na roda de transmissão do MT96

- Lubrificante em muito mau estado, Figura 7.42;



Figura 7.42 - Lubrificante contaminado no interior do cárter do MT96

- Dano na zona de trabalho do retentor do veio de acoplamento, Figura 7.43;



Figura 7.43 - Vinco na zona dos retentores do veio de acoplamento do MT96

- Anel excêntrico desgastado;
- Cubo do acoplamento rebatido;
- Caixa da chumaceira de rolamento fora das tolerâncias, Figura 7.44;



Figura 7.44 - Dano na caixa da chumaceira de rolamento do MT96

- Freio queimado e com desgaste acentuado, Figura 7.45;



Figura 7.45 – Bobine de freio queimada do MT96

- Resultados das leituras do consumo do MT96 são apresentados na Figura 7.46.

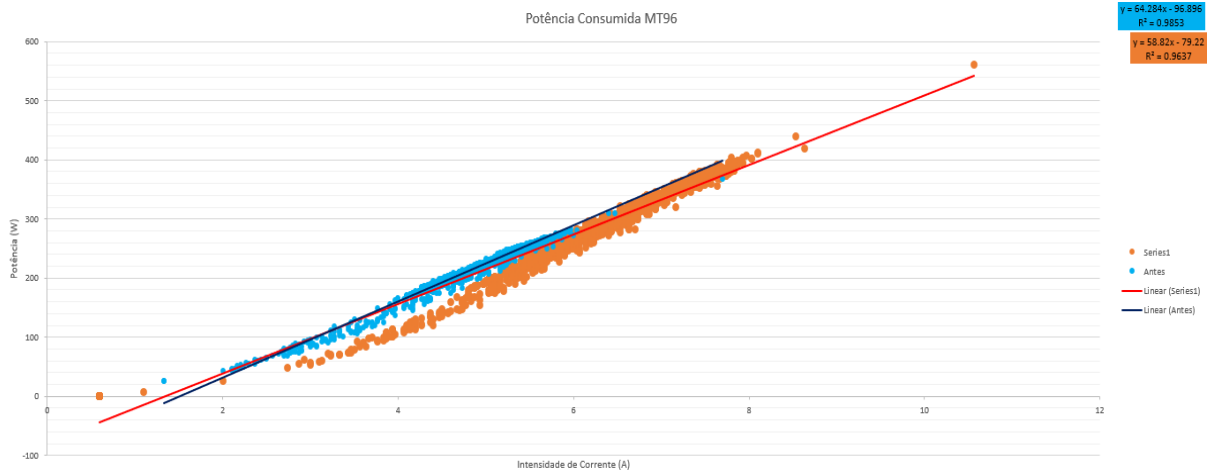


Figura 7.46 - Potência consumida pelo MT96 antes e depois da manutenção

Motorreductor - MT622

Falhas detetadas:

- Desgaste nas chumaceiras de rolamento;
- Retenores ressequidos;
- Veio oco com vinco na zona de trabalho do retentor, Figura 7.47;

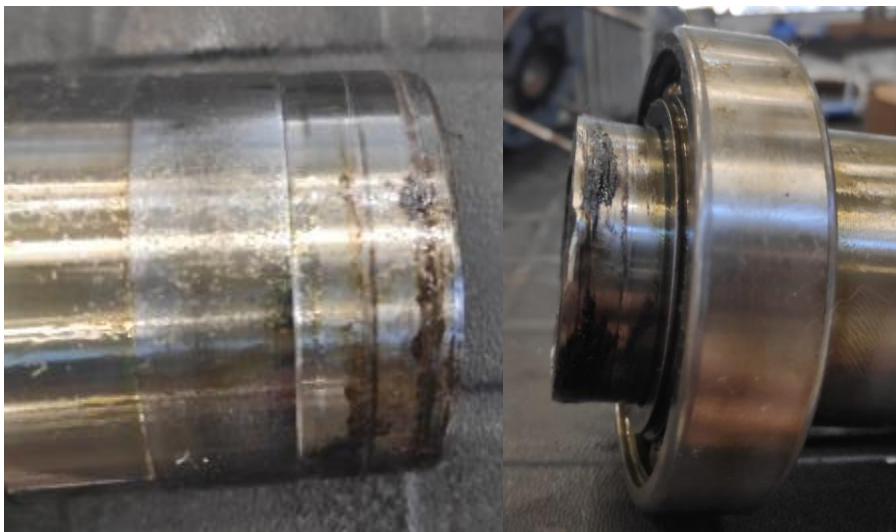


Figura 7.47 - Vinco na zona dos retenores e dano na extremidade do veio oco do MT622

- Lubrificante em mau estado;
- Roda coroa com *pitting* e com desgaste severo, Figura 7.48;



Figura 7.48 - Pitting inicial e desgaste severo na roda coroa do MT622

- Pinhão com desgaste;
- Cárter danificado;
- Veio do acoplamento vincado na zona do retentor, Figura 7.49;



Figura 7.49 - Vinco na zona dos retentores do veio de acoplamento do MT622

- Anel excêntrico partido, Figura 7.50;



Figura 7.50 - Anel excêntrico do MT622 partido

- Cubo do acoplamento danificado, Figura 7.51;



Figura 7.51 - Dano no cubo do acoplamento do MT622

- Flange rebatida na zona da chumaceira de rolamento;
- Estator com óleo;
- Resultados das leituras do consumo do MT622 são apresentados na Figura 7.52.

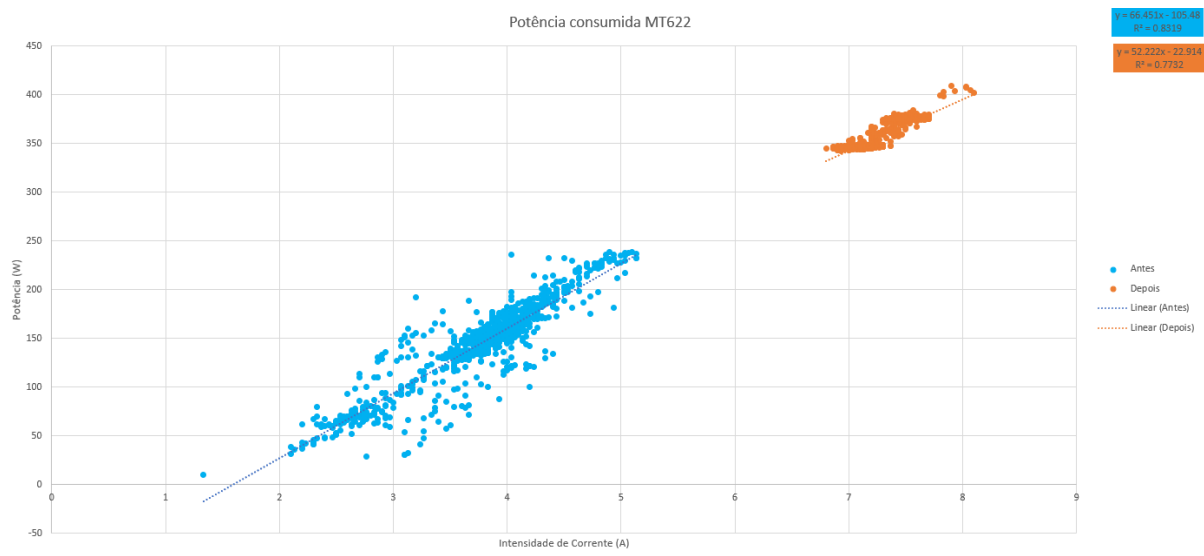


Figura 7.52 - Potência consumida pelo MT622 antes e depois da manutenção

7.4 Processo de Avaliação de Eficiência Energética Aplicado

O procedimento utilizado no estudo começou pela recolha de valores de consumo energético um mês antes da data prevista da manutenção, utilizando um analisador de energia do tipo C.A. 8333, que é um analisador de energia trifásico simplificado, da CHAUVIN ARNOUX apresentado na Figura 7.53.



Figura 7.53 - C.A. 8333 Simplified Three-phase power analyser

Foram efetuadas leituras em 7 equipamentos, com uma duração entre 45min a 1h durante o horário de funcionamento normal da linha. A leitura foi efetuada durante o período indicado de forma a se poder ter em consideração variações de produtividade que causassem variações de peso nas linhas de produção que por sua vez resultam em variações de consumo dos equipamentos.

Após recolher os dados pré manutenção, estes foram retirados das linhas de produção e transportados para a sede da SEW-EURODRIVE em Portugal e sujeitos ao processo descrito anteriormente.

Por fim repete-se o processo de recolha de dados para cálculo da eficiência energética para cada um dos equipamento após manutenção.

As leituras foram efetuadas da forma acima descrita pois, a potência consumida por estes equipamentos é variável, dependendo da potência exigida à saída, ou seja, a intensidade de corrente fornecida varia conforme a velocidade que o tapete precisa, o que significa que antes e depois da manutenção a potência exigida à saída dos equipamentos é sempre a mesma sendo que a potência à entrada terá que variar para manter essa mesma potência tendo em conta o rendimento do motorreductor em causa, o que significa, se os equipamentos tiverem maiores perdas de potência antes da manutenção então para garantir a mesma velocidade e carga ao tapete antes da manutenção irá ter que ser fornecida uma maior corrente que depois da manutenção.

Este equipamento consegue fornecer um melhor entendimento da qualidade de rede elétrica. É muito utilizado em manutenção preditiva e corretiva e também é utilizado para

efetuar auditorias energéticas em instalações. É adequado para aplicações até 1000 V em CATIII e 600 V em CATIV [118].

De modo a efetuar as leituras dos equipamentos montou-se o C.A. 8333 com medidores de corrente e tensão conforme apresentado na Figura 7.54.



Figura 7.54 - Montagem para medição do consumo elétrico de um motorreductor

7.5 Análise dos Problemas Identificados

Na empresa em estudo, os equipamentos são levados muitas vezes ao limite, como é realçado pelo estado dos equipamentos recebidos pela SEW-EURODRIVE na Mealhada. Após analisar a manutenção efetuada na empresa, pode-se concluir que embora existam planos para a gestão da manutenção destes equipamentos, os processos definidos por vezes não implementados, devido à elevada pressão da produção, resultando em falta de tempo para paragens de manutenção, com algumas exceções. A manutenção na empresa cliente baseia-se muito por manutenção corretiva e alguma manutenção preventiva, mas esta pode não ser útil, caso não seja mantido um histórico minucioso da manutenção de cada equipamento e não sejam sempre identificados todos os elementos/componentes trocados após atividades de manutenção corretiva. Embora exista um *software* de gestão de manutenção na empresa, este não é usado a toda a sua capacidade e não é atualizado com a devida consistência.

Os equipamentos examinados apresentaram diversas falhas, onde várias destas eram recorrentes. Começando por analisar os motores recebidos começa-se por ver que três destes equipamentos foram beneficiados, por empresas não certificadas, e outro equipamento foi rebobinado e apresentava queimaduras no rotor. A análise feita aos equipamentos encontrou possíveis falhas nos motores. Estas falhas foram internas ao motor, conforme definido no

subcapítulo 3.2, sendo estas falhas na chumaceira de rolamento e excentricidade estático ou dinâmica, em alguns dos equipamentos aparenta também ter havido falhas de fontes externas, nomeadamente montagem errada que pode ter resultado nas infiltrações no estator. Além disso alguns dos motorreductores apresentavam sujidade no ventilador o que pode contribuir para o mau funcionamento do equipamento devido a sobreaquecimento, provocando perdas de eficiência, é de notar que o equipamento MT9 cujo rotor apresentava marcas de queimadura, apresentava bastante sujidade, podendo ser este um fator externo que contribuiu para o surgimento da falha. Em última análise, os freios em alguns dos equipamentos apresentavam desgaste acentuado.

Associados aos motores encontram-se os acoplamentos elásticos, onde dos sete equipamentos encontravam-se cinco com o anel excêntrico desfeito ou partido e um com o mesmo extremamente desgastado. As possíveis causas para a fratura destes componentes podem estar associadas à falta de manutenção ou à degradação do mesmo ou do desalinhamento. Sem o componente elástico o contacto entre o cubo de cada lado do acoplamento resultou no dano deste elemento, sendo que o MT79 apresentava dano severo. Adicionalmente havia veios ocultos com danos na extremidade, possivelmente, provocados num processo de manutenção anterior.

As rodas dentadas apresentavam sinais de desgaste em todos os equipamentos, com alguns motorreductores a apresentar falhas mais acentuadas. Em grande parte dos equipamentos encontra-se desgaste da superfície que pode ter derivado de carregamentos não uniformes ao longo da superfície do dente, despoletados de desalinhamentos. Também se pode observar *pitting* em diversas das superfícies dos dentes, onde grande parte das rodas que foram afetadas por este fenómeno eram as rodas coroa, o que, como referido no subcapítulo 3.3, este fator não apresenta grande influência sobre o rendimento neste componente. O *pitting* apresentado era principalmente do tipo corrigível e normal uma vez que não houve fissuras muito profundas e também não ocorreu *spalling*, com a exceção do MT79. As falhas apresentadas podem estar associadas ao desalinhamentos dos veios e ao estado do lubrificante, que será analisado em mais pormenor ainda neste capítulo.

As chumaceiras de rolamento também apresentavam desgaste nos anéis externos o que os levou a ficarem fora das tolerâncias, que por sua vez pode ter causado danos nas caixas dos mesmos. Adicionalmente, os elementos que incorporavam retentores, apresentavam lubrificante desgastado no interior da chumaceira de rolamento. Também foram observados casos em que as gaiolas das chumaceiras de rolamento se encontravam partidas. Conforme explicado no subcapítulo 3.4, este tipo de falhas é derivado de desalinhamentos e de má lubrificação. Os fatores que possivelmente resultaram no surgimento de falhas nas chumaceiras de rolamento podem também ter prejudicado os retentores e ter originado as falhas nos retentores

e que estes desgastassem os veios em que estavam montados, que por sua vez pode ter causado infiltrações no motor.

Por fim verificou-se que a lubrificação dos equipamentos, que em todos os casos apresentava lubrificante em mau estado, sendo que as causas podem derivar da falta, dos períodos de troca do mesmo podem não ser os adequados para as condições de funcionamento do equipamento, o lubrificante pode não ser o mais adequado para a aplicação ou o desgaste dos diversos componentes pode ter contribuído para a contaminação do mesmo.

7.6 Análise da avaliação energética

Feita a análise das falhas encontradas, passa-se agora à análise da evolução da potência consumida pelos equipamentos, apresentados anteriormente, com base nas falhas encontradas em cada motorreductor. A análise foi feita através dos gráficos, apresentados no subcapítulo 7.3 e da aplicação da Equação 7.2.

$$G = \frac{y_a(x) - y_d(x)}{y_a(x)} \times 100 \quad \text{Equação 7.2}$$

Onde:

G – Ganhos, %;

y_d – Valor de potência consumida após a regressão linear dos consumos depois da manutenção, W;

y_a – Valor de potência consumida após a regressão linear dos consumos antes da manutenção, W;

x – Corrente, A.

Os resultados da aplicação da Equação 7.1 são apresentados no Anexo C, onde se pode observar a verde as intensidades de corrente em comum, a que as leituras foram feitas antes e depois da manutenção.

No caso do motorreductor MT3, que apresentava falhas num estado mais inicial, a variação da potência consumida não foi extrema, o seu consumo energético, representado na Figura 7.10, apresenta uma redução ligeira para correntes mais elevadas. Sendo que entre os valores de 6 a 11 A obtiveram-se ganhos de aproximadamente 4%.

A variação da potência consumida pelo motorreductor MT7, representada na Figura 7.16, embora este apresente algumas das falhas num estado mais avançado, nomeadamente nos retentores e nas chumaceiras de rolamento, apresenta apenas uma pequena redução na potência consumida para valores mais baixos de corrente com tendência para aumentar para valores

maiores de intensidade de corrente. Sendo que a potência consumida após regressão linear apresenta valores de ganhos entre 3 e 7% para os valores de corrente entre 4 e 5 A.

No caso do MT9, embora o equipamento apresentasse desgaste nas engrenagens, nomeadamente no sem-fim, que como referido no subcapítulo 3.3, não tem um efeito relevante no seu funcionamento, também apresentava o lubrificante muito degradado e o rotor com sinais de sobreaquecimento. No caso da potência consumida pelo MT9, representada na Figura 7.23, não apresenta ganhos significativos para valores mais baixos de intensidade de corrente, mas apresenta uma tendência para ganhos significativos para valores mais elevados de corrente.

O MT13 por sua vez, não apresenta um desgaste e/ou danos mais acentuado que os equipamentos anteriores, com a exceção de dano na extremidade do veio oco, possivelmente resultado de manutenção inadequada, e *pitting* na roda 2, apresentado na Figura 7.25. Este equipamento apresentou melhorias, representadas na Figura 7.30, para intensidades de corrente mais baixas, aproximadamente 1%, com uma tendência de melhorias para correntes mais elevadas.

Em seguida o MT79, apresentava vincos nas zonas de contato dos retentores dos veios, lubrificante degradado e danos na roda coroa e dano severo no acoplamento, o que resultou numa grande melhoria da potência consumida. Esta melhoria obtida com a manutenção é evidente, na Figura 7.39, para valores de corrente superiores a 4 A, enquanto para valores abaixo desta intensidade de corrente mantêm-se relativamente inalterados. Pela comparação dos valores após as regressões lineares obtiveram-se ganhos de aproximadamente 50% em toda a gama de correntes. É de realçar que a distribuição apresentada nos valores medidos antes da manutenção é semelhante às curvas de perdas de potência apresentadas para retentores, Figura 4.6, para lubrificantes, Figura 4.10, e rolamentos, Figura 4.3.

O equipamento MT96 apresentou apenas uma ligeira melhoria no consumo, embora apresente uma tendência para que esta diferença aumente consideravelmente para valores de corrente mais elevados, como representado na Figura 7.46. Pela comparação dos valores obtidos após a regressão linear das duas situações obteve-se melhorias de 2,6 a 7,4% para valores entre 4 e 15 A. É de notar que este equipamento apresentava desgaste acentuado, sendo que a roda coroa apresentava-se com desgaste não uniforme elevado e com o escatel partido, lubrificante extremamente degradado e com a bobine do freio queimada.

Por fim o motorreductor MT622, apresentou tendências de melhoria, na Figura 7.52, para valores de intensidade de corrente acima de 5.8 A onde os resultados após a regressão linear apresentam uma melhoria mais acentuada dos consumos, uma vez que os ganhos tendem para 15% para valores de 15 A. Este equipamento não apresentava desgaste extremamente acentuado, com a exceção do veio oco danificado na extremidade, possivelmente de manutenção inadequada, e do anel excêntrico se encontrar partido.

Resumindo os resultados de potência consumida, como esperado, da teoria, surgiram melhorias no consumo dos equipamentos após a manutenção, em alguns casos de forma mais evidente que outros, as falhas comuns nos equipamentos que apresentaram as melhorias mais significativas foram danos nos veios e acoplamentos. Na realidade o que se pode observar de forma mais evidente foi que tal como apresentado, do capítulo 4, as perdas de potência foram mais evidentes para intensidades de corrente maiores e menos evidentes para intensidades de corrente mais baixas. Adicionalmente também se pode observar que, como indicado pela teoria, desgaste na roda coroa e no sem-fim não resultaram nas perdas mais relevantes, mesmo no caso mais extremo do MT96.

Adicionalmente foram também feitas análises pela SEW-EURODRIVE, apresentadas no Anexo D, onde se pode observar o consumo de dois dos equipamentos ao longo do tempo, antes e após a manutenção.

7.7 Propostas de Melhoria

Através da análise feita nos subcapítulos anteriores, podem-se perceber as principais razões de falha dos equipamentos e os fatores que mais afetaram as perdas de potência nos equipamentos em estudo. Deste modo apresentam-se em seguida sugestões para a empresa melhorar a vida útil dos seus equipamentos e a sua eficiência energética.

A primeira sugestão passa pela atualização dos históricos de manutenção, registrando as ocorrências de falhas e a duração da respetiva manutenção, no sistema informático já existente, mas não usado regularmente, este registo pode ser efetuado pelos técnicos de manutenção ou pelos operadores dos equipamentos da linha, no âmbito de manutenção de nível 1 e 2, sendo que o hábito pode ser introduzido através da introdução de rotinas de inspeção no início e no fim de cada turno. Deste modo possuirão dados suficientes para avaliar a eficácia dos serviços e atividades de manutenção a que os equipamentos são sujeitos e através da utilização de KPI's, como MTBF, MTTR, D (disponibilidade intrínseca) e λ (taxa de avarias) poderão avaliar a sua eficácia, com base em custos a longo prazo. Adicionalmente sugere-se que se façam leituras, semelhantes às que foram apresentadas neste estudo, de forma a perceber os benefícios da manutenção em cada prestador de serviços.

Em seguida, com base nos resultados do método de Ipinza, Anexo E, obtidos através de observação direta e das reuniões com os técnicos e Engenheiros, e com base na análise efetuada a cada equipamento, determinou-se que é importante aplicar manutenção preditiva ou preventiva mais cuidada nos motores, nas engrenagens e no lubrificante, caso esta já seja aplicada aconselha-se a experimentar novos métodos ou uma reavaliação da periodicidade destas inspeções e que sejam efetuados estudos em relação à aplicabilidade do tipo de lubrificante usado nas condições de trabalho dos equipamentos. Para os restantes componentes considera-

se que também se deve aplicar manutenção preventiva embora não seja tão importante, mas com base na análise das falhas aconselha-se que também se aplique manutenção preditiva ou preventiva mais cuidada nos retentores e acoplamentos.

Com base na análise feita aos equipamentos e ~~noseom-os~~ resultados das leituras dos consumos energéticos considera-se relevante rever os processos de manutenção aplicados localmente e por terceiros, uma vez que a montagem dos equipamentos não cumpre, em alguns casos, as instruções do fabricante o que resulta em danos a componentes e desalinhamentos que por sua vez resultam no desgaste acentuado dos restantes componentes, que consequentemente leva à troca prematura ou desnecessária de peças, o que envolve custos elevados não só a curto prazo como também durante todo o período em que estes se encontram em funcionamento com as falhas, uma vez que estas causam consumos mais elevados.

Adicionalmente poderia ser benéfico de um ponto de vista económico, com base na teoria, a empresa estudar a opção de alterar o óleo mineral, que utiliza nos motorreductores, por óleo sintético, que embora tenha um custo mais elevado, que em muitos casos corresponde aproximadamente ao dobro do valor, tendem a ter vidas úteis muito superiores e durante esse período apresentam uma maior eficiência.

No caso da manutenção efetuada pela SEW-EURODRIVE, consegue-se garantir que a montagem dos equipamentos é efetuada da forma mais próxima a comprar um equipamento novo, uma vez que os equipamentos após serem processados e preparados para remontagem, são enviados para a linha de montagem onde é efetuada a montagem de equipamentos novos, garantido o cumprimento das tolerâncias de montagem.

7.8 Discussão de Resultados

A empresa em estudo não mantém todos os registos de manutenção atualizados, com aplicação de procedimentos de manutenção mais rígidos, de forma a forçar as equipas de manutenção a registar todos os incidentes, promoverá o aumento de dados recolhidos sobre os equipamentos. Assim, com a atualização do histórico de manutenção, com o registo de falhas e com o registo dos períodos de paragens e períodos de bom e mau funcionamento, pode-se aplicar os KPI's apresentados, anteriormente, e perceber como reduzir os períodos de não funcionamento, bem como escolher prestadores de serviços de manutenção mais adequados e melhorar a vida útil dos equipamentos. É de realçar que aplicação de procedimentos não será suficiente, mas garantir que estes registos são atualizados (por exemplo: através da criação de rotinas de análise) durante um longo período é de extrema importância uma vez que a evolução dos KPI's apresenta respostas mais importantes.

Uma vez que o método de Ipinza, ou outro método semelhante, não era aplicado na empresa, não se aplicava a manutenção adequada a certos componentes, com a aplicação deste

método revela-se a importância da aplicação da manutenção preditiva ou preventiva mais adequada, no lubrificante, no motor, nos rolamentos e nos retentores garante-se que os equipamentos não chegam ao estado apresentado no subcapítulo 7.3 e pode-se poupar os restantes componentes de sofrerem degradação, evitando possíveis fugas de lubrificante ou desalinhamentos, que por sua vez resultam em reduções de eficiência dos motorreductores.

É também de extrema importância a revisão das atividades de manutenção, uma vez que os equipamentos apresentavam falhas derivadas do processo de manutenção, como danos na extremidade do veio oco, apresentado na Figura 7.24. Ao garantir que esta é efetuada de forma correta, impedem-se desalinhamentos e danos derivados do processo e consequentemente previnem-se perdas monetárias derivadas de componentes que têm de ser substituídos desnecessariamente e a redução de eficiência dos equipamentos.

Os resultados das leituras de consumos energéticos, apoiam o que é esperado da literatura apresentada no capítulo 4, que as perdas eram mais acentuadas ocorrem para velocidades de rotação maiores, uma vez que os ganhos mais relevantes tendiam a ser para valores de intensidade de corrente mais elevados. Adicionalmente os resultados obtidos não apresentam ganhos elevados para equipamentos com desgaste no parafuso sem-fim e na roda coroa, apoiando o que foi apresentado no subcapítulo 3.3, que o desgaste destes componentes não afeta de forma muito significativa o seu funcionamento adequado. É de realçar que embora ganhos de 1%, em alguns equipamentos, pareçam baixos quando comparados com os ganhos de 50% do MT79, que esta redução a longo prazo, resultará em reduções de consumos de energia bastante elevados. É de realçar também que a montagem dos equipamentos antes e após a manutenção não foi inspecionada, tornando possível este fator ter alguma influência nos resultados obtidos.

Ao longo do estudo foram encontradas algumas dificuldades, sendo que as principais foram a falta de informação sobre avarias e atividades de manutenção nos equipamentos no caso de estudo, o que impedia a realização de um histórico de manutenção. Durante as leituras de consumos energéticos, houve alguma inconsistência na produção de bebidas, devido a avarias esporádicas na linha, entre outros fatores, que comprometiam as leituras feitas, sendo que algumas das leituras têm um menor número de dados que as suas equivalentes antes ou depois da manutenção, embora se tenham repetido leituras para se poder obter mais dados. Por fim, também não foi possível acompanhar a manutenção efetuada pela SEW-EURODRIVE desde o momento de receção dos equipamentos, mas apenas quando estes já se encontravam desmontados, embora esta dificuldade tenha sido mitigada devido às análises feitas pelos técnicos.

Com o aumento das preocupações com as alterações climáticas e com a escassez de recursos naturais, o tópico da eficiência energética torna-se cada vez mais relevante, uma vez que a produção de energia embora seja um fator importante para um futuro melhor, a forma como a usamos também é pertinente. Aproveitar ao máximo a energia produzida pelas novas tecnologias é um passo que a humanidade deve dar em direção à sustentabilidade energética.

Neste contexto, a manutenção é um fator importante, uma vez que diminuir as fontes de perdas de rendimento em equipamentos está diretamente ligado à aplicação de uma manutenção adequada. A aplicação adequada da manutenção em empresas não só apoia na redução de custos energéticos, como também aumenta a vida útil dos equipamentos, reduzindo os custos de manutenção a longo prazo e evita reduções ou paragens na produção.

Os equipamentos analisados neste estudo foram motorreductores. Estes equipamentos desempenham um papel importante em inúmeras indústrias para controlar a velocidade e o binário de motores elétricos. Sendo este um dos equipamentos mais usados, qualquer melhoria/pioria no seu rendimento tem um efeito relevante nos consumos das empresas.

Neste âmbito, a SEW-EURODRIVE, sendo uma empresa líder de mercado na indústria de motorreductores, em Portugal, e uma empresa que se preocupa com o rendimento dos seus equipamentos durante o projeto e após a venda, oferecem uma variedade de serviços de manutenção para apoiar os equipamentos muito tempo depois destes serem vendidos. No seguimento da dissertação do Engenheiro Pedro Figueiredo surgiu a temática do estudo em colaboração com a SEW-EURODRIVE. O intuito deste estudo foi desenvolver um modelo e um procedimento, para a sua aplicação, que apoiassem empresas na determinação do rendimento de motorreductores. Também se pretendia desenvolver um estudo de caso onde fossem analisados os consumos energéticos de equipamentos antes e depois da sua manutenção e as falhas que causaram estas perdas.

O objetivo inicial da dissertação pretendia desenvolver um estudo de caso aos motorreductores que compõem uma linha de lavagem e enchimento de garrafas para bebidas, onde foi realizada uma avaliação do consumo energético dos equipamentos antes e depois de atividades de manutenção na SEW-EURODRIVE Portugal. Durante este processo foi efetuada uma

análise das falhas encontradas nos equipamentos. Dentro das falhas encontradas, foram encontrados danos resultantes de manutenção inadequada ou falta da mesma, devido à elevada degradação de elementos consumíveis. A análise dos consumos levou a concluir que as falhas que mais afetavam o rendimento dos equipamentos eram danos nos veios e acoplamentos. Os ganhos provenientes das atividades de manutenção apresentaram valores de melhoria de 1 a 50% do consumo, para uma variedade de velocidades de rotação. É importante destacar que, embora um aumento de 1% em alguns equipamentos possa parecer baixo em comparação com ganhos de 50%, mesmo uma pequena melhoria, ao longo do tempo terá resultados bastante perceptíveis nos consumos desses equipamentos.

Com o decorrer do estudo surgiu também o interesse em desenvolver um modelo para avaliar a eficiência dos equipamentos durante a sua vida útil através de dados disponibilizados pelos fabricantes dos diferentes componentes ou de estudos de eficiência sobre os diferentes componentes. Sobre este modelo foi desenvolvido um procedimento que permite avaliar o rendimento de motorreductores, que foi por sua vez aplicado à gama de motorreductores em estudo.

Durante o processo de caracterização da manutenção na empresa foram encontradas diversas falhas na gestão da manutenção, nesse sentido foram também apresentadas propostas de melhoria que implicam a monitorização de KPI's como MTBF e MTTR, e a utilização do método de Ipinza para apoiar na gestão da manutenção destes equipamentos. Com base na análise das falhas e dos consumos energéticos, também foram feitas sugestões em relação a utilização de lubrificantes diferentes e a reavaliação das atividades de manutenção.

Os contributos desta dissertação podem ser sumarizados em três vertentes principais. Por um lado, o modelo e o procedimento desenvolvidos, podem ser facilmente adaptados a outras gamas de motorreductores e equipamentos nas diversas indústrias, para a fácil avaliação do rendimento dos equipamentos por parte das empresas. Por outro lado, as análises e as conclusões retiradas, mostram os benefícios da manutenção adequada mesmo em motorreductores de menor dimensão. Sendo que estes resultados podem ser utilizados para mostrar a importância da manutenção para melhorar a sustentabilidade das empresas e reduzir custos a longo prazo. As sugestões feitas à empresa do estudo de caso, servem para apoiar a melhoria da sua gestão de manutenção e para redução de custos a longo prazo.

Em conclusão sugerem-se trabalhos futuros onde se pode aplicar a metodologia de avaliação de consumos energéticos a outras linhas da mesma empresa e outras indústrias, em várias situações, de forma a obter uma maior variedade de resultados, ou durante períodos mais longos em equipamentos com cargas menos variáveis e equipamentos de maior dimensão e com motores de maior potência onde os resultados serão mais evidentes. Também seria útil aplicar o modelo e o procedimento desenvolvidos em outros equipamentos e indústrias e validar o resultado com testes experimentais. Por fim poder-se-ia desenvolver também uma

ferramenta que ajudasse no cálculo do retorno do investimento dos serviços de manutenção efetuados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Cabral, "Ser Inteligente na era da manutenção inteligente," *Manutenção n° 142/143*, pp. 44–46, 2019.
- [2] European Commission No 640, "Commission Regulations (EC) No 640/2009 of 22 July 2009 implementing Directive 2005/32/EC with regard to ecodesign requirements for electric motors and No 4/2014 of 6 January 2014 amending Regulation (EC) No 640/2009," 2009.
- [3] A. Almeida, J. Fong, P. Fonseca, and F. J. T. E. Ferreira, "EUP Lot 11 Motors," *ISR - University of Coimbra*. Feb. 18, 2008.
- [4] P. N. Figueredo, H. V. G. Navas, and D. F. N. Braga, "Estudo da Influência da Manutenção na Eficiência Energética de Acionamentos Eletromecânicos SEW-EURODRIVE Portugal," *Faculdade de Ciências e Tecnologia*. Sep. 2015.
- [5] J. Moubray, *Reliability-centered maintenance*, 2nd ed. New York: Industrial Press INC., 1999.
- [6] P. G. D. Ramos, F. M. B. C. Santos, and C. M. P. Cabrita, "Organização e Gestão da Manutenção Industrial Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial," *Universidade da Beira Interior*. Oct. 2012.
- [7] H. Navas, "Modelos e Filosofias da Manutenção," *School of Science and Technology*. 2023.
- [8] A. M. Al-Shayea, "Maintenance Definition," *King Saud University*. 2007.
- [9] D. Braga, "Manutenção de acionamentos eletromecânicos," *Robótica n° 88*, 2013.
- [10] F. Trojan and R. F. M. Marçal, "Proposal of Maintenance-types Classification to Clarify Maintenance Concepts in Production and Operations Management," *Journal of Business and Economics*, vol. 8, no. 7, pp. 560–572, 2017, doi: 10.15341/jbe(2155-7950)/07.08.2017/005.
- [11] GIAGI, "Gestão da Manutenção e Disponibilidade dos Equipamentos," *Manual Formando*, no. 0. Aveiro, Nov. 2005.
- [12] F. S. Nowlan and F. H. Howard, "Reliability-Centered Maintenance," *U.S. Department of Commerce*. Dec. 29, 1978.
- [13] National Aeronautics and Space Administration, "RCM GUIDE RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE GUIDE For Facilities and Collateral Equipment," Sep. 2008.
- [14] G. G. Antony, "How to Determine the MTBF of Gearboxes," *Power Transmission Engineering*, pp. 32–37, Apr. 2008.

- [15] W. Torell and V. Avelar, "Mean Time Between Failure: Explanation and Standards," *APC by Schneider Electric*, 2010.
- [16] S. Speaks, "Reliability and MTBF Overview," *Vicor Reliability Engineering*. 2016.
- [17] T. Palmeira, H. Navas, and T. Morgado, "LEAN MAINTENANCE MANAGEMENT ACTIVITIES IN AN OIL TERMINAL: CASE STUDY," in *M2D'2015*, 6th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Jul. 2015.
- [18] L. Pires, "Manutenção na Indústria 4.0," *Manutenção 138/139*, pp. 54–55, 2018.
- [19] G. Longo, "Aplicar tecnologia de monitorização baseada na condição ajuda a indústria a reduzir o tempo de inatividade e o TCO," *Manutenção 146/147*, 2020.
- [20] Equinotec, "A Indústria 4.0 na Manutenção," *Manutenção 138/139*, pp. 62–63, 2019.
- [21] SEW-EURODRIVE, "Configurador de produtos," SEW-EURODRIVE Brasil. Accessed: Sep. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.sew-eurodrive.com.br/os/catalog/products/drives/acgearmotor/default.aspx?language=pt_br&country=BR
- [22] SEW-EURODRIVE, "Redutores industriais da série P," SEW-EURODRIVE. Accessed: Sep. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.sew-eurodrive.pt/produtos/redutores_industriais/redutores_planetarios/redutores_planetarios_p/redutores_planetarios_p.html
- [23] SEW-EURODRIVE, "Redutores cónicos da Série K," SEW-EURODRIVE. Accessed: Sep. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.sew-eurodrive.pt/produtos/redutores/redutores_standard/redutores_conicos_k/redutores_conicos_k.html
- [24] Electrical Technology, "Types of Electric Motors - Classification of AC, DC & Special Motors," electricaltechnology.org. Accessed: Jun. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.electricaltechnology.org/2021/01/types-of-electric-motors.html>
- [25] A. Hughes, *Electric Motors and Drives*, 3rd ed. Elsevier, 2006.
- [26] SEW-EURODRIVE, "AC motors, asynchronous motors," SEW-EURODRIVE. Accessed: Jun. 29, 2023. [Online]. Available: https://www.sew-eurodrive.de/products/motors/ac_motors/ac-motors-asynchronous-motors.html
- [27] Instituto Metr pole Digital, "Motor com rotor tipo gaiola de esquilo," Metr pole Digital. Accessed: Jul. 03, 2023. [Online]. Available: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/58/4/3>
- [28] Eletrical Technology, "Diferen as entre motores el tricos CA e CC," Eletrical Technology. Accessed: Feb. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.electricaltechnology.org/2020/06/difference-between-ac-dc-motor.html>
- [29] P. Jayaswal, A. K. Wadhvani, and K. B. Mulchandani, "Machine fault signature analysis," *International Journal of Rotating Machinery*, Jan. 2008, doi: 10.1155/2008/583982.
- [30] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-phase Squirrel-Cage Induction Motors," Jul. 1992.

- [31] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors - A review," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4. pp. 719–729, Dec. 2005. doi: 10.1109/TEC.2005.847955.
- [32] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 1. pp. 106–114, Mar. 2005. doi: 10.1109/TEC.2004.837304.
- [33] A. Bonnett and C. Yung, "Increased efficiency versus increased reliability," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 29–36, Jan. 2008, doi: 10.1109/MIA.2007.909802.
- [34] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "IA-22."
- [35] A. Patel and E. Trader, "Six common reasons why electric motors fail," *Plant Engineering*. Jul. 31, 2018. Accessed: May 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.plantengineering.com/articles/six-common-reasons-why-electric-motors-fail/>
- [36] A. J. Bazurto, E. C. Quispe, and R. C. Mendoza, "Causes and Failures Classification of Industrial Electric Motor," *IEEE*. 2016.
- [37] S. Bindu and T. Vinod, *Diagnoses of Internal Faults of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor - A Review*. IEEE, 2014.
- [38] A. Lebaroud and G. Clerc, "Classification of induction machine faults by optimal time-frequency representations," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4290–4298, 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.2004666.
- [39] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 1. pp. 106–114, Mar. 2005. doi: 10.1109/TEC.2004.837304.
- [40] J. R. Davis, *Gear materials, properties, and manufacture*. ASM International, 2005.
- [41] R. Errichello, "How to analyze gear failures," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, pp. 35–40, Apr. 1994, doi: 10.1007/bf02715492.
- [42] Rexnord, "Failure analysis Gears-Shafts-Bearings-Seals," *Rexnord*, pp. 1–20, Aug. 1978.
- [43] O. Asi, "Fatigue failure of a helical gear in a gearbox," *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, no. 7. pp. 1116–1125, Oct. 2006. doi: 10.1016/j.engfailanal.2005.07.020.
- [44] R. L. NORTON, "Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada." Bookman, 2004.
- [45] WRH manutenção preditiva, "Casos Práticos exclusivos diagnosticados e catalogados pela WRH," WRH manutenção preditiva. Accessed: Sep. 09, 2023. [Online]. Available: <http://www.wrhpreditiva.com.br/Engrenagem.htm>
- [46] SKF, "Bearing self study guide," *Bearing Installation and Maintenance Guide*. 2008.
- [47] NTN, "ROLLING BEARINGS HANDBOOK," 2015.

- [48] SKF, "Componentes e materiais," SKF. Accessed: Jul. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/general-bearing-knowledge/bearing-basics/components-and-materials>
- [49] A. Fletcher, "The ACORN Bearing Compendium: Everything you need to know about bearings, Part 1." Accessed: Jun. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.acorn-ind.co.uk/insight/the-acorn-bearing-compendium-everything-you-need-to-know-about-bearings-part-1/>
- [50] D. E. Nourse, "Electric motor failure - A comparative study of its causes," *IEEE 68C6-EI-85*. Dec. 1968.
- [51] H. Peng, H. Zhang, Y. Fan, L. Shangguan, and Y. Yang, "A Review of Research on Wind Turbine Bearings' Failure Analysis and Fault Diagnosis," *Lubricants*. Dec. 31, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants11010014>.
- [52] M. T. Lobo, "Ruídos em mancais de rolamento: Quais as causas? Como proceder?," Portal Lubes. Accessed: Sep. 09, 2023. [Online]. Available: <https://portallubes.com.br/2019/02/ruidos-em-mancais-de-rolamento/>
- [53] M. Organisciak, P. Baart, S. Barbera, A. Paykin, and M. Schweig, "Theoretical and Experimental Study of the Frictional Losses of Radial Shaft Seals for Industrial Gearbox," *Power Transmission Engineering*, pp. 58–63, Jun. 2015.
- [54] C. R. Brooks and A. Choudhury, *Metallurgical failure analysis*, 1st ed. McGraw-Hill, 1992.
- [55] A. H. Bonnett, "Root Cause AC Motor Failure Analysis with a Focus on Shaft Failures," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 36, no. 5. 2000.
- [56] A. H. Bonnett, "ROOT CAUSE A.C. MOTOR FAILURE ANALYSIS," *IEEE Paper nº PCIC-99-06*. pp. 85–97, 1999.
- [57] T. J. Barnish, M. R. Muller, and D. J. Kasten, "MOTOR MAINTENANCE: A SURVEY OF TECHNIQUES AND RESULTS," *State University of New Jersey*. pp. 287–298, Dec. 1997.
- [58] Abecom, "Acoplamentos Industriais: Para que servem? Quais os tipos? - Guia Completo," Abecom. Accessed: Jul. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.abecom.com.br/acoplamentos-industriais/>
- [59] acorn, "12 Reasons for coupling failure and how to avoid them," acorn. Accessed: Jul. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.acorn-ind.co.uk/insight/12-reasons-for-coupling-failure-and-how-to-avoid-them/>
- [60] B. Boyle, "Tracking the causes of coupling failure." Accessed: Jul. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.plantservices.com/equipment/industrial-motors/article/11338572/tracking-the-causes-of-coupling-failure>

- [61] D. Lauer, "Synthetic Gear Oil Selection Guide," Machine Lubrication. Accessed: Jul. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.machinerylubrication.com/Read/167/synthetic-gear-oil>
- [62] KHK Stock Gears, "LUBRICATION OF GEARS," KHK Stock Gears. Accessed: Jul. 07, 2023. [Online]. Available: https://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear_technical_reference/lubrication-of-gears.html
- [63] VCS sales and distribution, "Gear Lubrication Methods," VCS sales and distribution. Accessed: Jul. 07, 2023. [Online]. Available: <https://vcsdistribution.com/gear-lubrication-methods/>
- [64] Beijing GEARX, "Lubrication of Gears," Beijing GEARX. Accessed: Jul. 07, 2023. [Online]. Available: http://www.gearandrack.com/gear_information/gear_lubrication/lubrication_of_gears.html
- [65] F. Concli, C. Gorla, A. Della Torre, and G. Montenegro, "Churning power losses of ordinary gears: A new approach based on the internal fluid dynamics simulations," *Lubrication Science*, vol. 27, no. 5, pp. 313–326, Aug. 2015, doi: 10.1002/lis.1280.
- [66] C. M. C. G. Fernandes, P. M. T. Marques, R. C. Martins, and J. H. O. Seabra, "Gearbox power loss. Part II: Friction losses in gears," *Tribol Int*, vol. 88, pp. 309–316, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.triboint.2014.12.004.
- [67] Mosil Lubricants, "SYNTHETIC OIL VS MINERAL OIL TECHNICAL CONCEPT," Dec. 2021. [Online]. Available: www.mosil.com
- [68] L. Ludwig, "Lubrication Selection for Enclosed Gear Drives," Machinery Lubrication. Accessed: Jul. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.machinerylubrication.com/Read/707/enclosed-gear-drives>
- [69] Petroleum Service Company, "What are Compounded Gear Oils?," Petroleum Service Company. Accessed: Jul. 07, 2023. [Online]. Available: <https://petroleumservicecompany.com/blog/what-are-compounded-gear-oils/>
- [70] Tec Mecanico, "Alinhamento," Tec Mecanico. Accessed: Sep. 09, 2023. [Online]. Available: <https://tecmechanico.blogspot.com/2011/10/alinhamento.html>
- [71] S. Jesse and J. W. Hines, "Motor Shaft Misalignment Bearing Load Analysis G-Mode-Full information acquisition in scanning probe microscopy View project Atomic-scale material control in the STEM View project," 1970.
- [72] United Nations, "The Paris Agreement," United Nations Climate Change. Accessed: Sep. 09, 2023. [Online]. Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [73] European Commission, "Acordo de Paris sobre alterações climáticas," European Commission. Accessed: Sep. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/climate-change/paris-agreement/>

- [74] Zachary Shahan, "Electric Motors Use 45% Of Global Electricity, Europe Responding (+ Electric Motor Efficiency Infographic)," CleanTechnica. Accessed: May 08, 2023. [Online]. Available: <https://cleantechnica.com/2011/06/16/electric-motors-consume-45-of-global-electricity-europe-responding-electric-motor-efficiency-infographic/>
- [75] MrHu Bo, "Electric Motors Alignment of Standards and Best Practice Programmes within APEC Final Report APEC Energy Working Group," 2008. [Online]. Available: www.apec.org
- [76] L. Szabo, J. Flavia Florina, C. Radu Daniel, and S. Loránd, "Current Trends in Energy Efficient Electrical Machines New book entitled 'SRM drives for electric traction' View project Topical Collection 'Conference Papers Collection in Sustainable Energy' View project Current Trends in Energy Efficient Electrical Machines," 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/321870312>
- [77] European Commission, "Electric motors and variable speed drives." 2021.
- [78] A. Almeida, F. Ferreira, and J. Fong, "Perspectives on Electric Motor Market Transformation for a Net Zero Carbon Economy," *MDPI*, no. Energies, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/xxxxx>.
- [79] B. Jeremic, "Energy Efficiency Through Improved Maintenance," *Tribology in industry*, vol. 27, no. 3 & 4, pp. 36–40, 2005.
- [80] European Union, "COMMISSION REGULATION (EU) 2019/1781," *Official Journal of the European Union*. pp. 74–94, Oct. 25, 2019.
- [81] A. Krings, A. Boglietti, A. Cavagnino, and S. Sprague, "Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2405–2414, Mar. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2613844.
- [82] A. Ilie, M. Bucur, S. Cananau, R. F. Mirica, and S. Gabroveanu, "Considerations concerning the power loss in a gear system," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1262, no. 1, p. 012007, Oct. 2022, doi: 10.1088/1757-899x/1262/1/012007.
- [83] R. Honkalas, B. Deshmukh, and P. Pawar, "A Review on Design and Efficiency Improvement of Worm and Worm Wheel of a Gear Motor," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Jul. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1969/1/012023.
- [84] B.-R. Hoehn and M. Hinterstoißer, "Optimization of gearbox efficiency," 2009. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228628459>
- [85] AEMT and EASA, "The Effect of Repair/Rewinding on Motor Efficiency," 2003. [Online]. Available: www.easa.com
- [86] The Engineering ToolBox, "Efficiency of Small Machine Elements," The Engineering ToolBox. Accessed: Jul. 27, 2023. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/efficiency-small-machine-elements-d_2076.html

- [87] T. A. Harris and M. N. Kotzalas, *Advanced Concepts of Bearing Technology: Rolling Bearing Analysis*, 5th ed. CRC Press, 2006. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420006582>.
- [88] M. R. D. Bălan, V. C. Stamate, L. Houpert, and D. N. Olaru, "The influence of the lubricant viscosity on the rolling friction torque," *Tribol Int*, vol. 72, pp. 1–12, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.triboint.2013.11.017.
- [89] SKF, "Atrito do rolamento, perda de potência e torque de partida," SKF. Accessed: Sep. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/operating-temperature-and-speed/bearing-friction-power-loss-and-starting-torque>
- [90] M. A. Abu-Zeid and S. M. Abdel-Rahman, "Bearing problems' effects on the dynamic performance of pumping stations," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 52, no. 3, Elsevier B.V., pp. 241–248, Jan. 13, 2013. doi: 10.1016/j.aej.2013.02.002.
- [91] M. Garcia, P. A. Panagiotou, J. A. Antonino-Daviu, and K. N. Gyftakis, "Efficiency assessment of induction motors operating under different faulty conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 10, pp. 8072–8081, Oct. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2885719.
- [92] B.-R. Hoehn and M. Hinterstoißer, "Optimization of gearbox efficiency," Jan. 2009. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228628459>
- [93] E. Buckingham, *Analytical Mechanics of Gears*. Dover Publications, 1949.
- [94] H. Ohlendorf, "Verlustleistung und Erwärmung von Stirnrädern," Fakultät für Architektur, 1958.
- [95] T. Jurkschat, T. Lohner, and K. Stahl, "Improved calculation of load-dependent gear losses by consideration of so far disregarded influences," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 233, no. 4, pp. 509–519, Apr. 2019, doi: 10.1177/1350650118766794.
- [96] RoyMech, "Gear Efficiency," RoyMech.org. Accessed: Jul. 27, 2023. [Online]. Available: https://roymech.org/Useful_Tables/Drive/Gear_Efficiency.html
- [97] J. Croes and S. Iqbal, "D2.1 Document 1: Literature Survey: gear losses," *ESTOMAD*. 2009.
- [98] SKF, "Radial shaft seals: static and dynamic performance - Friction," SKF. Accessed: Aug. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.skf.com/sg/products/industrial-seals/power-transmission-seals/radial-shaft-seals/friction>
- [99] C. Knauder, H. Allmaier, D. Sander, and T. Sams, "Measurement of the Crankshaft Seals Friction Losses in a Modern Passenger Car Diesel Engine," Jun. 2019.

- [100] S. Seetharaman and A. Kahraman, "Load-independent spin power losses of a spur gear pair: Model formulation," *J Tribol*, vol. 131, no. 2, pp. 1–11, Apr. 2009, doi: 10.1115/1.3085943.
- [101] J. Fitch, "Add Oil Circulation to Gear and Bearing Sumps for Greater Reliability," Machinery Lubrication. Accessed: Sep. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29453/circulation-gear-sumps>
- [102] T. Fondelli, A. Andreini, R. Da Soghe, B. Facchini, and L. Cipolla, "Numerical Simulation of Oil Jet Lubrication for High Speed Gears," *Hindawi Publishing Corporation*, Dec. 30, 2015.
- [103] F. Concli, C. Gorla, A. Della Torre, and G. Montenegro, "Churning power losses of ordinary gears: A new approach based on the internal fluid dynamics simulations," *Lubrication Science*, vol. 27, no. 5, pp. 313–326, Aug. 2015, doi: 10.1002/ls.1280.
- [104] H. Liu and C. Zhu, "Effects of lubrication on gear performance: A review," 2020.
- [105] J. A. Heredia-Cancino, M. Ramezani, and M. E. Álvarez-Ramos, "Effect of degradation on tribological performance of engine lubricants at elevated temperatures," *Tribol Int*, vol. 124, pp. 230–237, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.04.015.
- [106] A. Ziegltrum, T. Lohner, and K. Stahl, "TEHL simulation on the influence of lubricants on load-dependent gear losses," *Tribol Int*, vol. 113, pp. 252–261, 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2016.12.018.
- [107] PG&E, "Efficiency Opportunities through Motor Maintenance," 1997.
- [108] S. Jesse, J. W. Hines, J. Kuropatwinski, A. Edmondson, T. G. Carley, and D. Nower, "Motor Shaft Misalignment Versus Efficiency Analysis," 1970. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/2238581>
- [109] SEW-EURODRIVE, "History," SEW-EURODRIVE. Accessed: Feb. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.seweurodrive.com/company/history/history.html>
- [110] SEW-EURODRIVE, "SPIROPLAN," SEW-EURODRIVE. Accessed: Apr. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.sew-eurodrive.pt/produtos/redutores/redutores_standard/redutores_angulares_piroplan_w/redutores_angulares_piroplan_w.html
- [111] SEW-EURODRIVE, "Setores da Industria," SEW-EURODRIVE.
- [112] SEW-EURODRIVE, "Our Claim," SEW-EURODRIVE. Accessed: Feb. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.sew-eurodrive.pt/company/our_drive/corporate_principles_code_of_conduct/corporate_principles_code_of_conduct.html
- [113] SEW-EURODRIVE, "O nosso espetro de serviços," SEW-EURODRIVE. Accessed: Feb. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.sew-eurodrive.pt/empresa/o_que_nos_move/perfil_breve_da_empresa/perfil_breve_da_empresa.html

- [114] SEW-EURODRIVE, “Configurador de produtos,” SEW-EURODRIVE. Accessed: Feb. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.sew-eurodrive.pt/os/catalog/products/drives/acgearmotor/default.aspx?language=pt_PT&country=PT
- [115] SEW-EURODRIVE, “Motoredutor Série S,” SEW-EURODRIVE. Accessed: Apr. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.sew-eurodrive.pt/produtos/redutores/redutores_standard/redutores_de_parafuso_sem_fim_s/redutores_de_parafuso_sem_fim_s.html
- [116] SEW-EURODRIVE, *Instruções de Montagem e Operação*, 08/2022. 2022.
- [117] “Standard and Regulations,” in *Technical Catalogue 10-215/21*, pp. 5–10.
- [118] CHAUVIN ARNOUX, “C.A 8333.” Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: https://catalog.chauvin-arnoux.co.uk/uk_en/c-a-8333-3644.html

ANEXOS

Anexo A

Figura A.1 – Valores de eficiência para 50 Hz de acordo com IEC 60034-30-1:2014

EFFICIENCY VALUES FOR 50 HZ ACCORDING TO IEC 60034-30-1:2014

Output kW	IE1				IE2				IE3				IE4			
	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
0.12	45.0	50.0	38.3	31.0	53.6	59.1	50.6	39.8	60.8	64.8	57.7	50.7	66.5	69.8	64.9	62.3
0.18	52.8	57.0	45.5	38.0	60.4	64.7	56.6	45.9	65.9	69.9	63.9	58.7	70.8	74.7	70.1	67.2
0.20	54.6	58.5	47.6	39.7	61.9	65.9	58.2	47.4	67.2	71.1	65.4	60.6	71.9	75.8	71.4	68.4
0.25	58.2	61.5	52.1	43.4	64.8	68.5	61.6	50.6	69.7	73.5	68.6	64.1	74.3	77.9	74.1	70.8
0.37	63.9	66.0	59.7	49.7	69.5	72.7	67.6	56.1	73.8	77.3	73.5	69.3	78.1	81.1	78.0	74.3
0.40	64.9	66.8	61.1	50.9	70.4	73.5	68.8	57.2	74.6	78.0	74.4	70.1	78.9	81.7	78.7	74.9
0.55	69.0	70.0	65.8	56.1	74.1	77.1	73.1	61.7	77.8	80.8	77.2	73.0	81.5	83.9	80.9	77.0
0.75	72.1	72.1	70.0	61.2	77.4	79.6	75.9	66.2	80.7	82.5	78.9	75.0	83.5	85.7	82.7	78.4
1.1	75.0	75.0	72.9	66.5	79.6	81.4	78.1	70.8	82.7	84.1	81.0	77.7	85.2	87.2	84.5	80.8
1.5	77.2	77.2	75.2	70.2	81.3	82.8	79.8	74.1	84.2	85.3	82.5	79.7	86.5	88.2	85.9	82.6
2.2	79.7	79.7	77.7	74.2	83.2	84.3	81.8	77.6	85.9	86.7	84.3	81.9	88.0	89.5	87.4	84.5
3	81.5	81.5	79.7	77.0	84.6	85.5	83.3	80.0	87.1	87.7	85.6	83.5	89.1	90.4	88.6	85.9
4	83.1	83.1	81.4	79.2	85.8	86.6	84.6	81.9	88.1	88.6	86.8	84.8	90.0	91.1	89.5	87.1
5.5	84.7	84.7	83.1	81.4	87.0	87.7	86.0	83.8	89.2	89.6	88.0	86.2	90.9	91.9	90.5	88.3
7.5	86.0	86.0	84.7	83.1	88.1	88.7	87.2	85.3	90.1	90.4	89.1	87.3	91.7	92.6	91.3	89.3
11	87.6	87.6	86.4	85.0	89.4	89.8	88.7	86.9	91.2	91.4	90.3	88.6	92.6	93.3	92.3	90.4
15	88.7	88.7	87.7	86.2	90.3	90.6	89.7	88.0	91.9	92.1	91.2	89.6	93.3	93.9	92.9	91.2
18.5	89.3	89.3	88.6	86.9	90.9	91.2	90.4	88.6	92.4	92.6	91.7	90.1	93.7	94.2	93.4	91.7
22	89.9	89.9	89.2	87.4	91.3	91.6	90.9	89.1	92.7	93.0	92.2	90.6	94.0	94.5	93.7	92.1
30	90.7	90.7	90.2	88.3	92.0	92.3	91.7	89.8	93.3	93.6	92.9	91.3	94.5	94.9	94.2	92.7
37	91.2	91.2	90.8	88.8	92.5	92.7	92.2	90.3	93.7	93.9	93.3	91.8	94.8	95.2	94.5	93.1
45	91.7	91.7	91.4	89.2	92.9	93.1	92.7	90.7	94.0	94.2	93.7	92.2	95.0	95.4	94.8	93.4
55	92.1	92.1	91.9	89.7	93.2	93.5	93.1	91.0	94.3	94.6	94.1	92.5	95.3	95.7	95.1	93.7
75	92.7	92.7	92.6	90.3	93.8	94.0	93.7	91.6	94.7	95.0	94.6	93.1	95.6	96.0	95.4	94.2
90	93.0	93.0	92.9	90.7	94.1	94.2	94.0	91.9	95.0	95.2	94.9	93.4	95.8	96.1	95.6	94.4
110	93.3	93.3	93.3	91.1	94.3	94.5	94.3	92.3	95.2	95.4	95.1	93.7	96.0	96.3	95.8	94.7
132	93.5	93.5	93.5	91.5	94.6	94.7	94.6	92.6	95.4	95.6	95.4	94.0	96.2	96.4	96.0	94.9
160	93.7	93.8	93.8	91.5	94.8	94.9	94.8	93.0	95.6	95.8	95.6	94.3	96.3	96.6	96.2	95.1
200-1000	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4

Anexo B

Tabela B.1 – Checklist para manutenção de motorreductores

Nº de Série:

Número de CDM:

Designação do cliente:

Modelo:

<i>Equipamento</i>	<i>Componente</i>	<i>Verificação</i>	<i>Fase a analisar</i>	<i>Observações:</i>
Redutor	Cárter	Pintura oxidada	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Alojamento dos rolamentos com desgaste	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Danificado	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
	En-grenagens	Com desgaste	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Com <i>pitting</i>	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Com desgaste	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Gripadas	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Partidas	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
	Veio oco	Dano na zona dos retentores	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Escatel rebatido	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Interior fora das tolerâncias	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Marcas de desgaste	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
	Lubrificante	Nível	Pré desmontar	<input type="checkbox"/>
		Contaminado	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Escuro	Após desmontar	<input type="checkbox"/>
		Demasiado viscoso	Após desmontar	<input type="checkbox"/>

	Rolamentos			
	Com desgaste	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
	Danos nos anéis	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
	Danos nos corpos rolantes	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
	Avarias nas pistas de rodagem	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
	Contaminação	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
	Folga elevada	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
	Folga radial reduzida	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
	Lubrificação insuficiente	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
	Retentor			
	Com desgaste	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
Motor				
Estator				
	Com óleo	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Beneficiado	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Rebobinado	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Com alhetas partidas	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Danos elétricos	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Sobrecarga	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Danos mecânicos	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
Rotor				
	Com vinco na zona do retentor	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Escatel rebatido	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Marcas de desgaste	Após desmontar		<input type="checkbox"/>

		Danos mecânicos	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Caixa de terminais	Partida	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
		Com corrosão	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
		Com a placa de bornes danificada	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Guarda ventilador	Muito sujo	Pré desmontar		<input type="checkbox"/>
		Corroído	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
		Danos mecânicos	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
		Obstruções	Pré desmontar		<input type="checkbox"/>
	Freio	Bobine queimada	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
		Desgaste no disco	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
		Muito ferôdo	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
		Disco partido	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
		Folga	Pré desmontar		<input type="checkbox"/>
	Rolamentos	Com desgaste	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
		Danos nos anéis	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
		Danos nos corpos rolantes	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
		Avarias nas pistas de rodagem	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
		Contaminação	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
		Folga elevada	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
		Folga radial reduzida	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>

		Lubrificação insuficiente	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
	Retentores				
		Com desgaste	Ao desmontar		<input type="checkbox"/>
Adaptador	Veio				
		Danificado	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
		Cubo rebatido	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
		Estrela ressequida	Após desmontar		<input type="checkbox"/>
	Flange				
		Desgastada	Após desmontar		<input type="checkbox"/>

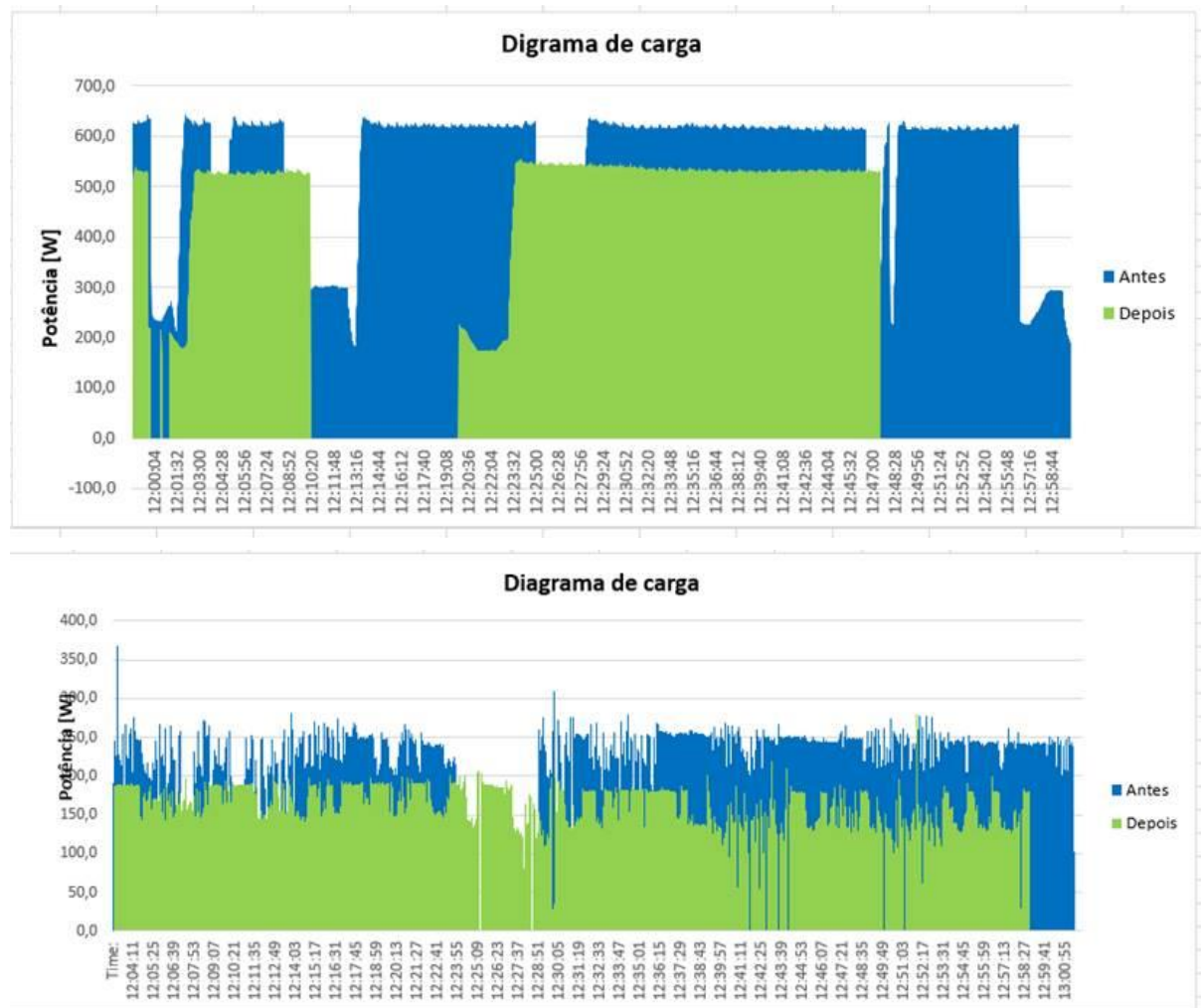
Anexo C

Tabela C.1 - Valores da variação de consumo de potência

Intensidade de corrente	MT3	MT7	MT9	MT13	MT79	MT96	MT622
1	-26.03290373	175.09288	46.614786	35.88445	149.898566	37.4463388	1.73808654
2	18.12740588	-197.316	50.432772	-17.4683	-351.26816	-21.305885	-1.2177592
3	8.381272922	-42.48186	51.243845	-0.57254	-78.121624	-1.3381133	-0.3946656
4	6.023035769	-15.99885	51.596617	2.908409	-43.065175	2.60858712	-0.2135159
5	4.961101112	-5.036269	51.793964	4.410968	-29.290654	4.29530919	-0.1340107
6	4.357054248	0.9576231	51.920061	5.248527	-21.931122	5.23115703	-0.0893428
7	3.967268968	4.7367499	52.007592	5.782566	-17.351666	5.82624359	-0.0607298
8	3.694917091	7.337232	52.071904	6.152764	-14.227281	6.23802039	-0.0408344
9	3.493876398	9.2360819	52.121154	6.424491	-11.959539	6.5398829	-0.0261994
10	3.339381492	10.683505	52.160078	6.632425	-10.238605	6.7706578	-0.014982
11	3.216944773	11.823381	52.191616	6.79667	-8.8879842	6.95281108	-0.0061102
12	3.117525924	12.744316	52.217688	6.929687	-7.7997603	7.10024432	0.00108196
13	3.035191692	13.503863	52.239601	7.039609	-6.9042365	7.22202069	0.00703029
14	2.965886671	14.141027	52.258278	7.13197	-6.1543917	7.32430144	0.01203177
15	2.906744865	14.683182	52.274385	7.210667	-5.5173523	7.41142127	0.0162958

Anexo D

Figura D.1 – Consumos de dois equipamentos ao longo do tempo



Anexo E

Tabela D.1 – Aplicação do método de Ipinza

Motor (Pontuação total 16)

Características	Estado	Pontuação
Efeito na Produção	Para	4
Valor Técnico-Económico do Equipamento	Alto	4

Prejuízo – à máquina em si	Não	0
Prejuízo – ao processo	Sim	3
Prejuízo – ao pessoal	Sem Risco	0
Dependência Logística	Local	0
Dependência de Mão-de-Obra	Terceiros	2
Probabilidade de Avaria (Fiabilidade)	Baixa	0
Facilidade de Reparação	Alta	1
Flexibilidade e Redundância	Simples	2

Acoplamentos (Pontuação total = 12)

Características	Estado	Pontuação
Efeito na Produção	Reduz	2
Valor Técnico-Económico do Equipamento	Médio	2
Prejuízo – à máquina em si	Sim	2
Prejuízo – ao processo	Não	0
Prejuízo – ao pessoal	Sem Risco	0
Dependência Logística	Estrangeiro	3
Dependência de Mão-de-Obra	Própria	0
Probabilidade de Avaria (Fiabilidade)	Alta	1
Facilidade de Reparação	Baixa	0
Flexibilidade e Redundância	Simples	2

Lubrificante (Pontuação total = 11)

Características	Estado	Pontuação
Efeito na Produção	Reduz	2
Valor Técnico-Económico do Equipamento	Médio	2
Prejuízo – à máquina em si	Sim	2
Prejuízo – ao processo	Não	0
Prejuízo – ao pessoal	Sem Risco	0
Dependência Logística	Estrangeiro	3

Dependência de Mão-de-Obra	Própria	0
Probabilidade de Avaria (Fiabilidade)	Baixa	0
Facilidade de Reparação	Baixa	0
Flexibilidade e Redundância	Simples	2

Chumaceira de rolamento (Pontuação total = 7)

Características	Estado	Pontuação
Efeito na Produção	Reduz	2
Valor Técnico-Económico do Equipamento	Baixo	1
Prejuízo – à máquina em si	Sim	2
Prejuízo – ao processo	Não	0
Prejuízo – ao pessoal	Sem Risco	0
Dependência Logística	Local	0
Dependência de Mão-de-Obra	Própria	0
Probabilidade de Avaria (Fiabilidade)	Alta	1
Facilidade de Reparação	Baixa	0
Flexibilidade e Redundância	By-Pass	1

Retentores (Pontuação total = 11)

Características	Estado	Pontuação
Efeito na Produção	Não Para	0
Valor Técnico-Económico do Equipamento	Baixo	1
Prejuízo – à máquina em si	Sim	2
Prejuízo – ao processo	Sim	3
Prejuízo – ao pessoal	Sem Risco	0
Dependência Logística	Estrangeiro	2
Dependência de Mão-de-Obra	Própria	0

Probabilidade de Avaria (Fiabilidade)	Alta	1
Facilidade de Reparação	Baixa	0
Flexibilidade e Redundância	Simple	2

Engrenagens (Pontuação total = 15)

Características	Estado	Pontuação
Efeito na Produção	Reduz	2
Valor Técnico-Económico do Equipamento	Alto	4
Prejuízo – à máquina em si	Sim	2
Prejuízo – ao processo	Não	0
Prejuízo – ao pessoal	Sem Risco	0
Dependência Logística	Estrangeiro	2
Dependência de Mão-de-Obra	Terceiros	2
Probabilidade de Avaria (Fiabilidade)	Baixa	0
Facilidade de Reparação	Alta	1
Flexibilidade e Redundância	Simple	2



2023

João Oliveira Bencael

Efeitos da Manutenção no Rendimento de Motorreductores Industriais