

Plano de manutenção preditiva para motores elétricos - Definição e implementação numa indústria de pasta de papel

Relatório de Estágio apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica -
Especialização em Sistemas de Energia

Autor

Hugo da Costa Melo

Orientador

Prof. Dr^a Cristina Agreira

Professora do Departamento de Eng. Eletrotécnica
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Supervisor

Eng. Jorge Simões

Navigator Pulp Cacia

Coimbra, novembro, 2017

*Em memória do meu avô,
Aguinaldo Armindo da Silva Melo*

Agradecimentos

Muitas pessoas fizeram parte do meu percurso académico e sem as quais não seria possível cumprir os objetivos. Não sendo possível mencioná-las todas, deixo aqui o meu agradecimento a todos os que de alguma forma me ajudaram.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra e ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica pela oportunidade de formação.

Agradeço à direção da Navigator Pulp Cacia e à direção da engenharia de manutenção pela oportunidade de realizar o estágio curricular nas suas instalações.

À Professora Doutora Cristina Isabel Ferreira Figueiras Faustino Agreira pela sua orientação e todo o apoio e conselhos dados desde o início do estágio até à elaboração do presente relatório.

Ao meu supervisor na fábrica, Engenheiro Jorge Simões, pela sua supervisão, incentivo e motivação e, acima de tudo, pela constante disponibilidade para ajudar com boa disposição, mesmo na ausência de tempo para o fazer.

A todos os colaboradores da preparação, especialmente ao Sr. Carlos Cardoso e ao Sr. Fernando Martins, da área de motores elétricos, pelo bom humor, constante disponibilidade para transmitir conhecimento e pela forma como me integraram no grupo.

A toda a engenharia de manutenção pelo apoio prestado, em particular ao Engenheiro António Ramos e Engenheiro Pedro Santos, da área da fiabilidade.

Um grande agradecimento à minha namorada, Sara Pocinho, pelo apoio e tempo que disponibilizou e pela enorme paciência e sem a qual teria um percurso académico diferente.

E uma especial gratidão aos meus pais e à minha família pela dedicação e pelo apoio que me deram desde sempre.

RESUMO

Neste mercado globalizado e em constante evolução, a concorrência é cada vez mais competitiva. Na era digital, a indústria de pasta de papel está a atravessar uma grande mudança, com a venda de papel de escritório a descer nos países desenvolvidos, mas em contrapartida sobem as vendas de papel *tissue* ao mesmo tempo que o preço de venda da pasta de alta qualidade também sobe. Assim, com os preços elevados e procura em crescimento, as paragens não programadas têm um peso cada vez mais expressivo no lucro da empresa, dando maior ênfase ao investimento em manutenção mais eficiente.

Na atual conjuntura, um plano de manutenção eficaz é a ferramenta para conseguir maior fiabilidade dos equipamentos, maior eficiência, com menos reparações e paragens de custos elevados, e assim obter mais produção e uma melhor eficiência energética, resultando na diminuição dos custos associados ao funcionamento de uma fábrica.

Tendo em conta a relevância dos motores elétricos na indústria de pasta de papel e os avanços tecnológicos, foi proposta a atualização do plano de manutenção atual para um plano de manutenção preditiva para motores elétricos com capacidade para determinar a condição dos motores e assim evitar os problemas associados com a falha destes.

Assim, foram pesquisadas as melhores práticas de manutenção e também os diversos tipos de falhas de motores elétricos que afetam a indústria. Aqui foram identificadas áreas em que a avaliação da condição pode não compensar devido ao custo-benefício. A lubrificação é uma delas e onde a definição de intervalos específicos é preferível à avaliação da necessidade de lubrificação caso a caso. Nesta área foram identificadas as maiores oportunidades de melhoria.

Da lista de mais de 1800 motores em serviço na fábrica, os de maior potência foram os selecionados, não só devido à criticidade que normalmente lhes é inerente, como à melhor relação custo-benefício na implementação de novas ferramentas, mas também devido aos cuidados e procedimentos de manutenção adicionais que normalmente já estão associados a estes motores e que por vezes acabam por ser negligenciados.

Este relatório é, portanto, uma agregação do estudo feito, dos casos de estudo presenciados assim como todo o trabalho de análise aos procedimentos e sugestões de melhoria para o plano atual.

Palavras chave: Motores elétricos, Manutenção Preditiva, Plano de manutenção, Monitorização contínua, Lubrificação.

ABSTRACT

In this globalized and constantly evolving market, competition is increasingly competitive. In the digital age, the pulp industry is undergoing a major change, with the sale of office paper coming down in developed countries, but on the other hand sales of tissue paper go up at the same time as the selling price of high quality pulp also goes up. Thus, with high prices and growing demand, unscheduled stops have an increasingly significant weight in the company's profit, giving greater emphasis to more efficient maintenance investment.

At the present juncture, an effective maintenance plan is the tool to achieve greater equipment reliability, higher efficiency, with fewer repairs and less unplanned factory stops, thus obtaining more production and better energy efficiency, resulting in the reduction of the costs associated with the operation of a factory.

Taking into account the relevance of electric motors in the pulp industry and technological advances, it was proposed to update the current maintenance plan to a predictive maintenance plan for electric motors with capacity to determine the condition of the motors and thus avoid the problems associated with their failure.

Thus, the best maintenance practices and the various types of electric motor failures affecting the industry were investigated. Here we identified areas in which the assessment of the condition may not offset due to cost-effectiveness. Lubrication is one of them and where the definition of specific intervals is preferable to assessing the need for lubrication on a case-by-case basis. In this area, the greatest opportunities for improvement were identified.

From the list of more than 1800 engines in service at the plant, the ones with the greatest power were those selected, not only due to the inherent criticality of the engines, but also because of the better cost-effective implementation of new tools, additional maintenance procedures that are usually already associated with these engines and which are sometimes neglected.

This report is, therefore, an aggregation of the study done, of the cases of study witnessed as well as all the work of analysis to the procedures and suggestions of improvement for the current plan.

Keywords: Electric motors, Predictive maintenance, Maintenance schedule, Continuous monitoring, Lubrication.

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xv
ABREVIATURAS.....	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura do Relatório.....	2
2 A Indústria da Pasta de Papel.....	3
2.1 Navigator Pulp Cacia	3
2.1.1 Motores Elétricos na Indústria de Pasta de Papel	3
2.2 Produção de Pasta de Papel - Navigator Pulp Cacia	4
2.2.1 Receção e Tratamento da Matéria-prima.....	5
2.2.2 Cozimento	5
2.2.3 Recuperação de Reagentes	5
2.2.4 Depuração e lavagem.....	6
2.2.5 Branqueamento	6
2.2.6 Secagem e Enfardamento	6
3 Manutenção - Estado de arte.....	7
3.1 Manutenção Preditiva.....	8
3.2 Manutenção e os seus Custos.....	10
3.3 Manutenção e Eficiência energética	10
3.4 Monitorização contínua	13
3.4.1 ABB Smart Sensors	14
3.4.2 InSwitch	15
3.4.3 Enging - EMS MCM.....	17
3.5 Procedimentos de manutenção preditiva em curso na Navigator Pulp Cacia.....	18
4 Enquadramento Teórico	19
4.1 Isolamento e o Armazenamento.....	19
4.1.1 Armazenamento.....	19
4.1.2 Manutenção dos rolamentos	20

4.1.3	Resistência de isolamento	20
4.1.4	Índice de Polarização e Índice de Absorção	21
4.2	Vibração.....	22
4.2.1	Vibração em motores elétricos	23
4.2.2	Principais causas mecânicas	23
4.2.3	Ferramentas de análise	24
4.3	Lubrificação de Rolamentos	25
4.3.1	Massa lubrificante	26
4.3.2	Falhas devidas à lubrificação de rolamentos.....	28
4.3.3	Degradação da massa lubrificante	30
4.3.4	Análises tribológicas	31
4.4	Temperatura.....	32
4.4.1	Monitorização contínua - PT100	32
4.5	Análise de Corrente de Motores	33
4.5.1	Qualidade de energia	33
4.5.2	Vetor de Park.....	34
4.5.3	Equipamentos de teste - PdMA MCEMAX.....	35
5	Desenvolvimento e Implementação.....	40
5.1	Prioridade na Manutenção.....	40
5.1.1	Análise de Criticidade de Equipamentos	40
5.1.2	Análise de criticidade de motores elétricos	41
5.2	Isolamento.....	41
5.2.1	Receção de motores pós reparação	41
5.2.2	Índice de Polarização e Índice de Absorção	42
5.3	Armazenamento	44
5.3.1	Condições atuais de armazenamento	45
5.4	Lubrificação	45
5.4.1	Informação dos fabricantes.....	46
5.4.2	Planos de lubrificação.....	56
5.5	Temperatura.....	64
5.5.1	Monitorização contínua na NPC.....	64
5.5.2	Termografia	66
5.6	Casos de estudo.....	68
5.6.1	Paragem Geral de 2017	68
5.6.2	Motor de Ar Secundário	73

5.6.3	Motor da Bomba Booster.....	74
5.6.4	Motor TAA2	76
5.6.5	Motor de Ar Secundário – Falha nos rolamentos	77
5.6.6	Motor de Ar Terciário.....	81
5.6.7	Monitorização da corrente de motores - MCM	83
5.6.8	Alternador da TG3	84
5.7	Ordens de manutenção.....	87
6	Conclusão	89
6.1	Síntese do trabalho	90
6.2	Desenvolvimentos Futuros.....	91
ANEXO	97
	Anexo A - <i>Template</i> de relatório de termografia	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 – Exemplo de Indústria de produção de pasta de papel (Andersson, 2017).	4
Figura 3-1 – Vários tipos de manutenção. Adaptado de (Veldman, Wortmann, & Klingerberg, 2011). 7	
Figura 3-2 – Fontes externas de falha (Bazurto, Quispe, & Mendoza, 2016).	9
Figura 3-3 – Fontes internas de falha (Bazurto, Quispe, & Mendoza, 2016).	9
Figura 3-4 – Algumas práticas de reparação (Ferreira, 2008).	11
Figura 3-5 – Influência do desequilíbrio de impedâncias na eficiência de um motor de indução (Penrose H. W., 2017).	12
Figura 3-6 – Motores com dispositivos montados na lateral da carcaça.	14
Figura 3-7 – Caixa de ligações com dispositivo InSwitch no interior (OptiSigma, 2017).	15
Figura 3-8 – Comparação da instalação estrela-triângulo para o InSwitch (OptiSigma, 2017).	16
Figura 4-1 – Exemplo de analisador de Vibrações (Bernet, 2017).	24
Figura 4-2 – Exemplo de medidor de vibrações simplificado (Bernet, 2017).	25
Figura 4-3 – Exemplo de medidor de vibrações (Bernet, 2017).	25
Figura 4-4 – Vetor de Park teórico de uma máquina em bom estado (Ourici & Ouari, 2012).	35
Figura 4-5 – Equipamento de análise PdMA MCEMAX (PdMA, 2017).	35
Figura 5-1 – Mega ohmímetro de média tensão disponível nas instalações da NPC.	42
Figura 5-2 – Gráfico da evolução da resistência de isolamento de equipamento saudável (McKinnon, 2017).	43
Figura 5-3 – Gráfico da evolução da resistência de isolamento de equipamento com humidade (McKinnon, 2017).	44
Figura 5-4 – Gráfico da evolução da resistência de isolamento de equipamento com contaminação severa (McKinnon, 2017).	44
Figura 5-5 – Motor de Ar Secundário da CR4 (500 kW) equipado com 5 termístores (2 para os rolamentos e 1 por fase).	64
Figura 5-6 – Caixa de Ligações do Motor de Ar Secundário da CR4.	65
Figura 5-7 – Motor de Ar de Exaustão da CR4. Caixa de ligações dos sensores de temperatura.	65
Figura 5-8 – Câmara termográfica Flir E40.	66
Figura 5-9 – Antes (lado direito) e depois da limpeza do motor.	68
Figura 5-10 – Antes (lado direito) e depois da limpeza do motor.	69
Figura 5-11 – Tampa da caixa de ligações de motor intervencionado.	69
Figura 5-12 – Caixa de ligações de um motor intervencionado.	70
Figura 5-13 – Motores em ambientes corrosivos.	70
Figura 5-14 – Acumulação de resíduos a obstruir a ventilação.	71
Figura 5-15 – Acumulação de resíduos em todo o motor.	71
Figura 5-16 – Motor de acionamento do raspador.	72
Figura 5-17 – Interior da caixa de ligações do motor.	72
Figura 5-18 – Motor em serviço– Termografia de 29/06/2017.	73
Figura 5-19 – Isolamento queimado no lado do ataque.	74
Figura 5-20 – Termografia da parte superior da carcaça do motor.	75
Figura 5-21 – Termografia da parte superior da carcaça do motor.	75
Figura 5-22 – Termografia do lado do ataque do motor.	75
Figura 5-23 – Motor TAA2 antes da abertura.	76

Figura 5-24 – Motor TAA2 depois da abertura.....	76
Figura 5-25 – Carcaça do motor com acumulação de biomassa.....	77
Figura 5-26 – Falha no revestimento cerâmico.....	78
Figura 5-27 – Esferas com marca profundas.....	78
Figura 5-28 – Gaiola do rolamento com desgaste acentuado na zona das esferas.....	79
Figura 5-29 – Pista no anel interior indicando desgaste lateral.....	79
Figura 5-30 – Desgaste no centro da pista causada por passagem de corrente (<i>fluting</i>).....	80
Figura 5-31 – Escovilhão de remoção de massa do lado esquerdo e injetor do lado direito (Santos, 2017).....	80
Figura 5-32 – Acumulação de lubrificante nas bobinas do estator (Santos, 2017).....	81
Figura 5-33 – Interior do motor dos dois lados.....	81
Figura 5-34 – Acumulação de resíduos na flange do motor.....	82
Figura 5-35 – Projeções de massa lubrificante no estator.....	82
Figura 5-36 – Vetor de Park da corrente (esquerda) e da tensão (direita) de motor alimentado por VEV.....	83
Figura 5-37 – Vetor de Park da corrente (esquerda) e da tensão (direita) de motor com distorção harmónica na rede.....	83
Figura 5-38 – Vista da instalação da TG3 – Alternador e excitatriz à direita.....	84
Figura 5-39 – Veio com parte inferior da chumaceira e aros de lubrificação.....	85
Figura 5-40 – Veio do alternador sem chumaceira.....	85
Figura 5-41 – Interior da chumaceira inferior.....	86
Figura 5-42 – Chumaceira de reserva em armazém.....	86
Figura 5-43 – Parametrização de plano de manutenção para indústria alimentar (Silva, 2014).....	87
Figura 5-44 – Definição de prazos para o plano (Silva, 2014).....	88

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4-1 – Valores limite para a resistência de isolamento (WEG, 2010).	20
Tabela 4-2 – Níveis de consistência NLGI (BP, 2017).	27
Tabela 4-3 – Compatibilidade de espessantes de massa lubrificante (Turner, 2017).	30
Tabela 4-4 – Temperaturas máximas para atuação das proteções térmicas (WEG, 2010).	32
Tabela 5-1 – Índice de Polarização e Índice de Absorção.	43
Tabela 5-2 – Intervalos de Lubrificação para rolamentos de esferas de motores WEG (WEG, 2010)..	47
Tabela 5-3 – Intervalos de Lubrificação para rolamentos de rolos de motores WEG (WEG, 2010).	48
Tabela 5-4 – Tempo de vida de rolamentos selados, sem lubrificação adicional (ABB, 2009).	49
Tabela 5-5 – Intervalos de lubrificação para rolamentos de esferas de motores ABB (adaptado de (ABB, 2009)).	50
Tabela 5-6 – Intervalos de lubrificação para rolamentos de rolos de motores ABB (adaptado de (ABB, 2009)).	51
Tabela 5-7 – Tempo de vida e intervalos de lubrificação de rolamentos.	53
Tabela 5-8 – Intervalos de lubrificação para motores VEM 315-400.....	56
Tabela 5-9 – Quantidade de lubrificante para rolamentos de motores VEM 315-400.	56
Tabela 5-10 – Programa de lubrificação para centrais nucleares (adaptado de (EPRI, 1992)).....	58
Tabela 5-11 – Etiqueta de registo e informação para cada motor.	63

ABREVIATURAS

ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
BT	Baixa Tensão
CA5	Caldeira Auxiliar nº5
CR4	Caldeira de Recuperação nº4
cSt	centistoke (1 centistoke = 1 mm ² /s)
CTG	<i>Capacitance to Ground</i>
DA	<i>Dielectric Absorption</i>
DCS	<i>Distributed Control System</i>
EP	<i>Extreme Pressure</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
EPVA	<i>Extended Park Vector Analysis</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IA	Índice de Absorção
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	Índice de Polarização
LA	Lado do Ataque
LOA	Lado Oposto ao Ataque
MCE	<i>Motor Circuit Evaluator</i>
MCM	<i>Motor Condition Monitoring</i>
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i>
MSCSA	<i>Motor Square Current Signature Analysis.</i>
MT	Média Tensão
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
NLGI	<i>National Lubricating Grease Institute</i>
NPC	Navigator Pulp Cacia

p.p.	Ponto Percentual
RI	Resistência do Isolamento
RIC	<i>Rotor Influence Check</i>
ROI	<i>Return On Investment</i>
RTG	<i>Resistance to Ground</i>
SI	Sistema Internacional de medidas
SKF	<i>Svenska Kullagerfabriken AB</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TI	Tecnologias de Informação
VEV	Variador Eletrônico de Velocidade

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Ao longo da formação académica, o interesse pela área de motores elétricos predominou. Sendo disponibilizada a oportunidade de realizar um estágio, foi escolhida esta via para assim conseguir um contacto com o mercado de trabalho ao mesmo tempo que se adquire experiência e formação.

De modo a ter contacto com a maior variedade e quantidade de motores, deu-se preferência à área da indústria de processos e produção. Nesta enquadra-se o grupo The Navigator Company, do qual fazem parte as instalações da Navigator Pulp Cacia, uma fábrica com tradição no mercado, em constante renovação, com muitas atualizações ao longo dos anos, assim como novos projetos e uma grande variedade de diferentes instalações, mas que tornaram difícil a contínua atualização do plano de manutenção com o passar do tempo. Assim, foi definido o tema do estágio, uma forma de contribuição útil para a fábrica mantendo um contacto com a área de preferência de estudo.

Embora o tema se dirija à generalidade dos motores elétricos, o motor trifásico assíncrono com rotor gaiola de esquilo é de longe o motor predominante nas instalações e na indústria em geral.

Num mercado cada vez mais competitivo é da maior importância conseguir produzir com a melhor qualidade, menor custo e de forma ininterrupta. A única forma de o conseguir sem otimização de processos e investimento em novo equipamento, é através da manutenção adequada do equipamento existente para assim garantir a sua fiabilidade e eficiência que irá contribuir para um produto final de melhor qualidade a um custo de produção inferior.

Os procedimentos e técnicas de manutenção evoluíram muito desde os tempos em que os equipamentos eram deixados em serviço até falharem, sendo depois substituídos. Nos dias de hoje, com a possibilidade de termos equipamentos de monitorização sofisticados, com capacidade de leitura de diversas variáveis e respetiva análise por sistemas de *cloud computing* e inteligência artificial, é possível conseguir definir o tempo de vida útil de um motor com maior precisão, isolar possíveis falhas e evitar paragens intempestivas.

É importante compreender que os motores elétricos eventualmente falham. Embora haja falhas extremamente difíceis de prever, a grande maioria das falhas que levam a perdas de produção poderiam ser evitadas com um plano de manutenção eficiente.

1.2 Objetivos

Os objetivos definidos pelo tema escolhido não foram de desenvolver um novo plano de manutenção para substituir o existente, que já era bastante elaborado, mas atualizá-lo tendo em conta os avanços tecnológicos da atualidade e os benefícios que daí advém, ao mesmo

tempo que se tentou corrigir erros sistemáticos que podem não ser perceptíveis quando as pessoas se habituariam aos procedimentos instalados. Assim, foi necessário analisar a estrutura e funcionamento da fábrica, analisar o funcionamento do plano de manutenção atual e de que forma são tratadas as falhas, como e se são registadas as ocorrências e de que forma influenciam os procedimentos futuros.

Sendo uma fábrica de grande dimensão e não havendo dados sobre os motores existentes e só após a análise do processo, da quantidade e tipo de motores (mais de 1800 motores analisados, 55MW de potência instalada, fora os motores em armazém) se pôde definir um plano concreto para o estágio onde foi necessário restringir a abrangência total do projeto a apenas um conjunto restrito de motores mais críticos.

Assim os objetivos centraram-se em reduzir o trabalho redundante, evitar aumentar a burocracia associada a grandes empresas e instalações de grande dimensão e, acima de tudo aumentar a eficácia do plano de manutenção para motores elétricos para diminuir ao máximo o número de paragens intempestivas que significam perdas de produção, evitando aumentar os custos gerais da manutenção.

1.3 Estrutura do Relatório

Este Relatório de Estágio está dividido em 6 capítulos, tal como se sintetiza seguidamente:

O Capítulo 1 contém a introdução ao projeto associado ao estágio, a sua contextualização, os objetivos, as metas a atingir e a organização do documento.

O Capítulo 2 contém um resumo sobre a indústria de pasta de papel, o processo de fabrico e a importância dos motores elétricos nesta indústria.

O Capítulo 3 apresenta a manutenção preditiva e a sua importância no contexto atual. É feita uma comparação com os outros tipos de manutenção, analisados os custos e benefícios assim como é analisada a influência da manutenção na eficiência de motores elétricos de indução. São também apresentados alguns tipos de equipamentos de monitorização contínua já que estes são essenciais para um plano de manutenção preditiva funcional.

O Capítulo 4 apresenta o enquadramento teórico, abordando as várias áreas da manutenção do motor elétrico que tiveram de ser estudadas ao longo do estágio, dando maior ênfase a aquelas onde havia maior potencial para ser implementadas no tempo disponível.

O Capítulo 5 apresenta uma parte do trabalho prático desenvolvido para colmatar o plano em vigor assim como análises a casos de estudo que decorreram ao longo do estágio.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

O final deste Relatório de Estágio inclui as referências bibliográficas e os vários anexos mencionados ao longo dos capítulos anteriores.

2 A Indústria da Pasta de Papel

A pasta de papel é um recurso com inúmeros usos além do tradicional papel de escritório associado à empresa The Navigator Company.

Embora o uso de papel de escritório nos países desenvolvidos esteja em declínio, a procura de pasta de papel de alta qualidade continua em alta, assim como se assiste ao crescimento das vendas de papéis para fins higiénicos e sanitários (vulgo *tissue*), com cada vez maior exigência de qualidade da parte dos consumidores, traduzindo-se no elevado preço de mercado atual e no rápido escoamento do *stock*. Nestas condições, qualquer indisponibilidade de equipamento que cause perda de produção significa perdas elevadas para as empresas.

2.1 Navigator Pulp Cacia

O Complexo Industrial de Cacia (agora Navigator Pulp Cacia) pertence à The Navigator Company, terceiro maior exportador em Portugal. Este é o grupo que gera o maior valor acrescentado nacional, representa 1 % do PIB e 3 % das exportações nacionais de bens.

O grupo apresenta-se como líder europeu na produção de papéis finos de impressão e escrita não revestidos e sexto a nível mundial. É também o maior produtor europeu, e o quinto a nível mundial, de pasta branqueada de eucalipto. Vende para 127 países nos cinco continentes.

O Complexo Industrial de Cacia está localizado na vila de Cacia, distrito de Aveiro, no centro da maior mancha florestal de eucalipto em Portugal.

A sua produção atinge um volume anual na ordem das 350 mil toneladas de pasta branqueada de eucalipto, direcionadas para a transformação em papéis especiais como décor, filtros, cigarros e *tissues* de alta qualidade. Integra também uma central de cogeração a biomassa associada à fábrica de pasta e uma central termoelétrica de biomassa para a produção de energia renovável.

O Complexo de Cacia é internacionalmente reconhecido pelas suas pastas “desenhadas” para aplicações especiais, muito apreciadas pelos exigentes clientes europeus.

Foi neste complexo que, em 1957, se produziu pela primeira vez a nível mundial pasta de papel a partir de eucalipto pelo processo Kraft, considerada excelente para o fabrico de papel de alta qualidade (The Navigator Company, 2017).

2.1.1 Motores Elétricos na Indústria de Pasta de Papel

Os motores elétricos têm um papel preponderante no funcionamento de uma fábrica de pasta de papel. Por exemplo, a falha de apenas um motor da alimentação de ar à caldeira de recuperação pode causar a sua paragem. Esta é responsável pela maioria do vapor usado em

grande parte dos processos e sem este, pelo menos o cozimento das aparas e a secagem de pasta deixam de poder funcionar. A caldeira, por sua vez, usa como combustível a lixívia negra que tem de ser queimada de forma contínua já que o seu armazenamento é limitado. Da mesma forma, falhando o processo de concentração da lixívia negra na área da evaporação (com elevado número de motores de indução), deixa de haver combustível para a caldeira, tendo de se recorrer a fuel ou gás natural, repercutindo-se num aumento de custos para a produção.

2.2 Produção de Pasta de Papel - Navigator Pulp Cacia

A madeira é uma matéria-prima formada por fibras em múltiplas camadas, ligadas entre si por lignina. Para separação dessas fibras, unidas entre si por forças coesivas intermoleculares, é necessário uma determinada quantidade de energia que irá variar conforme a qualidade, características e as utilizações que forem pretendidas para a pasta. Deste modo, pode-se definir o processo de produção de pasta de papel como sendo um processo de separação de fibras da madeira mediante utilização de energia química e/ou mecânica.

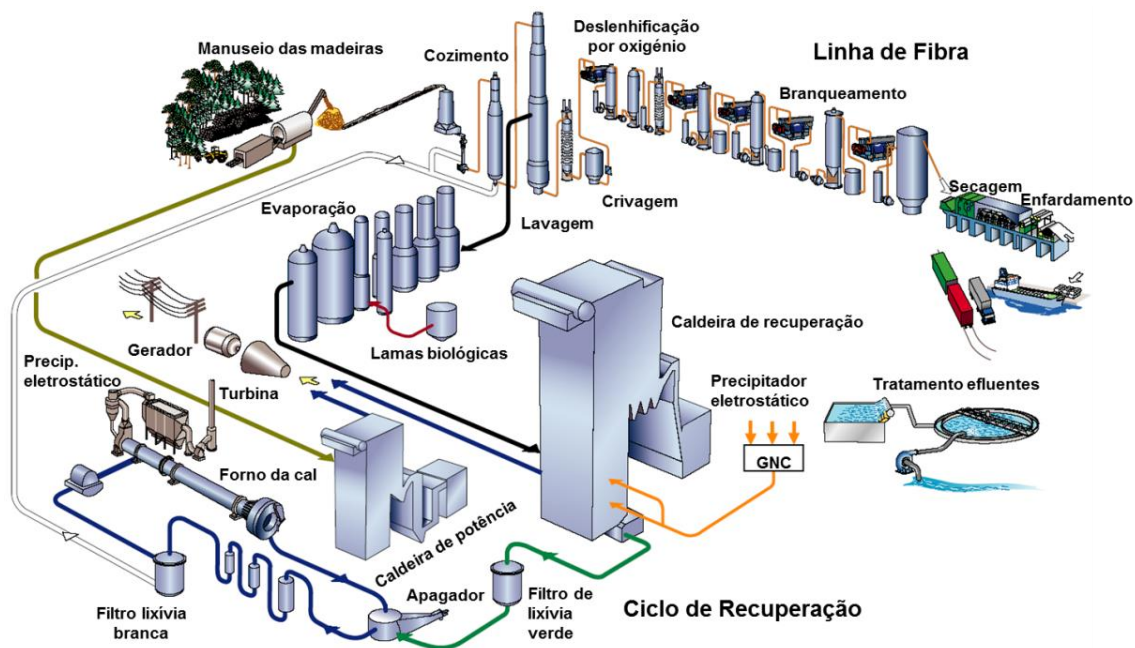


Figura 2-1 – Exemplo de Indústria de produção de pasta de papel (Andersson, 2017).

O processo de produção de pasta de papel tem vários métodos diferentes, mas o mais comum na produção de pasta branqueada e que é usado na Navigator Pulp Cacia é o processo “Kraft”.

2.2.1 Receção e Tratamento da Matéria-prima

Nestas instalações, a grande maioria da matéria-prima é recebida na fábrica em camiões (embora tenha linha ferroviária onde ocasionalmente é recebida madeira ou enviada pasta), sob a forma de troncos de madeira que, no caso do eucalipto, é recebido de duas formas diferentes: com e sem casca. A madeira é inicialmente inspecionada para verificação do diâmetro, comprimento, densidade, presença de madeira queimada (esta aumenta os custos com branqueamento e baixa a qualidade da pasta sendo, por norma, rejeitada). A madeira com casca é encaminhada para uma linha com tambor descascador, seguida de um destroçador, enquanto madeira sem casca é encaminhada para uma linha apenas com destroçador. A casca retirada segue para os armazéns de biomassa onde poderá ser valorizada na caldeira de biomassa (para produção de energia elétrica) ou na caldeira auxiliar (para produção de vapor para o processo e produção de energia elétrica). Os galhos e troncos com baixas dimensões que não tem aproveitamento para o processo de produção de pasta, são armazenados para seguirem para o *Crusher*, onde são moídos para serem aproveitados na caldeira de biomassa ou na caldeira auxiliar.

Os equipamentos destroçadores desfazem os troncos em pequenas aparas calibradas para facilitar a impregnação dos reagentes e promover um melhor cozimento da madeira.

2.2.2 Cozimento

O processo *Kraft* consiste em atuar na madeira, sob a forma de aparas, com uma combinação de dois reagentes químicos: hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na_2S), obtendo-se como resultado a dissolução da lignina e a libertação das fibras (Campos, 2011). Estas fibras constituem a pasta não branqueada de cor castanha.

O processo de obtenção da celulose desenvolve um subproduto, denominado lixívia negra (ou licor negro), que contém a parte da madeira dissolvida (lignina), combinada com os reagentes químicos utilizados no início do processo. Por razões económicas e ambientais, é absolutamente necessário o reaproveitamento da lixívia negra.

Durante o ciclo de recuperação do processo “Kraft”, o sulfato de sódio é reduzido a sulfeto de sódio, o qual, juntamente com o hidróxido de sódio, constituem os reagentes utilizados no processo “Kraft” (Campos, 2011).

2.2.3 Recuperação de Reagentes

A lixívia negra concentrada é queimada na caldeira de recuperação, onde gera calor para a produção de vapor que depois é usado no processo e na produção de energia elétrica. Os reagentes químicos fundidos acumulam-se no fundo da caldeira onde são designados “*Smelt*”, tendo uma aparência semelhante a magma. Este é removido de forma contínua e depois dissolvido, passando a designar-se “lixívia verde”, devido à sua coloração característica. Após tratamento adequado, a “lixívia verde” é transformada em “lixívia branca”, que será de novo usada no processo de cozimento das aparas.

2.2.4 Depuração e lavagem

A pasta, após ter sido cozida nos digestores, contém constituintes não desejáveis que podem danificar os equipamentos e comprometer a qualidade do produto final. Estes são constituídos por estilha não cozida, nós, metais, plásticos e minerais. Estas impurezas são removidas através de sistemas de depuração mecânica e, no caso dos metais, eletroímãs. A fase final de lavagem com água limpa consiste em remover a lixívia residual (para diminuir carga de reagentes no branqueamento) e recuperar ao máximo os reagentes usados no cozimento.

2.2.5 Branqueamento

Após remoção da lixívia negra e lavagem da pasta que, ao sair do cozimento tem cor castanha, esta é submetida a um processo de pré-branqueamento e branqueamento. Para este processo são usados vários reagentes como oxigénio, peróxido de hidrogénio e dióxido de cloro (estes locais são dos ambientes mais corrosivos da fábrica) para que se possa obter a pasta branqueada. Esta etapa é um custo considerável do processo de produção de pasta, portanto evita-se que entrem elementos na produção que aumentem a carga de reagentes (como madeira de baixa qualidade, madeira queimada ou casca).

2.2.6 Secagem e Enfardamento

Como a fábrica apenas produz pasta que é usada como matéria-prima para produzir diferentes produtos noutras instalações, é necessário facilitar o transporte e manuseamento. Assim, na parte final da produção, a pasta é submetida a um processo de formação em folha de forma contínua. Esta passa por rolos onde é submetida a alta pressão e removida grande parte da água contida na pasta. De seguida, passa por máquinas de secagem a ar quente (aquecido pelo vapor produzido na caldeira de recuperação). No final do processo, a folha é cortada em pequenas unidades quadrangulares que são empilhadas, prensadas e embrulhadas para formar fardos embalados (tudo de forma automatizada).

Este é um processo complexo que tem várias vantagens em relação aos demais como: flexibilidade a todas as espécies de madeiras, tempos de cozimento mais curtos, não há problemas com resinas (coníferas), existe produção de pastas de alta resistência, produção de subprodutos valiosos (“*tall-oil*” e terebintina) e recuperação relativamente fácil dos reagentes utilizados (Campos, 2011).

Todavia, o processo “*Kraft*” também apresenta certas desvantagens, tais como: alto custo de investimento na montagem da fábrica, problema de mau cheiro dos gases produzidos (H_2S , e mercaptanos), baixo rendimento (40 a 50 %) e alto custo de branqueamento (Campos, 2011).

3 Manutenção - Estado de arte

O início da manutenção preditiva pode ter sido quando um mecânico decidiu colocar o seu ouvido junto a uma chave de fendas, encostou a uma máquina e pronunciou que os rolamentos poderiam estar no final da sua vida. Desde essa altura, a tecnologia evoluiu e foram desenvolvidos vários métodos de análise da condição de equipamentos, mas ainda não mudou a necessidade de pessoas com conhecimentos e experiência para uso destas tecnologias (Dunn, 2002).

Os avanços na ciência e tecnologia permitiram que a manutenção preditiva se tornasse uma realidade com níveis de fiabilidade bastante elevados, principalmente devido à enorme capacidade computacional para análise de dados que dispomos nos dias de hoje. A análise dos dados é onde o conhecimento e a experiência revelam-se mais importantes num programa de manutenção preditiva.

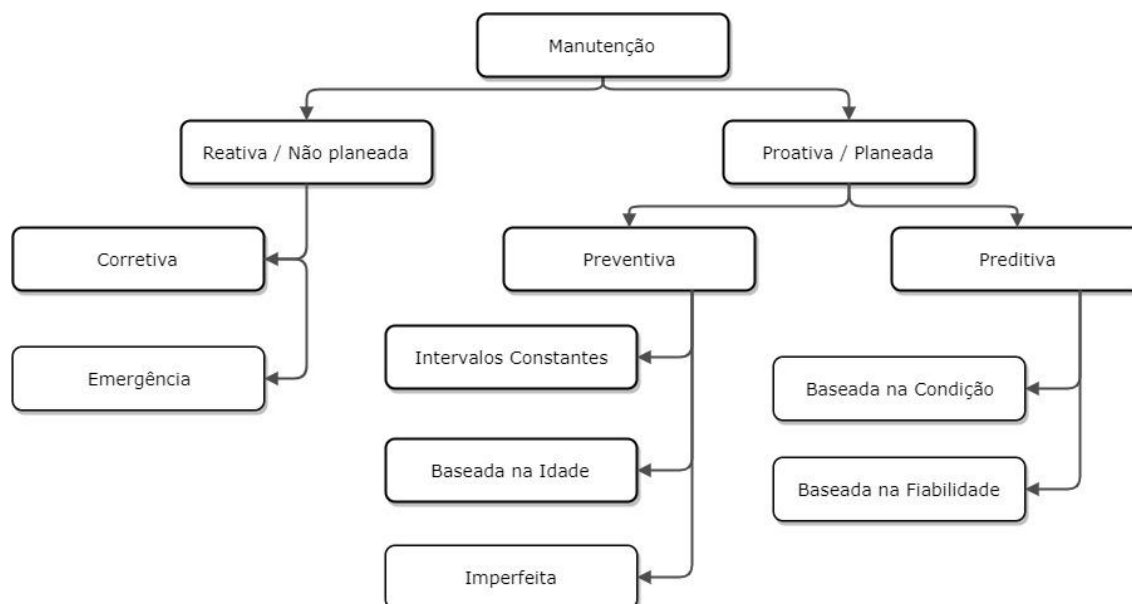


Figura 3-1 – Vários tipos de manutenção. Adaptado de (Veldman, Wortmann, & Klingerberg, 2011).

A figura 3-1 mostra os vários tipos de manutenção possíveis. Estas variam conforme o plano implementado, mas a manutenção reativa e a preventiva baseada em intervalos constantes costumam ser as predominantes. É de salientar que a manutenção não planeada fará sempre parte de um plano de manutenção já que é impossível prever todas as falhas.

3.1 Manutenção Preditiva

Manutenção preditiva (também referida como preventiva baseada na condição) é aquela que indica as condições reais de funcionamento das máquinas com base em dados que indicam o seu nível de desgaste ou processo de degradação. Trata-se de um conjunto de processos para tentar estimar o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para que esse tempo de vida seja bem aproveitado. Assim, atua-se com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho do equipamento, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. A manutenção preditiva pode ser comparada a uma inspeção sistemática para o acompanhamento das condições dos equipamentos.

A manutenção preventiva condicionada é realizada em função do estado dos componentes do equipamento, isto é, através de análises tribológicas (análises de óleos, análise da existência de detritos provenientes do desgaste das peças em contacto), termografia (processo que consiste na análise das temperaturas de diferentes órgãos ou componentes), ultra-sons (técnica que permite identificar diferenças de ruídos anormais em peças como rolamentos, etc.), análise de correntes elétricas em motores de corrente alternada (CA), recolha e análise de vibrações (método que permite determinar o estado do componente facilitando assim a predição da sua avaria) (Dias, 2010).

Quando é detetada a necessidade de intervenção no equipamento, a empresa está a realizar uma manutenção corretiva planeada. Assim, os objetivos da manutenção preditiva são (SESMT, 2015):

- Determinar, antecipadamente, a necessidade de serviços de manutenção numa peça específica de um equipamento;
- Eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção;
- Aumentar o tempo de disponibilidade dos equipamentos;
- Reduzir as reparações de emergência não planeadas;
- Impedir o agravamento das falhas;
- Aproveitar a vida útil total dos componentes e, conseqüentemente, do equipamento;
- Aumentar o grau de confiança no desempenho de um equipamento ou linha de produção;
- Determinar previamente as interrupções de fabricação para realizar as operações de manutenção dos equipamentos de forma planeada.

Todos estes objetivos são direcionados para uma causa maior: redução dos custos de manutenção e aumento da produtividade. Para ser executada, a manutenção preditiva exige a utilização de aparelhos adequados, capazes de registar vários parâmetros e providenciar um histórico destes.

Com base no conhecimento e análise dos fenómenos torna-se possível indicar, com antecedência, eventuais defeitos ou falhas nas máquinas e equipamentos. A manutenção preditiva, após a análise dos fenómenos, adota dois procedimentos para atacar os problemas detetados: estabelece um diagnóstico e efetua uma análise de tendências.

Para isto é necessário experiência e conhecimento da origem das falhas, como ilustrado nas figuras seguintes. Estas podem ser classificadas em internas (Figura 3-3) e externas (Figura 3-2), subdivididas em elétricas, mecânicas e, no caso das origens externas, ambientais.

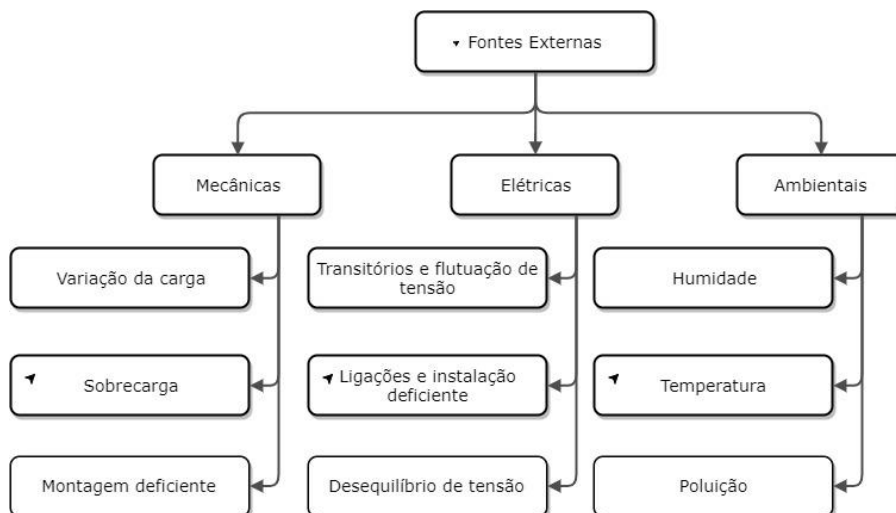


Figura 3-2 – Fontes externas de falha (Bazurto, Quispe, & Mendoza, 2016).

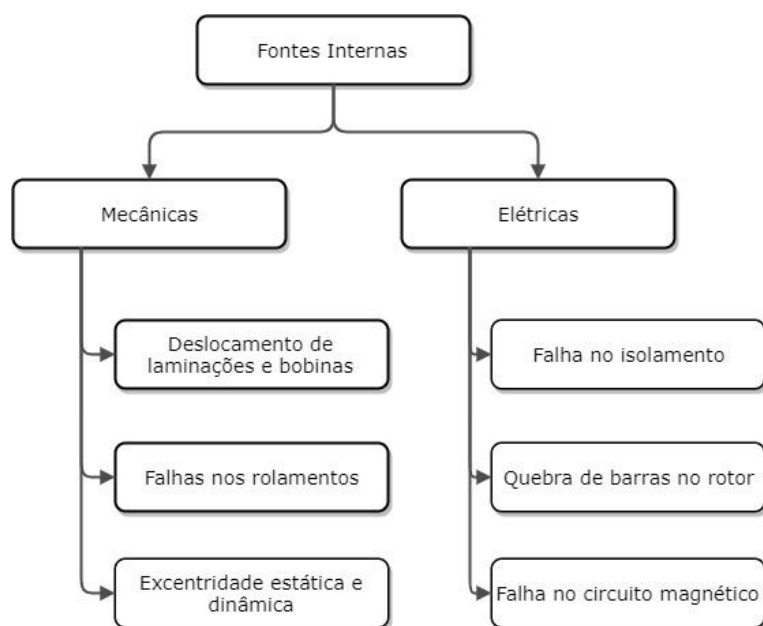


Figura 3-3 – Fontes internas de falha (Bazurto, Quispe, & Mendoza, 2016).

No diagnóstico, detetada a irregularidade, o engenheiro de manutenção e fiabilidade terá a responsabilidade de estabelecer, como referido e na medida do possível, um diagnóstico referente à origem e à gravidade do defeito constatado. Este diagnóstico deve ser feito antes da intervenção no equipamento para que se possa diminuir o tempo necessário na manutenção corretiva planeada.

3.2 Manutenção e os seus Custos

É importante entender que, normalmente, os motores elétricos falham ao fim de um determinado tempo de serviço. A sua fiabilidade diminui e as perdas aumentam (eficiência diminui) ao longo do tempo antes da maioria das falhas catastróficas. Embora algumas falhas sejam instantâneas e difíceis de prever, a larga maioria das falhas catastróficas com possibilidade de afetar a produção são o resultado de falhas na implementação de um plano de manutenção adequado. Embora um plano de manutenção eficaz tenha custos elevados, que não são fáceis de justificar quando este funciona corretamente na prevenção de falhas, é necessário perceber que a manutenção é um investimento no negócio e não uma despesa de fazer negócio. Se não houver investimento num plano de manutenção adequado, o produto final irá sempre ter um custo de produção global superior à concorrência que o faça de forma eficaz. A implementação de um bom programa de manutenção já mostrou reduzir o consumo energético de indústrias em 10-14 % (Penrose H. W., 2013), assim como reduziu o tempo e o número de paragens não planeadas.

O *Mckinsey Global Institute* estima que as soluções de manutenção preditiva na indústria produtiva terão um impacto potencial de quase 630 biliões de dólares americanos por ano, em 2025 (Erins, 2017). Em primeiro lugar, para a implementação de um plano de manutenção adequado, é necessário comunicar o potencial ROI (retorno do investimento) à organização. Os engenheiros da manutenção e fiabilidade têm oportunidades significativas nesta área para conseguirem o investimento necessário à realização de um plano abrangente e eficaz. Em segundo lugar é necessário entender que este investimento pode ser introduzido de forma gradual; ao tentar pequenos projetos piloto em equipamentos críticos, o impacto potencial pode ser comprovado e abrir as portas para o alargamento do projeto às várias áreas da instalação. Só no caso da NPC, uma hora de paragem das caldeiras que afete a produção de pasta de papel, equivale a perdas na produção de cerca 10 000 €, sem contar com as perdas na produção de energia elétrica (fábrica é autossuficiente em termos energéticos e vende energia à rede) e os custos fixos inerentes ao seu funcionamento. Aqui o potencial é enorme já que houve casos de paragens intempestivas que duraram várias horas.

Por último, na época da Indústria 4.0, as áreas de TI e análise terão de alargar as suas capacidades e crescer com este processo já que são essenciais para a análise e processamento dos dados. Este pode ser um ponto de partida para as indústrias aumentarem as suas competências digitais.

3.3 Manutenção e Eficiência energética

A melhoria da eficiência energética é uma das principais estratégias para reduzir custos e alcançar um desenvolvimento sustentável, uma vez que leva a uma redução significativa do consumo de energia num período relativamente curto e com custos moderados, principalmente considerando que, em termos de consumo energético, os motores de indução são a carga mais importante a nível mundial (Ferreira, 2008).

Estudos demonstram que, na Europa, o fator de carga dos motores é em média inferior a 60 % (em Portugal estima-se que seja ainda menor), o que significa que parte significativa dos motores instalados estarão sobredimensionados (Ferreira, 2008) e a funcionar fora do seu ponto de máxima eficiência energética.

Dependendo de uma série de fatores, incluindo a eficiência do motor, o custo operacional domina o custo do ciclo de vida dos motores de indução, atingindo 50 a 200 vezes o preço de compra (Ferreira, 2008). Assim, pequenos incrementos na eficiência do motor podem levar a uma redução significativa do custo do ciclo de vida de um motor de indução.

O mercado de reparação de motores representa, em termos de unidades, cerca de 2 a 3 vezes o mercado de motores novos. Normalmente, o custo de reparação de um motor é cerca de 40-50 % do custo de um motor novo, dependendo da potência nominal do motor, podendo mesmo aproximar-se do custo de um motor novo para as pequenas potências (Ferreira, 2008).

Sempre que há uma falha num motor elétrico e este necessita de uma reparação sob a forma de rebobinagem, por norma a eficiência do motor decresce em relação à eficiência original do fabricante. O decréscimo de eficiência, em valores percentuais, depende dos processos e técnicas usadas na rebobinagem. Vários estudos demonstram que as práticas de reparação mais comuns levam a uma redução da eficiência do motor de 0,5 p.p. a 1 p.p. e nos piores casos, a redução pode chegar a 4 p.p. (Ferreira, 2008), alterar a fiabilidade do motor e a sua curva binário-velocidade.

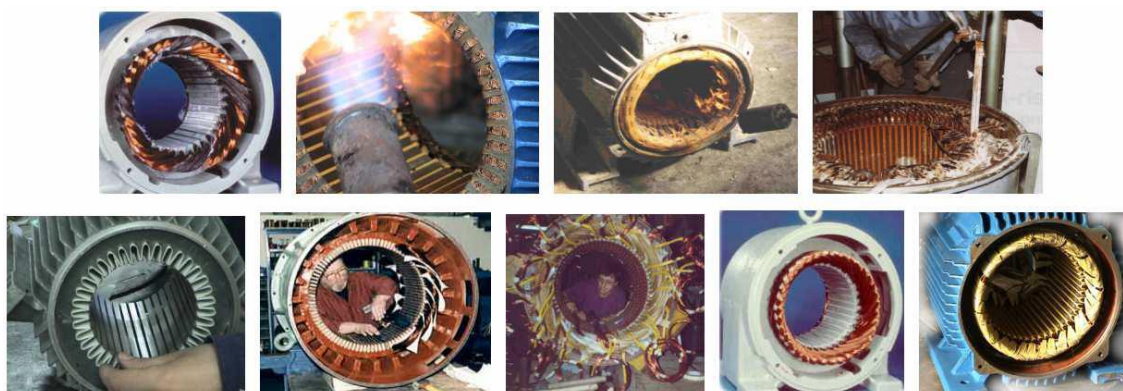


Figura 3-4 – Algumas práticas de reparação (Ferreira, 2008).

A figura 3-4 mostra alguns procedimentos de reparação. Por exemplo, o uso de maçaricos na remoção do estator pode levar à deterioração do isolamento nas laminações, podendo levar ao aumento das perdas devido ao aumento das correntes de Foucault.

As principais causas da deterioração das características de um motor são a remoção e limpeza inadequada do estator, substituição por bobinagem de especificações diferentes do original, impregnação incorreta e outras com menos impacto.

A necessidade de reparações rápidas, juntamente com a possível falta de conhecimentos de alguns reparadores quanto ao impacto de certas técnicas de reparação na performance de motores, são as principais causas de reparações de baixa qualidade. Por exemplo, reparadores podem instalar bobines de estator com saliências maiores (assim aumentando a quantidade de

cobre e as perdas associadas) porque é mais fácil de manusear e inserir nas *slots* do estator. Baixa eficiência significa custos operacionais mais altos e, possivelmente, manutenção com maior frequência assim como maior número de reparações. Através do uso planos de manutenção que evitem falhas de motores catastróficas, podem-se evitar a necessidade de reparações profundas (rebobinagem). Quando efetivamente necessário, estima-se que com o uso de serviços de reparação de qualidade, a redução na eficiência seja inferior a 0.25 p.p. (assumindo cópia da bobinagem e substituição dos rolamentos e ventilador por originais). Se um motor tem uma eficiência inicial de 90 % e esta baixa 1 p.p. após uma reparação standard (baixa qualidade), as perdas aumentam 10 %. Após a primeira reparação do género, há um incremento do custo de funcionamento anual do motor em 1.1 %. Se forem usados procedimentos para um serviço de reparação ótimo, o aumento do custo de funcionamento anual de um motor de indução poderá chegar a 0.2 % (Ferreira, 2008). Pode parecer uma diferença pequena, mas numa indústria como a NPC, com mais de 1800 motores e consumo de energia médio de 20 MW, o potencial de poupança energética é significativo.

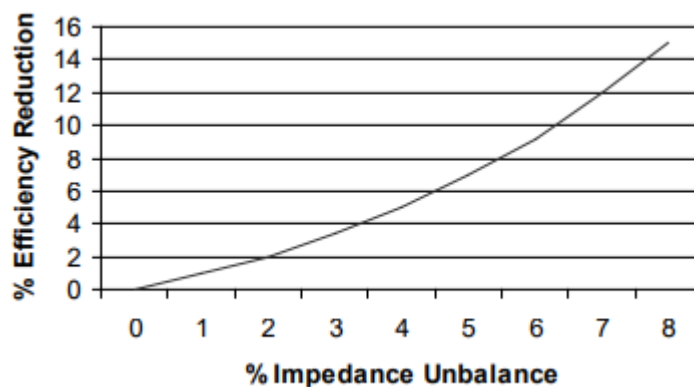


Figura 3-5 – Influência do desequilíbrio de impedâncias na eficiência de um motor de indução (Penrose H. W., 2013).

A figura 3-5 mostra um tipo de falha que afeta a eficiência de um motor, o desequilíbrio de impedâncias. As diferentes impedâncias entre fases podem afetar a eficiência de um motor de forma severa, além das vibrações adicionais associadas a estas falhas.

Associado à eficiência, há o facto de que um motor que funcione a temperatura mais elevada devido a um aumento das perdas, poderá ter uma redução da vida útil significativa.

O correto planeamento do projeto inicial é muito importante para a eficiência energética do processo, mas uma manutenção adequada não só evita falhas que levem à perda de produção, como evita falhas intempestivas que levem à necessidade de reparações profundas que, invariavelmente, significam perdas de eficiência num motor, perdas estas que podem anular as diferenças entre um motor de eficiência IE2 e um motor IE3 - diferenças que justificaram um investimento inicial superior por um motor de eficiência mais elevada.

3.4 Monitorização contínua

Para que se possa implementar um plano de manutenção preditiva eficaz, os equipamentos críticos devem ser integralmente instrumentados com sensores. Estes sensores, por sua vez, devem estar ligados a uma instalação central estruturada, com base de dados.

Um bom teste para determinar se os sensores e a estrutura estão corretamente implementados seria se, um engenheiro de manutenção e fiabilidade pudesse fazer um gráfico de análise do estado atual do equipamento a partir dos dados extraídos automaticamente. Se é possível, então a implementação de um algoritmo de manutenção preditiva e a expansão progressiva para a generalidade dos sensores, será muito mais facilitada. Se houver leituras de sensores críticos que sejam agregadas manualmente ou disponíveis de forma fragmentada em vários sistemas diferentes, a sua utilização num sistema de manutenção preditiva será desafiadora, mas possível.

Ao introduzir automação na agregação e processamento de dados, podem ser estabelecidas fontes de dados que de outra forma passariam despercebidas. Embora não seja intuitivo, conhecer 100 episódios de falhas no passado pode ser mais importante do que ter Tera bytes de leituras de sensores (Erins, 2017).

Se os dados estiverem armazenados em folhas de cálculo, *emails* ou simplesmente espalhados por diversos sistemas, é importante fazer uma agregação destes para o sistema de manutenção. O número de falhas, a duração da indisponibilidade causada por estas e os tempos de reparação devem ser descritos e registados. A falta desta catalogação sistemática reduz o valor potencial e a eficácia de um programa de manutenção preditiva (Erins, 2017).

Um programa de manutenção preditiva necessita de ser implementado de forma controlada, caso a caso. É necessário estabelecer onde começar e estabelecer o que é prioritário sendo fundamental que os engenheiros da manutenção e fiabilidade forneçam informação sobre quais são os dados prioritários, quais os equipamentos com comportamentos mais previsíveis e onde há as melhores oportunidades de redução de paragens não programadas.

Os dispositivos seguintes são exemplos de equipamentos que já existem no mercado e permitem monitorização de motores elétricos além dos sensores que já vêm instalados (temperatura e vibração).

3.4.1 ABB Smart Sensors



Figura 3-6 – Motores com dispositivos montados na lateral da carcaça.

Os sensores inteligentes da ABB (Figura 3-6) são pequenos dispositivos que monitorizam motores de baixa tensão fornecendo uma medição regular e precisa de parâmetros chave do motor. Os dados são gravados pelo sensor e são transmitidos por *bluetooth* a servidores ABB baseados na *cloud*.

Estes são transmitidos para os servidores de duas formas: por *Bluetooth* para um *gateway* ABB ou transferência por solicitação para um *smartphone*. As unidades têm um alcance de transmissão de 50 metros e podem transferir 1 MB por mês.

Os sensores ficam montados na carcaça do motor, não requerem cablagem adicional e podem ser montados em cerca de 15 minutos.

Os parâmetros medidos são, principalmente, a vibração mas também temperatura, som, entre outros, que são analisados de forma consistente através de algoritmos usados nos servidores ABB, sendo depois os resultados enviados de volta para otimizar performance e para manutenção preditiva com um simples sistema de semáforos que indica se um motor está bom, se precisa de reparação, mas pode esperar até à próxima paragem ou se precisa de atenção imediata. Assim, podem-se descer as paragens não planeadas em 70 %, estender a vida útil até 30 % e descer o consumo de energia até 10 % (ABB, 2017).

No entanto estes dispositivos têm algumas desvantagens além de deixar o sistema de monitorização totalmente dependente de uma marca: apenas podem funcionar com uma temperatura máxima na superfície do motor de 85 °C (o intervalo de medição não vai além deste valor). Alguns motores atingem estas temperaturas nas instalações da NPC. Outra desvantagem é de que, por este dispositivo funcionar com uma bateria de lítio que não pode ser substituída pelo utilizador, este tem de ser removido para a bateria ser trocada ao fim de três a cinco anos (cinco anos no caso de temperaturas até 40 °C e três anos se a temperatura de operação for até aos 70 °C) (ABB, 2017).

3.4.2 InSwitch



Figura 3-7 – Caixa de ligações com dispositivo InSwitch no interior (OptiSigma, 2017).

O InSwitch (Figura 3-7) é um dispositivo eletrônico ultracompacto e autoalimentado que se instala dentro da caixa de terminais dos motores de indução trifásicos e oferece as seguintes funcionalidades:

- Arranque suave baseado na comutação estrela-triângulo otimizada por fase;
- Poupança de energia (até 15 %) e melhoria do fator de potência nos regimes de carga baixa (< 40 %);
- Proteção do motor contra falta de fase, sobrecarga, subtensão, sequência de fases, rotor bloqueado e desequilíbrios de fase excessivos;
- Monitorização do funcionamento, incluindo potência ativa, fator de potência, tensão, corrente e binário eletromagnético, mostrando também o diagrama Park's Vector;
- Interfaces de comunicação com fios (RS-485/Modbus, USB) e sem fios (*Bluetooth*, Wi-Fi – opcional com adaptador externo).

No caso dos sistemas com arranque estrela-triângulo, o dispositivo proporciona poupanças significativas devido à necessidade de menos componentes na instalação, evitando também fontes de falha adicionais na instalação, como mostra a figura 3-8.

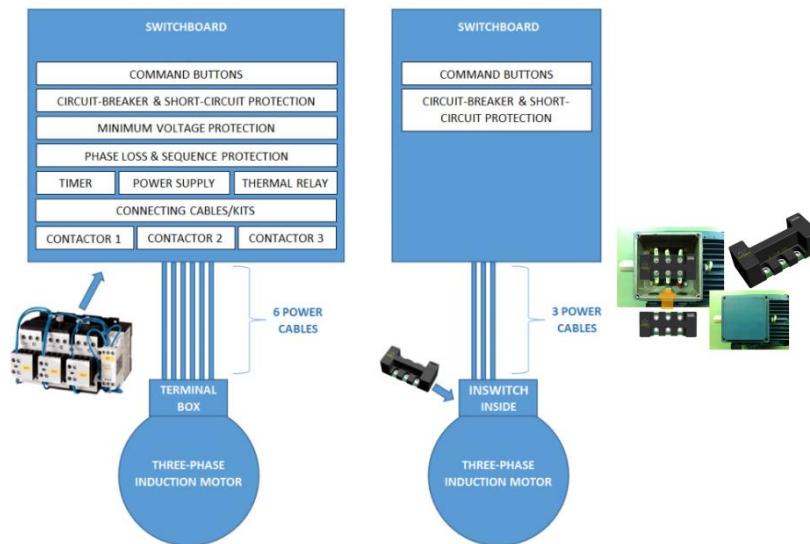


Figura 3-8 – Comparação da instalação estrela-triângulo para o InSwitch (OptiSigma, 2017).

O InSwitch pode ser aplicado em motores de baixa tensão de velocidade única/fixa, alimentado diretamente da rede, na gama de 4 a 37 kW, e substitui:

- Arranadores estrela-triângulo (3 contactores eletromecânicos + 1 temporizador + 1 fonte de alimentação + 1 proteção térmica + 1 proteção tensão mínima);
- Arranadores suaves eletrônicos.

A sua instalação requer apenas 3 condutores do quadro para o motor ao invés dos típicos 6 condutores utilizados nos arranadores estrela-triângulo.

A instalação é rápida e fácil (< 15 minutos).

O rendimento é superior a 99,5 % e não produz distorção harmónica quer do lado do motor quer do lado da rede.

Estima-se um tempo médio entre avarias (MTBF-Mean Time Between Failures) superior a 10 anos.

Com o InSwitch é fornecida uma aplicação que permite a sua parametrização e monitorização no seu computador, *tablet* e/ou *smartphone* (sistemas operativos Windows e Android).

Existe ainda a possibilidade de aquisição de soluções para monitorização *online* de motores com o InSwitch instalado já que este tem capacidade de comunicação Bluetooth, USB e RS-485 (OptiSigma, 2017).

Este dispositivo já foi testado nas instalações da The Navigator Company da Figueira da Foz, sendo que de momento está *offline*, não tendo sido possível obter *feedback* sobre o seu funcionamento.

Embora seja bastante promissor para monitorização contínua, o facto de que este dispositivo só está disponível para pequenas potências limita a sua atratividade para estas instalações visto que, na maioria dos casos, os motores de grande potência são os que tem processos de substituição mais complicados e demorados, maiores custos e que podem provocar as maiores

perdas. Por outro lado, pode ser muito útil para os pequenos motores que estão sobre dimensionados para a instalação (até 37 kW, para aumentar a eficiência) ou para aqueles que usam arrancadores suaves/arranque estrela-triângulo.

3.4.3 Enging - EMS MCM

A Enging é uma empresa que providencia, entre outros, serviços e produtos para diagnóstico de avarias em sistemas eletromecânicos através de variáveis elétricas. Esta é considerada uma ferramenta muito poderosa de manutenção preditiva para detecção de avarias num estado muito precoce do seu desenvolvimento. De qualquer computador da fábrica ou até de casa, o cliente pode saber as condições de funcionamento dos seus motores elétricos. Em caso de falha ou identificação de algum defeito no funcionamento do motor, o cliente será notificado, sendo possível uma ação imediata para resolução do problema (Enging, 2017).

As principais avarias que estes métodos de diagnóstico podem detetar são:

- Problemas no estator (ex. curto-circuitos, etc.);
- Problemas no rotor (ex. fraturas);
- Excentricidade/desalinhamento entre motor e carga;
- Avarias na alimentação do motor.

Vantagens:

- Detecção de defeitos de fabrico, instalação inadequada, manutenção inapropriada em motores novos ou reparados recentemente;
- Melhor planeamento da manutenção;
- Maior Sensibilidade em relação a outros métodos de diagnóstico;
- Sem necessidade de mão-de-obra especializada;
- Sistema não invasivo;
- Redução de avarias inesperadas;
- Aumento da disponibilidade do ativo;
- Detecção antecipada da avaria;
- Redução dos custos de reparação.

3.5 Procedimentos de manutenção preditiva em curso na Navigator Pulp Cacia

Relatórios de empresas terceiras mostram que uma gama de procedimentos de manutenção preditiva são usados nas instalações da Navigator Pulp Cacia para equipamentos mecânicos e elétricos. Os níveis de vibração do equipamento rotativo crítico são medidos de forma rotineira por dois colaboradores contratados a tempo inteiro usando equipamentos SKF para medição e análise de dados. Existe um conjunto de programas de vigilância sujeitos à criticidade do equipamento. No caso dos motores elétricos, se o equipamento for classificado como crítico, os motores que o acionam também o serão. A inspeção de vibração segue uma rota definida com 19 rotinas designadas para cobrir todas as áreas da fábrica com mais de 1300 itens pontos de inspeção. As medições efetuadas permitem a realização de um espectro de frequência e podem ser identificados quaisquer apoios com elevados níveis de vibração, desalinhamento de componentes ou desequilibrados. Um relatório é emitido, que inclui recomendações e tendências de dados de leituras anteriores. Para as turbinas a vapor, é fornecida monitorização contínua da vibração.

Inspeções termográficas com infravermelhos de equipamentos elétricos são realizadas, como parte do contrato de manutenção, de forma sistemática em toda a instalação, com três inspeções mensais em todo o equipamento elétrico e duas inspeções mensais nas turbinas e fornos. A equipa de manutenção tem disponível no local uma câmara de infravermelhos.

Transformadores e motores elétricos estão sujeitos a testes ao isolamento de rotina com equipamento de monitorização em serviço usando o equipamento de diagnóstico PdMA MCEMAX™, geralmente a cada 3 meses (Stonebridge, 2015).

Após acompanhamento das equipas e dos planos em curso, chegou-se à conclusão que havia algumas falhas nos planos propostos nestes relatórios e que estes nem sempre estavam a ser cumpridos. Assim, foram anotadas as oportunidades de melhoria iniciais para a posterior elaboração do relatório.

4 Enquadramento Teórico

Antes de poder fazer sugestões de melhoria, foi necessário conhecer as várias zonas de falha, as condições em que há maior predominância destas assim como os diversos equipamentos e testes necessários para as identificar. Neste capítulo são abordadas as diversas áreas de teste de motores elétricos que são predominantes nos dias de hoje, assim como uma abordagem mais profunda à temática da lubrificação de rolamentos e os vários procedimentos associados, devido às falhas de rolamentos serem a maior causa de avaria de motores elétricos (Bazurto, Quispe, & Mendoza, 2016).

4.1 Isolamento e o Armazenamento

A grande maioria das falhas no estator devem-se à degradação do isolamento das bobinas. As condições de armazenamento têm um papel preponderante no estado do isolamento quando o motor entra ao serviço, portanto é essencial que estas sejam avaliadas e otimizadas para a redução das condições que tenham impacto negativo no motor.

4.1.1 Armazenamento

Alguns dos motores permanecem em armazenamento durante um período de tempo elevado, portanto é importante que sejam respeitadas as condições mencionadas pelos fabricantes para que os motores estejam em condições ótimas quando entram em funcionamento.

Assim, devem ser armazenados nas condições a seguir propostas:

- Local seco com humidade relativa do ar até 60 %;
- Temperatura ambiente uniforme entre 5 °C e 40 °C;
- Ausência de poeiras;
- Ausência de vibrações;
- Ausência de gases ou agentes corrosivos;
- Colocados em posição normal sem outros objetos em repouso;
- Caso o motor tenha resistência de aquecimento, esta deve ser ligada.

Adicionalmente, o inibidor de corrosão colocado no eixo deve ser verificado e/ou repostado a cada 6 meses.

4.1.2 Manutenção dos rolamentos

Há alguns cuidados a ter para que os rolamentos estejam em condições ótimas quando voltam ao serviço. Para os diferentes tipos de rolamentos há alguns procedimentos comuns que podem evitar danos no período de armazenamento:

- Recomenda-se girar o eixo do motor manualmente pelo menos uma vez por mês, no mínimo cinco voltas, deixando o eixo em posição diferente da original (caso o motor possua dispositivo de travamento do eixo, este deve ser retirado antes da movimentação e recolocado antes do transporte do motor).
- Caso o motor permaneça armazenado por um período superior a 2 anos, a WEG recomenda que os rolamentos sejam substituídos ou estes devem ser removidos, lavados, inspecionados e lubrificados.

4.1.2.1 Mancais de rolamento lubrificados a massa

Para motores com rolamentos abertos armazenados por mais de 6 meses, deve-se seguir os intervalos de lubrificação e os procedimentos referidos no plano de lubrificação em vigor.

4.1.2.2 Mancais de rolamento lubrificados a óleo

O motor deve ser armazenado na posição original de funcionamento e com óleo nos mancais. O nível de óleo deve ser respeitado, permanecendo na metade do visor de nível.

O óleo dos mancais dos motores verticais é retirado para evitar vazamento durante o transporte. Aquando a colocação do motor em armazém, os mancais devem ser lubrificados.

4.1.3 Resistência de isolamento

Recomenda-se medir periodicamente a resistência de isolamento dos motores para assim avaliar as condições de armazenamento sob o ponto de vista elétrico. Se forem observadas quedas nos valores de resistência de isolamento, as condições de armazenamento devem ser analisadas, avaliadas e corrigidas, quando necessário. A tabela 4-1 mostra os valores limite de isolamento recomendados pelo fabricante de motores WEG.

Tabela 4-1 – Valores limite para a resistência de isolamento (WEG, 2010).

Valor limite para tensão nominal até 1,1 kV (MΩ)	Valor limite para tensão nominal acima de 1,1 kV (MΩ)	Situação
Até 5	Até 100	Perigoso, o motor não deve operar nessa condição.
Entre 5 e 100	Entre 100 e 500	Regular
Entre 100 e 500	Acima de 500	Bom
Acima de 500	Acima de 1000	Excelente

No entanto, segundo o *standard* IEEE 43-2000, os valores mínimos de resistência de isolamento recomendados para máquinas rotativas devem ser os seguintes:

- Para isolamentos fabricados antes de 1974 = $1 \text{ M}\Omega + 1 \text{ M}\Omega/\text{kV}$ da tensão nominal da máquina.
- Para isolamentos fabricados depois de 1974, enrolamentos de formação aleatória e tensão abaixo de 1 kV = $5 \text{ M}\Omega$ ou superior.
- Para máquinas e equipamentos com enrolamentos pré formados = $100 \text{ M}\Omega$ ou superior.

4.1.4 Índice de Polarização e Índice de Absorção

Anteriormente a 1974 foi desenvolvido um sistema para avaliar a polarização do sistema de isolamento de um equipamento. Verificou-se que o isolamento de muitos equipamentos ficava polarizado ao fim de cerca de 10 minutos até várias horas, portanto, ao analisar a resistência do isolamento ao fim de 1 minuto e ao fim de 10 minutos, podia-se fazer um rácio. Este podia ser anotado para gerar uma tendência ou comparado com uma tabela simples para se poder ter uma indicação do estado do isolamento dos enrolamentos. Anteriormente, um índice de polarização (IP) abaixo de 2.0:1.0 seria indicativo de um problema com o isolamento do equipamento- normalmente teria alguma zona queimada ou teria absorvido algum tipo de contaminação (Penrose H. , 2007).

Com o *standard* IEEE 43-2000, apareceram novas limitações ao uso do IP. O teste deixou de ser fácil e direto já que o isolamento dos motores elétricos sofreu muitas alterações no fabrico desde as primeiras diretrizes. Por exemplo, os novos isolamentos começam com leituras na ordem dos Giga Ohms ou até Tera Ohms (Penrose H. , 2007). Isto significa que existem correntes de fuga extremamente baixas, sendo assim necessário equipamentos com elevada precisão onde até a posição das pinças de medida é importante.

Tanto o índice de polarização (IP) como o índice de absorção (IA) são indicadores do estado do isolamento. O IP permite estimar os níveis de humidade e contaminação geral enquanto o IA determina a que grau já se deu a contaminação no material isolante.

Estes indicadores são calculados através das seguintes equações:

$$IP = \frac{RI_{10min}}{RI_{1min}} \quad (1)$$

$$IA = \frac{RI_{60s}}{RI_{30s}} \quad (2)$$

Os dados dos testes de resistência de isolamento são úteis para avaliar a presença de alguns problemas de isolamento, como contaminação, absorção de humidade ou danos severos. No entanto, além das limitações mencionadas anteriormente, existem outras mencionadas no *standard* IEEE 43-2000:

- A resistência de isolamento de um enrolamento não está diretamente relacionada com a sua resistência dielétrica. A não ser que o defeito esteja localizado, é impossível especificar o valor da resistência de isolamento a que os enrolamentos do sistema poderão falhar.
- Os enrolamentos com extremidades com superfície excepcionalmente grande, máquinas de grande porte ou velocidade baixa, ou máquinas com comutadores (ex: DC), podem ter valores de resistência de isolamento inferiores aos valores recomendados.
- Uma única medida da resistência de isolamento a uma determinada tensão não indica se a contaminação está concentrada ou distribuída pelos enrolamentos.
- Testes de medição de tensão direta, como o RI ou IP, podem não detetar vazios internos no isolamento causados por impregnação imprópria, deterioração térmica ou ciclos térmicos em bobines de estator pré formadas (condutores retangulares, usados em máquinas de potência elevada).

Estas limitações são de grande importância já que, por vezes, devido a existirem valores de resistência de isolamento relativamente elevados, o índice de polarização é ignorado em detrimento do valor da resistência.

4.2 Vibração

A análise de vibração é um componente primordial de qualquer plano de manutenção preditiva de equipamentos rotativos.

Por norma todos os motores vêm equilibrados dinamicamente de fábrica. Na instalação podem aparecer vibrações devido a ressonância das fundações, mau alinhamento, variação de alinhamento, desequilíbrio no acoplamento, etc. Em serviço podem ocorrer avarias no motor que provocam o aumento de vibrações como por exemplo, barras rotóricas partidas, desequilíbrio de fases, danos nos rolamentos, etc.

A amplitude das vibrações pode ser medida com bastante precisão, mas é sempre necessário ter em conta os limites de vibração admissíveis para os diversos motores assim como, no caso de equipamentos mais avançados, capacidade para analisar o espectro de forma a conseguir isolar a causa da avaria.

No caso da monitorização contínua de equipamentos, através do uso de algoritmos de análise de padrões e amplitudes da vibração a determinadas frequências pode-se obter estimativas de possíveis falhas com bastante precisão.

4.2.1 Vibração em motores elétricos

Uma parte primordial para evitar desgaste excessivo será o alinhamento correto do motor com o acionamento.

Como em qualquer outra máquina elétrica rotativa, o motor de indução com rotor gaiola de esquilo (predominante na indústria) é submetido a forças eletromagnéticas e mecânicas repartidas de forma simétrica. Em boas condições, negligenciando os efeitos de poucas excentricidades e desequilíbrios mecânicos que estão sempre presentes em máquinas rotativas, apenas a frequência fundamental f existe nas correntes do estator. Por exemplo, se o rotor estiver danificado, perde-se a simetria do rotor da máquina e aparece um campo magnético de rotação contrária ao normal relacionado com uma componente de sequência inversa das correntes do rotor, com a frequência $s \cdot f$ (s designa o deslizamento). Esta sequência inversa é refletida no estator e produz uma componente de frequência $12s \cdot f$. Por consequência, é gerada uma ondulação no binário e velocidade à frequência $2s \cdot f$, que modula o fluxo magnético rotativo e provoca vibrações características (Miceli, Gritli, Tommaso, Filippetti, & Rossi, 2014). Estas, com o tratamento adequado dos dados, podem ser usadas para diagnosticar o problema em causa.

4.2.2 Principais causas mecânicas

Entre as falhas mecânicas mais relevantes que a análise de vibração pode revelar são:

- Desequilíbrio – Um ponto mais pesado num componente rotativo que causa vibração quando esta massa roda em redor do eixo da máquina, criando uma força centrífuga que provoca desgaste acentuado de rolamentos e diminuição da eficiência energética.
- Desalinhamento – Forças elevadas geradas quando os eixos da máquina estão desalinhados. Como no desequilíbrio, esta falha causa um desgaste acelerado de rolamentos e acoplamentos gerais, resultando em energia desperdiçada.
- Desgaste – À medida que determinados componentes sofrem desgaste, como rolamentos ou correias, as suas propriedades alteram-se e levam a um acentuar da vibração. No caso de rolamentos, quando uma pista de rolamentos fica picada, as esferas de rolamento passarão nestas micro crateras e irão gerar vibração adicional.
- Montagem – No caso dos rolamentos é importante que estes fiquem justos nas flanges do motor. Qualquer vibração gerada será acentuada e poderá levar a um comportamento destrutivo.

4.2.3 Ferramentas de análise

Nos últimos anos têm surgido ferramentas de análise com maior facilidade de uso e que ajudam técnicos com menor formação na área a diagnosticar problemas através da leitura das vibrações e diagnóstico imediato. Estas ferramentas são particularmente úteis em motores elétricos onde o número de variáveis o que permite isolar as falhas a um número restrito de possíveis causas.

4.2.3.1 Analisador de Vibrações Avançado



Figura 4-1 – Exemplo de analisador de Vibrações (Bernet, 2017).

A aquisição deste género de equipamentos normalmente está reservada a máquinas de elevado valor como turbinas e alternadores, onde as falhas tem custos extremamente elevados. Os analisadores de vibrações avançados necessitam de mão-de-obra especializada com experiência e capacidade para identificar possíveis falhas.

4.2.3.2 Analisador de Vibrações Simplificado



Figura 4-2 – Exemplo de medidor de vibrações simplificado (Bernet, 2017).

Este é um analisador comum mais adequado a motores elétricos, já que estes equipamentos possuem relativamente poucas variáveis. Já tem capacidade de processar os dados lidos e dar uma estimativa da condição através de sistemas de semáforos ou semelhante, não exigindo formação tão especializada e já conseguindo identificar um grande número de possíveis falhas.

4.2.3.3 Medidor de Vibrações



Figura 4-3 – Exemplo de medidor de vibrações (Bernet, 2017).

Este equipamento serve apenas para determinar se determinado equipamento está a cumprir os limites de vibração admissíveis pelos fabricantes já que apenas dá um valor absoluto. Está reservado a equipamentos simples como chumaceiras ou para primeira abordagem a rolamentos de motores elétricos.

4.3 Lubrificação de Rolamentos

Segundo dados do IEEE, mais de 40 % das falhas nos motores elétricos são causadas por falhas nos rolamentos (Bazurto, Quispe, & Mendoza, 2016). Por sua vez, a grande maioria das falhas de rolamentos devem-se aos processos de lubrificação. Devido a estes factos e às falhas encontradas no plano atual, é dado grande ênfase a este capítulo.

Nos rolamentos podem ser usados dois tipos de lubrificantes: óleo e massa consistente. Os óleos são fluidos lubrificantes em que a sua fluidez é definida pela sua viscosidade. As massas são lubrificantes consistentes sendo que estas são definidas principalmente pela sua penetração. Estas são o lubrificante preferido em rolamentos quando são desejáveis as seguintes características (BP, 2017):

- Diminuir o gotejamento ou salpicos de óleo
- Diminuir a frequência de lubrificação
- Impedir a entrada de contaminantes
- Operações intermitentes
- Diminuir o atrito localizado com lubrificantes sólidos
- Sob condições extremas de operação:
 - Elevadas temperaturas
 - Elevadas pressões
 - Cargas de choque
 - Baixa velocidade/elevadas pressões
- Máquinas com bastante desgaste
- Quando a redução do ruído é muito importante

4.3.1 Massa lubrificante

Uma massa lubrificante é um produto intermédio entre um sólido e um semissólido obtido por dispersão de um agente espessante num líquido lubrificante.

Por norma é constituída por 90 % de óleo base mais aditivos e 10 % de espessante.

A escolha da massa adequada é muito importante devido à gama de características conferidas a cada uma. As características atribuídas podem ser:

- Penetração
- Estabilidade mecânica
- Separação do óleo
- Ponto de gota
- Resistência à água
- Pressão de fluxo
- Performance antioxidante
- Performance de extrema pressão
- Ensaio de rolamentos

Quando se escolhe uma massa lubrificante para rolamentos de motores elétricos, há alguns indicadores que são comuns a todas as fichas de características, os quais são fundamentais compreender para se conseguir o lubrificante que consiga prolongar o mais possível a vida útil dos rolamentos (Decker, 2016):

- **Viscosidade:** A viscosidade do óleo deve ser adequada para a carga e a velocidade da aplicação à temperatura de funcionamento. A viscosidade do óleo mineral típico numa massa lubrificante de um motor elétrico está na gama de 90-120 cSt de viscosidade cinemática a 40 °C;
- **Consistência:** a consistência ou a firmeza de uma massa lubrificante é indicada pelo seu grau NLGI (instituto composto por vários fabricantes de lubrificantes). Normalmente, a massa de grau NLGI 2 é usada em aplicações de motores elétricos que envolvem configurações de eixo horizontal, enquanto o grau NLGI 3 é indicado como sendo mais apropriado para os motores com configurações de eixo vertical.

A tabela 4.2 mostra os vários níveis de consistência NLGI. O grau 000 corresponde a um lubrificante com consistência semelhante a óleo de transmissão, enquanto o grau 6 assemelha-se a cera.

Tabela 4-2 – Níveis de consistência NLGI (BP, 2017).

Consistência NLGI	Penetração a 25°C (em 1/10 de mm)
000	445/475
00	400/430
0	355/385
1	310/340
2	265/295
3	220/250
4	175/205
5	130/160
6	85/115

- **Resistência à oxidação:** A massa lubrificante para motores elétricos deve ter excelente resistência à oxidação. Os testes de vida útil da massa a alta temperatura da ASTM dão uma indicação adequada sobre a sua resistência à oxidação quando é submetida a condições extremas. Deve-se escolher uma massa lubrificante com alta *ASTM oxidation life* ou com *DIN 51821 FE 9 high temperature bearing life testing*.
- **Anti-desgaste (aditivos EP):** A não ser que as condições da instalação levem a uma pressão excepcional nos rolamentos, é aconselhável escolher um lubrificante que não tenha aditivos de extrema pressão. Estes aditivos podem diminuir a vida útil da massa lubrificante e, portanto, não se recomenda o seu uso quando não são necessários.
- **Ponto de Gota (*Dropping point*):** O ponto de gota é uma indicação da temperatura à qual a massa lubrificante pode derreter ou o óleo se separe do espessante. Uma massa

lubrificante com um ponto de gota elevado é desejável, dado que os rolamentos de motores elétricos podem chegar a temperaturas bastante altas.

- **Estabilidade (*Shear stability*):** O teste de penetração de lubrificação ASTM D217 mede a consistência da massa lubrificante após ter sido submetida a 100 000 golpes. Durante o teste, a consistência da massa não deve alterar em mais do que 1 a 1.5 níveis NLGI. Alterações superiores a esta podem levar a que, com o envelhecimento, a massa possa escorrer para fora do rolamento.

4.3.2 Falhas devidas à lubrificação de rolamentos

A lubrificação é essencial, mas deve ser feita seguindo as especificações do fabricante. Se não houver cuidado na elaboração de planos de manutenção adequados e no manuseamento das ferramentas de lubrificação (em particular, bombas de lubrificação de rolamentos sem *feedback*), pode dar lugar a diversas falhas (Honeycutt, 2004).

4.3.2.1 Sobreaquecimento devido a excesso de massa lubrificante

Sobre lubrificação de rolamentos faz com que os rolamentos deslizem ao longo das pistas, em vez de girarem. À medida que estes se movem, também deslocam a massa para fora do seu caminho, resultando em condições de baixa ou até nenhuma lubrificação e menor eficiência do equipamento. Este deslocamento do lubrificante e aumento da temperatura podem levar a oxidação acelerada e degradação química da massa, assim como à aceleração de uma separação do óleo do espessante (normalmente designado por sabão) e consequente escorrimento deste para fora do rolamento.

Eventualmente, as altas temperaturas e o escorrimento do óleo levam ao “cozimento” do espessante até formar uma pasta rija que se irá acumular e bloquear lubrificações futuras. Isto resultará num desgaste acelerado e eventualmente levará a falha catastrófica (Frahm, 2015).

4.3.2.2 Sobreaquecimento do motor

Excesso de lubrificação dos rolamentos do motor pode fazer com que a massa lubrificante chegue aos enrolamentos levando a que estes fiquem isolados com lubrificante, levando ao aumento geral da temperatura do motor e à diminuição da sua vida útil.

4.3.2.3 Sobre pressurização da proteção do rolamento

Quando a massa lubrificante é adicionada à cavidade do rolamento, há um aumento de pressão. Quando o rolamento e cavidade de enchimento ficam cheios de massa, deixa de haver espaço para a expansão térmica que acontece quando o motor está à temperatura normal de serviço. Se a lubrificação for feita quando o motor está frio ou for adicionada massa de forma muito rápida, a proteção lateral do rolamento pode ceder e danificar o rolamento e/ou o motor de forma irremediável.

4.3.2.4 Massa lubrificante não adequada

É importante que seja usada a massa adequada para a aplicação final. Alguns rolamentos necessitam apenas de massas de uso geral (GP – *General Purpose*) enquanto outros necessitam de massas para pressão elevada (EP – *Extreme Pressure*). Por exemplo, geralmente, os motores de montagem vertical necessitam de massas de maior consistência devido à força acrescida a que estão sujeitos e para evitar que esta se desloque para fora do rolamento e para o rotor do motor, sendo posteriormente projetada para os enrolamentos.

4.3.2.5 Perda de lubrificante

Por perda de lubrificante, refira-se à separação do lubrificante do espessante da massa consistente. Isto pode ocorrer quando:

- O rolamento não for colocado em funcionamento com massa lubrificante em quantidade suficiente;
- O rolamento não for lubrificado no intervalo adequado ou com as quantidades indicadas;
- Se o rolamento funcionar a temperatura elevada por períodos de tempo prolongados.

4.3.2.6 Incompatibilidade de massas lubrificantes

Nem todas as massas lubrificantes são compatíveis umas com as outras. Isto é devido, principalmente, ao espessante utilizado. Por norma, os espessantes de Poliureia não estabilizados são incompatíveis com a restante maioria. Estes, juntamente com os de lítio, são os mais utilizados na lubrificação de rolamentos de motores elétricos.

A tabela 4-3 mostra a compatibilidade entre os espessantes mais comuns.

Tabela 4-3 – Compatibilidade de espessantes de massa lubrificante (Turner, 2009).

Grease Compatibility Chart												
	Aluminum Complex	Barium Complex	Calcium Stearate	Calcium 12-Hydroxystearate	Calcium Complex	Calcium Sulfonate	Bentonite Clay	Lithium Stearate	Lithium 12-Hydroxystearate	Lithium Complex	Polyurea (Conventional)	Polyurea (Shear Stable)
Aluminum Complex	-	I	I	C	I	B	I	I	I	C	I	C
Barium Complex	I	-	I	C	I	C	I	I	I	I	I	B
Calcium Stearate	I	I	-	C	I	C	C	C	B	C	I	C
Calcium 12-Hydroxystearate	C	C	C	-	B	B	C	C	C	C	I	C
Calcium Complex	I	I	I	B	-	I	I	I	I	C	C	C
Calcium Sulfonate	B	C	C	B	I	-	I	B	B	C	I	C
Bentonite Clay	I	I	C	C	I	I	-	I	I	I	I	B
Lithium Stearate	I	I	C	C	I	B	I	-	C	C	I	C
Lithium 12-Hydroxystearate	I	I	B	C	I	B	I	C	-	C	I	C
Lithium Complex	C	I	C	C	C	C	I	C	C	-	I	C
Polyurea (Conventional)	I	I	I	I	C	I	I	I	I	I	-	C
Polyurea (Shear Stable)	C	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-

4.3.3 Degradação da massa lubrificante

Normalmente, a degradação da massa lubrificante é um processo gradual. As maiores influências na degradação acontecem quando o motor está em funcionamento (Honeycutt, 2004).

4.3.3.1 Endurecimento da massa lubrificante

O endurecimento da massa lubrificante é bastante comum em sistemas com déficit ou excesso de lubrificação. Por norma, acontece ao longo de um determinado período de tempo e resulta da absorção de sujeira, humidade ou oxidação.

4.3.3.2 Cargas elevadas

No caso do acionamento direto com alinhamento correto e acoplamento com amortecedor, não devem existir cargas radiais adicionais. As cargas radiais (ex. correias) podem sobrecarregar um rolamento quando este não é preparado para forças neste sentido.

4.3.3.3 Separação do lubrificante do espessante

Normalmente acontece em motores que permanecem armazenados por longos períodos de tempo sem renovação da massa lubrificante.

4.3.3.4 Velocidade de rotação do rolamento

Quanto maior a velocidade de rotação, mais rápida será a degradação da massa lubrificante. Os motores de 2 polos costumam ter intervalos de lubrificação muito mais curtos que motores de 8 polos.

4.3.3.5 Dimensão do rolamento

Quanto maior o rolamento, maior a degradação da massa lubrificante. Por norma, a dimensão do rolamento está associada à potência do motor.

4.3.3.6 Ambiente

Quanto maior a temperatura ambiente, maior probabilidade de o rolamento funcionar a temperatura elevada e quanto mais elevada a temperatura, mais rápida é a degradação da massa lubrificante.

4.3.4 Análises tribológicas

A ciência da tribologia estuda as superfícies interativas em relação ao movimento, incluindo a análise de fricção, lubrificação e desgaste. Aqui incluem-se as análises a óleos e outros lubrificantes, necessárias nos casos de transformadores com óleo, motores, alternadores, turbinas e outro equipamento rotativo que tenha mancais de rolamento banhados a óleo, devido às grandes quantidades que costumam ser empregues. No entanto, fazer análises à massa lubrificante dos rolamentos é um processo moroso e de custo proibitivo e que só poderia ser feito uma vez por ano, na paragem geral, sendo preferível substituir com um plano de lubrificação preventiva.

Por outro lado, existem vários motores de grande potência que têm válvulas de purga de massa por onde sai a massa em excesso ou câmaras onde esta se acumula e que têm de ser abertas periodicamente. Outros têm escovilhões com um canal de acesso lateral onde se acumula o lubrificante em excesso.

Nestes casos, os testes podem ser usados para ajustar o plano de lubrificação dos motores em função dos resultados das análises aos lubrificantes. Isto só seria possível se fosse garantida a limpeza destas zonas onde fossem retiradas as amostras senão estas facilmente ficariam contaminadas.

Testes possíveis:

- Análise da consistência (com penetrómetro ou Análise Gravimétrica Térmica)
- Níveis de Antioxidantes na massa lubrificante (*Differential Scanning Calorimetry*)
- Contaminação da massa usada (*Fourier Transform Infrared Spectrometry*)

4.4 Temperatura

Geralmente, cada aumento de 10 °C na temperatura de serviço do isolamento de um motor elétrico, leva a uma redução da sua vida útil em cerca de 50 % (lei de Arrhenius). Considerando o decréscimo de eficiência associado às rebobinagens, estima-se que uma redução de 1 % na eficiência de motores selados de 4, 45 e 132 kW, com arrefecimento por ventilador próprio, resulta numa diminuição da vida útil de 22, 30 e 31 %, respetivamente (Ferreira, 2008). Embora menos significativo, o lubrificante do rolamento também sofre um decréscimo de 50 % da sua vida útil por cada aumento de 15 °C (para lubrificantes minerais, que são os mais comuns). Assim, além do aumento do consumo de energia de um motor de menor eficiência, também o seu MTTF é reduzido, podendo aumentar os custos de manutenção (Ferreira, 2008).

4.4.1 Monitorização contínua - PT100

A monitorização contínua de temperatura nos rolamentos dos motores e nos enrolamentos é das formas mais fiáveis de deteção de falhas em progresso. Por exemplo, à medida que os rolamentos se vão deteriorando, a temperatura aumenta. Muito frequente na indústria de pasta de papel, são as restrições (biomassa e pasta de papel) ao sistema de dissipação de calor de um motor que podem levar ao aumento da temperatura e deterioração do isolamento ao ponto de este falhar. Desequilíbrios resistivos nas bobinas do estator, desequilíbrios na tensão de alimentação e harmónicos são alguns dos muitos outros problemas que causam aumento da temperatura do motor. Tendo sistemas de monitorização contínua de temperatura instalados, grande parte destes problemas pode ser detetado com antecipação, podendo depois ser usado equipamento de análise especializado (análise de vibrações e/ou corrente de motores) para detetar a falha.

A implementação de sistemas de monitorização de temperatura com sensores de temperatura PT100, já incluídos em vários motores de grande potência, tem um custo relativamente baixo quando comparado com o benefício que se obtém com estes. Por norma, estes sistemas apenas servem para observação instantânea e alarme em caso de ser atingida uma temperatura predefinida. Por exemplo, engenheiros da WEG presentes nas instalações da Navigator Pulp Cacia recomendaram alarmes de temperatura quando são atingidos cerca de 100 °C nos rolamentos e paragem do motor a cerca de 110 °C. Estes valores são ainda mais conservativos que os do manual de manutenção do fabricante que recomenda, respetivamente, 110 °C e 120 °C, como se pode observar na tabela 4.4.

Tabela 4-4 – Temperaturas máximas para atuação das proteções térmicas (WEG, 2010).

Componente	Classe de isolamento	Temperatura máxima de operação (°C)	
		Alarme	Desligamento
Enrolamento	B	-	130
	F	130	155
	H	155	180
Mancal	Todas	110	120

Um sistema de análise de tendências tem melhor enquadramento na manutenção preditiva e permite detetar as falhas com maior antecedência, evitando as paragens por serem atingidas as temperaturas de alarme. Neste caso, quando o projeto já tem os sistemas de aquisição de dados, apenas é necessária alteração do sistema central.

Esta deve ser uma prioridade nos motores de difícil acesso, de difícil manutenção ou de criticidade elevada, onde é necessária preparação para agilizar o processo de substituição e diminuir o tempo de paragem.

4.5 Análise de Corrente de Motores

O uso generalizado de motores elétricos de indução na indústria requer cada vez mais precisão no diagnóstico de falhas futuras para que estas não venham a comprometer a produção. As técnicas de manutenção preditiva baseadas na análise de padrões de falhas no espectro de frequência da corrente do estator do motor de indução, são uma ferramenta cada vez mais usada devido à sua elevada fiabilidade na deteção e distinção de vários tipos de problemas associados a estes motores.

O fundamento teórico básico da técnica MCSA é baseado na capacidade de que as falhas, sejam elétricas ou mecânicas, têm de influenciar o fluxo magnético no entreferro do motor. Esta técnica é muito usada na manutenção preditiva devido à sua facilidade de uso e às suas características não invasivas (Fontes, Cardoso, & Oliveira, 2016).

Nos últimos anos, técnicas mais avançadas têm vindo a surgir tais como: *Extended Park Vector Approach* (EPVA), *Park's Vector Square Modulus* (PVSM) e *Park-Hilbert Transform* (PVSMP-H). A grande vantagem destas técnicas é a capacidade de usar as 3 fases do motor invés de apenas uma fase na técnica MSCA. Isto permite analisar uma quantidade de informação bastante maior. No entanto estas técnicas necessitam de alguns conhecimentos e experiência para se conseguir distinguir condições de funcionamento anormais, já que os parâmetros monitorizados podem resultar de outras fontes como variações na carga ou harmónicos na rede.

Recentemente têm sido usadas técnicas mais avançadas que usam inteligência artificial, redes neurais e lógica *fuzzy* para deteção de padrões na corrente do estator (Fontes, Cardoso, & Oliveira, 2016).

4.5.1 Qualidade de energia

Cada vez mais importante, a qualidade de energia é um tópico bastante discutido nos dias de hoje com cada vez mais equipamentos eletrónicos sensíveis a variações de tensão e, ao mesmo tempo, cada vez mais equipamento gerador de harmónicos e outros distúrbios na rede. A análise de corrente de alimentação dos motores permite detetar falhas nestes, mas

obviamente também permite a análise da qualidade de energia da rede de alimentação. Algumas das falhas relacionadas com qualidade de energia são aqui resumidas:

- Picos de tensão – Este tipo de falha na qualidade de energia pode causar problemas sérios no isolamento se repetida e se a amplitude do pico de tensão for suficientemente grande.
- Desequilíbrio de fases – O desequilíbrio de fases provoca campos girantes com binário contrário ao da rotação normal, introduzindo ineficiência, vibração e aumento da temperatura do motor.
- Harmónicos – A existência de harmónicos provoca o aumento da temperatura dos enrolamentos do estator e acentua a circulação de correntes de modo comum através dos rolamentos, encurtando a sua vida útil. Isto é de conhecimento geral nos casos de motores alimentados por VEVs que, por norma, funcionam a temperaturas superiores para a mesma potência.

4.5.2 Vetor de Park

O Vetor de Park é uma técnica de diagnóstico relativamente recente, mas bastante difundida que permite ter uma perceção rápida da presença de alguns tipos de falhas no estator, rotor e até nos rolamentos (Mehala & Dahiya, 2010). Para o cálculo deste gráfico apenas é necessário a leitura da corrente instantânea nas três fases e, aplicando esta à matriz seguinte, pode-se obter o gráfico do Vetor de Park.

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_a & \frac{-1}{\sqrt{6}} \cdot i_b & \frac{-1}{\sqrt{6}} \cdot i_c \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_b & \frac{-1}{\sqrt{2}} \cdot i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Em condições ideais, sistemas com corrente trifásica formam o Vetor de Park com as seguintes componentes:

$$i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} \cdot I \cdot \sin \omega t \quad (4)$$

$$i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} \cdot I \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

Com:

I = valor máximo da corrente de alimentação

ω_s = frequência da rede

t = tempo

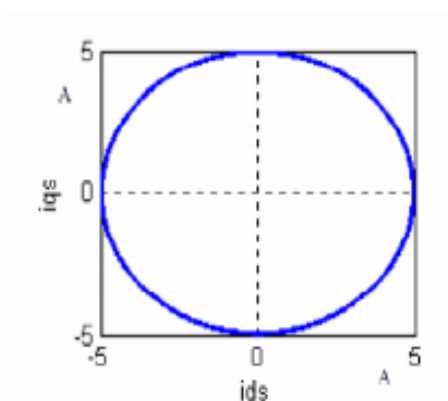


Figura 4-4 – Vetor de Park teórico de uma máquina em bom estado (Ourici & Ouari, 2012).

Quando o gráfico (Figura 4-4) deixa de apresentar forma circular e começa a apresentar a forma de uma elipse, significa que se pode estar a formar uma falha no motor, sendo que o tipo de falha pode ser estabelecido através das características da elipse. Outras alterações na forma podem significar problemas na corrente de alimentação, como se poderá observar nos casos de estudo do capítulo 5.

4.5.3 Equipamentos de teste - PdMA MCEMAX

As instalações da NPC possuem um analisador de corrente para motores elétricos - o PdMA MCEmax (Figura 4-5).



Figura 4-5 – Equipamento de análise PdMA MCEMAX (PdMA, 2017).

Este é um equipamento sofisticado e muito interessante para o estudo da condição e diagnóstico de falhas de motores elétricos. No entanto, este ficou inoperacional no início do estágio, não tendo havido oportunidade de explorar uma das áreas mais promissoras da manutenção preditiva. Devido à importância do equipamento, o grupo The Navigator

Company decidiu investir num modelo semelhante, mais recente, para substituir o equipamento avariado, mas, até à data do final do estágio, ainda não o tinham em sua posse. As capacidades e limitações do equipamento foram estudadas para aprendizagem do seu uso, caso estivesse pronto e pudesse ser integrado no relatório.

O equipamento de análise possui uma grande variedade de dados e testes diferentes que possibilitam a deteção da grande maioria das falhas em motores elétricos. Aqui são descritos os dados e testes possíveis:

- | | |
|--|--|
| 1. Resistência fase a fase | 19. Análise da excentricidade de alta frequência |
| 2. Indutância fase a fase | 20. Arranque/Aceleração trifásica |
| 3. Equilíbrio de resistências | 21. Tensão fase a fase e neutro a fase |
| 4. Equilíbrio de indutâncias | 22. Desequilíbrio de Tensões |
| 5. Capacitância à terra | 23. Fator de pico de corrente |
| 6. Índice de Polarização | 24. Distorção harmónica total (THD) |
| 7. Rácio de absorção do dielétrico | 25. % <i>Full Load Amps</i> |
| 8. Resistência à terra medida | 26. Corrente RMS por fase |
| 9. Resistência à terra corrigida | 27. Impedância por fase |
| 10. Verificação de influência do rotor | 28. Desequilíbrio de Impedâncias |
| 11. Indutância Campo DC | 29. Potência (kW, kVA, kVAR) |
| 12. Resistência Campo DC | 30. Fator de Potência |
| 13. Capacitância Campo DC | 31. Eficiência |
| 14. Resistência à terra Campo DC | 32. Análise de custo da energia |
| 15. Testes à armadura DC | 33. Potência útil |
| 16. Testes a motores Síncronos | 34. Binário |
| 17. Testes a motores de rotor bobinado | |
| 18. Análise espectral da corrente | |

Os testes possíveis podem ser realizados com o motor em serviço para leitura da corrente de alimentação ou fora de serviço, para aferir o estado do isolamento, entre outros.

4.5.3.1 Teste MCE

Este é um teste não destrutivo e apenas pode ser realizado com o motor fora de serviço. O teste demora cerca de 10 minutos quando são efetuados os testes ao isolamento. Este teste assemelha-se às medições efetuados por um Mega ohmímetro para aferir se existe e qual o grau de contaminação do isolamento, mas complementado com a medição de outros parâmetros.

Características medidas:

- Resistência à terra (RTG – *Resistance to ground*)
Testa isolamento do motor e cablagem à terra.

- Capacitância à terra (CTG – *Capacitance to ground*)
Indicador adicional do estado do isolamento/sujidade no motor. Indica a acumulação de contaminantes no isolamento.
- Resistência fase a fase (*phase-to-phase resistance*)
Testa a resistência do circuito e das bobinas do estator. Calcula desequilíbrio resistivo e indica quando os valores não são satisfatórios.
- Podem ser usados para indicar pontos quentes, ligações com resistência alta ou curto-circuito no estator.
- Indutância fase a fase (*phase-to-phase inductance*)
Testa o circuito, bobina do estator, ferro e componentes do rotor por desequilíbrios indutivos e indica se estes são insatisfatórios.
- Tensão por degraus (*step voltage*)
O teste de tensão por degraus grava o pico e o decair de corrente por cada aumento (step) na tensão DC aplicado através do isolamento do circuito à terra. O teste permite que o utilizador observe a resposta do sistema de isolamento a um teste de sobretensão. O estado do isolamento pode ser identificado através da análise do gráfico de correntes de fuga.
- Índice de Polarização (IP)
É realizado um teste de 10 min ao isolamento. O rácio de Absorção do Dielétrico (DA) é calculado e é realizado um perfil do *plot* RTG vs tempo. O perfil pode ser usado para identificar o estado do sistema de isolamento do motor.

Adicionalmente, o teste MCE pode fazer verificação de influência do rotor (RIC – *Rotor Influence Check*) em motores AC, testes de isolamento e de tensão por degraus e Índice de Polarização para motores AC e DC e um teste de comutador barra-a-barra nos motores DC.

- Verificação de Influência do Rotor (RIC)
O RIC é realizado para isolar problemas do rotor ou estator. Enquanto o rotor é girado manualmente, é realizado um *plot* da sua influência nas bobinas do estator através de medidas da indutância. Se a influência nas bobinas do estator for uniforme, então a anomalia está isolada ao rotor. Se a influência nas bobinas do estator for não uniforme, então a anomalia está isolada ao estator.
- Comutador barra a barra
O teste é realizado na secção da armadura de motores DC. Isto ajuda a diagnosticar problemas no comutador ou bobinagem da armadura.

4.5.3.2 Teste EMAX

O teste EMAX permite testar motores AC e DC em serviço. Este é o mais comum e aquele para o qual o equipamento foi primariamente adquirido já que permite a leitura da corrente do motor e detecção de possíveis falhas associadas a determinadas frequências além da fundamental.

Os tipos de teste possíveis com o motor em serviço são:

- Análise de corrente (*Current Analysis*)
- Análise de potência (*Power Analysis*)
- Teste de arranque/aceleração. (*In-Rush/Start-Up*)

A parte de análise de corrente do teste EMAX mede a corrente nas 3 fases do circuito do motor AC. Esta realiza os seguintes testes a motores AC a funcionar com uma carga recomendada igual ou superior a 70 %:

- Avaliação do Rotor
É realizado para identificar danos nas barras do rotor antes que causem danos nas bobinas do estator ou nos rolamentos.
- Excentricidade
Este teste é realizado para determinar excentricidade do motor antes que haja danos no rotor, estator e rolamentos.
- Teste de arranque/aceleração DC (*In-Rush/Start-Up*)
É realizado para monitorizar assinaturas de corrente no arranque e aceleração do motor, fornecendo sinais precoces de degradação do motor e análise de processo.

A parte de Análise de Potência do teste EMAX realiza medições de tensão e corrente das três fases do circuito do motor e providencia a seguinte informação:

Sinais de tensão, corrente e potência, em relação ao tempo, são usados para indicar a relação entre tensão e corrente para verificar a sequência de fases correta e determinar qualidade de energia. São usados gráficos FFT de tensão, corrente e potência para detetar amplitudes anormais de várias frequências de falha conhecidas. Harmónicos de tensão, corrente e potência são usados para determinar a qualidade de energia de entrada. Uma página de resultados com vários parâmetros é usada para documentar leituras efetuadas durante cada teste.

O teste Demod para motores AC filtra a frequência de 60/50 Hz e revela sinais escondidos, representando variações na carga do motor. Estas variações podem depois ser analisadas e verificar se indicam possíveis falhas em progresso.

4.5.3.3 Testes a motores com VEV

Para realizar testes com motores acionados por inversores de frequência deve-se ter alguns cuidados acrescidos. Nos testes com o motor fora de serviço, o variador deve estar desconectado do motor já que a injeção de corrente pelo equipamento de medida pode danificar o VEV, enquanto para testes com o motor em serviço, deve-se fazer dois testes (quando possível): um no lado do motor e outro no lado do VEV. Assim, consegue-se uma leitura mais precisa e despistar eventuais problemas que possam estar ligados apenas ao motor ou apenas ao VEV. Outro dos cuidados a ter envolve os alarmes de distorção harmónica e amplitude de tensão que, no caso de alimentação por VEV, não se aplicam da mesma forma que a um motor de alimentação direta com onda sinusoidal e, portanto, têm de ser ajustados.

5 Desenvolvimento e Implementação

Neste capítulo é mostrado uma parte do trabalho desenvolvido com potencial para alterar e/ou implementar no plano de manutenção em vigor. Assim, as áreas da manutenção aqui discutidas foram aquelas onde havia maior margem para melhorias.

5.1 Prioridade na Manutenção

Para se poder implementar um plano de manutenção preditiva eficaz, é necessário um sistema de monitorização contínua. No caso dos motores elétricos, o sistema convém ser implementado de forma faseada considerando primeiro os motores críticos e com maior potencial de retorno financeiro a curto prazo. A instalação já tem processos para análise de criticidade de equipamentos, mas não para os motores. No entanto, motores que afetem equipamentos críticos serão parte do sistema e, portanto, também serão eles críticos.

5.1.1 Análise de Criticidade de Equipamentos

A seguinte análise de criticidade de equipamentos foi elaborada para a zona da tiragem nº3 (formação, secagem e enfardamento da pasta).

O Índice de criticidade deste método é avaliado em função de 3 fatores:

- Severidade da falha
- Probabilidade de falha
- Detetabilidade

Estes são depois agregados num índice de criticidade com as respetivas propostas de melhoria (Branco, 2016):

- 1) Severidade – Consequência da falha (**CF**)
 - a) Consequências na Produção (1-3)
 - b) Manutibilidade (1-3)
 - c) Segurança e Ambiente (1-3)
- 2) Frequência – Probabilidade da Falha (**PF**)
 - a) Fiabilidade (1-3)
- 3) Detetabilidade (**DF**)
 - a) Detetabilidade (1-3)
- 4) Índice de Criticidade (**IC**)
 - a) Criticidade (1-4)
 - i) Criticidade (secundário, importante, crítico)
 - ii) Sev. vs Freq. (secundário, importante, crítico)
 - iii) Sev. vs Det. (secundário, importante, crítico)
 - iv) Classificação

- 5) Ações de melhoria
 - a) Medida Corretiva
 - b) Custo
 - c) CF (1-3)
 - d) PF (1-3)(C-A)
 - e) DF (1-3)(C-A)

Este método pode ser adequado para os diversos equipamentos da fábrica, mas pode-se tornar muito elaborado e demasiado exaustivo para análise de motores elétricos, onde as variáveis são em muito menor número que noutros equipamentos complexos.

5.1.2 Análise de criticidade de motores elétricos

A área da produção (colaboradores afetos ao controlo e funcionamento do processo de produção) tem maior experiência sobre o funcionamento de cada um dos equipamentos, sendo que estes têm um bom conhecimento dos tempos de paragem e de que forma influenciam o sistema produtivo. Assim, para uma abordagem inicial, ao apresentar à produção um sistema simples de poucos níveis e de fácil compreensão como o seguinte, rapidamente e de forma eficiente se pode obter uma lista de motores elétricos com potencial para um sistema de monitorização contínua:

1. Não crítico. Pode ser colocado fora de serviço sem análise prévia.
2. Pouco crítico. Pode afetar produção parcialmente. Necessária análise prévia.
3. Crítico. Necessário à produção. Desconsignação/avaria a partir de x tempo, limita ou pára a produção.
4. Muito crítico. Essencial ao processo. A sua colocação fora de serviço pára a produção de forma imediata (ex. todos os que interfiram com o funcionamento da caldeira de recuperação).

Resumindo, qualquer motor que interfira com o processo de forma imediata, considera-se muito crítico e, portanto, prioritário nas operações de manutenção e monitorização.

5.2 Isolamento

A avaliação do estado do isolamento dos motores, principalmente os novos e os reconicionados em armazém, é uma área muitas vezes descurada considerando a facilidade e fiabilidade dos testes que podem ser realizados, com custos baixos de implementação já considerando que a empresa possui equipamento de alta qualidade para este fim (Figura 5-1).

5.2.1 Receção de motores pós reparação

Por norma, quando um motor é reparado, as suas características iniciais são alteradas sendo que até os motores que vêm novos de fábrica podem ter tido problemas no controlo de

qualidade. Tendo em conta que existem várias instalações em que o processo de substituição de um motor tem um tempo e custo elevados, a instalação de um motor com falhas teria graves consequências. Assim, deve-se acompanhar os motores desde a sua receção, para verificar a conformidade com os procedimentos de reparação, com equipamento como o PdMA MCEMax.



Figura 5-1 – Mega ohmímetro de média tensão disponível nas instalações da NPC.

Antes de um motor ser colocado ao serviço pela primeira vez, depois de ser reparado ou de estar armazenado por um longo período, deve-se medir o isolamento do motor para aferir qual o seu estado. Por norma, o isolamento de motores novos ou reparados é muito alto, mas condições não favoráveis durante o transporte ou armazenamento podem levar à acumulação de humidade de tal forma que pode levar à diminuição da resistência de isolamento até ao ponto de ser perigoso colocar o motor em funcionamento. Isto também se aplica a motores que vão ser recolocados em funcionamento, após serem parados durante um determinado período em condições ambientais desfavoráveis (como em paragens da fábrica). Como referido, a figura 5-1 mostra um sofisticado equipamento de medição de isolamento de motores e transformadores (inicialmente adquirido para os transformadores de média tensão). Este pode e deve ser usado nas medições do estado de isolamento de motores.

5.2.2 Índice de Polarização e Índice de Absorção

Como já foi referido, tanto o índice de polarização (IP) como o índice de absorção (IA) são indicadores do estado do isolamento. O IP permite estimar os níveis de humidade e contaminação geral enquanto o IA determina a que grau já se deu a contaminação no material isolante. Estes indicadores são úteis para avaliar as condições de armazenamento e criar tendências. Se as condições ambientais não forem favoráveis, o IP e o IA irão diminuir ao longo do tempo.

Para avaliar o estado do isolamento deve-se comparar os valores medidos com os indicados na tabela 5-1:

Tabela 5-1 – Índice de Polarização e Índice de Absorção.

Índice de Polarização	Índice de Absorção	Classificação
< 1	-	Péssimo
1 a 1,5	< 1,1	Perigoso
1,5 a 2	1,1 a 1,25	Razoável
2 a 3	1,25 a 1,4	Bom
3 a 4	1,4 a 1,6	Muito Bom
> 4	> 1,6	Excelente

No caso de o equipamento de medida ter capacidade para fazer um *plot* da medição ao longo do período de teste (como o Megger MT515 e o PdMA MCEMax que as instalações possuem), o gráfico para um equipamento sem contaminação terá um crescimento estável da resistência de isolamento, como o gráfico da figura 5-2:

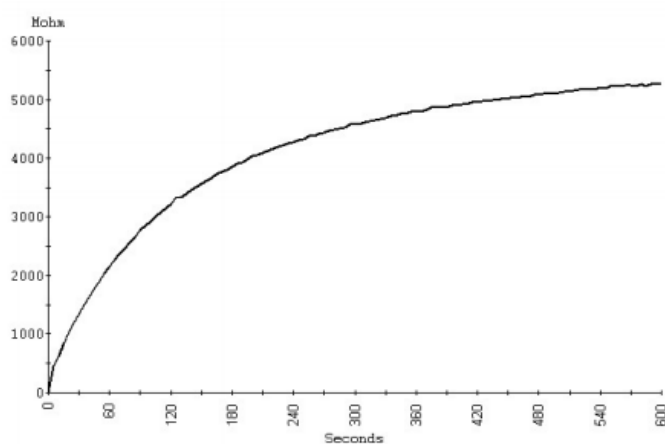


Figura 5-2 – Gráfico da evolução da resistência de isolamento de equipamento saudável (McKinnon, 2017).

Como o PI é um rácio entre o valor ao fim de 10 minutos e o valor ao fim de 1 minuto, este terá um PI alto. Já os gráficos das figuras 5-3 e 5-4 mostram motores com contaminação nos enrolamentos.

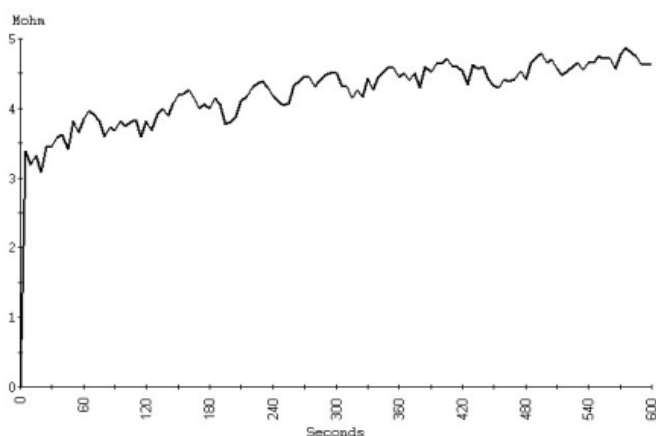


Figura 5-3 – Gráfico da evolução da resistência de isolamento de equipamento com humidade (McKinnon, 2017).

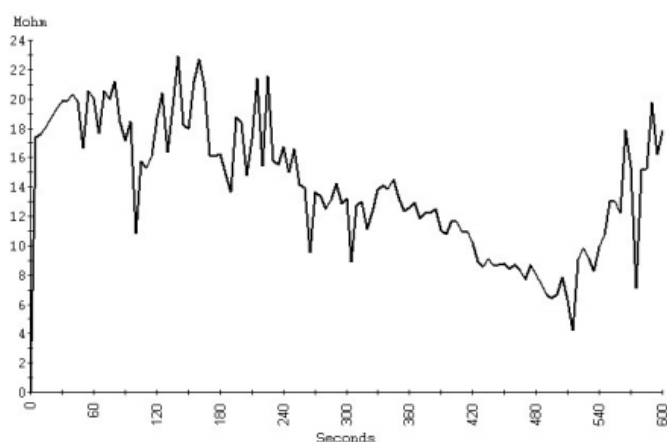


Figura 5-4 – Gráfico da evolução da resistência de isolamento de equipamento com contaminação severa (McKinnon, 2017).

No caso de haver contaminação na bobinagem, o gráfico irá apresentar pouca variação entre o valor final e o valor inicial (PI irá aproximar-se do valor 1) e apresentará vários picos e depressões. A figura 5-4 mostra a medição de um equipamento que tinha níveis de contaminação elevados. Aqui verifica-se que o teste iria apresentar um PI com um valor inferior a um e com vários picos e depressões pronunciadas nos valores de medição da resistência, indicando contaminação severa do sistema de isolamento do estator.

5.3 Armazenamento

Como referido no capítulo 4, é importante que as condições de armazenamento sejam adequadas para que os motores não entrem ao serviço com isolamento contaminado, corrosão ou rolamentos danificados. Neste subcapítulo são mostradas as condições atuais e as oportunidades de melhoria baseadas em recomendações dos fabricantes e literatura atual.

5.3.1 Condições atuais de armazenamento

O armazém de motores está dividido em duas secções distintas. Os motores de baixa potência (abaixo de cerca de 110 kW) e/ou de baixo valor para a empresa (normalmente motores antigos), são colocados num armazém coberto ligado ao armazenamento geral, mas sem portas ou controlo do ambiente (humidade e temperatura). Devido a estas condições, verificou-se vários motores reconicionados já com elevado nível de corrosão.

Os motores de potência elevada e/ou alto valor para a empresa são colocados num armazém deslocado do armazém geral, fechado e com acesso restrito. Após visita para inspeção, constatou-se que embora este tenha portas fechadas, não havia controlo do ambiente havendo mesmo um odor característico de ambientes com elevada humidade, que também se deve à presença de madeiras das embalagens e paletes de transporte. Verificou-se também a presença de roedores que embora não apresentem perigo para o exterior dos motores, podem roer e afetar o isolamento dos cabos elétricos presentes na caixa de ligações ou dos cabos de ligação das resistências de aquecimento.

Devido à fábrica e respetivos armazéns se situarem contíguos a uma via ferroviária, estão sujeitos às vibrações provocadas pela passagem de comboios. Como não é possível deslocar os armazéns para fora do alcance destas, é de salientar a recomendação do fabricante relativa à periódica rotação do rotor para evitar danos aos rolamentos. Foi-me transmitido que, após terem sido instalados motores com elevados danos nos rolamentos causados no período em que permaneceram armazenados, no último ano foi implementado um plano que envolve fazer meia rotação do veio de cada motor a cada 3 meses, mas que não tem sido implementado corretamente e que, mesmo seguindo estas indicações, não segue as recomendações dos fabricantes.

Como medidas de melhoria recomenda-se:

- Fechar e isolar passagens de ar do armazém de motores de baixa potência.
- Isolar o armazém de motores de alta potência.
- Colocar meios de controlo de pragas.
- Colocar meios de controlo da humidade (desumidificadores) em ambos armazéns.
- Implementar plano de rotação periódica dos veios seguindo as recomendações dos fabricantes mencionadas no capítulo 4.
- Adaptar os intervalos de lubrificação para os motores em armazém tendo preferência pelos motores que têm purga de massa, para evitar sobre lubrificação.
- Verificar periodicamente os valores da resistência de isolamento dos motores para avaliar as condições de armazenamento.

5.4 Lubrificação

Devido aos rolamentos serem uma das maiores causas de falhas de motores elétricos (Bazurto, Quispe, & Mendoza, 2016), esta área de estudo teve uma ênfase considerável no decorrer do estágio.

A maioria dos motores analisados referem o uso de massas lubrificantes de grau NLGI 2 para motores de médias potências e instalação horizontal e de massas lubrificantes de grau NLGI 3 para motores de grande potência e/ou instalação vertical.

5.4.1 Informação dos fabricantes

Embora os fabricantes indiquem os intervalos de lubrificação a seguir na carcaça do motor, a degradação das placas com a informação necessária e a falta de um registo sistemático destes dados, impediu que efetivamente fosse implementado um plano de lubrificação correto. Assim, uma parte do estágio consistiu na catalogação dos mais de 1800 motores para posterior processamento da informação. Devido à duração do estágio, foi necessário concentrar o processamento de informação para os motores mais críticos, mas não havendo critérios definidos, foram selecionados os motores acima de 90 kW porque são, normalmente, os mais críticos. Os dados aqui referidos são essenciais para colmatar a ausência de informação de uma parte substancial dos motores. Os 6 fabricantes mencionados compõem a grande maioria dos motores instalados.

5.4.1.1 Motores WEG

A The Navigator Company possui contratos com fabricantes de motores que determinam a sua aquisição. Por exemplo 20 % dos motores instalados com potência acima de 90 kW são da marca WEG. O plano de lubrificação em vigor na NPC indica massa específica com espessante de poliureia para estes motores, mas não tem mais indicações, revelando-se um pouco aquém do ideal principalmente devido a que a informação fornecida por este fabricante ser bastante extensa. Aqui são mostrados alguns dos pontos mais importantes para um bom plano de manutenção e lubrificação de motores.

Os intervalos de lubrificação especificados nas tabelas seguintes, consideram uma temperatura absoluta do mancal de 70 °C (até à carcaça IEC 200 / NEMA 324/6) e 85 °C (a partir da carcaça IEC 225 / NEMA 364/5), rotação nominal do motor, instalação horizontal e massa Mobil Polyrex EM. Qualquer variação dos parâmetros indicados acima deve ser sujeita a avaliação pontual. Assim, um motor que funcione a metade da rotação nominal (com uso de VEV) pode ter o seu intervalo de lubrificação praticamente duplicado, embora tenha que ter em conta que, com uso de VEV, o intervalo de lubrificação original deve ser reduzido (20-25 %).

Tabela 5-2 – Intervalos de Lubrificação para rolamentos de esferas de motores WEG (WEG, 2010).

Carcaça		Polos	Rolamento	Quantidade de graxa (g)	Intervalos de relubrificação (horas)						
IEC	NEMA				ODP (Invólucro aberto)		W21 (Invólucro Fechado)		W22 (Invólucro Fechado)		
					50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	
90	143/5	2	6205	4	-	-	20000	20000	25000	25000	
		4									
		6									
		8									
100	-	2	6206	5	-	-	20000	20000	25000	25000	
		4									
		6									
		8									
112	182/4	2	6207/ 6307	9	-	-	20000	20000	25000	25000	
		4									
		6									
		8									
132	213/5	2	6308	11	-	-	20000	18400	25000	23200	
		4					20000	20000	25000	25000	
		6									
		8									
160	254/6	2	6309	13	20000	20000	18100	15700	22000	20000	
		4					20000	20000	25000	25000	
		6									
		8									
180	284/6	2	6311	18	20000	20000	13700	11500	17000	14000	
		4					20000	20000	25000	25000	
		6									
		8									
200	324/6	2	6312	21	20000	20000	11900	9800	15000	12000	
		4					20000	20000	25000	25000	
		6									
		8									
225 250 280 315 355	364/5 404/5 444/5 445/7 447/9 L447/9	2	6314	27	18000	14400	4500	3600	5000	4000	
		4					11600	9700	14000	12000	
		6					16400	14200	20000	17000	
		8					19700	17300	24000	20000	
	504/5 5008	5010/11 589/7 588/9	2	6316	34	14000	*Mediante consulta	3500	*Mediante consulta	4000	*Mediante consulta
			4					10400	8500	13000	10000
			6					14900	12800	18000	16000
			8					18700	15900	20000	20000
	5010/11 589/7 588/9	504/5 5008	2	6319	45	*Mediante consulta					
			4			9000	7000	11000	8000		
			6			20000	20000	13000	11000	16000	13000
			8			17400	14000	20000	17000		
5010/11 589/7 588/9		504/5 5008	4	6322	60	20000	20000	7200	5100	9000	6000
			6					10800	9200	13000	11000
			8					15100	11800	19000	14000
			8								

Como se pode observar na tabela 5-2, os motores com a carcaça 355 (até 315 kW), podem ter intervalos de lubrificação tão variados como 3300 h até 25000 h (~5 meses a ~34 meses), podendo estes valores variar se houverem desvios às condições de teste como por exemplo:

- Grandes variações de temperatura ambiente (altas ou baixas).
- Ambientes agressivos.
- Variação de velocidade (acionamento por variador eletrônico de velocidade).

Também referido por vários fabricantes é de que, para cada incremento de 15 °C na temperatura de serviço do mancal (no caso dos WEG, acima dos 70-85 °C), o intervalo de lubrificação deverá ser reduzido para metade.

Motores originais de fábrica para posição horizontal, porém instalados na posição vertical (com autorização do fabricante) devem ter o seu intervalo de lubrificação reduzido para metade. Por norma esta situação não se verifica já que os apoios de um motor vertical e um

motor horizontal são bastante diferentes, embora as instalações da NPC tenham locais de instalação preparados para instalar motores horizontais em posição vertical.

Estes intervalos tão variados significam que o plano de lubrificação em vigor de 3 meses (~2200 horas) não é adequado, devendo este ser bastante alargado na maioria dos casos, o que deverá poupar recursos e tempo das equipas de lubrificação, assim como evitar problemas por sobre lubrificação. A tabela 5-3 mostra os intervalos de lubrificação para rolamentos de rolos, menos comuns e normalmente afetos a motores de grandes dimensões.

Tabela 5-3 – Intervalos de Lubrificação para rolamentos de rolos de motores WEG (WEG, 2010).

Carcaça		Polos	Rolamento	Quantidade de graxa (g)	Intervalos de relubrificação (horas)					
					ODP (Invólucro aberto)		W21 (Invólucro Fechado)		W22 (Invólucro Fechado)	
					50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
160	254/6	2	NU309	13	20000	19600	13300	9800	16000	12000
		4				20000	20000	20000	25000	25000
		6								
		8								
180	284/6	2	NU311	18	18400	12800	9200	6400	11000	8000
		4			20000	20000	20000	19100	25000	25000
		6						20000		
		8								
200	324/6	2	NU312	21	15200	10200	7600	5100	9000	6000
		4			20000	20000	20000	17200	25000	21000
		6						20000		
		8								
225 250 280 315 355	364/5	4	NU314	27	17800	14200	8900	7100	11000	9000
	404/5	6			20000	20000	13100	11000	16000	13000
	444/5	8					16900	15100	20000	19000
	445/7	4	NU316	34	15200	12000	7600	6000	9000	7000
	447/9	6			20000	19000	11600	9500	14000	12000
	L447/9	8				20000	15500	13800	19000	17000
	504/5	4	NU319	45	12000	9400	6000	4700	7000	5000
	5008	6			19600	15200	9800	7600	12000	9000
5010/11	8	20000			20000	13700	12200	17000	15000	
586/7	4	NU322	60	8800	6600	4400	3300	5000	4000	
588/9	6			15600	11800	7800	5900	9000	7000	
	8			20000	20000	11500	10700	14000	13000	

5.4.1.2 Motores ABB

Os motores ABB estão presentes em grande número entre os que têm maior potência (33.7 % dos motores instalados acima de 90 kW), assim como estão em grande parte das localizações mais críticas das instalações da NPC, portanto é importante uma análise aprofundada a estes.

A tabela 5-4 mostra o tempo de vida estimado dos rolamentos selados. Estes não necessitam de lubrificação adicional, sendo o lubrificante desenhado para durar a vida útil do rolamento. Estes costumam vir instalados nos motores de menor potência.

Tabela 5-4 – Tempo de vida de rolamentos selados, sem lubrificação adicional (ABB, 2009).

Tamanho da estrutura	Pólos	Horas de funcionamento a 25° C	Horas de funcionamento a 40° C
56-63	2-8	40 000	40 000
71	2	40 000	40 000
71	4-8	40 000	40 000
80-90	2	40 000	40 000
80-90	4-8	40 000	40 000
100-112	2	40 000	32 000
100-112	4-8	40 000	40 000
132	2	40 000	27 000
132	4-8	40 000	40 000
160	2	40 000	36 000
160	4-8	40 000	40 000
180	2	38 000	38 000
180	4-8	40 000	40 000
200	2	27 000	27 000
200	4-8	40 000	40 000
225	2	23 000	18 000
225	4-8	40 000	40 000
250	2	16 000	13 000
250	4-8	40 000	39 000

O tempo de vida de rolamentos selados é bastante importante para aferir quando se deve aumentar a frequência das inspeções de ação sensorial genérica para avaliar o tempo de vida restante ou, em último caso, simplesmente retirar os motores de serviço para substituir os rolamentos.

Os intervalos de lubrificação das tabelas 5-5 e 5-6 abrangem a quase totalidade dos motores ABB instalados na NPC, fornecendo a informação adequada para os vários motores que já não possuem chapa de características com informação legível.

Tabela 5-5 – Intervalos de lubrificação para rolamentos de esferas de motores ABB (adaptado de (ABB, 2009)).

Tamanho da estrutura	Quantidade de lubrificante (g/rolam.)	Potência (kW)	3000 rpm	Potência (kW)	1500 rpm	Potência (kW)	1000 rpm	Potência (kW)	500 - 900 rpm
Intervalos de lubrificação em horas de serviço									
112	10	todas	13 000	todas	21 000	todas	25 000	todas	22 800
132	15	todas	11 000	todas	19 000	todas	23 000	todas	26 500
160	25	≤ 18.5	12 000	≤ 15	21 500	≤ 11	24 000	todas	24 000
160	25	> 18.5	10 000	> 15	18 000	> 11	22 500	todas	24 000
180	30	≤ 22	9000	≤ 22	18 500	≤ 15	24 000	todas	24 000
180	30	> 22	8500	> 22	17 000	> 15	21 000	todas	24 000
200	40	≤ 37	8000	≤ 30	17 500	≤ 22	23 000	todas	24 000
200	40	> 37	5500	> 30	12 000	> 22	16 000	todas	20 000
225	50	≤ 45	6500	≤ 45	16 500	≤ 30	22 000	todas	24 000
225	50	> 45	2500	> 45	6000	> 30	8000	todas	10 000
250	60	≤ 55	4000	≤ 55	11 500	≤ 37	15 000	todas	18 000
250	60	> 55	1500	> 55	4500	> 37	6000	todas	7000
280 ¹	60	todas	3500	-	-	-	-	-	-
280 ¹	60	-	-	todas	10 500	todas	14 000	todas	17 000
280	35	todas	3200	-	-	-	-	-	-
280	40	-	-	todas	9600	todas	13 900	todas	15 000
315	35	todas	3200	-	-	-	-	-	-
315	55	-	-	todas	7600	todas	11 800	todas	12 900
355	35	todas	3200	-	-	-	-	-	-
355	70	-	-	todas	600	todas	9600	todas	10 700
400	40	todas	2700	-	-	-	-	-	-
400	85	-	-	todas	4700	todas	8600	todas	9700
450	40	todas	2700	-	-	-	-	-	-
450	95	-	-	todas	3900	todas	7700	todas	8700

Como se pode verificar, também nos motores ABB se mostra uma grande disparidade nos intervalos de lubrificação entre motores de diferentes potências e velocidade de rotação, mostrando mais uma vez que o intervalo escolhido para os motores da NPC é muito curto. O intervalo mínimo aqui referido é de 1500 h, mas apenas se aplica a um caso em particular para motores de rotação elevada (3000 rpm).

Também a tabela 5-6, que mostra intervalos de lubrificação para rolamentos de rolos, refere intervalos muito díspares com valores mínimos de 750 h para a mesma estrutura e rotação referida na tabela 5-5, de rolamentos de esferas. Nestes casos, devido à evolução contínua dos lubrificantes, os intervalos de lubrificação podem e devem ser ajustados através da análise dos lubrificantes usados que saem do rolamento no processo de lubrificação. Se estes apresentarem desgaste elevado (cor muito diferente da original ou quantidade elevada de lubrificante separada do espessante) ou, no caso oposto, saírem como novos, o intervalo deve ser ajustado.

Tabela 5-6 – Intervalos de lubrificação para rolamentos de rolos de motores ABB (adaptado de (ABB, 2009)).

Tamanho da estrutura	Quantidade de lubrificante (g/rolam.)	Potência (kW)	3000 rpm	Potência (kW)	1500 rpm	Potência (kW)	1000 rpm	Potência (kW)	500 - 900 rpm
Intervalos de lubrificação em horas de serviço									
160	25	≤ 18.5	6000	≤ 15	10 500	≤ 11	12 000	todas	12 000
160	25	> 18.5	5000	> 15	9000	> 11	1100	todas	12 000
180	30	≤ 22	4500	≤ 22	9000	≤ 15	12 000	todas	12 000
180	30	> 22	4000	> 22	8500	> 15	10 500	todas	12 000
200	40	≤ 37	4000	≤ 30	8500	≤ 22	11 500	todas	12 000
200	40	> 37	2500	> 30	6000	> 22	8000	todas	10 000
225	50	≤ 45	3000	≤ 45	8000	≤ 30	11 000	todas	12 000
225	50	> 45	1250	> 45	3000	> 30	4000	todas	5000
250	60	≤ 55	2000	≤ 55	5500	≤ 37	7500	todas	9000
250	60	> 55	750	> 55	2000	> 37	3000	todas	3500
280 ¹	60	todas	1750	-	-	-	-	-	-
280 ¹	70	-	-	todas	5250	todas	7000	todas	8500
280	35	todas	1600	-	-	-	-	-	-
280	40	-	-	todas	5300	todas	7000	todas	8500
315	35	todas	1600	-	-	-	-	-	-
315	55	-	-	todas	3800	todas	5900	todas	6500
355	35	todas	1600	-	-	-	-	-	-
355	70	-	-	todas	2800	todas	4800	todas	5400
400	40	todas	1600	-	-	-	-	-	-
400	85	-	-	todas	2400	todas	4300	todas	4800
450	40	todas	1300	-	-	-	-	-	-
450	95	-	-	todas	2000	todas	3800	todas	4400

- 1) Para M3AA. Para motores M4BP de tamanhos 160 a 250 o intervalo pode ser aumentado em 30 %, e durante um máximo de 3 anos. Os valores indicados nos quadros acima são válidos para as dimensões M4BP 280 a 355.

O fabricante indica massa lubrificante compatível com as seguintes características:

- Massa de boa qualidade com espessante de complexo de lítio e com óleo PAO ou mineral;
- Viscosidade do óleo de base 100-160 cSt a 40 °C;
- Consistência NLGI de grau 1.5-3. Para motores em condições de alta temperatura ou montados na vertical, recomenda-se consistência de grau superior para evitar o escorrimento do lubrificante para fora do rolamento;
- Temperaturas limites de utilização entre -30 °C + 120 °C, continuamente.

É indicada uma temperatura máxima de serviço dos rolamentos e lubrificante de 110 °C, que não deve ser excedida. Esta por sua vez, difere da temperatura máxima indicada para os motores WEG em 10 °C (120 °C).

A massa lubrificante escolhida para a generalidade dos motores da NPC (Castrol Spheerol SY-HT 2) cumpre ou excede os parâmetros referidos pelo fabricante ABB, sendo assim adequada para estes.

5.4.1.3 Motores Siemens

Os motores deste fabricante compõem 14.4 % dos motores acima de 90 kW em serviço na NPC.

Este refere a massa lubrificante UNIREX N3 – ESSO para os seus motores (IP55). Este lubrificante é de grau de consistência NLGI 3, por norma reservado a motores de grande porte, montagem vertical ou rotação elevada. Outras características são (Mobil, 2017):

- É adequado para temperaturas de funcionamento de -20 °C a +140 °C (espessante resiste até 190 °C);
- Tem um ponto de gota de 230 °C;
- Classificação NLGI 3 (235 × 0.1 mm);
- Viscosidade do óleo de base de 115 mm²/s a 40 °C (ISO 3104 / ASTM D445);
- Alteração de penetração após 100 000 golpes – 30 (altera cerca de 0.5 a 1 grau NLGI para 265);
- Recomendada para rolamentos de motores elétricos com fator DmN (diâmetro do rolamento x rpm) superior a 360 000.

A tabela 5-7 refere os intervalos de lubrificação e o tempo de vida de rolamentos de lubrificação permanente (selados) para os motores *standard* do fabricante.

Tabela 5-7 – Tempo de vida e intervalos de lubrificação de rolamentos.

Lubrificação Permanente				
Série	Tamanho	Tipo	Número de Pólos	Tempo de vida (temp. do lubrificante até 40 °C)
Todas	56 a 250		2 a 8	20,000 a 40,000 h ¹⁾
Com relubrificação (versão básica)				
Série	Tamanho	Tipo	Número de Pólos	Intervalo de lubrificação (temp. do lubrificante até 40 °C)
1LA6,1PP6	100 a 160	...10 a ...16	2 a 8	8000 h
1LA5,1LP5, 1PP5, 1LA7, 1LP7, 1PP7, 1LA9	100 a 225	...10 a ...22	2 a 8	8000 h
1LA8.. 1PQ8..	315 a 400	...31 a ...40	2	4000 h
		...31 a ...40	4 a 8	6000 h
	450	...45	2	3000 h
		...45	4 a 8	6000 h
1LL8..	315	...31	2	4000 h
		...31	4 a 8	8000 h / 4000 h ²⁾
	355 a 450	...35 a ...45	2	4000 h
		...35 a ...45	4 a 8	6000 h / 3000 h ¹⁾
1LG4, 1LP4,1PP4, 1LG6, 1PP6	180 a 280	...18 a ...28	2	4000 h
		...18 a ...28	4 a 8	8000 h
	315	...31	2	3000 h
		...31	4 a 8	6000 h
1MA6	100 a 200	...18 a ...28	2 a 8	8000 h
	225 a 280	...22 a ...28	2	4000 h
		...22 a ...28	4 a 8	8000 h
	315	...315	2	3000 h
1MA7	100 a 160	...10 a ...16	2 a 8	8000 h
	180 a 200	...18 a ...20	2 a 8	8000 h
1MJ6, 1MJ7	225 a 280	...22 a ...28	2	4000 h
		...22 a ...28	4 a 8	8000 h
	315	...315	2	4000 h
		...315	4 a 8	8000 h

- 1) O intervalo de 40 000 h aplica-se a motores de instalação horizontal com acoplamento direto sem cargas axiais adicionais (ex. correias).
- 2) Intervalo para construção tipo IM V1.

O fabricante refere que cada variação de 10 K acima da temperatura do lubrificante de 40 °C, deve encurtar o intervalo de lubrificação para metade. Esta temperatura de serviço é muito baixa para a maioria dos rolamentos dos motores instalados na NPC, sendo mesmo a temperatura ambiente em algumas zonas. Este contrasta com as informações da WEG com temperaturas de serviço de 70-80 °C e alterações nos intervalos por cada incremento de 15 °C.

Embora seja recomendado lubrificante de grau NLGI 3, todos estes motores estão a usar massa de grau NLGI 2 na NPC.

Considerando o intervalo de temperatura bastante alargado do lubrificante usado na NPC, assume-se que este tenha capacidade para resistir ao envelhecimento e cumprir com os

intervalos aqui referidos (o intervalo máximo é inferior a um ano entre lubrificações), sem grandes alterações na duração.

5.4.1.4 Motores EFACEC

A Efacec é um fabricante português que, em 2002, vendeu a divisão de fabrico de motores à WEG. Compõem 20 % dos motores acima de 90 kW, têm bastante idade e já foram todos (ou quase) rebobinados ou beneficiados. Estão normalmente dedicados a zonas menos críticas ou com ambiente agressivo. Os intervalos de lubrificação ainda estão presentes em algumas máquinas, mas são geralmente bastante curtos (2 a 3 meses). O lubrificante recomendado devia ter as seguintes características (Efacec, 1987):

- Espessante de lítio com aditivo antioxidante com teor máximo de 12 %;
- Viscosidade do óleo base de 8 °E a 9 °E a 50 °C (~60 a 70 mm²/s a 40 °C);
- Ponto de gotejamento de 180 °C a 190 °C;
- Penetração ASTM 220 a 250 × 0.1 mm (equivalente a grau NLGI 3).

Estes dados podem já não ser válidos devido à idade dos motores, à evolução dos lubrificantes e dos rolamentos e ao facto de que quase todos já não possuem as características originais do fabricante. Aqui pode-se reter que, à semelhança de outros fabricantes, recomenda-se aditivos antioxidantes (comuns nas massas lubrificantes para rolamentos de motores elétricos), espessante lítio, ponto de gota elevado e consistência de grau NLGI 3.

O lubrificante usado na NPC cumpre com os requisitos com exceção da consistência, que é de grau NLGI 2.

5.4.1.5 Motores ASEA

A ASEA, antigo fabricante de motores sueco, foi fundida em 1987 com a *Brown Boveri* para formar o gigante ABB.

As instalações ainda têm alguns motores ASEA (apenas 6 dos motores instalados acima de 90 kW, mas pelos menos 3 deles são críticos e têm potência superior a 600 kW). Estes já não têm as indicações sobre lubrificação.

Para rolamentos a funcionar com temperaturas de -30 °C a +110 °C recomendava-se os seguintes lubrificantes:

- BP – Energrease Ls2
- Castrol – Sphreerol APS 2
- Esso – Beacon 2
- Mobil – Mobilux 2
- Shell – Alvania Grease R2
- SKF – Alfalub LGMT 2

Para rolamentos a funcionar com temperaturas de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+145\text{ }^{\circ}\text{C}$ recomendava-se os seguintes lubrificantes:

- Esso – Unirex N3
- Mobil – Mobilgrease 532
- SKF – Alfabub LGHT 3

Os nomes comerciais destas massas consistentes já não são os mesmos em vários casos, assim como as suas propriedades já evoluíram com o tempo. Devido à idade que estes motores têm, a maioria, se não todos, já foram rebobinados e/ou beneficiados. Aqui pode-se reter que, para temperaturas mais elevadas recomendavam lubrificantes de grau NLGI 3, de maior consistência e lubrificantes de grau NLGI 2 para temperaturas de funcionamento mais baixas, com espessantes de lítio. Os intervalos de lubrificação apenas estavam indicados na chapa de características dos motores e já não estão visíveis, portanto deve-se seguir o plano atual e, quando possível, estender os intervalos

5.4.1.6 Motores VEM

Apenas foram encontrados cinco motores com potência acima de 90 kW deste fabricante finlandês, adquiridos recentemente. Os motores tinham as placas ainda bastante visíveis, portanto foi possível identificar a informação necessária. O fabricante indica algumas instruções e parâmetros que convém reter:

Os motores com rolamentos de lubrificação permanente têm um tempo de vida útil de pelo menos 20 000 h. Este pode ser largamente estendido com uma manutenção adequada e acoplamentos que respeitem as tolerâncias de força exercida nos rolamentos.

Para os rolamentos com lubrificação periódica, existe a indicação para mudar o lubrificante a cada 10 000 h. O lubrificante referido em todos é o Kluber Asonic GHY 72 com as seguintes características (Kluber Lubrication, 2013):

- Espessante de poliureia e óleo sintético;
- Temperatura admissível de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Viscosidade do óleo de base de aprox. $72\text{ mm}^2/\text{s}$ (ASTM D-445, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- Penetração $250\text{-}280 \times 0.1\text{ mm}$ (DIN ISO 2137, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- Classificação aproximada NLGI 2;
- Ponto de gotejamento $\geq 250\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Adequado para rolamentos de motores elétricos.

Este lubrificante, como o Polyrex EM nos motores WEG, tem um espessante de poliureia que não deve ser misturado com os lubrificantes de lítio. Assim, motores VEM também devem ser incluídos no plano de lubrificação com massa à base de poliureia e grau NLGI 2.

As tabelas 5-8 e 5-9 mostram os intervalos de lubrificação e quantidade de lubrificante para os motores instalados na NPC (todos de dimensão 315, com um de dimensão 280).

Tabela 5-8 – Intervalos de lubrificação para motores VEM 315-400.

Tamanho do motor	2 polos	4 polos ou mais
315	2000 h	4000 h
355	2000 h	4000 h
400	2000 h	4000 h

Tabela 5-9 – Quantidade de lubrificante para rolamentos de motores VEM 315-400.

Séries IEC/DIN Tamanho	Tamanho / n° de polos	Quantidade de massa (cm ³)	
		LA	LOA
315	S, M ≥ 4, MX2	57	52
	MY, L, LX2	57	57
	MX4, 6, 8	64	52
	MY, L, LX4, 6, 8	78	57
355	2	57	57
	4, 6, 8	90	57
400, 450	2	57	57
	4, 6, 8	90	65

O fabricante refere que, no caso de motores alimentados por VEV, o intervalo entre lubrificações deve ser reduzido em 25 % devido ao aumento de temperatura de serviço causado por estes sistemas de alimentação. Este é um princípio que deve ser aplicado a todos os motores.

Na primeira lubrificação recomenda-se usar o dobro da massa lubrificante devido aos canais de lubrificação estarem vazios.

Durante o funcionamento e nos processos de lubrificação, a massa lubrificante usada é empurrada para uma câmara de lubrificante na parte externa do rolamento. Deve-se remover a massa usada ao fim de cerca de 5 lubrificações para evitar sobre lubrificação e consequente sobre pressurização do rolamento.

5.4.2 Planos de lubrificação

A melhor forma de evitar a lubrificação deficiente de rolamentos é com um plano de manutenção adequado a cada equipamento e tendo em conta o ambiente onde este se encontra instalado. Aqui não se pode descurar a formação aos técnicos que efetuam os procedimentos de lubrificação, para que estes possam implementar o plano de forma adequada.

Dentro deste programa de manutenção, cada ponto de lubrificação deve ser mapeado ao longo das instalações. A manutenção de registos é essencial para evitar falhas na lubrificação (défice ou excesso) que possam levar a avarias nos equipamentos. Este registo deve ser acompanhado do intervalo designado para o motor elétrico, assim como as quantidades de lubrificante para

cada rolamento e, caso haja cuidados especiais a ter (exemplo dos escovilhões de massa lubrificante nos motores WEG), deve haver instruções para que se tenha atenção a estes.

5.4.2.1 Plano de Lubrificação – Caso comprovado

A lubrificação de rolamentos de motor é um assunto muito discutido, mas o consenso geral é que se deve respeitar os intervalos referidos pelo fabricante para que a vida útil destes seja bastante elevada ou até ultrapasse o MTTF. No entanto há estudos que referem que até os intervalos de lubrificação dos fabricantes podem ser demasiado conservativos e levar à sobre lubrificação de rolamentos.

Embora se assuma que haja vários sistemas de segurança, as falhas de motores elétricos em centrais nucleares podem causar problemas graves. Após várias falhas de rolamentos de motores por sobre lubrificação, o *Electric Power Research Institute* (EPRI) elaborou um relatório com guias para a manutenção preventiva e preditiva de motores elétricos em Centrais Nucleares dos EUA (Honeycutt, 2004). Parte deste relatório era composto por orientação para a lubrificação de rolamentos de motores elétricos e continha uma tabela de fácil compreensão, com diferentes intervalos de lubrificação para as várias características das instalações.

A tabela 5-10 é uma adaptação da versão disponibilizada nos EUA, convertida para unidades do SI e a para a frequência de 50 Hz (sem alteração dos intervalos de lubrificação, que poderiam ser aumentados devido à menor rotação dos motores a 50 Hz).

Este plano pressupõe a existência de um ambiente limpo característico de centrais nucleares. Ambientes mais agressivos ou mais propícios a acumulação de contaminantes, devem ter o plano ajustado.

Tabela 5-10 – Programa de lubrificação para centrais nucleares (adaptado de (EPRI, 1992)).

RPM			kW		Carga		Temp. Amb.(°C)		Operação		Intervalos de lubrificação (meses)
1000	1500	3000	>75	<75	Lateral	Direta	>60	<60	Contínua	Standby/lay-up	
X			X			X	X		X	Para todos os motores em standby, deve-se multiplicar o intervalo de lubrificação por 1.5x	8 ~ 18
X			X		X			X	X		12 ~ 18
X			X		X		X		X		6 ~ 9
	X			X		X		X	X		36 ~ 54
	X			X		X	X		X		24 ~ 36
	X			X	X			X	X		24 ~ 36
	X			X	X		X		X		12 ~ 18
	X		X			X		X	X		24 ~ 36
	X		X			X	X		X		12 ~ 18
	X		X		X			X	X		12 ~ 18
	X		X		X		X		X		6 ~ 9
		X		X		X		X	X		24 ~ 36
		X		X		X	X		X		12 ~ 18
		X		X	X		X		X		6 ~ 9
		X	X			X		X	X		12 ~ 18
		X	X			X	X		X		6 ~ 9
		X	X		X			X	X	6 ~ 9	
		X	X		X		X		X	6 ~ 9	

Muitas centrais nucleares nos EUA implementaram este plano e após a implementação destas orientações de lubrificação de motores, não houve aumento dos problemas causados por sobre ou sub lubrificação, assim como se reduziram consideravelmente os custos com manutenção e recursos humanos.

5.4.2.2 Plano de Lubrificação em Curso nas Instalações

O plano em curso é auxiliado por um *software* de gestão de lubrificação que fornece o aviso para lubrificação de motor com um intervalo de cerca de 3 meses.

Após acompanhamento das equipas de lubrificação conclui-se que estes avisos não pareciam ser seguidos já que o *software* aparentava ter falhas. Foi indicado que este dava avisos de lubrificação para motores já fora de serviço, em armazém (apenas era feita lubrificação a motores em serviço) ou não dava avisos para alguns motores. Outro problema apontado era que, na ausência de um registo, era complicado manter a lubrificação de motores de forma esporádica. Assim, inicialmente, o responsável da área optava por fazer a lubrificação de todos os motores para os quais estava responsável, de uma só vez, quando tinha indicação para tal, posteriormente seguindo o intervalo de 3 meses. Este procedimento podia levar a que

alguns motores fossem esquecidos, acabando por levar a situações de, predominantemente, lubrificação excessiva, mas também seria possível situações de falta de lubrificação.

Foi também indicado que não eram seguidas as instruções para quantidades de massa lubrificante do fabricante do motor já que, muitas vezes, devido ao ambiente corrosivo de várias zonas da fábrica, as chapas de características dos motores estavam ausentes ou incompreensíveis e só alguns motores têm a quantidade de massa visível na chapa de características.

O procedimento de lubrificação dos motores pareceu revelar o desconhecimento da purga de massa, algo importante no processo, já que permite o alívio de pressão e saída de massa usada para o exterior, evitando danificar os rolamentos e a passagem de lubrificante para dentro do motor e a sua acumulação no estator.

Todos estes problemas são agravados pelo facto que as equipas de lubrificação mudam com frequência superior ao desejável, levando a que os técnicos possam não adquirir a formação e sensibilidade adequada para o trabalho.

As equipas de lubrificação indicaram o uso de Castrol Optitemp PU035/4 para os motores WEG e Castrol Spheerol SY-HT 2 para os restantes motores.

A Castrol Optitemp PU035/4 usa um espessante à base de poliureia que se assume não ser compatível com os outros lubrificantes:

- É adequado para temperaturas de funcionamento de -35 °C a +160 °C;
- Tem um ponto de gota elevado (≥ 260 °C);
- Classificação NLGI 1 (aproximada);
- É referida, pelo fabricante, como sendo uma massa lubrificante mais indicada para transmissões automóveis.

A Castrol Spheerol SY-HT 2 usa um espessante inorgânico (assume-se que seja lítio) e lubrificante sintético.

- Indicado para rolamentos de rolos e esféricos;
- É adequado para temperaturas de funcionamento de -50 °C a +200 °C;
- Tem um ponto de gota elevado (≥ 260 °C);
- Classificação NLGI 2 (265-295);
- Viscosidade do óleo de base 100 cSt a 40 °C (ISO 3104 / ASTM D445);
- Alteração de penetração após 100 000 golpes – 60 (altera 1-1.5 níveis NLGI para 325-355);
- Recomendada para motores elétricos.

Em caso de necessidade de alterar a massa lubrificante é essencial determinar se as massas são compatíveis. Para isso é necessário verificarem-se os seguintes parâmetros:

- O ponto de gota da mistura não é significativamente menor que o das massas individuais;

- A estabilidade mecânica da mistura está dentro dos parâmetros das massas individuais;
- Não há alterações apreciáveis na consistência da mistura após armazenamento prolongado a temperaturas elevadas em comparação com as massas individuais.

Embora isto possa ser feito, em ambiente fabril é preferível remover completamente o lubrificante a substituir e evitar misturas que possam comprometer a integridade da lubrificação. O custo do lubrificante adicional será sempre inferior ao custo de paragens intempestivas por falhas na lubrificação.

5.4.2.3 Atualização do plano existente

A catalogação e análise dos motores da fábrica revelou a existência de mais de 1800 motores, a larga maioria motores de indução assíncronos com rotor do tipo gaiola de esquilo. Devido à grande quantidade de informação e ao tempo limitado do estágio foi decidido restringir a atualização do plano aos motores com potência acima de 90 kW, por norma os motores mais críticos. Isto restringiu o número de motores a cerca de 160, um número passível de gerir no tempo disponível.

A análise revelou intervalos de lubrificação completamente díspares, desde 1300 h para motores de 500 kW e 4 pólos até 16 000 h para motores de 110 kW e 8 pólos. Isto mostra que um intervalo único é completamente desproporcionado num plano de manutenção adequado.

O plano desenvolvido engloba as recomendações dos fabricantes referidas anteriormente sendo que para os motores para os quais não foram encontrados dados, o intervalo foi extrapolado a partir da informação de motores semelhantes ou, na ausência destes, ficaram por defeito com o intervalo de 3 meses em vigor no plano anterior, sendo sujeito a análise posterior para aferir o prolongamento conforme o envelhecimento da massa lubrificante na altura da lubrificação.

Devido à indústria de pasta de papel ter ambientes de instalação bastante agressivos e diversificados, decidiu-se ajustar os intervalos de lubrificação à instalação, sendo que para isso foram escolhidos quatro multiplicadores que alteram o intervalo conforme o tipo de instalação e o ambiente em que está inserida:

Estes multiplicadores são:

1. Tipo de acionamento
2. Tipo de alimentação
3. Condições Ambientais
4. Regime de funcionamento

Tipo de acionamento:

- Axial – valor 1
- Correia – valor 0.8
- Vertical – valor 0.6

O acionamento por correia provoca maior esforço radial que por sua vez conduz a maior carga no rolamento, provocando maior temperatura e mais rápida degradação da massa lubrificante.

O acionamento com motor na vertical provoca maior carga axial no rolamento, embora os motores de construção para funcionamento na vertical tenham rolamentos mais adequados ao tipo de carga. No entanto, estes também estão mais sujeitos a perdas de lubrificante.

As indicações da generalidade dos fabricantes referem que o intervalo de lubrificação deve ser reduzido para metade quando os motores são usados na vertical.

Tipo de alimentação:

- Alimentação direta à rede – valor 1
- Alimentação por VEV com algum tipo de filtração – valor 0.9
- Alimentação por VEV sem filtração – valor 0.8

Está comprovado que o acionamento por VEV está associado uma maior temperatura e um menor tempo de vida de rolamentos de motores elétricos, inclusive sendo recomendado o ajuste de intervalos de lubrificação ou vigilância acrescida. Há indicações de fabricantes de que se deve reduzir o intervalo de lubrificação em cerca de 20-25 %.

Condições Ambientais:

- Condições normais - coberto – valor 1
- Nível elevado de humidade - coberto – valor 0.95
- Motor no exterior - com proteção – valor 0.9
- Motor no exterior - sem proteção – valor 0.8
- Motor em ambiente corrosivo – valor 0.7

Todos os fabricantes mencionam que os intervalos de lubrificação devem ser ajustados conforme as condições ambientais (humidade, temperatura e químicos corrosivos). Estes multiplicadores foram definidos com base no impacto que a humidade e concentração de contaminantes tem na degradação da massa lubrificante.

Regime de funcionamento:

- Elevado número de arranques por dia – 0.8
- Contínuo – 1
- Ocasional – 1.5
- Recurso/Parado – 2...4

Os primeiros três multiplicadores reduzem o intervalo de lubrificação enquanto o multiplicador do regime de funcionamento pode aumentá-lo. Este critério foi escolhido devido aos vários motores que estão de reserva, montados na instalação, mas que só entram em funcionamento em caso de falha do motor principal ou caso seja necessária mais potência no acionamento. Nestes casos, a massa lubrificante está sujeita a muito menos desgaste, oxidação e contaminação, não sendo necessária a renovação com a frequência normal.

A massa lubrificante definida como a universal para a generalidade dos motores elétricos da NPC é bastante adequada embora, nos motores de maior potência e nos motores com montagem vertical, normalmente recomenda-se massa com classificação NLGI 3, como a Polyrex EM 103. A massa lubrificante de poliureia escolhida para os motores elétricos da WEG não parece ser adequada devido a ser de classificação aproximada a NLGI 1, logo terá menor capacidade de lubrificação em cargas elevadas e terá tendência a sair dos rolamentos com maior facilidade.

Para que se possa assegurar a implementação do plano é essencial a formação aos técnicos com os procedimentos e processos definidos. Como exemplo, deve-se usar os procedimentos seguintes para a lubrificação de cada motor:

- Verificar a quantidade e o tipo de massa indicado no plano de lubrificação (se atualizado) ou pelo fabricante na chapa de características, se disponível.
- Quando a bomba de lubrificação não tiver forma de medir a quantidade de massa injetada, deve-se usar uma balança e definir a quantidade por “bombada” ou pelo caudal da bomba.
- Desobstruir e limpar a purga de massa.
- Nos motores fornecidos com dispositivo de mola (ou escovilhão), o excesso de massa deve ser removido, puxando a vareta da mola e limpando-a, até que a mesma não contenha mais massa.
- Abrir e limpar o pino de injeção de massa e a região em redor.
- Injetar a quantidade referida.
- Fechar o pino de injeção de massa.
- Registrar a lubrificação na folha de registo/plano de manutenção.
- Caso seja necessário e aplicável, fazer anotações relativas ao estado de limpeza do motor, estado dos pinos de injeção, das purgas de massa e das folhas de informação da lubrificação.

Para facilitar os procedimentos de lubrificação e conseguir manter um registo, foi sugerida a aplicação de uma etiqueta plastificada com informação sintetizada em cada motor, como na tabela 5.11.

Tabela 5-11 – Etiqueta de registo e informação para cada motor.

Motor nº		AC58121	
Características		750rpm, 110 kW	
Lubrificante		NLGI 2; espessante de lítio	
Rolamento	horas	g	Bombadas
RA	16 000	90	36
ROA	16 000	70	28

Lubrificação		
Data estimada	Efetuada em:	Rubrica
01/11/2017		
29/08/2019		
26/06/2021		
24/04/2023		
18/02/2025		
17/12/2026		
14/10/2028		
11/08/2030		

Esta etiqueta seria individual e única por motor, ficando segura pelos olhais de levantamento do motor ou nos cabos de alimentação de corrente. A folha de cálculo com estes dados apenas necessita da informação do motor, horas e quantidade de massa. As datas são calculadas automaticamente assim como o número de bombadas, que é calculado assumindo uma quantia unitária de 2.5 g (Efacec, 1987), devendo ser ajustado caso varie para as bombas manuais em serviço. Tentou-se simplificar e permitir uma fácil leitura dos dados essenciais para o técnico de lubrificação e que são indispensáveis para um procedimento correto, ao mesmo tempo que se mantém um registo de preenchimento rápido, sem causar entrave ao técnico.

5.5 Temperatura

A monitorização da temperatura de motores e rolamentos é das formas mais fiáveis de prevenção de falhas catastróficas já que uma parte significativa das falhas leva a aumentos de temperatura. Possuindo um histórico destas medições, é possível aferir quando um equipamento não está a operar ou se está a desviar-se, de forma anormal, da zona ótima de temperatura. Quando são detetadas variações através destes métodos, pode-se usar equipamentos mais especializados na deteção de falhas individuais como analisadores de vibrações ou de corrente.

5.5.1 Monitorização contínua na NPC

Por norma, os motores acima de 250 kW têm resistências PT100 nas bobinas do estator e/ou nos rolamentos embora haja motores nas instalações que não tenham estes sensores ligados ao sistema DCS para monitorização contínua, sendo necessário fazer a medição da resistência localmente e converter para o respetivo valor de temperatura. Este procedimento, embora possível, não é exequível nos motores em que as ligações estão na mesma caixa que a alimentação. Nestes casos, o risco de acidente seria muito elevado ao tentar fazer as medições com os motores em serviço.

Estas resistências são calibradas e têm variação linear com a temperatura, como mostra a figura 5-5.



Figura 5-5 – Motor de Ar Secundário da CR4 (500 kW) equipado com 5 termístores (2 para os rolamentos e 1 por fase).



Figura 5-6 – Caixa de Ligações do Motor de Ar Secundário da CR4.

A figura 5-6 mostra a caixa de ligações de um dos motores mais importantes para o funcionamento da CR4, essencial ao funcionamento da fábrica. Na parte superior da imagem pode-se observar as várias junções para ligar os termístores, ausentando qualquer cabo de ligação.

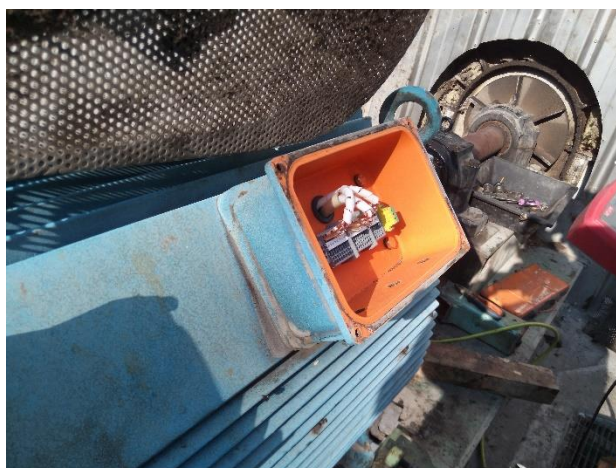


Figura 5-7 – Motor de Ar de Exaustão da CR4. Caixa de ligações dos sensores de temperatura.

A figura 5-7 mostra outro motor muito importante, também da caldeira de recuperação. Na exaustão do ar da caldeira existem dois motores paralelos a acionar dois exaustores. A falha de qualquer um deles afeta severamente o funcionamento da caldeira, no entanto nenhum deles tem sensores de temperatura e vibração ligados ao DCS. Neste caso, os sensores estão facilmente acessíveis já que as ligações estão deslocadas da caixa de alimentação de corrente do motor.

Esta instalação contrasta com outros projetos independentes como o da caldeira auxiliar nº5 (CA5) ou a caldeira de biomassa (CTB) que têm vários motores críticos com sensores de temperatura e vibração ligados ao sistema de monitorização.

5.5.2 Termografia

As instalações possuem uma câmara termográfica FLIR E40 como a da figura 5-8.



Figura 5-8 – Câmara termográfica Flir E40.

Esta tira fotografia de leitura da radiação de infravermelhos emitida pelo equipamento assim como uma fotografia com luz natural.

A resolução é baixa comparada com as ofertas de gama mais elevada, mas o equipamento já permite o diagnóstico de pontos quentes com bastante facilidade de uso.

- Resolução IR – 160×120
- Resolução MSX – 320×240

Este equipamento, por norma, está reservado a operações de manutenção corretiva (por exemplo, quando é detetada temperatura superior ao normal ou quando um motor faz disparar as proteções térmicas), não havendo indicação de existirem inspeções periódicas definidas.

As inspeções termográficas periódicas elaboradas na NPC são feitas por empresas alheias a esta. Embora tenham acesso a equipamento de gama elevada e alguns conhecimentos que os técnicos da NPC não possuem, rapidamente se podia colmatar esta falha com formação específica, podendo delegar uma parte das inspeções programadas a recursos humanos disponíveis na empresa e diminuir a frequência das inspeções realizadas por terceiros.

Para elaborar um relatório de uma inspeção apenas é necessário ligar a câmara ao computador e, com o *software* proprietário FLIR e as *templates* fornecidas, rapidamente se elabora um relatório que agrega as fotografias termográficas e as fotos de luz natural, que ajudam a identificar o equipamento e a sua condição (ver exemplo em anexo). Isto agiliza o processo de formação e de elaboração do relatório e permite que pessoas com poucos conhecimentos de *software* de produtividade possam ter acesso a estas ferramentas.

Sendo esta câmara propriedade da empresa, haverá todo o interesse em rentabilizar o investimento elevado que foi efetuado. Assim, algumas das vantagens que poderiam obter seriam:

- **Análise imediata:** um dos problemas revelados no acompanhamento das inspeções termográficas foi de que as possíveis falhas só eram analisadas quando era recebido o

relatório da inspeção. Isto envolvia um desperdício de recursos considerável, já que os técnicos da NPC tinham de verificar e confirmar a localização dos pontos quentes mencionados no relatório e gerar ordens de trabalho para, posteriormente, outros (ou os mesmos) técnicos analisarem e/ou retificarem os problemas. Delegando uma parte das inspeções aos técnicos da NPC, os problemas podem ser analisados e resolvidos de imediato, invés de se aguardar vários dias/semanas pelo relatório de uma empresa terceira.

- **Redução de custos:** tendo a empresa já investido no equipamento e, havendo disponibilidade de recursos humanos, qualquer inspeção termográfica não delegada a uma empresa terceira significa uma redução de custos.

Desvantagens:

- **Rigor na inspeção:** técnicos da empresa poderão não ter capacidade ou interesse em ter o mesmo rigor na detecção e despistagem de possíveis problemas, ora por falta de formação ora por significar que brevemente poderá ter trabalho acrescido. Podendo adiar a resolução do problema, poderá escolher omitir a sua comunicação a órgãos superiores.
- **Falta de recursos humanos:** a alocação de recursos humanos para as inspeções pode compensar se estas forem efetuadas nos períodos de vazio (quando, na ausência de falhas, os técnicos permanecem nas oficinas). Se a limitação nos recursos humanos não o permitir, as inspeções podem ser consecutivamente adiadas ao ponto de a manutenção preditiva ficar comprometida.

Necessário ter em conta que os roteiros têm de ser feitos quando as áreas estão em funcionamento há tempo suficiente para permitir uma leitura termográfica adequada.

Embora a análise termográfica de equipamentos seja bastante útil para localizar pontos quentes e colmatar falhas na monitorização contínua, manter um registo da termografia de cada equipamento poderá tornar-se um processo moroso e não permite uma análise fidedigna do histórico dos dados recolhidos além da análise pontual. É preferível optar pela monitorização contínua de temperatura de equipamentos críticos e reservar a análise com câmara termográfica a rotinas de inspeção a equipamentos não críticos e aos que não estão incluídos nos sistemas de monitorização contínua.

5.6 Casos de estudo

Durante o período de estágio houve alguns motores que falharam de forma intempestiva, causando a paragem de zonas da fábrica, sendo que em alguns casos a produção parou por completo. Os casos demonstrados resumem-se a análises aos procedimentos e sugestões para evitar problemas semelhantes no futuro.

5.6.1 Paragem Geral de 2017

Os casos de estudo aqui referidos resumem-se à altura da paragem geral, já no final do estágio.

Na paragem geral de setembro foi dada a oportunidade de coordenar os trabalhos de inspeção, limpeza e manutenção de motores elétricos efetuados por uma empresa especializada na área. Esta era a primeira vez que um trabalho do género era feito nas instalações da NPC, apesar de já ter sido contratada para outras instalações do grupo. Foram selecionados 65 motores de potência superior a 90 kW e de maior criticidade para o funcionamento das instalações.

O trabalho da empresa consistia em fazer a limpeza dos motores com produto de limpeza e jato de água quente (~100 °C). Isto é necessário nesta indústria devido aos elevados níveis de sujidade e contaminação presentes em várias áreas, com aglomerados de óleos, pasta e biomassa a restringir a dissipação de calor em muitos motores. As figuras 5-9 e 5-10 mostram exemplos do antes e depois da limpeza.

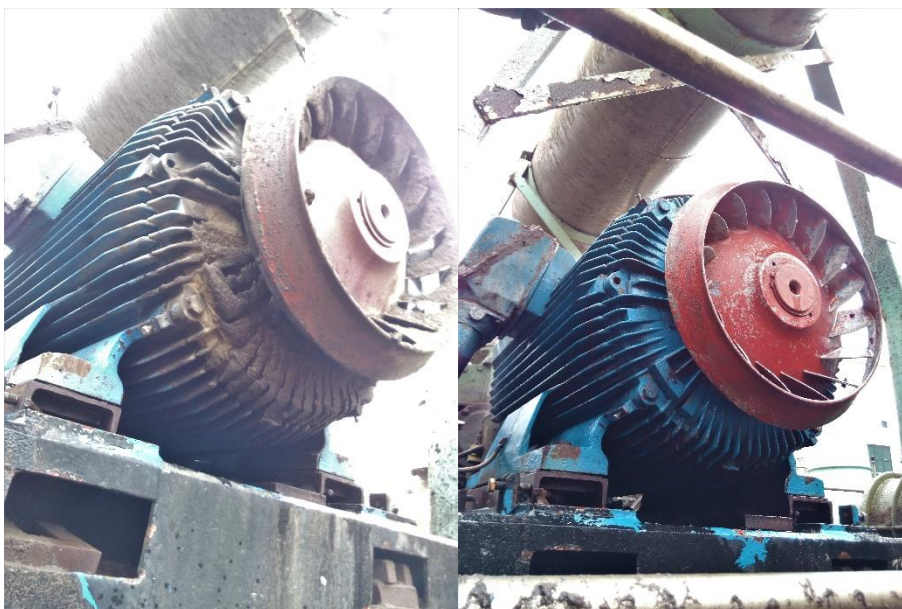


Figura 5-9 – Antes (lado direito) e depois da limpeza do motor.



Figura 5-10 – Antes (lado direito) e depois da limpeza do motor.

Como se pode observar, os resíduos acumulados eram consideráveis e chegavam a limitar a ventilação de forma severa. Havia casos de motores em pior estado, principalmente nas zonas onde havia fugas e projeção de pasta de papel para os ventiladores dos motores, que levava à sua acumulação nos resguardos e carcaça, restringindo a ventilação e dissipação de calor.

Posteriormente ao processo de limpeza, a caixa de ligações era aberta, os cabos de alimentação eram desapertados e era feita um teste ao isolamento do motor durante 10 min com um mega ohmímetro adequado. De seguida, os cabos de alimentação eram reapertados, era colocado um verniz de proteção no interior da caixa de ligações e, quando necessário, era colocado um cordão de borracha novo como na figura 5-11.



Figura 5-11 – Tampa da caixa de ligações de motor intervencionado.

A figura 5-12 mostra o final do procedimento com o cordão de borracha na tampa da caixa de ligações e o cordão de silicone na parte inferior, para assegurar estanquicidade.



Figura 5-12 – Caixa de ligações de um motor intervencionado.

Este procedimento era particularmente importante devido aos vários casos prévios de motores que ficaram com humidade no interior da caixa de ligações devido a caixas mal seladas e que acabaram por acionar as proteções respetivas.

Ao longo das intervenções eram transmitidas atualizações relativas ao estado dos motores e à necessidade (ou não) de intervenção adicional da parte da NPC. No final das intervenções (decorridos 6 dias efetivos, já no último dia de paragem) foi elaborada uma folha de cálculo com os resultados das medições para que, após análise ponderada, se pudessem decidir se haveria motores a substituir ainda antes da fábrica arrancar em pleno e não fosse necessário esperar pelo relatório da empresa, disponibilizado mais tarde.

As figuras seguintes mostram outros motores com acumulação de resíduos e/ou corrosão avançada. É de salientar que há algumas zonas da fábrica onde a atmosfera é tão agressiva que é difícil de manter alguns motores em bom estado de conservação.



Figura 5-13 – Motores em ambientes corrosivos.

A figura 5-13 mostra exemplos de motores afetos a zonas com ambiente corrosivo. Aqui, os motores mostram sinais de corrosão em poucos meses. Nestas zonas deve-se optar por motores com tratamentos anti corrosão adequados. Estes estão disponíveis pelos fabricantes como opção, mas devem significar maior investimento inicial, embora deva compensar ao evitarem tratamentos posteriores para combater a corrosão que eventualmente se instala.



Figura 5-14 – Acumulação de resíduos a obstruir a ventilação.

A figura 5-14 mostra um problema comum em várias zonas da fábrica. A figura do lado esquerdo mostra o interior do resguardo de um motor de média tensão. A figura do lado direito mostra um motor vertical com acumulação de pasta no interior do resguardo a obstruir a passagem de ar do ventilador para a carcaça. Nesta imagem já tinha sido removida grande parte dos resíduos acumulados entre as alhetas da flange do motor. A zona da formação das folhas e secagem da pasta (onde este motor vertical está) tem bastante predisposição a fugas e projeções de pasta húmida e à acumulação de partículas aéreas desta. Acumula-se facilmente no interior e na rede de proteção do resguardo, levando a casos de sobreaquecimento apenas devido aos resíduos acumulados.



Figura 5-15 – Acumulação de resíduos em todo o motor.

Estes casos mostram a importância da desmontagem e limpeza de motores em dias de paragem, quando os motores estão fora de serviço e é seguro fazer a limpeza e inspeção.

O motor seguinte foi um dos motores intervencionados e um dos que mereceu atenção especial devido à sua importância. Este motor de 132 kW aciona o raspador do digestor contínuo que, em caso de falha do motor, leva à paragem do digestor e a consequente paragem do cozimento de aparas no digestor contínuo, onde se processa grande parte da matéria-prima para o branqueamento.



Figura 5-16 – Motor de acionamento do raspador.

O motor estava selecionado para intervenção, mas num procedimento de manutenção relacionado com o digestor, acabou inadvertidamente submerso em água durante algum tempo.

A inspeção revelou a presença de humidade e um nível de oxidação avançado no interior, como se pode observar na figura 5-17, indicando que este motor já teria problemas com humidade excessiva há bastante tempo.



Figura 5-17 – Interior da caixa de ligações do motor.

O teste ao isolamento das 3 fases à massa revelou os seguintes valores:

- Resistência do isolamento ao fim de 10 min – 3.1 GΩ
- Índice de Polarização – 0.6

O índice de polarização estava bastante baixo, sendo que é recomendável retirar um motor de serviço com valores de IP abaixo de 1 mas, devido ao valor do isolamento ser bastante elevado, à pouca experiência com os indicadores de contaminação do isolamento e à particular dificuldade em substituir este motor (está num espaço confinado), acabou por ser escolhido manter o motor no local de instalação.

Cerca de um mês depois o motor saiu de serviço, levou a uma paragem intempestiva e causou prejuízo considerável devido à falta de produção enquanto se procedia à sua substituição.

Outros motores apresentaram índices de polarização baixos, como o motor do ventilador de ar primário da caldeira de recuperação 4:

- Resistência do isolamento ao fim de 10 min – 37.3GΩ
- Índice de Polarização – 0.82

O standard IEEE 43-2000 diz que se a resistência do isolamento ao fim de 1 minuto $> 5 \text{ G}\Omega$, o PI pode ou não ser uma indicação do estado do isolamento, portanto não é recomendado que se use o IP para avaliar a contaminação do isolamento. Apesar desta indicação, o motor apresentava humidade no interior da caixa de ligações e, devido à criticidade deste, foi decidido substituí-lo por outro em armazém.

5.6.2 Motor de Ar Secundário

O motor de ar secundário da caldeira de recuperação foi dos locais mais problemáticos no decurso do estágio, tendo falhado três vezes num período de cerca de 6 meses. Este é um motor de 690 V, 500 kW e 4 polos, essencial para o funcionamento da caldeira de recuperação.

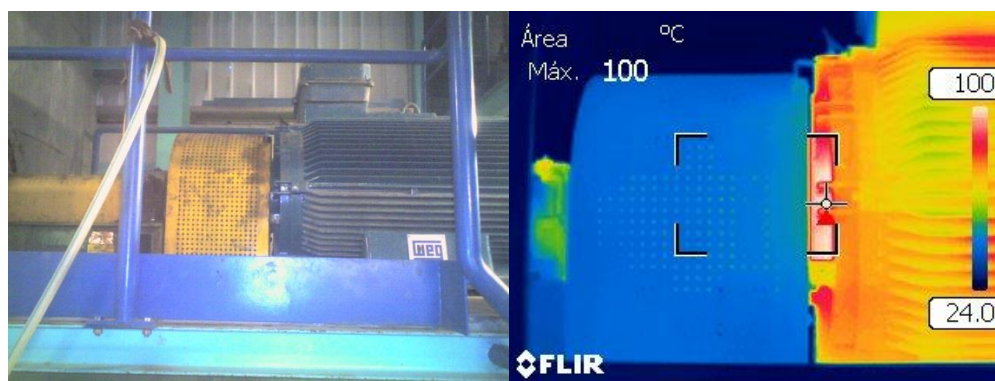


Figura 5-18 – Motor em serviço – Termografia de 29/06/2017.

A figura mostra a foto de luz natural e a foto termográfica tirada por uma câmara FLIR pela empresa contratada para a inspeção periódica, no dia 29 de junho. Como se pode observar, este motor estava com temperaturas anormais no rolamento do lado do ataque.

No dia seguinte, o motor falhou. Teve de ser retirado de serviço e, como a falha deu-se ao final do dia numa mudança de turno, a substituição por outro motor em armazém acabou por demorar mais do que o normal, causando um prejuízo considerável para a fábrica.

Embora a temperatura do rolamento LA fosse inferior à temperatura de alarme, esta era suficientemente elevada para suscitar uma análise do problema. Caso se tivessem sido tomadas medidas para preparar a sua substituição, o prejuízo teria sido muito menor.

O relatório de avaria mostrou que o motor sofreu uma falha de isolamento que levou a um curto-circuito entre fases, tendo este se manifestado perto das saliências das bobinas do estator no lado do ataque (Figura 5-19). Embora não diretamente relacionado com a falha do motor, um aumento da temperatura dos enrolamentos do lado do ataque, levaria ao aumento da temperatura da flange do LA e do mancal de rolamento.



Figura 5-19 – Isolamento queimado no lado do ataque.

Posteriormente, o motor continuou a exibir temperaturas anormais até à paragem geral, onde foram substituídos o ventilador, as chumaceiras de apoio do veio de transmissão e alterado o acoplamento ao motor para um sistema que permitia maior ventilação deste no LA.

Medições efetuadas com o motor em serviço dois dias após o final da paragem, mostraram que o problema estaria atenuado com temperaturas no rolamento de 80 °C, temperatura de serviço aproximada indicada pelo fabricante.

5.6.3 Motor da Bomba Booster

O motor da bomba booster 1 é um motor bastante importante para a produção. Na ronda de identificação e inspeção de motores para intervencionar na paragem geral, este motor foi sinalizado para intervenção devido à temperatura muito elevada que se apresentava na carcaça e no rolamento do LA do motor. As fotos da carcaça (Figuras 5-20,5-21 e 5-22) mostram uma obstrução por acumulação de pasta à saída da ventilação e que estaria a contribuir para o aumento da temperatura do motor.



Figura 5-20 – Termografia da parte superior da carcaça do motor.

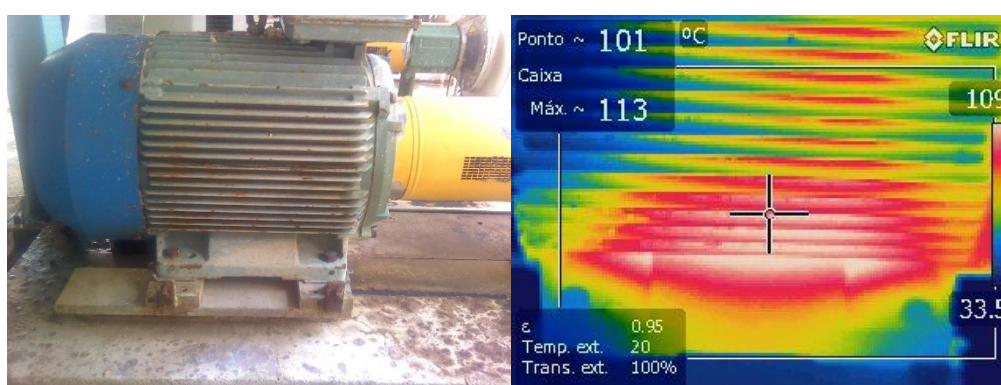


Figura 5-21 – Termografia da parte superior da carcaça do motor.

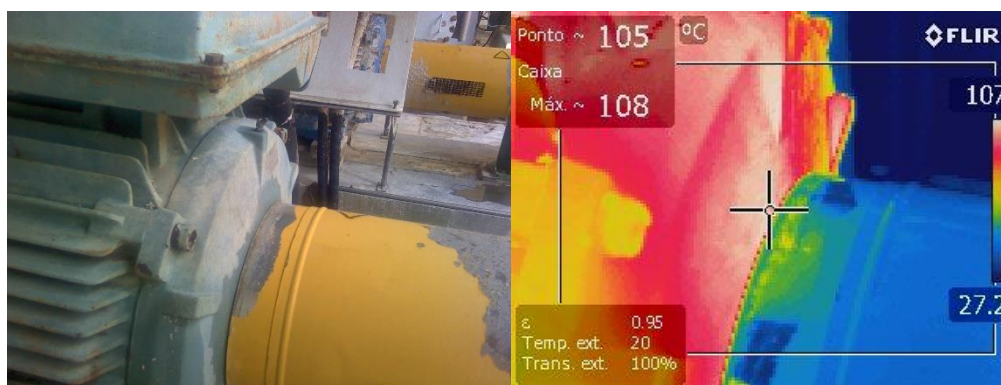


Figura 5-22 – Termografia do lado do ataque do motor.

As temperaturas verificadas no rolamento do LA (Figura 5-22) já se aproximavam das temperaturas de alarme definidas pelo fabricante (110 °C), devendo mesmo ser superiores no interior do rolamento. As temperaturas exteriores da carcaça indicam que a temperatura dos enrolamentos também já era elevada.

Na paragem geral este motor foi selecionado para intervenção onde foi feita uma limpeza geral, revisão das ligações e efetuados testes ao isolamento, onde não foram detetados problemas significativos.

5.6.4 Motor TAA2

Os procedimentos em vigor na NPC determinam que quando um rolamento dá sinal de que está a chegar ao fim da sua vida (através da leitura da vibração e temperatura), este é sinalizado para ter lubrificações extra. A premissa é de que, à medida que o rolamento se vai deteriorando, vai libertando partículas que levam a que a erosão do material restante seja acelerada. Ao colocar massa lubrificante extra, a massa que sai do rolamento como excesso, arrasta estas partículas para fora deste, podendo prolongar a sua vida útil até o motor poder ser intervencionado.



Figura 5-23 – Motor TAA2 antes da abertura.

Na figura 5-23 já se pode verificar que antes da abertura do motor existe um claro excesso de lubrificante.



Figura 5-24 – Motor TAA2 depois da abertura.

Teoricamente pode haver fundamento para o procedimento indicado quando existe purga de massa lubrificante, mas na ausência desta, fenómenos como demonstrado na figura 5-24 vão acontecer e apenas irão diminuir o tempo de vida dos rolamentos e enrolamentos que, nestas condições, já será curto.

O rolamento que funcionar nestas condições irá inevitavelmente sobreaquecer por excesso de massa, além de que ter tanto lubrificante em contacto com os enrolamentos pode danificar o isolamento e/ou levar a sobreaquecimento e levar a situações de falha catastrófica por falha de isolamento. Neste caso, o motor teria de ser rebobinado em vez de apenas necessitar de substituição de rolamentos e beneficiação geral, reparação esta com um custo e impacto bastante inferior ao de uma rebobinagem.



Figura 5-25 – Carcaça do motor com acumulação de biomassa.

O caso da figura 5-25 era muito comum nas zonas perto do parque de madeiras, onde os resíduos dos descascadores e destroçadores se acumulam nas alhetas dos motores e restringem a ventilação de forma severa, sendo necessário limpar os motores com frequência.

Medições efetuadas com um mega ohmímetro revelaram um curto-circuito entre fases. A acumulação de biomassa a restringir circulação de ar, que por sua vez diminui a dissipação de energia térmica, conjugado com isolamento contaminado por massa lubrificante com certeza diminuiu a vida útil do isolamento do motor. Em conjugação com estes problemas, havia indícios de biomassa no interior do motor o que significa que também entraria humidade com facilidade.

5.6.5 Motor de Ar Secundário – Falha nos rolamentos

Como já foi referido, esta instalação teve falhas de motores pelo menos 3 vezes ao longo do estágio. Este caso de estudo mostra outra das falhas que mostrou problemas diferentes. Esta revelou uma acumulação de problemas nos rolamentos. Aqui, uma das causas da falha dos rolamentos foi a perda do revestimento cerâmico (Figura 5-26) que isola o rolamento do lado oposto ao ataque e, ao abrir o circuito entre o veio e a carcaça do motor, impede a circulação

de correntes de modo comum. Após visita de responsáveis do fabricante para explicar os motivos da falha (o motor era importante e as falhas constantes justificaram a presença destes), foi indicado que o motor não tinha os rolamentos concêntricos. A vibração causada e a temperatura adicional acabaram por desgastar o revestimento cerâmico.



Figura 5-26 – Falha no revestimento cerâmico.



Figura 5-27 – Esferas com marca profundas.

Embora pouco visível, a figura 5-27 mostra as esferas com marcas profundas, indicando danos severos. Devido a desequilíbrios de cargas, a gaiola que separa as esferas de rolamento (Figura 5-28) sofreu desgaste acentuado e acabou por ceder, o que levou a que algumas das esferas bloqueassem, passando estas a deslizar em vez de rolar nas pistas, provocando a marca circular que se vê no lado esquerdo.



Figura 5-28 – Gaiola do rolamento com desgaste acentuado na zona das esferas.

A figura 5-28 mostra a gaiola afetada. Esta tem saliências direcionadas para o lado interior do rolamento indicando que as esferas estariam a ser forçadas nesse sentido (ou a gaiola no sentido contrário).



Figura 5-29 – Pista no anel interior indicando desgaste lateral.

A figura 5-29 mostra o desgaste numa posição lateral. Isto indica que a carga não estava equilibrada em relação ao motor e estaria a ser exercida força axial excessiva.

Outro problema crónico neste motor foi causado por uma falha transversal a este projeto. Como este motor é alimentado por um VEV e os cabos de alimentação têm um comprimento bastante apreciável, deveria ter sido optado por cabos próprios para instalações com VEV, assim como reatâncias de carga à saída deste (outras instalações da fábrica contém estes elementos). Embora seja um problema bastante conhecido nas instalações com VEV, o problema das tensões de modo comum no eixo do motor nem sempre é abordado até haver falhas causadas por circulação de correntes nos rolamentos. Quando este problema existe, tem marcas características como as da figura 5-29, normalmente designado *fluting*.



Figura 5-30 – Desgaste no centro da pista causada por passagem de corrente (*fluting*).

Para resolver este problema, foi aplicada uma escova de descarga à terra ligada ao eixo do lado do ataque do motor. Esta não só possibilita a descarga da corrente que circularia pelos rolamentos do motor como também possibilita a descarga da carga electrostática criada pelo ventilador (também presente em acionamentos com correias) mas está sujeita a desgaste e à acumulação de detritos. Os motores seguintes passaram a ter este dispositivo montado havendo indicações de que o problema estaria atenuado.

Como já foi referido no caso TAA2, quando um rolamento começa a acusar vibração excessiva a indicar que está a chegar ao fim da sua vida útil (por desgaste normal ou, como neste caso, anormal), são solicitadas lubrificações extra. Neste caso também foi solicitado este procedimento, dando origem a um caso de sobre lubrificação que poderia ser facilmente evitado já que este motor possui purga de massa de fácil acesso.

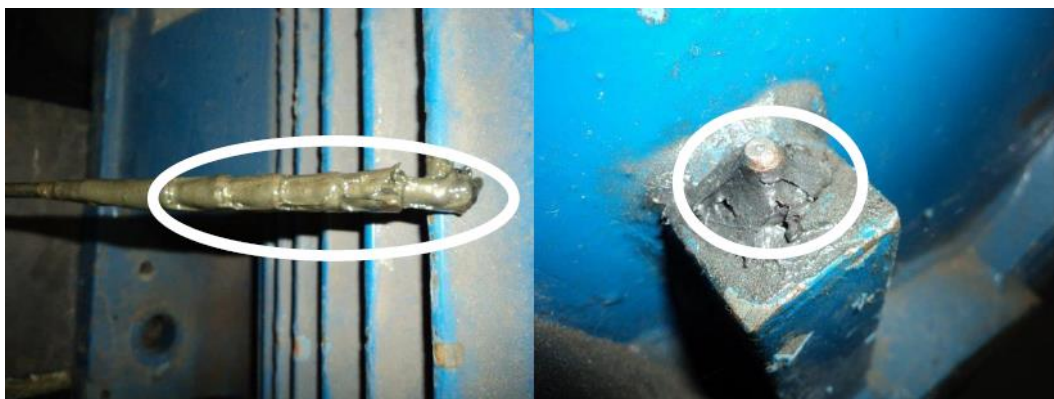


Figura 5-31 – Escovilhão de remoção de massa do lado esquerdo e injetor do lado direito (Santos, 2017).

Na figura 5-31 pode-se ver o escovilhão (contém vários anéis invisíveis por estarem cobertos de lubrificante) que deveria estar limpo. Isto é sinal de que não foi removido quando é feito o processo de lubrificação, portanto os técnicos não seguiram as indicações do fabricante para

evitar a acumulação e sobre pressurização do mancal de rolamento que levou a que o lubrificante saísse e fosse projetado na bobinagem, como se vê na figura 5-32.

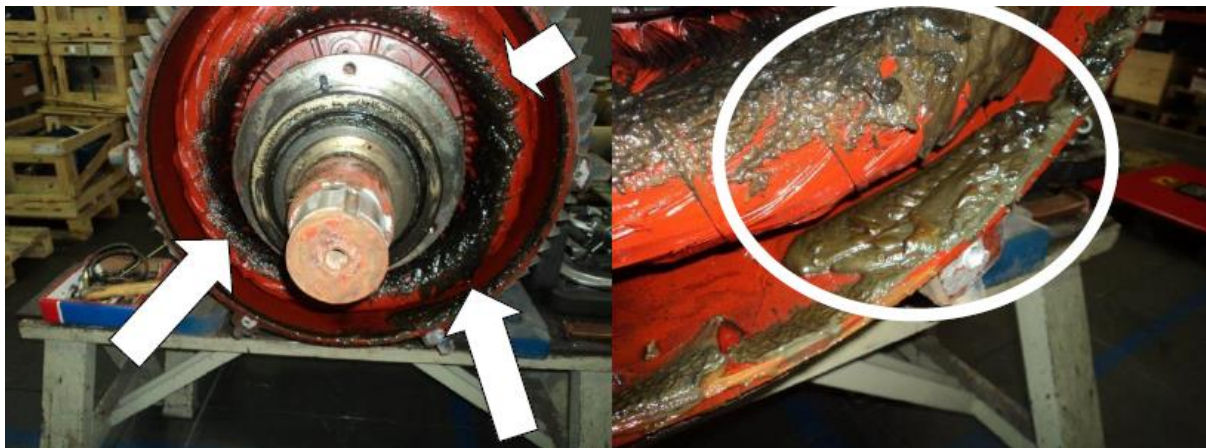


Figura 5-32 – Acumulação de lubrificante nas bobinas do estator (Santos, 2017).

5.6.6 Motor de Ar Terciário

Este motor, crítico para o funcionamento da caldeira de recuperação e, portanto, da fábrica, teve uma paragem causada por falha dos rolamentos. Cerca de duas semanas antes, a área da manutenção foi alertada para vibração e temperatura elevadas neste acionamento. Neste caso foi possível tomar medidas antes da falha. Foi criada ordem de reparação e este passou a ser acompanhado pelas equipas de ação sensorial genérica onde foram solicitadas lubrificações extra que levaram ao estado do motor que se vê na figura 5-33.

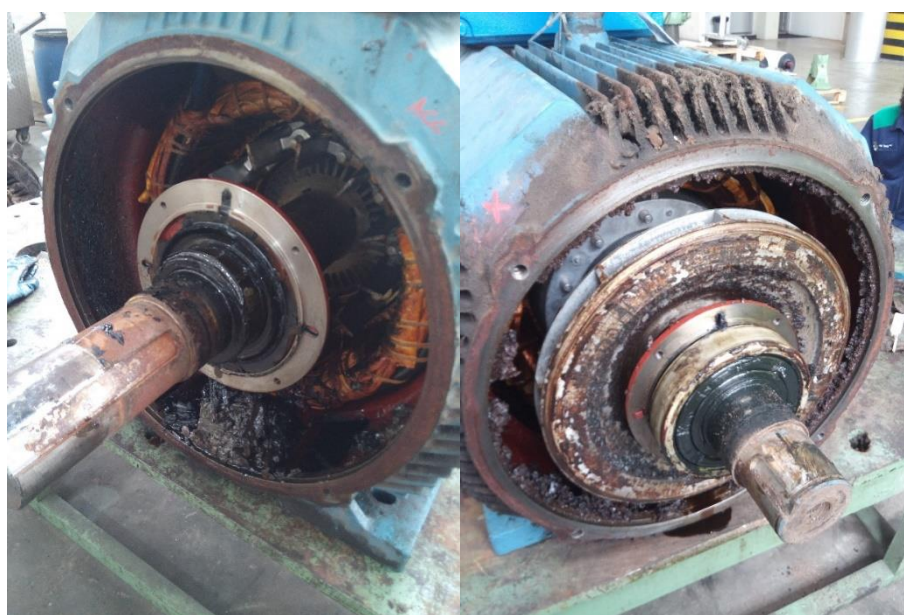


Figura 5-33 – Interior do motor dos dois lados.



Figura 5-34 – Acumulação de resíduos na flange do motor.

A figura 5-34 mostra a acumulação de sujeira na flange do motor que limita a refrigeração do mancal de rolamento, aumentando a sua temperatura de serviço e diminuindo a vida útil da massa lubrificante e do rolamento em si.

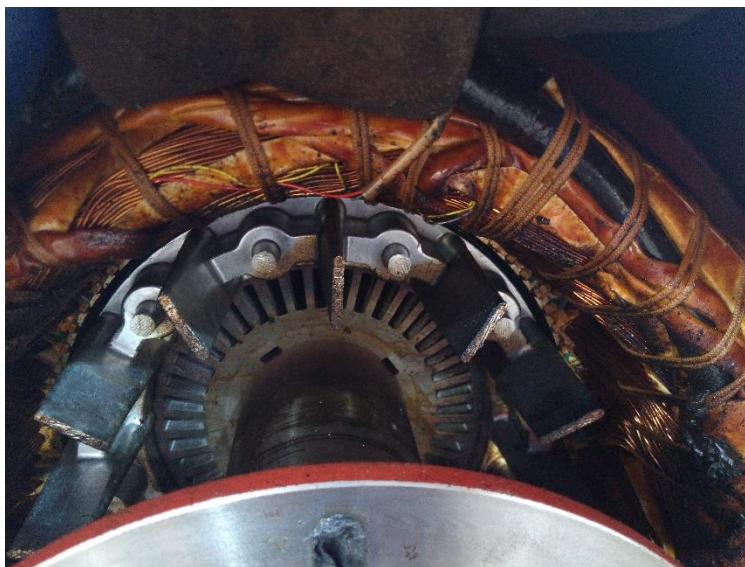


Figura 5-35 – Projeções de massa lubrificante no estator.

A figura 5-35 mostra um problema já visto nos casos anteriores, a acumulação de massa lubrificante nos enrolamentos do estator, leva à contaminação e possível degradação do isolamento. Esta também limita a refrigeração por isolar os enrolamentos da circulação de ar.

5.6.7 Monitorização da corrente de motores - MCM

Devido à indisponibilidade do equipamento de leitura e diagnóstico de corrente PdMA MCEMax, foram solicitados os serviços de uma empresa externa (Enging) para colmatar esta falha na manutenção preditiva. Para este teste foram selecionados 10 motores que estariam sinalizados como tendo possíveis falhas ou que seriam críticos para as instalações. Aqui foram medidos parte dos motores mencionados nestes casos de estudo, como os motores de ventilação de ar da caldeira de recuperação e a bomba booster 1. De seguida mostra-se os gráficos de Vetor de Park de alguns dos motores, para análise de algumas condicionantes associadas a estes testes.

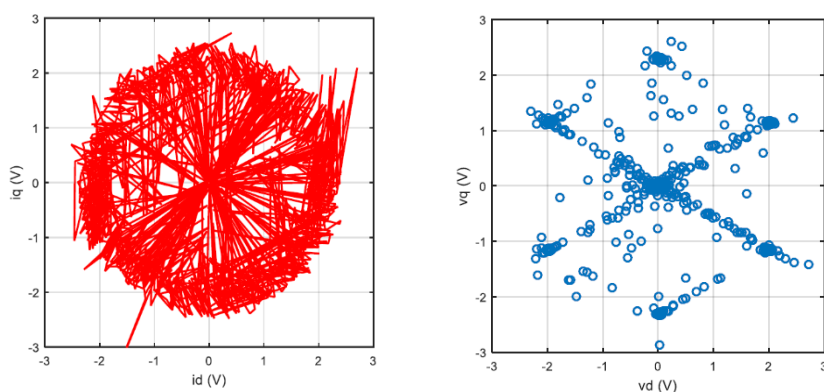


Figura 5-36 – Vetor de Park da corrente (esquerda) e da tensão (direita) de motor alimentado por VEV.

A figura 5-36 mostra um dos gráficos do Vetor de Park que, como se pode verificar, não é muito útil como primeira abordagem visual a motores alimentados por VEV, onde a tensão de alimentação do tipo PWM impede a formação de um gráfico contínuo.

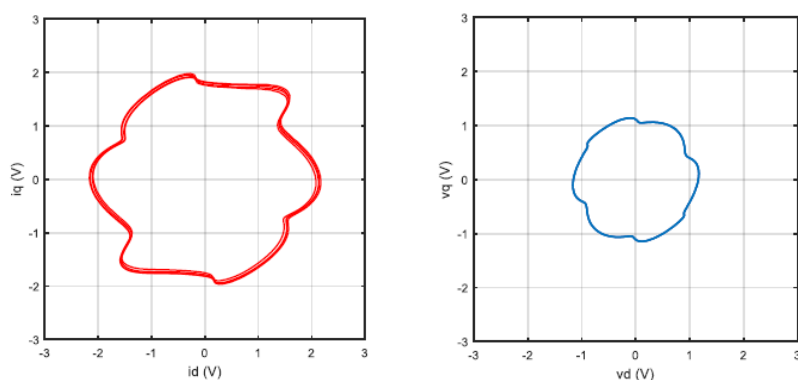


Figura 5-37 – Vetor de Park da corrente (esquerda) e da tensão (direita) de motor com distorção harmónica na rede.

Na figura 5-37 está presente um caso de harmónicos na rede, com THD da corrente de 10.8 %, que distorceu completamente o gráfico do Vetor de Park. Este é um problema conhecido que está presente em algumas zonas da fábrica.

De salientar que a empresa conseguiu isolar as frequências de falha usando outros métodos de análise, como a assinatura EPVA e demodulação e análise do espectro da corrente de alimentação do motor. Outros motores apresentaram gráficos semelhantes onde foi possível isolar pequenas falhas em evolução, embora não houvesse nenhuma falha grave (nível 1 a 5, só apareceram falhas de nível 3). Sem esta técnica de análise, estas falhas poderiam permanecer até começarem a afetar o funcionamento de forma severa, com aumento de vibração e temperatura, ou até levando a falha intempestiva, com saída do motor de serviço e danos que poderiam levar a reparações com custos mais elevados. Verifica-se assim a importância do estudo e experiência nas técnicas de análise de corrente de motores.

5.6.8 Alternador da TG3

Como parte do estágio, foi feito o acompanhamento e assistência na inspeção do alternador e excitatriz da turbina nº3 (Figura 5-38). Esta encontrava-se fora de serviço há cerca de dois anos devido a uma falha grave no disjuntor e no circuito de descarga de sobretensões do alternador, mas era necessário aferir se era possível colocar o equipamento em serviço de novo.



Figura 5-38 – Vista da instalação da TG3 – Alternador e excitatriz à direita.

O alternador é um English Electric de 1970, com uma potência de 28.4 MVA, tensão de 6.3 kV e rotação nominal de 1000 rpm. Não possui rolamentos, sendo o veio do alternador assente em chumaceiras de um metal macio lubrificadas a óleo, assemelhando-se ao funcionamento dos rolamentos do tipo *sleeve bearing*.

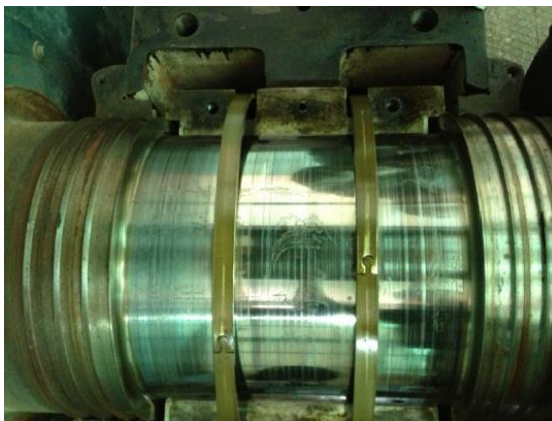


Figura 5-39 – Veio com parte inferior da chumaceira e aros de lubrificação.

A figura 5-39 mostra o veio onde costuma estar o óleo a circular. A lubrificação é feita através da bombagem de óleo sendo que, em caso de falha, possui anéis que arrastam óleo desde o cárter na parte inferior até à parte superior do veio.



Figura 5-40 – Veio do alternador sem chumaceira.

A chumaceira sofre pouco ou nenhum desgaste enquanto o alternador se mantiver a rodar à velocidade de serviço e sem partículas estranhas, já que existe um filme de óleo a circular e a separar os dois materiais, podendo ter, teoricamente, um tempo de vida infinito. O que causa o desgaste são os ciclos de arranque e paragem, já que nestas situações o filme de óleo é quase inexistente.

A chumaceira que estava instalada evidenciava sinais de um desgaste considerável. Verificou-se zonas onde houve deslocação de material. Na figura 5-41, no lado esquerdo, vê-se que, provavelmente se prendeu alguma partícula que provocou o sobreaquecimento da zona que levou à formação da saliência. Colocar o alternador em serviço nestas condições estava fora de questão.



Figura 5-41 – Interior da chumaceira inferior.

Embora houvesse indicação de que o alternador necessitava de ter as resistências de aquecimento em funcionamento permanente enquanto estivesse fora de serviço, estas estavam com um defeito à massa, impossibilitando o seu uso. Assim, foi optado pelo uso de um insuflador de ar quente portátil (como se verifica na Figura 5-38) que, à data da inspeção, estava desligado.

A inspeção foi realizada em condições de temperatura de 20 °C e elevada humidade atmosférica (o edifício tem circulação de ar permanente para o exterior). Estes fatores, conjugados com idade avançada da máquina (com isolamento higroscópico), levaram a que os valores de resistência (0.29 MΩ a 1.1 MΩ) e indicadores de contaminação do isolamento (IP - 1 a 1.49) fossem bastante baixos, de tal forma que a inspeção indicou que este alternador não deve voltar a entrar ao serviço sem um acondicionamento adequado.



Figura 5-42 – Chumaceira de reserva em armazém.

A figura 5-42 mostra que a chumaceira do alternador indicada para a substituição estava com elevado nível de corrosão devido à idade e às condições ambientais em que estava armazenada. Também esta necessitava de uma beneficiação antes de ser colocada em serviço.

O estado da chumaceira é mais um dos indicadores de que as condições de armazenamento do equipamento e material devem ser revistas, em particular o controlo ambiental.

5.7 Ordens de manutenção

Para poder implementar os planos e os roteiros definidos é necessária uma alteração no sistema atual (em particular, a gestão da lubrificação). A NPC usa o sistema de gestão SAP que possui a capacidade de abrir ordens de manutenção periódicas de forma automática, evitando a necessidade de as criar manualmente sempre que é necessário algum tipo de intervenção de manutenção preventiva/preditiva, trabalho este que é moroso e repetitivo.

Um dos problemas para a implementação do plano de lubrificação de intervalos variáveis é de que, normalmente, associado a cada local de instalação está um motor que não é fixo (quando falha, é substituído por outro que pode ser de outro fabricante, com rolamentos diferentes e/ou com intervalos de lubrificação diferentes).

Da forma como o plano estava implementado, com um intervalo trimestral de lubrificação para todos os motores, não havia problema sobre qual o motor instalado. A partir do momento em que o intervalo de lubrificação passa a estar dependente do motor, é necessário que a ordem assim o reflita, acompanhando o motor ao longo da sua vida, quer mude local de instalação ou permaneça em armazém.

Assim é necessário que, no caso dos motores, a ordem seja associada ao nº do motor (único) e não ao local de instalação.

The screenshot displays the SAP 'Modificar plano de manutenção' (Modify maintenance plan) interface. The title bar reads 'Modificar plano de manutenção: Pln.manut.ciclo 000100000050'. The main form contains the following fields and sections:

- Plano manutenção:** 100000050, Assist.Técnica 3ºTrimestre Enchedora L11
- Cabec.pl.manut.:** (Header of the maintenance plan)
- Item:** 161, Assist.Técnica 3ºTrimestre Enchedor...
- Objeto de referência:**
 - Loc.instalação: FB-PRD-L11, Linha Latas Kettner
 - Equipamento: 10001593, Enchedora Latas O+H L11
 - Conjunto: (empty)
- Dados de planejamento:**
 - Centro planej.: 1003 Pombal, Grp.plnj.PM: P01 Pombal
 - Tipo de ordem: OT05 Ordem de Manutenção Correcti..., Tp.ativ.PM: (empty)
 - CenTrab respon.: MDO_1003 / 1003 Manutenção Geral ..., Divisão: (empty)
 - Prioridade: (dropdown menu)
 - Doc.vendas: (empty) / (empty)
 - Norma de apropriação: (dropdown menu)

Figura 5-43 – Parametrização de plano de manutenção para indústria alimentar (Silva, 2014).

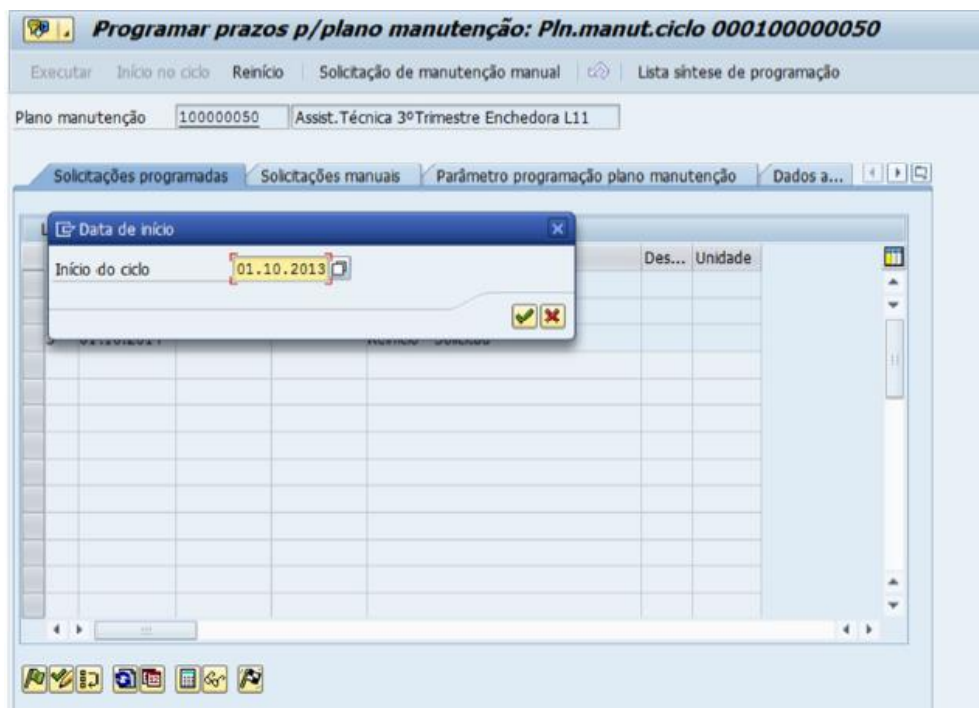


Figura 5-44 – Definição de prazos para o plano (Silva, 2014).

Embora não se tenha tentado implementar no período de estágio, este processo foi discutido devido às limitações do *software* de gestão da lubrificação atual, que não está em consonância com os processos e a gestão em vigor na NPC.

Através do uso de ordens de manutenção automáticas, o tempo despendido na abertura de ordens manualmente pode ser largamente reduzido (apenas necessária a configuração inicial) e ainda se reduz a probabilidade de erro humano nestas operações (Silva, 2014).

6 Conclusão

O percurso do estágio pode ser resumido a estas tarefas que ocuparam mais recursos:

Inicialmente houve um acompanhamento dos técnicos de controlo e potência nas diferentes áreas da fábrica, para estudo dos procedimentos em curso assim como para conhecimento do processo de fabrico. Uma parte crucial e que foi sempre debatida foram os cuidados de segurança a ter nas diferentes localizações, onde o equipamento de segurança varia conforme os tipos de perigo (por exemplo, na área dos digestores é obrigatória a utilização de viseiras de proteção da face para o caso de haver projeções de líquidos). A identificação dos diversos motores elétricos foi abordada à medida que o conhecimento das instalações o permitia. Este foi um ponto crucial já que, devido aos inúmeros perigos nesta indústria, não deixam que os novos colaboradores ou estagiários percorram as instalações de forma individual, nos primeiros meses.

Ao longo e depois deste acompanhamento inicial, foi necessário fazer uma recolha de artigos, publicações, estudos e outro tipo de informação sobre o tema da manutenção, para ter conhecimento do estado de arte e tentar implementar as técnicas e procedimentos mais recentes. Aqui a informação para a temática dos motores elétricos era imensa e variada.

Apesar de requerido, não havia um levantamento da totalidade dos motores da fábrica onde se pudesse fazer um estudo sobre quais os motores a abordar para o estágio. Assim, por iniciativa própria, foi feito um levantamento manual através do sistema SAP, assim como identificação presencial dos motores instalados. Isto consumiu bastante tempo, mas permitiu conhecer melhor as instalações assim como o histórico da evolução da fábrica, à medida que as diversas áreas eram conhecidas. Devido à sua extensão e às limitações de tempo do estágio, foi necessário restringir o estudo e abrangência de partes do plano a um número diminuto de motores elétricos, mas que compõem grande parte da potência instalada com maior criticidade associada.

Devido aos vários casos de estudo e as diversas visitas ao campo mostrarem problemas na área da lubrificação dos rolamentos de motores, esta foi a área de estudo predominante neste estágio. Esta é uma área basilar e crítica, mas que muitas vezes não tem a devida atenção devido à simplicidade associada.

Algumas das alterações ao plano não foram colocadas em prática e espera-se que possam contribuir para uma maior eficiência e menores paragens de produção.

É essencial manter registos e casos de estudo num plano de manutenção preditiva. Justificar os custos de um plano de manutenção que funciona corretamente e que, portanto, tem poucas falhas, é sempre difícil de fazer quando não se tem acesso aos casos de prevenção de falha que foram presenciados.

Como referido anteriormente, para que um plano de manutenção preditiva tenha sucesso é essencial que haja sistemas de monitorização e análise de parâmetros como a temperatura. A instalação da monitorização para todos os motores críticos pode ser feita de forma faseada.

mas a monitorização não serve para muito se não houver análise e tratamento dos dados. Assim é necessário que seja implementado um sistema uniforme para toda a fábrica, com possibilidade de leitura pela engenharia de manutenção e pelos técnicos, com histórico, registo de tendências e análise inteligente das variações.

É essencial compreender que a manutenção é um investimento na empresa e não um custo de gerir uma empresa.

6.1 Síntese do trabalho

Aqui resumem-se algumas das alterações que devem ser efetuadas de forma imediata. Em relação à lubrificação, o uso de aditivos de pressão extrema (EP) presentes nas massas lubrificantes atuais podem não ser necessários. Estes não são recomendados para temperaturas de rolamento elevadas (ABB, 2009) e reduzem o tempo de vida da massa lubrificante (WEG, 2010).

As massas lubrificantes usadas de momento são contraindicadas em alguns casos, sendo recomendável diferenciar conforme a aplicação e as recomendações dos fabricantes. Assim, deve-se deixar o lubrificante Castrol Optitemp e analisar a necessidade de usar a massa atual com espessante de lítio e aditivos EP. Assim deve-se optar por 4 massas diferentes que poderão ser utilizadas na totalidade dos motores da fábrica e cumprir com as especificações dos fabricantes. Estas seriam:

1. Massa lubrificante com espessante de lítio e consistência NLGI 2
2. Massa lubrificante com espessante de lítio e consistência NLGI 3
3. Massa lubrificante com espessante de poliureia e consistência NLGI 2
4. Massa lubrificante com espessante de poliureia e consistência NLGI 3

No caso dos lubrificantes desenhados para rolamentos de motores elétricos, os outros parâmetros, como a viscosidade do óleo e as temperaturas de serviço e de gotejamento, aditivos antioxidantes, etc., costumam estar dentro ou exceder as especificações dos fabricantes.

Os motores do fabricante VEM devem ser incluídos no plano dos motores WEG e levar massa com espessante de poliureia, tal como indicado pelo fabricante.

Os intervalos de lubrificação definidos ao longo do estágio devem ser inseridos no plano de manutenção, considerando os ajustes necessários, assim como introduzir a etiqueta de informação e registo da lubrificação e fornecer a formação necessária para os diferentes procedimentos dos vários motores da fábrica.

Deve ser considerada a implementação de roteiros usando a câmara termográfica da NPC, com a formação devida, substituindo parte das inspeções subcontratadas a terceiros.

As condições de armazenamento dos motores devem ser alteradas e implementados os procedimentos referidos nos respetivos capítulos. Neste campo, a monitorização do

isolamento com o mega ohmímetro Megger MT515 pode ser uma grande mais valia e ajudar a aferir o impacto das mudanças efetuadas.

A aquisição de um equipamento de monitorização de correntes de motores deve ser uma prioridade numa indústria onde os motores elétricos de indução têm uma importância tão grande. Embora o grupo possua um equipamento para todas as instalações, facilmente se justifica a aquisição de equipamentos exclusivos a cada instalação já que o potencial de prevenção de falhas por estes equipamentos é muito elevado e uma das formas mais precisas de o fazer.

Por último, devem ser consideradas as vantagens da monitorização e processamento dos dados (isto é importante já que não serve de nada haver aquisição de dados se ninguém os analisa ou não há análise de tendências) de forma contínua nos motores críticos, em particular os motores da caldeira de recuperação, sendo que aqui o investimento pode ser amortizado na prevenção de apenas uma falha, já que a paragem da caldeira de recuperação por falhas de motores leva, por norma, a prejuízos de várias dezenas de milhares de euros.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Devido à grande extensão da fábrica, as alterações ao plano de lubrificação aqui sugeridas acabaram por não ser introduzidas de forma concreta no plano de manutenção atual. Estas têm grande potencial de melhoria dos procedimentos atuais e é do interesse da NPC que estas sejam tidas em conta na atualização do plano atual.

Apesar do trabalho desenvolvido, o plano de manutenção preditiva não ficou implementado de forma eficaz, aproximando-se mais a um plano de manutenção preventiva em alguns pontos. Assim, é necessário continuar o trabalho e aprofundar o alcance da manutenção preditiva colocando meios de leitura, armazenamento, diagnóstico e processamento de dados e investir na expansão dos equipamentos atuais de leitura portáteis enquanto a transição para um sistema de processamento de dados centralizado não for possível.

Numa indústria de capital intensivo como a NPC, com um número elevado de motores elétricos críticos à produção, um sistema de monitorização eficiente rapidamente poderá ter retorno no investimento se for corretamente implementado se houver cuidado de tornar o sistema escalável e atualizável ao longo dos anos, evitando as soluções únicas de grandes empresas que poderão ficar aquém do esperado. O retorno do investimento seria feito de várias formas e que terão de ser tidas em conta quando este é calculado, como a disponibilidade de equipamento, custos de reparação de motores inferiores e aumento da eficiência de motores elétricos, ao evitar que estes permaneçam com falhas escondidas.

Referências

- ABB. (01 de 2009). Manual de Motores de Baixa Tensão.
- ABB. (2017). *ABB Ability Smart Sensor*. Obtido em 16 de 06 de 2017, de ABB: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106930A9867&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- Andersson, K. (2017). Formação Operadores grupo Portucel Soporcel Cacia, Atualização Evaporação. Gothenburg, Sweden: Valmet.
- Bazurto, A. J., Quispe, E. C., & Mendoza, R. C. (2016). Causes and Failures Classification of Industrial Electric Motor. *2016 IEEE ANDESCON*.
- Bernet, J. (23 de 10 de 2017). *From Screwdrivers to Testers: Vibration Analysis Comes of Age*. Obtido em 28 de 10 de 2017, de Maintenanceworld: <http://www.maintenanceworld.com/2017/10/23/screwdrivers-testers-vibration-analysis-comes-age/#more-7654>
- Bethel, N. (2017). *Tips for a Lean Approach to Motor Reliability*. Obtido em 8 de 05 de 2017, de PdMA: <http://www.pdma.com/pdfs/Articles/WhitePapers/LeanApproach.pdf>
- BP. (2017). Obtido em 18 de 06 de 2017, de Instituto Politécnico de Setúbal: lodi.est.ips.pt/jviegas/_private/massasBP2.pps
- Branco, P. A. (2016). *Análise de Criticidade de Equipamentos da Tiragem 3*. Aveiro.
- Campos, E. d. (2011). *Curso básico de fabricação de celulose e papel*. Apostila.
- Decker, C. (22 de 2 de 2016). *How to choose grease for electric motor bearings*. Obtido em 13 de 09 de 2017, de mobil: <https://www.mobil.com/en/industrial/lubricant-expertise/resources/choose-grease-electric-motor-bearings>
- Dias, P. (2010). Optimização de Planos de Manutenção e de Manutibilidade de Equipamentos numa Industria de Pasta de Papel. Coimbra.
- Dunn, R. (2002). Predictive Maintenance Technologies. *Plant Engineering*, 63-71.
- Efacec. (1987). Motores Assincronos Trifásicos - Manual de instruções. Maia.
- Enging. (2017). *EMS - MCM*. Obtido em 24 de 08 de 2017, de Enging - Make Solutions: http://enging.pt/?page_id=1525
- EPRI. (1992). *Report No. NP-7502, "Electric Motor Predictive and Preventive Maintenance Guide"*.
- Erins, P. (24 de 10 de 2017). *How to Make the Most of Predictive Maintenance*. Obtido em 3 de 11 de 2017, de maintenanceworld: <http://www.maintenanceworld.com/2017/10/24/make-most-predictive-maintenance/#more-7662>
- Ferreira, F. J. (2008). Strategies to Improve the Performance of Three-Phase Induction Motor Driven Systems. Coimbra.

- Fontes, A., Cardoso, C., & Oliveira, L. (2016). *Comparison of techniques based on current signature analysis to fault detection and diagnosis in induction electrical motors*. Aracaju-SE, Brazil: IEEE.
- Frahm, V. (27 de 01 de 2015). The truth behind lubrication and over greasing. Obtido em 27 de 05 de 2017, de Crane Engineering: <https://blog.craneengineering.net/the-truth-behind-lubrication-over-greasing>
- Honeycutt, J. S. (2004). How to Design an Electric Motor Regreasing Program. *LUBRICATION EXCELLENCE 2004 CONFERENCE PROCEEDINGS*, pp. 12-16.
- Kluber Lubrication. (10 de 2013). ASONIC GHY 72 product information. Obtido em 5 de 07 de 2017, de <http://yairerez.co.il/wp-content/uploads/2015/08/ASONIC-GHY-72.pdf>
- McKinnon, D. L. (2017). *Case Studies in online and offline motor analysis*. Obtido em 21 de 06 de 2017, de http://www.pdma.com/pdfs/cs/Case_Studies_in_Online_and_Offline_Motor_Analysis.pdf
- Mehala, N., & Dahiya, R. (2010). Detection of Bearing Faults of Induction Motor Using Park's Vector Approach . *International Journal of Engineering and Technology* , 263-266 .
- Miceli, R., Gritli, Y., Tommaso, A., Filippetti, F., & Rossi, C. (2014). Vibration Signature Analysis for Monitoring Rotor Broken Bar in Double Squirrel Cage Induction Motors Based on Wavelet Analysis . Italy.
- Mobil. (11 de 2017). *UNIREX™ N Series*. Obtido em 20 de 11 de 2017, de Mobil: <https://www.mobil.com/English-AT/Grease/pds/GLXXUnirex-N-Series>
- OptiSigma. (2017). *InSwitch*. Obtido em 5 de 06 de 2017, de Optisigma: <http://www.optisigma.pt/produtos-servicos/inswitch/>
- Ourici, A., & Ouari, A. (2012). Park's Vector Approach to detect an inter turn stator fault in a doubly fed induction machine by a neural network. 25–32.
- PdMA. (2017). Obtido em 14 de 05 de 2017, de PdMA Corporation: <http://www.pdma.com/PdMA-MCEMAX.php>
- Penrose, H. (03 de 2007). *A Review of Polarization Index and IEEE Standard 43-2000*. Obtido em 13 de 09 de 2017, de alltestpro: http://www.alltestpro.com/fileadmin/user_upload/PDFs/A_review_of_polarization_index_and_IEEE_standard_43-2000.pdf
- Penrose, H. W. (11 de 2013). *Test Methods for Determining the Impact of Motor Condition on Motor Efficiency and Reliability (Re-Publish from 2000)*. Obtido em 16 de 06 de 2017, de motordoc: <http://www.motordoc.org/wp-content/uploads/2013/11/Test-Methods-for-Determining-the-Impact-of-Motor-Condition.pdf>
- Santos, V. (2017). *Relatório Técnico da Beneficiação do Motor de Ar Secundário*.

-
- SESMT. (05 de 2015). Obtido em 10 de 04 de 2017, de Portal SESMT: <http://www.sesmt.com.br/Blog/Artigo/sesmt-diferenca-entre-manutencao-preventiva-corretiva-preditiva-detectiva>
- Silva, M. D. (2014). *Abordagem Lean à Gestão da Manutenção e Energia de uma Indústria de Bebidas*. Coimbra: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Stonebridge, E. I. (2015). *All Risks Property & Machinery Breakdown Exposures Risk Assessment & Insurance Market Report*. Aveiro.
- The Navigator Company. (10 de 2017). *Complexo Industrial de Cacia*. Obtido em 20 de 10 de 2017, de TheNavigatorCompany: <http://www.thenavigatorcompany.com/Institucional/A-Nossa-Actividade/Cacia>
- Turner, D. (01 de 2009). *The Skinny on Grease Compatibility*. Obtido em 18 de 10 de 2017, de Machinerylubrication: <http://www.machinerylubrication.com/Read/1865/grease-compatibility>
- Veldman, J., Wortmann, H., & Klingerberg, W. (2011). Typology of Condition Based Maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 183-202.
- WEG. (2010). *Manual Geral de Instalação, Operação e Manutenção de Motores Elétricos*.

ANEXO

Anexo A - Template de relatório de termografia



Bomba Booster 1 - AC56737
A245-01-05-06
245M962

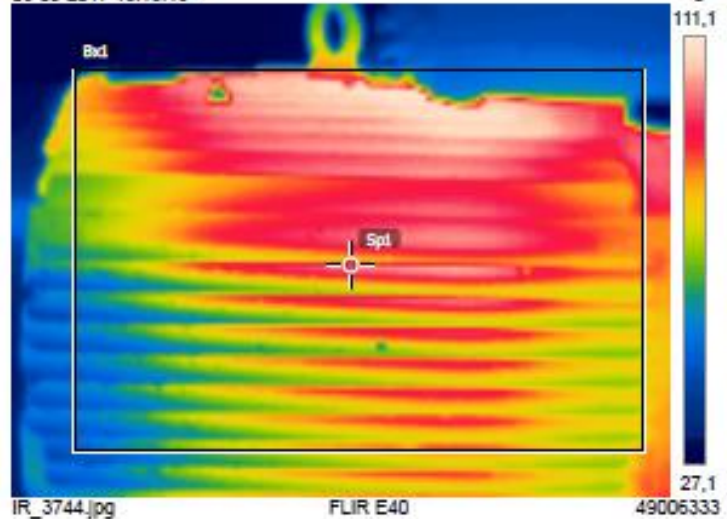
Measurements

Bx1	Max	112,5 °C
Sp1		96,3 °C

Parameters

Emissivity	0.95
Ref. temp.	23 °C
Distance	2 m
Atmospheric temp.	23 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	50 %

06-09-2017 15:18:13



06-09-2017 15:18:13



DC_3745.jpg



Bomba Booster 1 - AC56737
 A245-01-05-06
 245M962

Measurements		
Bx1	Max	107,7 °C
Sp1		104,2 °C
Parameters		
Emissivity		0.95
Ref. temp.		23 °C
Distance		2 m
Atmospheric temp.		23 °C
Ext. optics temp.		20 °C
Ext. optics trans.		1
Relative humidity		50 %

