

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

RENAN FAVARÃO DA SILVA

**CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE NO PROCESSO DE
LUBRIFICAÇÃO DE REDUTORES COM SISTEMA DE
BLINDAGEM**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

Curitiba
2015

RENAN FAVARÃO DA SILVA

**CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE NO PROCESSO DE
LUBRIFICAÇÃO DE REDUTORES COM SISTEMA DE
BLINDAGEM**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

Curitiba
2015

RESUMO

SILVA, Renan Favaraol da. **ANÁLISE DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE DE MOINHOS DE UMA PLANTA INDUSTRIAL**. Monografia do Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

A contaminação de óleos lubrificantes está diretamente relacionada com as recorrentes falhas de lubrificação em sistemas mecânicos que acarretam interrupções da produção. Quantificar o crescimento de confiabilidade da lubrificação em redutores de velocidade, após instalação de medidas de engenharia, mediante sistema de blindagem dos equipamentos foi o objetivo desse artigo. Com a base de dados de falhas nos padrões aceitáveis do lubrificante a partir dos laudos das análises de óleo dos equipamentos, levantou-se as curvas da função de densidade de probabilidade (pdf) e confiabilidade ($R(t)$) para os diferentes períodos com o *software* Weibull ++. Foi observado que a instalação dessas medidas em redutores contribui para o crescimento da confiabilidade do óleo lubrificante em manter os padrões aceitáveis de operação por mais tempo quando comparado aos períodos anteriores às blindagens.

Palavras-chave: Crescimento da confiabilidade. Blindagem de redutores. Lubrificação. Análise de lados de vida.

ABSTRACT

SILVA, Renan Favarão da. **RELIABILITY, MAINTAINABILITY AND AVAILABILITY ANALYSIS OF MILLS INDUSTRIAL PLANT**. Monograph of Specialization in Reliability Engineering of Academic Department of Electrical Engineering at Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2015.

The contamination of lubricating oil is directly related to the often lubrication failures in mechanical systems that lead to production interruptions. Quantify the lubrication reliability growth in gearbox after engineering measures through equipment shielding system was the objective of this article. Based on the failure database of acceptable lubricant standards through the reports of the equipment oil analysis, it was possible to generate the curves of the probability density function (pdf) and reliability ($R(t)$) for different periods with Weibull ++ software. It was observed that the installation of these measures in gearboxes contributes to the reliability growth of the lubricating oil in preserving the acceptable standards of operation for longer when compared to previous periods before shielding.

Key word: Reliability Growth. Gearboxes Shielding. Lubrication. Life Data Analysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Blindagem: Cronograma e etapas do processo.....	7
Tabela 2 Histórico das análises dos dados de vida dos óleos lubrificantes.	7
Tabela 3 das análises de dados de vida na lubrificação dos redutores	9
Tabela 4 Resultados das análises de dados de vida na lubrificação dos redutores.....	10

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Gráfico de Pareto de falhas de máquinas operatrizes por modo de falha.....	1
Figura 2 Levantamento das principais causas de falhas em rolamentos.....	3
Figura 3 Acessórios utilizados na blindagem de redutores.....	4
Figura 4 Reliasoft Weibull ++: Ferramenta Teste de Aderência	5
Figura 5 Reliasoft Weibull ++: Ferramenta QCP	6
Figura 6 Funções densidades de probabilidade (pdf): alteração verde-vermelho	12

SUMÁRIO

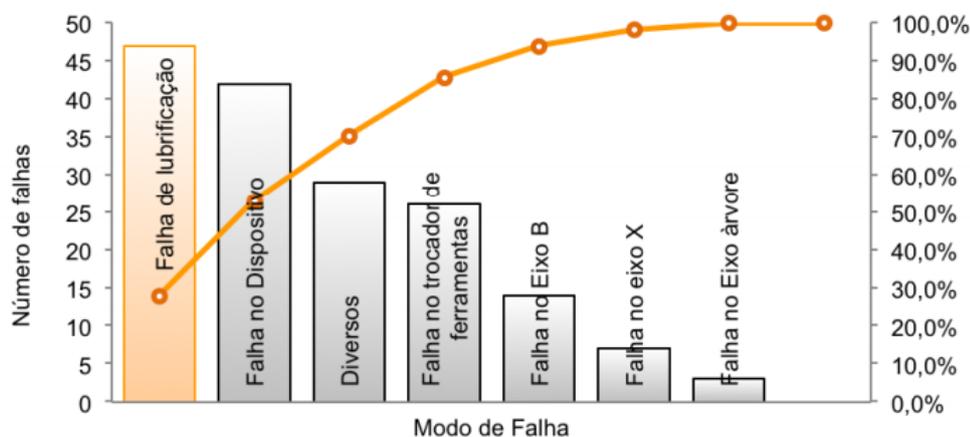
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	2
1.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. UBRIFICAÇÃO INDUSTRIAL E BLINDAGEM	3
3. METODOLOGIA.....	4
4. COLETA E ANÁLISE DE RESULTADOS	7
5. CONCLUSÃO	13
REFERÊNCIAS	14

1. INTRODUÇÃO

Presente na maioria das rotinas de manutenção de sistemas mecânicos, a lubrificação tem se tornado cada vez mais uma área especializada, já sendo referenciada por estudiosos como engenharia de lubrificação desde 1944 com a fundação da Sociedade Americana de Engenheiros de Lubrificação (*American Society of Lubrication Engineers, ASLE*), atual Sociedade dos Tribologistas e Engenheiros de Lubrificação (*Society of Tribologists and Lubrication Engineers, STLE*). A sua importância é tamanha no universo da manutenção industrial que frequentemente é identificada como a causa raiz de incidentes por falha mecânica, ao exemplo dos rolamentos. (MENDEL et al., 2008). Conseqüentemente, sistemas de lubrificação confiáveis são cada vez mais requeridos.

A interrupção de um sistema de produção dada à indisponibilidade de um equipamento é o reflexo da perda da função de algum componente desse equipamento. Comumente, costuma-se dizer nesse caso que a máquina falhou, quando na verdade a abordagem deve ser realizada sobre seus componentes visto que formam subsistemas com atribuições definidas. A Análise dos Modos e Efeitos de Falhas (*Failure Mode and Effects Analysis, FMEA*) inicia-se com essas identificações de subsistemas, seguidas pela classificação dos modos de falhas concebíveis, ou seja, como esses componentes deixam de cumprir suas funções e requisitos, e os efeitos e causas de cada modo de falha (BERTSCHE, 2008).

Figura 1 Gráfico de Pareto de falhas de máquinas operatrizes por modo de falha



Fonte: Machado (2013)

Para sistemas mecânicos, é de consenso que os problemas com lubrificação é um dos modos de falha mais recorrentes. Um levantamento por Análise de Pareto (Figura 1) em máquinas operatrizes e sistemas automatizados, apontou falhas de lubrificação como o primeiro modo de falha na análise (MACHADO, 2013). Incluem-se nessa categoria os problemas de

abrasão, de fadiga e de adesão compondo os desgastes mecânicos de degradação de superfície.

Uma prática comum para sistemas de redução de velocidade a fim de evitar modos de falhas enraizados na lubrificação é popularmente conhecida como blindagem de sistemas de lubrificação. Essa prática consiste em manter os reservatórios de óleos lubrificantes do sistema isolados do meio externo, garantindo que estejam em padrões aceitáveis por normas ou definições corporativas. A contaminação nos lubrificantes comprometem a vida útil das máquinas através do desgastes acelerados e conseqüentemente à disponibilidade operacional dos equipamentos (GRACIA et al.,2012).

1.1 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho foi quantificar o crescimento da confiabilidade para a lubrificação dos redutores que passaram por adequações de blindagem. Nenhum estudo havia sido realizado para o conjunto de 35 redutores de um terminal portuário em Paranaguá que apresentassem os ganhos em termos de confiabilidade, disponibilidade e retorno econômico após o investimento das blindagens nos equipamentos.

1.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada para avaliar o crescimento da confiabilidade do processo de lubrificação dos equipamentos teve como base de dados o histórico de 3 anos dos laudos de análise de óleos lubrificantes. O terminal conta com um programa de análise de óleo lubrificante trimestral, onde são coletadas amostras são coletadas dos 35 redutores críticos da unidade e submetidas à análise em laboratório qualificado. O retorno desses laudos expressam a necessidade de trocar ou intervir no equipamento a fim de retorná-lo aos padrões aceitáveis de lubrificação.

O uso de simulações estatísticas no *software* Reliasoft Weibull ++ foi o método utilizado para calcular e extrair relatórios gráficos das análises de dados de vida (*Life Data Analysis*, LDA), processo também utilizado durante o estabelecimento dos critérios de confiabilidade e da base de dados na execução de um programa de Manutenção Centrada na Confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance*, RCM). Com essas informações foi possível comparar diferentes momentos da implantação das melhorias de blindagem quanto aos retornos em termos econômicos e de confiabilidade. Indo além, o levantamento das curvas e funções constituirá uma base de dados que permite benefícios para próximos estudos, como a exemplo da previsão de falhas futuras, o tempo ótimo de troca de lubrificante e a projeção de orçamento e estoque de lubrificantes.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O restante do artigo estará estruturado em outras quatro seções: na seção 2, será abordado um pouco mais sobre o universo da lubrificação industrial e de blindagem de redutores, já na seção 3 terá a metodologia detalhada do artigo e, por fim, na seção 4 estará apresentada a coleta de dados e resultados, seguidos das considerações finais do trabalho na seção 5.

2. LUBRIFICAÇÃO INDUSTRIAL E BLINDAGEM

Orientados em tratar os principais modos de falha dos componentes mecânicos, muita energia foi depositada em identificar por quais motivos que os componentes dos maquinários falhavam. Dentre os principais pontos levantados mantinham-se a contaminação do lubrificante por partícula, a contaminação do lubrificante por umidade, o uso de lubrificante degradado, o uso de lubrificante errado, o desalinhamento de acionamento, o desbalanceamento de componentes rotativos, altas temperaturas e outros (Figura 2). Foi a partir desses conhecimentos que a indústria da lubrificação ganhou força para justificar os investimentos em adequações e desenvolvimento de componentes que contribuíssem para a preservação do lubrificante.

Figura 2 Levantamento das principais causas de falhas em rolamentos.

1.	Contaminação por Partículas
2.	Contaminação por Umidade
3.	Lubrificante Degradado/Errado
4.	Desalinhamento
5.	Desbalanceamento
6.	Altas temperaturas
7.	Outros

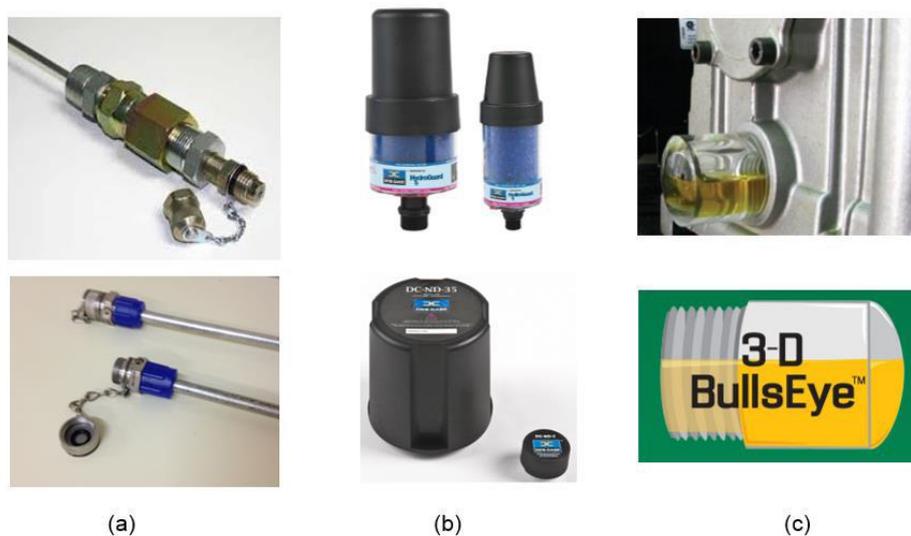
Fonte: Adaptado de Noria/SKF (2013)

As análises trimestrais de óleo aplicadas no terminal para os redutores passam por um conjunto de ensaios tais como: viscosidade 40°C, água por crepitação, índice de Acidez, Água por Karl Fischer, Contagem de partícula, Ferrografia quantitativa e espectrometria. Os resultados são comparados aos padrões estabelecidos na empresa e se qualquer um desses ensaios ultrapassar os padrões prévios, o ativo é classificado em amarelo (alerta) ou vermelho (alarme) conforme intervalos definidos, mantendo a cor verde quando este está nas condições aceitáveis.

O processo de blindagem bem executado permite que as operações de lubrificação no ativo sejam feitas de forma a minimizar contaminações. A

prática quando aplicada para redutores de velocidade trabalha na adequação do ponto de coleta de amostra, do ponto de dreno, do ponto de abastecimento, na visualização de níveis e no respiro da caixa de engrenagem. Geralmente esses pontos são adequados com a instalação de acessórios desenvolvidos especialmente para atender essas demandas como as válvulas *minimess* e tubos de *pitot*, engate rápido para dreno e abastecimento, visores de níveis externos (a exemplo do 3D) e respiros dessecantes (higroscópico) e não dessecantes, respectivamente (Figura 3).

Figura 3 Acessórios utilizados na blindagem de redutores



(a). Válvulas *minimess* e tubo de *pitot*; (b) Respiros higroscópico (sup.) e respiro não dessecante (inf.); (c) Visor de nível externo modelo 3D.

Fonte: Autoria Própria (2014)

3. METODOLOGIA

Computar os três anos de análises de óleo foi possível estabelecendo uma metodologia embasada na mudança de *status* dos laudos, ou seja, quando o ativo tem uma alteração no status de saúde comparado ao laudo anterior. As mudanças do nível aceitável (*status* verde) poderiam acontecer de duas formas: nível aceitável para alerta (amarelo) ou nível aceitável para alarme (vermelho). Essas mudanças foram identificadas e agrupadas separadamente para as análises, mantendo em comum o grupo de equipamentos aceitáveis (verde).

Iniciou-se então a compactação de todas as análises mediante as mudanças de *status* na tabela 2. Na estrutura de suas linhas todos os códigos dos ativos que participaram da análise de óleo no período e em suas diversas

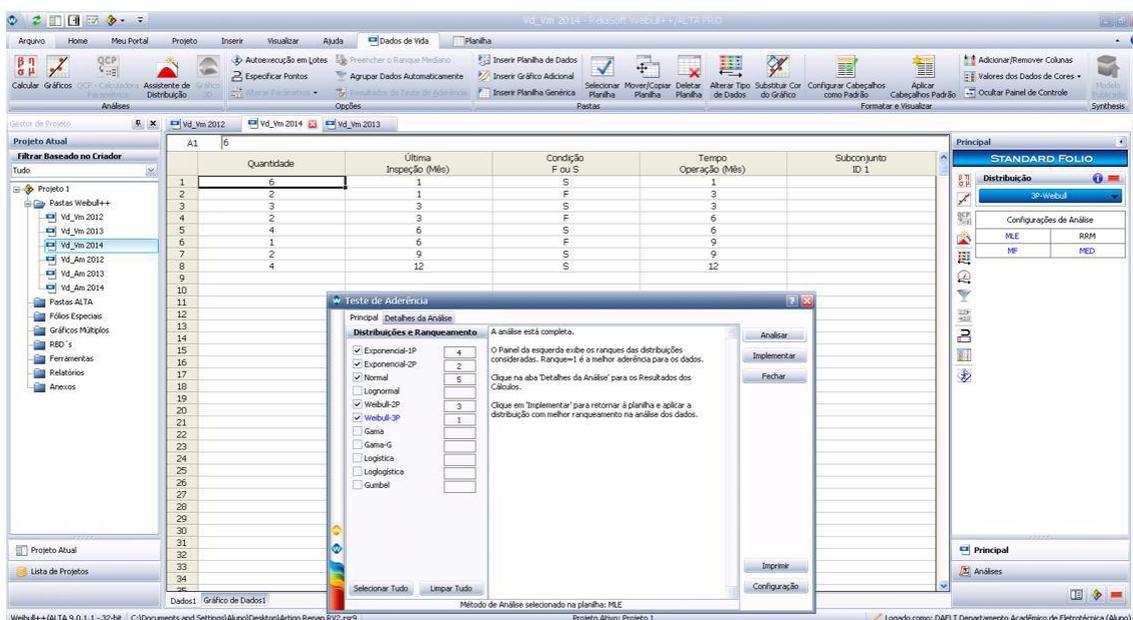
colunas os tempos para falha (alteração do *status* aceitável) em meses e separados por ano. O preenchimento dessas informações forneceu a base de dados necessária para realizar as análises de dados de vida por tipo de alteração (verde-amarelo ou verde-vermelho) e por ano.

Devido os ensaios dos lubrificantes serem trimestrais, os dados de falhas apresentados possuem suspensões em intervalos. Essa condição faz com que observamos casos de falha entre meses, contudo, sem exata precisão, ou seja, mudança na condição entre o intervalo de uma amostra prévia aceitável e o resultado da posterior. Essa notação na tabela 2 foi demarcada com o uso do período que a falha pode ter ocorrido, seguido da letra F, sinalizando falha.

A condição de encerrar o período amostral de um ano para os equipamentos possibilita a presença de suspensão a direita, ou seja, terá equipamentos que mesmo com o término do ano, seguiram em estado aceitável. Nesses casos, foram considerados os períodos de certeza para a condição verde. Essa notação na tabela 2 foi demarcada com o uso do período em que o ativo manteve-se em condição aceitável, seguido da letra S, sinalizando suspensão.

Deu-se sequência com o uso do *software* Reliasoft Weibull ++ na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) realizando-se o levantamento da melhor distribuição estatística que se adequasse aos dados, orientados pela função teste de aderência através da máxima verossimilhança (MLE). Para o teste de aderência, concentrou-se na comparação entre as seguintes distribuições: Exponencial (1 parâmetro), Exponencial (2 parâmetros), Normal, Weibull (2 parâmetros) e Weibull (3 parâmetros). A figura 4 ilustra o uso da ferramenta teste de aderência para um caso específico do trabalho.

Figura 4 Reliasoft Weibull ++: Ferramenta Teste de Aderência



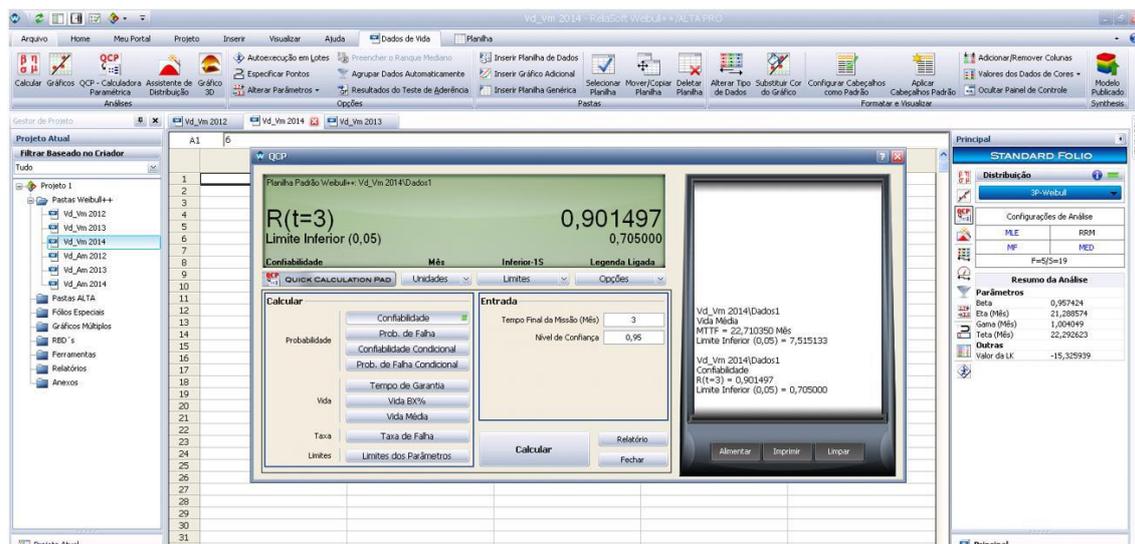
Fonte: Autoria Própria (2015)

Com as distribuições definidas para cada caso, extraem-se os níveis de confiabilidade através da ferramenta QCP para determinados tempos de vida do óleo a fim de comparação entre períodos e base de cálculo de retornos. Essa ferramenta é caracterizada como uma interface de calculadora que contém as funções algébricas pertinentes da distribuição, possibilitando extrair diversas informações, inclusive com intervalos de confiança. Na figura 5, exemplifica-se o resultado para a confiabilidade de um modelo em 3 meses ($R(3)$) com nível de confiança de 95% aplicando-se limite unilateral inferior.

As curvas de confiabilidade $R(t)$ e a função densidade de probabilidade foram extraídas a partir da ferramenta gráfica, possibilitando entre essas, outras opções. Ao término dos levantamentos, os dados foram compactados na tabela 3 e 4, sendo possível comparar o tipo da distribuição que cada alteração apresentou por ano e os níveis de confiabilidade de permanência do óleo em nível saudável para diferentes tempos.

Os valores de confiabilidade para diferentes momentos foram utilizados para quantificar o crescimento de confiabilidade quando comparado aos períodos anteriores em que as modificações do processo de blindagem não haviam sido realizadas. Os gráficos foram extraídos a fim de comparar visualmente as curvas das funções densidades de probabilidade (pdf) de falha e confiabilidade. Também utilizou-se do uso de confiabilidade condicional para quantificar o retorno econômico com troca de lubrificantes para períodos diferentes.

Figura 5 Reliasoft Weibull ++: Ferramenta QCP



Fonte: Autoria Própria (2015)

4. COLETA E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os redutores que participam do programa de análise de óleo lubrificante passaram pelas seguintes etapas conforme o cronograma de blindagem, disposto na tabela 1. Vale ressaltar que medidas de blindagem ainda serão providenciadas no ano em vigência (2015).

Tabela 1 Blindagem: Cronograma e etapas do processo.

2012	Redutores não apresentavam acessórios de blindagem
2013	Remoção de respiros originais e instalação de respiros dessecantes
2014	Receberam pontos de coleta (<i>minimess</i> e tubor <i>pitot</i>) e visor de nível externo
2015	Conclusão do pontos de coleta e visores e início do ponto de abastecimento

Fonte: Autoria Própria (2015)

Os dados de todos os laudos foram analisados e compactados na tabela 2 que se segue. Os ativos que tiveram mudanças drásticas nas propriedades do lubrificante, saindo de aceitável para alarme (verde-vermelho) estão dispostos na primeira coluna, os que tiveram uma variação menor nas propriedades do lubrificante, saindo de aceitável para alerta estão na segunda coluna seguidos na terceira coluna dos ativos em suspensão, ou seja, os lubrificantes que não tiveram alteração no período e estão na faixa aceitável. Todas essas colunas se subdividem em colunas menores para os três anos da base de dados.

Tabela 2 Histórico das análises dos dados de vida dos óleos lubrificantes.

Código do Equipamento	Duração em meses para alteração (F) ou permanência (S) de status								
	Verde - Vermelho			Verde - Amarelo			Verde Suspensão		
	2012	2013	2014	2012	2013	2014	2012	2013	2014
TC 201	-	-	-	-	-	-	-	-	6S
TC 202	-	-	-	1 - 4 F	-	-	1S	3S	12S
TC 203	-	-	-	-	-	5 - 8F	6S	6S	1S
TC 204	-	-	-	-	1 - 3F	-	-	1S	12S
TC 212	-	1 - 3F	-	-	-	-	-	-	-
TC 213	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TC 214	-	-	-	-	1 - 3F	-	1S	1S	12S
EL 301	-	1 - 3F	-	-	-	3 - 6F	-	-	1S
EL 304	-	-	-	4 - 6F	-	-	-	3S	12S
EL 302	-	-	1 - 3F	-	-	-	-	-	1S
EL 303	-	-	-	-	1 - 3F	-	6S	-	-
RD 506	1 - 4F	-	-	-	-	-	-	6S	9S
RD 507	-	-	-	-	-	1 - 3F	-	-	3S
RD 508	-	1 - 3F	-	-	-	-	-	-	6S
EL 307	-	-	-	-	-	-	-	1S	-
TC 217	1 - 3F	-	-	-	1 - 3F	1 - 3F	-	1S	3S

TC 218	-	1 - 3F	-	-	-	-	-	-	1S
EL 306	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TC 205	-	-	3 - 6F	1 - 4F	1 - 3F	-	-	-	-
TC 206	-	-	-	-	1 - 2F	-	-	1S	6S
TC 207	-	1 - 4F	3 - 6F	-	-	-	-	-	-
TC 219	-	-	-	1 - 4F	-	-	1S	3S	9S
TC 220	-	-	-	-	1 - 3F	-	1S	-	3S
TC 211A	-	-	6 - 9F	-	-	-	-	3S	-
TC 211B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TC 210A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TC 210B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TC 208A	-	-	1 - 3F	-	-	-	1S	-	-
TC 208B	-	-	-	-	-	1 - 3F	-	-	-
TC 231	-	-	-	-	-	-	-	-	1S
EL 305A	-	-	-	-	-	-	-	-	6S
EL 305B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RD 511	-	-	-	4 - 7F	-	1 - 3F	-	1S	-
RD 512	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TC 230	-	-	-	-	-	3 - 6F	-	6S	1S

Fonte: Autoria Própria (2014)

Os valores em intervalos de meses são referentes aos períodos em que as falhas ocorreram, sem precisão exata do momento dentro destes, e são seguidos pela letra F, já os valores de suspensão são em meses seguidos da letra S, e representam a permanência do *status* em verde sem alteração (suspensão) durante o período do ano. As linhas que estão vazias, ou seja, somente com traços, foram ativos que durante todos os períodos das análises nunca estiveram em condições aceitáveis (*status* em verde), dessa forma não sendo possível coletar os dados de falhas ou suspensões.

Foram realizados seis levantamentos de distribuições com os dados da tabela 2 a fim de identificar as distribuições estatísticas aplicáveis e seus parâmetros, possibilitando calcular a confiabilidade para diferentes tempos. As três primeiras combinações realizadas foram para as alterações verde-vermelho nos anos de 2012, 2013 e 2014, seguidas das outras três combinações para as alterações verde-amarelo nos mesmos períodos. Os valores dos parâmetros e os modelos das distribuições aplicadas assim como o valor da confiabilidade, expressa pela função $R(t)$ em meses, tempo médio para falhas e confiabilidade condicional, estão preenchidos nas tabelas 3 e 4 que se seguem, sempre utilizando a confiança em 95% com limite unilateral inferior.

Tabela 3 das análises de dados de vida na lubrificação dos redutores

Verde - Vermelho							
		2012	2013	2014			
Distribuição	Weibull 3p		Weibull 2p		Weibull 3p		
Parâmetros							
Beta (β)	2,42		1,58		0,95		
Eta (η)	6,60		6,53		21,28		
Gama (γ)	0,07		-		1,00		
Confiabilidade em t meses (R(t))							
Confiância 95%	Linf R(t)	R(t)	Linf R(t)	R(t)	Linf R(t)	R(t)	
	R(3)	0,470	0,871	0,527	0,747	0,705	0,901
	R(6)	0,076	0,464	0,132	0,417	0,580	0,779
	R(9)	0,000	0,126	0,007	0,189	0,438	0,676
	R(12)	0,000	0,015	0,000	0,073	0,299	0,588
	R(15)	0,000	0,000	0,000	0,024	0,187	0,512
	R(18)	0,000	0,000	0,000	0,007	0,108	0,447
Tempo Média até Falha (MTTF) - Meses							
Confiância 95%	Linf MTTF	MTTF	Linf MTTF	MTTF	Linf MTTF	MTTF	
	3,65	5,93	3,47	5,86	7,51	22,71	
Confiabilidade Condicional em t meses (R(t1/t2))							
Confiância 95%	Linf R(6/6)	R(6/6)	Linf R(6/6)	R(6/6)	Linf R(6/6)	R(6/6)	
	0,000	0,032	0,000	0,174	0,405	0,754	

Fonte: Autoria Própria (2015)

Como pode-se observar na tabela 3, os dados de falhas para alteração verde-vermelho foram ajustados pela distribuição estatística Weibull com três parâmetros (3p), simplificada em um dos casos a dois parâmetros (2p). Essa distribuição consegue modelar uma ampla variedade de situações em que unidades apresentam funções de taxas de falhas distintas (eq. 4.3), definidas pelo parâmetro Beta (β), o parâmetro de forma. Esse parâmetro é o responsável em dar a forma da função densidade de probabilidade de falha (pdf) (eq. 4.1), o qual interfere na taxa de falhas dos itens analisados. Variando o valor de Beta a 1, 2 e próximo de 3,26, por exemplo, teremos a distribuição de densidade de probabilidade de falha caracterizada por curvas exponencial, distribuição de Rayleigh e distribuição normal respectivamente (FOGLIATTO et al., 2009).

O parâmetro Eta (η) é frequentemente designado como vida característica da unidade modelada pela distribuição Weibull, sendo o momento em t em que a função confiabilidade R(t) (eq. 4.2), assume o valor de 0,36789, ou seja, também interpretado como o momento em que 63% do itens

já falharam. (FOGLIATTO et al., 2009). E por último o parâmetro gama (γ) representa a vida mínima, ou seja, o período que efetivamente não temos falhas, por isso que em alguns casos esse parâmetro não é aplicado.

$$f(t) = \beta \eta t^{\beta-1} e^{-t\beta\eta} \quad (4.1)$$

$$R(t) = e^{-(t\eta)\beta} \quad (4.2)$$

$$h(t) = \beta \eta (t\eta)^{\beta-1} \quad (4.3)$$

Tabela 4 Resultados das análises de dados de vida na lubrificação dos redutores

		Verde - Amarelo					
		2012		2013		2014	
Distribuição		Exponencial 2p		Exponencial 1p		Exponencial 2p	
Parâmetros							
Lambda (λ)		0,224		0,142		0,068	
Gama (γ)		1,000		-		1,000	
Confiabilidade em t meses (R(t))							
Confiança 95%	Linf R(t)	R(t)	Linf R(t)	R(t)	Linf R(t)	R(t)	
	R(3)	0,391	0,638	0,452	0,652	0,775	0,872
	R(6)	0,095	0,325	0,204	0,426	0,529	0,710
	R(9)	0,023	0,165	0,092	0,278	0,360	0,578
	R(12)	0,005	0,084	0,041	0,181	0,246	0,471
	R(15)	0,001	0,043	0,018	0,118	0,168	0,383
	R(18)	0,000	0,022	0,008	0,077	0,114	0,312
Tempo Média até Falha (MTTF) - Meses							
Confiança 95%	Linf MTTF	MTTF	Linf MTTF	MTTF	Linf MTTF	MTTF	
	3,13	5,45	3,77	7,03	8,84	15,61	
Confiabilidade Condicional em t meses (R(t1/t2))							
Confiança 95%	Linf R(6/6)	R(6/6)	Linf R(6/6)	R(6/6)	Linf R(6/6)	R(6/6)	
	0,060	0,259	0,204	0,458	0,405	0,754	

Fonte: Autoria Própria (2015)

Como pode-se observar na tabela 4, os dados de falhas para alteração verde-amarelo foram ajustados pela distribuição estatística Exponencial com dois parâmetros (2p), simplificada em um dos casos a apenas um parâmetro (1p) quando desconsiderado a vida mínima (γ). A distribuição exponencial é importante em estudos de confiabilidade por ser a única distribuição com função de risco constante, contudo devido a simplicidade matemática do modelo (eq. 4.4), foi difundida e seu uso às vezes fora inadequado. O parâmetro gama assim como no caso da distribuição Weibull, será a vida mínima e o parâmetro lambda (λ), representa o inverso do tempo médio para falha (MTTF) (eq. 4.7) (FOGLIATTO et al., 2009).

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (4.4)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4.5)$$

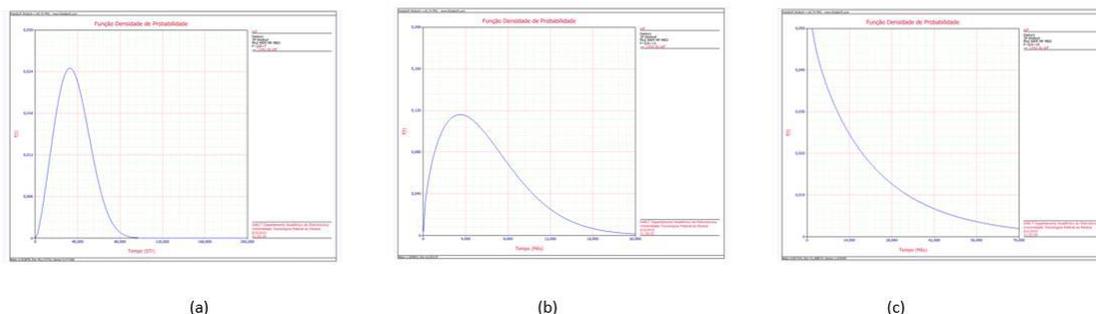
$$h(t) = \lambda \quad (4.6) \quad MTTF(t) = 1/\lambda \quad (4.7)$$

A análise dos dados apresentados nas tabelas 3 e 4 evidencia-se o crescimento de confiabilidade para ambos os modos de alteração de status do óleo. Para o primeiro caso, verde-vermelho (tabela 3), é observável que a confiabilidade saltou quase 40 vezes quando comparada o ano de 2014 ao mesmo período de 12 meses com o ano de 2012, e em 8 vezes quando comparado ao mesmo período em 2013. Ainda quanto a esse caso, vale observar que mesmo considerando o limite unilateral inferior em 2014, nenhum momento teremos a confiabilidade nula até 18 meses, o que para os anos de 2013 e 2012 acontecem em 12 e 9 meses respectivamente, de acordo com a tabela.

Os casos de alteração verde-amarelo também apresentaram resultados positivos. É observável que a confiabilidade para um ano ($R(12)$) cresceu 4,5 vezes quando comparado o ano de 2014 ao 2012 e 2,5 vezes com o ano de 2013. Um destaque é quanto ao nível da confiabilidade para um ano e meio ($R(18)$) em 2014 ser aproximadamente equivalente à mesma confiabilidade de apenas 6 meses ($R(6)$) em 2012, demonstrando que o óleo elevou o triplo do tempo para a mesma confiabilidade.

Em termos de distribuições, observa-se que a blindagem dos sistemas de lubrificação está propiciando a adequar a distribuições exponenciais, verificado principalmente na redução do parâmetro de forma Beta para 1 com o evoluir das adequações. Essa distribuição garante uma taxa de falha constante (aleatoriedade), ou seja, o tempo não é fator que influencia em uma probabilidade maior ou menor de falha, como antigamente se via nas alterações verde-vermelho. Nesses casos, em 2012 e 2013, quando se tinham fatores de forma Beta bem maiores que 1, as taxas de falhas eram crescentes demonstrando que o lubrificante teria risco cada vez maior de falhar pois a contaminação era crescente evidenciado em região de alta probabilidade de falha (pico) nas funções de densidade de probabilidade depois de um determinado período (Figura 6).

Figura 6 Funções densidades de probabilidade (pdf): alteração verde-vermelho



(a). Weibull 3p – 2012; (b) Weibull 2p – 2013; (c) Weibull 3p - 2014

Fonte: Autoria Própria (2015)

Ao analisar os MTTF para os casos iniciais e compará-los com os finais, observam-se resultados positivos. O tempo médio até falhas (MTTF) teve um salto em quase 3 vezes para a alteração verde-amarelo e quase 4 vezes para a alteração verde-vermelho quando comparados os anos de 2014 com 2012. Em 2014, o tempo médio para falhas para a alteração mais grosseira (verde-vermelho) chegou a 22 meses, o que inicialmente em 2012 apontava quase 6.

Em termos de retorno financeiro, pôde-se quantificar a economia com trocas de óleo anual entre dois períodos distintos (2014 a 2012). Considerou que os 35 equipamentos têm um volume médio de lubrificante por redutor de 20 litros, tendo esse um custo médio de R\$30,00 por litro dependendo da especificação e aplicação, e que seja necessário a troca do lubrificante quando este passar da condição verde para vermelho. Ao final dos seis primeiros meses do ano, tem-se de acordo com a tabela 3 uma confiabilidade $R(6) = 0,464$ e $R(6) = 0,779$ para o ano de 2012 e 2014 respectivamente, representando que 46,4 % dos equipamentos não teriam falhado no período dos 6 primeiros meses de 2012 e 77,9% no período análogo de 2014.

Dessa forma, teríamos 19 falhas no primeiro semestre de 2012 comparadas a 8 no mesmo período de 2014, tendo essas os seus lubrificantes substituídos para a restauração do processo. Segue-se para segundo semestre de 2012 com 19 equipamentos com lubrificantes restaurados que terão probabilidade 46,46 % de não falhar no final do ano e 16 equipamentos que tiveram seus lubrificantes em condições aceitáveis ao final do primeiro semestre e que terão probabilidade de continuar saudáveis $R(6/6) = 0,032$, equivalente apenas um equipamento aceitável e mais 15 falhas. Análogo para o ano de 2014, segue-se para o segundo semestre com 8 equipamentos que receberam troca de óleo, que terão confiabilidade de 77,9% ao final do ano, resultando em apenas 2 falhas e 27 equipamentos que tiveram seus lubrificantes em condições aceitáveis no final do primeiro semestre e que terão probabilidade condicional de continuar saudáveis $R(6/6) = 75,4$ %, equivalendo a 7 falhas dos 27.

Em síntese dessa análise, teríamos para todo o ano de 2012 um total de 19 falhas no primeiro semestre e 25 falhas no segundo semestre, 10 dos 19 ativos que foram restaurados e 15 dos 16 que sobreviveram ao primeiro semestre, totalizando 44 trocas de lubrificantes. Para o período de 2014 o total de falha reduz se a 8 no primeiro semestre e 9 no segundo, 2 dos 8 que foram restaurados e 7 dos que sobreviveram ao primeiro semestre, totalizando 17

trocas de lubrificantes. As trocas totais para os dois períodos equivalem aproximadamente R\$ 26.400,00 e R\$ 10.200,00 para os anos de 2012 e 2014, respectivamente, equivalente a quase o triplo para o período sem a blindagem.

A análise simplificada de custos anterior evidenciou que os ganhos econômicos são grandes quando comparadas as diferentes fases de blindagem do equipamento. O custo inicial de aquisição e instalação de todos os dispositivos de blindagem exemplificados nesse trabalho é médio de R\$1200,00 por redutor, totalizando um montante estimado de R\$ 42.000,00. Analisando as economias somente com a troca do lubrificante, sem especificar a redução na perda do lucro cessante devido a parada de linha para intervenções e do custo com destinação final dos lubrificantes usados, o *payback* desse investimento seria aproximadamente 2 anos.

5. CONCLUSÃO

O processo de blindagem dos equipamentos progressivo mostrou uma abordagem que contribui para o crescimento da confiabilidade no processo de lubrificação de redutores. Pela compactação do histórico das análises de óleo e definindo os padrões da mudança de status do óleo, realizou-se a análise de dados de vida (LDA) com levantamento de distribuições e parâmetros de confiabilidade. Esse levantamento evidenciou que o processo de blindagem traz ganhos quantificáveis em redução de custos e em termos de confiabilidade dos óleos lubrificantes, contribuindo para condições ideais de operação e maior disponibilidade. Ainda com as análises desenvolvidas nesse trabalho, há o benefício de possibilitar a extensão para elaboração previsões de falhas, orientando o tempo ótimo de troca de lubrificante e projeção de estoque sobressalente.

REFERÊNCIAS

BERTSCHE, B. **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability**. Berlin: Springer, 2008.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**, Elsevier Editora Ltda, cap. 2, p. 28-31, 2009

GRACIA, M. A.; MEZA, A. Ganhos com programa proativo de lubrificação em mineradora de bauxita. **Revista Minérios e Minerale**s, jul. 2012, Disponível em:

<http://www.minerios.com.br/Publicacoes/3975/Ganhos_com_programa_proativo_de_lubrificacao_em_mineradora_de_bauxita.aspx> Acesso em: 1. Fev. 2015.

MACHADO, F. Emprego da confiabilidade para o estabelecimento de estratégias de manutenção na indústria metal-mecânica. **XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, p. 9 – 10, 2013.

MENDEL, E.; MARIANO, L. Z.; DRAGO, I.; LOUREIRO, S.; RAUBER, T. W.; VAREJAO, F. M.;

BATISTA, R. Reconhecimento automático de padrões de falhas em rolamentos usando análise de sinais de vibração. **XVII Congresso Brasileiro de Automática (CBA)**, v. 1, n. 1, p. 8, 2008.

NORIA. **Fundamento da Lubrificação de Máquinas** – ICML; ICON – Maintenance Technology, SKF. cap. 1, p. 32, 2013.