

GUIFT CANGREMO PINHO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS PLANOS DE
MANUTENÇÃO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA EM
TURBINAS EÓLICAS**



UNIVERSIDADE DO ALGARVE
Instituto Superior de Engenharia
2024

GUIFT CANGREMO PINHO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS PLANOS DE
MANUTENÇÃO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA EM
TURBINAS EÓLICAS**

**Mestrado em Engenharia Mecânica
Especialidade em Energia, Climatização e
Refrigeração**

**Trabalho realizado sob a orientação de:
Prof. Doutora Cláudia Dias Sequeira**



UNIVERSIDADE DO ALGARVE
Instituto Superior de Engenharia
2024

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS PLANOS DE MANUTENÇÃO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA EM TURBINAS EÓLICAS

Declaração de autoria da obra

Declaro ser o autor desta obra, que é original e inédita. Os autores e obras consultados são devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluídas.

©2024, GUIFT CANGREMO PINHO

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

"Depois de subirmos a uma grande montanha, apenas descobrimos que há muitas mais para escalar."

Nelson Mandela

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me ter ajudado a superar todos os desafios atravessados ao longo dessa caminhada.

Desejo um agradecimento especial a Professora Doutora Cláudia Dias Sequeira na qualidade de Orientadora, pelo apoio incansável, pela paciência no apoio e esclarecimento das dúvidas, durante a realização da presente tese.

Os meus agradecimentos estendem-se a todos os Professores e aos colaboradores do Instituto Superior de Engenharia da UAlg e em particular aos que contribuíram de forma direta ou indireta na minha formação.

Agradeço aos membros da minha família e aos meus amigos pela motivação e pelo encorajamento.

Agradeço a todos os colaboradores da empresa *VentientEnergy* pelo fornecimento de dados que foram utilizados neste trabalho.

Guift Cangremo Pinho

RESUMO

A manutenção condicionada em turbinas eólicas é entendida como um conjunto de operações que garantem a funcionalidade, segurança e longevidade destes equipamentos, com uma reflexão notável para a qualidade de energia produzida, bem como para os custos relacionados com as prováveis indisponibilidades das mesmas.

As tendências atuais na utilização das turbinas eólicas na produção de energia elétrica, justificam a importância de investir em estudos contínuos sobre o princípio de funcionamento e o controlo dos seus componentes, com destaque aos mais suscetíveis a falhas que conduzem a retirada do grupo gerador.

Com a realização do presente trabalho avaliaram-se diferentes estratégias utilizadas na manutenção de turbinas eólicas, tendo como foco variáveis relacionadas com a monitorização de óleos lubrificantes, análise de vibrações e a temperatura. As análises integram dois momentos chave, o antes e o depois de várias substituições de caixas multiplicadoras e dos seus componentes, geradores e rolamentos dentro do gerador, localizados no *Drive End (DE)* e no *None Drive End (NDE)*. O principal objetivo do presente trabalho foi a avaliação das estratégias utilizadas na manutenção de turbinas eólicas e a sua eficiência na produção de energia elétrica.

A metodologia aplicada foi de analisar os parâmetros acima mencionados para as 38 turbinas pertencentes à empresa *VentientEnergy* localizadas no parque eólico da Pampilhosa da Serra, este estudo utilizou dados recolhidos durante um período de 5 anos, de 2019 até 2023. As ferramentas utilizadas para a análise e tratamento de dados foram, *Renewables Management System-RMS iberwind*, *MATLAB* e *excel*.

Os resultados desse estudo apontam para fortes correlações entre as curvas de potência antes e depois das intervenções de manutenção, bem como a redução de valores de vibração, contudo na variável temperatura e análises de óleos não se encontrou um padrão entre o antes e depois da substituição.

Palavras-Chave: Análise energética; Manutenção; Vibrações; Lubrificação; Temperatura de óleo da caixa multiplicadora

ABSTRACT

Conditioned maintenance on wind turbines is understood as a set of operations that ensure the functionality, safety, and longevity of these equipment, with a notable impact on the quality of energy produced, as well as the costs related to their potential unavailability. Current trends in the use of wind turbines for electrical energy production justify the importance of investing in continuous studies on the operating principles and control of their components, with emphasis on those most susceptible to failures that lead to the removal of the generator set.

In carrying out this work, different strategies used in the maintenance of wind turbines were evaluated, focusing on variables related to the monitoring of lubricating oils, vibration analysis, and temperature. The analyses integrate two key moments, before and after several replacements of the gearbox and its components, generator bearings inside, Drive End (DE) and Non-Drive End (NDE). The main objective of the present work was to evaluate the strategies used in the maintenance of wind turbines and their efficiency in the production of electrical energy.

The applied methodology was to analyze the parameters for the 38 turbines belonging to the VentientEnergy company located at the Pampilhosa da Serra wind farm. This study used data collected over a period of 5 years, from 2019 to 2023. The tools used for analysis and data processing were the Renewables Management System-RMS Iberwind, MATLAB, and Excel. The results of this study indicate strong correlations between power curves before and after maintenance interventions, as well as a reduction in vibration values. However, for the temperature variable and oil analysis, a correlation between before and after replacement was not found.

Keywords: Energy analysis, Maintenance; Vibrations; Lubrication; Gearbox oil temperature

ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Objetivos da Dissertação	2
1.2	Contexto do Trabalho	3
1.3	Organização do Documento	4
2	Estado da Arte.....	7
2.1	Energia eólica	7
2.2	Estratégias de manutenção em turbinas eólicas.....	9
2.2.1	Manutenção Baseada na Revisão.....	10
2.2.2	Manutenção Corretiva	10
2.2.3	Manutenção Baseada em Inspeção de Rotina.....	10
2.2.4	Manutenção Baseada em Desempenho	11
2.2.5	Manutenção Preditiva Centrada na Confiabilidade (RCM).....	11
2.2.6	A Manutenção de Caixa Multiplicadoras	11
2.2.7	A Substituição de Óleo	12
2.3	As Principais Falhas e Métodos de Diagnostico em Turbinas Eólicas.....	13
2.3.1	Os Tipos de Falhas em Rolamentos.....	15
2.3.2	Defeitos em Engrenagens	16
2.3.3	Análise de Vibrações em Caixa Multiplicadora	17
2.3.4	Lubrificação na Caixa Multiplicadora	17
2.3.5	Temperatura no Interior da Caixa Multiplicadora.....	19
2.4	Os Princípios de Funcionamento.....	21
2.5	Os Componentes de Uma Turbina Eólica	22
2.5.1	O Rotor	22
2.5.2	O veio de Entrada	23
2.5.3	A Caixa Multiplicadora	23
2.5.4	O Veio de Saída	24
2.5.5	O Gerador de Corrente Elétrica	24
2.5.6	Os Rolamentos Utilizados em Turbinas Eólicas	24

2.6	Sistema de Controlo e Aquisição de Dados - SCADA (SUPERVISORY CONTROL AND DATA ACQUISITION).....	27
2.7	Controlo de Dados de Vibrações - CMS (CONDITIONING MONITORING SYSTEM).....	28
2.7.1	Os Sensores	30
2.7.2	Seleção e Instalação de Sensores de Medição	31
2.8	Os Problemas de Lubrificação	32
2.8.1	Monitorização da Condição do Óleo Lubrificante.....	33
2.9	A Análise dos Dados Relativos à Temperatura	34
2.9.1	Temperatura de Óleo da Caixa Multiplicadora.....	34
2.9.2	Temperatura de Rolamentos do Gerador	35
2.10	A Análise de Curvas de Potência para Avaliação de desempenho	36
3	Desenvolvimento do trabalho realizado.....	37
3.1	Caso de Estudo.....	37
3.2	Metodologia	40
3.2.1	A metodologia Usada na Análise das Vibrações	41
3.2.2	A metodologia Utilizada na Análise dos Óleos Lubrificantes	42
3.2.3	A Metodologia Utilizada na Construção de Gráficos de Temperatura e Curvas de Potência.....	43
3.2.4	Análise de Vibrações	44
3.2.5	Análise de Óleos Antes e Depois de Substituições das Caixas Multiplicadoras	48
3.2.6	Análise de temperatura.....	73
3.2.7	Análise de Curvas de Potência.....	74
4	Resultados Experimentais	75
4.1	Os Resultados Obtidos Após A Análise de Vibrações	75
4.1.1	Os Resultados Obtidos Após a Análise de Vibrações dos Componentes das Caixas Multiplicadoras	75
4.1.2	Os resultados Obtidos Após a Análise de Vibrações dos Componentes dos Geradores	81
4.2	Os Resultados Obtidos Após A Análise de Óleos	83
4.2.1	Os resultados Obtidos Após a Análise de Oxidação e do TAN.....	83
4.2.2	Os Resultados Obtidos Após a Análise da Viscosidade a 100°C	84

4.2.3	Resumo Sobre a Viscosidade 40°C	85
4.2.4	Os Resultados Obtidos Após a Análise do Índice de Viscosidade	86
4.2.5	Os Resultados Obtidos Após a Análise do Silício e Água	87
4.2.6	Os Resultados Obtidos Após a Análise do Cobre e Ferro	88
4.2.7	O Resumo do Resultados Sobre a Limpeza do Óleo	89
4.3	Discussão	90
4.3.1	Turbina 02.....	90
4.3.2	Turbina 04.....	93
4.3.3	Turbina 08.....	95
4.3.4	Turbina 11.....	98
4.3.5	Turbina 13.....	100
4.3.6	Turbina 18.....	102
4.3.7	Turbina 21.....	104
4.3.8	Turbina 24.....	106
4.3.9	Turbina 28.....	107
4.3.10	Turbina 36.....	108
4.3.11	Turbina 38.....	109
4.4	Curvas de Potência	110
4.4.1	Curvas de Potência Antes e Depois de Substituição dos Rolamentos Drive <i>End</i> e <i>None Drive End</i>	110
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	113
5.1	Análise do Trabalho Realizado.....	113
5.2	Trabalhos Futuros	114
	Referências	115
A	Condições do óleo.....	123
A.1	Oxidação	123
A.2	Viscosidade do óleo a 100°C	125
A.3	Viscosidade do óleo a 40°C	126
A.4	Índice de viscosidade.....	127
B	Aditivos no óleo	129
B.1	Cálcio.....	129
B.2	magnésio, molibdênio e boro.....	131

B.2.1	Magnésio.....	131
B.2.2	Molibdénio.....	131
B.2.3	Boro.....	131
B.3	Fósforo.....	132
B.4	Zinco.....	133
B.5	Enxofre.....	135
C	Contaminantes.....	137
C.1	Sílicio.....	137
C.2	Água.....	139
D	Metais de desgaste.....	141
D.1	Cobre.....	141
D.2	Ferro.....	143
D.3	Alumínio e chumbo.....	145
D.3.1	Alumínio.....	145
D.3.2	Chumbo.....	145
E	Nível de limpeza do óleo.....	147
E.1	Partículas > 4 micron.....	147
E.2	Partículas > 6 micron.....	149
E.3	Partículas >14 micron.....	150
A	Os relatórios sobre óleos.....	155
A.1	Relatório sobre óleos #02.....	155
A.2	Relatório sobre óleos #04.....	155
A.3	Relatório sobre óleos #08.....	157
A.4	Relatório sobre óleos #11.....	157
A.5	Relatório sobre óleos #13.....	158
A.6	Relatório sobre óleos #18(1).....	158
A.7	Relatórios sobre óleos #18 (2).....	159
A.8	Relatório sobre óleos #21.....	159
A.9	Relatório sobre óleos #24.....	159
A.10	Relatório sobre óleos #28.....	160
A.11	Relatório sobre óleos#36.....	160
A.12	Relatório sobre óleos#38.....	160

B Os níveis de vibrações Caixa Multiplicadora e Gerador.....	161
B.1 Os níveis de vibrações antes e depois da substituição dos componentes da caixa multiplicadora.....	161
B.1.1 Níveis de vibrações de LSS	161
B.1.2 Níveis de vibrações de planetário 1	161
B.1.3 Níveis de vibrações de planetário 2	162
B.1.4 Níveis de vibrações de HSS UW	162
B.1.5 Níveis de vibrações de HSS DW	162
B.2 Os níveis de vibrações dos rolamentos DE e NDE de geradores	163
C Dados sobre temperatura de óleos em excel	165
C.1 Dados sobre a temperatura do óleo #02.....	165
C.2 Dados sobre a temperatura do óleo #04.....	166
C.3 Dados sobre a temperatura do óleo #11	167
C.4 Dados sobre a temperatura do óleo#18.....	168
C.5 Dados sobre temperatura do óleo#13	169

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Potência instalada em Portugal com recurso à energia eólica (INEGI/APREN, 2024).....	2
Figura 2. Evolução da capacidade de energia eólica na Europa nos últimos 10 anos (WindEurope, 2024)	8
Figura 3. Emissões de CO2 evitados com a utilização de energia eólica (EWEA, 2024)..	9
Figura 4. Camião de transporte de óleo (C. D. Sequeira, 2012).....	13
Figura 5. Tempos de paragem e origem das falhas.....	14
Figura 6. Defeitos em rolamento: a) Ranhuras na pista externa; b) Erosão elétrica; c) Desgaste adesivo.....	15
Figura 7. Rolamento com deficiência na lubrificação	16
Figura 8. Micropitting numa roda dentada	17
Figura 9. Falhas na lubrificação de rolamentos (Peng et al., 2022).....	18
Figura 10. As principais regiões a identificar na curva de potência	21
Figura 11. Principais componentes de uma turbina eólica (Calhau et al., 2020).....	22
Figura 12. Caixa multiplicadora de uma turbina eólica (Nova, 2017).....	24
Figura 13. Diferentes tipos de materiais para a construção de rolamentos: a) Rolamentos de rolos cilíndricos sem gaiola; b) rolamentos de rolos cilíndricos, com linha única; c) Rolamentos de esferas com o ângulo de contacto de 35° d) Rolamentos de esferas profundos e) Rolamentos de rolos cónicos duplos f) Rolamentos cónicos de linha única g) Rolamentos de rolos cónicos em linha dupla e h) Rolamentos isolantes revestidos em cerâmico (NSK, 2018)	26
Figura 14. Localização dos rolamentos numa caixa multiplicadora (NSK, 2018).....	27
Figura 15. Sistema de controlo de dados (C. D. Sequeira, 2012).....	27
Figura 16. Sistema de Controlo e Monitorização (C. D. Sequeira, 2012).....	28
Figura 17.S Sistema portátil para aquisição de dados sobre vibrações (Teng et al., 2021)	29
Figura 18. Sistema online para aquisição de dados sobre vibrações (Teng et al., 2021)..	29
Figura 19. Localização de sensores para medição de vibrações	30
Figura 20. Instalação do sensor com base roscada (Teng et al., 2021).....	31
Figura 21. Distribuição de falhas em componentes de um gerador (Singh & Sundaram, 2022)	36
Figura 22. O mapa da VentientEnergy na Europa (Queensland Treasury, 2024)	38
Figura 23. Localização do parque da Pampilhosa da Serra	39
Figura 24. Curva de potência nominal da turbina Vestas V90/3000 (Nova, 2017).....	40

Figura 25. Gráfico de tendência (Exception Report, 2022)	42
Figura 26. Análise espectral (Exception Report, 2022).....	42
Figura 27. Exemplo do relatório do óleo (Oelcheck, 2020)	43
Figura 28. Exemplo de aplicação do algoritmo matlab	43
Figura 29. Exemplo de aplicação de RMS da Iberwind	44
Figura 30. Substituições de componentes da caixa multiplicadora para análise de vibrações	44
Figura 31. Exemplo de dados de níveis de vibrações de componentes da caixa multiplicadora (Exception Report, 2022)	45
Figura 32. Exemplo de gráfico de dispersão para LSS	46
Figura 33. Exemplo de dados de níveis de vibrações DE (Exception Report, 2022)	46
Figura 34. Datas e o número de vezes das substituições de rolamento DE dos geradores	47
Figura 35. Datas e o número de vezes das substituições de rolamento NDE dos geradores	47
Figura 36. Datas e o número de vezes das substituições dos geradores	48
Figura 37. Substituições de componentes da caixa multiplicadora para análise de óleos	48
Figura 38. Estado de oxidação do óleo antes e depois das substituições dos componentes das caixas multiplicadoras	49
Figura 39. O estado de oxidação antes e depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 21	50
Figura 40. As 3 marcas de óleos lubrificantes utilizadas: a) MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320 (MOBIL, 2024); b) CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320 (CASTROL, 2024) e c) PLURASAFE GL PLUS 320 (Plurasafe® & Plus, 2024) ..	51
Figura 41. Limites de viscosidade a uma temperatura de 100°C.....	52
Figura 42. Viscosidade a 100°C, antes e depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 24	53
Figura 43. Limites de viscosidade a uma temperatura de 40°C.....	54
Figura 44. Limites de índice de viscosidade dos óleos	56
Figura 45. Índice de viscosidade do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 24	57
Figura 46. TAN antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras	58
Figura 47. Concentração do cálcio no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras.....	60
Figura 48. Concentração do cálcio no óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora 02	60
Figura 49. Concentração do magnésio no óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora 24	61

Figura 50. Concentração do fósforo no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras.....	62
Figura 51. Concentração do zinco no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras.....	63
Figura 52. Concentração do silício no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras.....	65
Figura 53. Conteúdo de água antes e depois das substituições dos componentes das caixas multiplicadoras.....	66
Figura 54. Conteúdo da água no óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora 21.....	66
Figura 55. Concentração do cobre no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras.....	68
Figura 56. Concentração do cobre no óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora 36	68
Figura 57. Concentração do ferro no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras.....	69
Figura 58. Partículas de tamanho $\geq 4 \mu\text{m}$ no óleo	71
Figura 59. Partículas de tamanho $\geq 6 \mu\text{m}$ no óleo	72
Figura 60. Partículas de tamanho $\geq 14 \mu\text{m}$ no óleo	73
Figura 61. Níveis de vibrações do LSS: a) Frequências de 63-74 Hz, b) Frequências 76-136 Hz e c) Frequências 830-1640 Hz.....	76
Figura 62. Níveis de vibrações do planetário 1: a) Frequências de 63-74 Hz, b) Frequências 76-136 Hz e c) Frequências 140-274 Hz	76
Figura 63. Níveis de vibrações do planetário 2: a) Frequências de 3-20 Hz, b) Frequências 43-49Hz e c) Frequências 140-274 Hz	77
Figura 64. Níveis de vibrações do HSS UW: a) Frequências de 76-136 Hz, b) Frequências 140-274Hz e c) Frequências 278-408 Hz e d) Frequências 420-810 Hz.....	78
Figura 65. Níveis de vibrações do HSS UW: a) Frequências de 830-1640 Hz, b) Frequências 1660-2460Hz e c) Frequências 2480-3200 Hz.....	79
Figura 66. Níveis de vibrações do HSS DW: a) Frequências de 76-136 Hz, b) Frequências 140-274Hz e c) Frequências 278-408 Hz e d) Frequências 420-810 Hz.....	80
Figura 67. Níveis de vibrações do HSS DW: a) Frequências de 830-1640 Hz, b) Frequências 1660-2460Hz e c) Frequências 2480-3200 Hz.....	81
Figura 68. Níveis de vibrações dos rolamentos DE dos geradores: a) Frequências de 60-1800 Hz e b) Frequências 1800-3200Hz depois da substituição dos DE do gerador 81	
Figura 69. Níveis de vibrações dos rolamentos DE dos geradores: a) Frequências de 60-1800 Hz e b) Frequências 1800-3200Hz depois da substituição dos geradores	82
Figura 70. Níveis de vibrações dos rolamentos NDE dos geradores: a) Frequências de 60-1800 Hz e b) Frequências 1800-3200Hz depois da substituição dos NDE dos geradores	82

Figura 71. Níveis de vibrações dos rolamentos NDE dos geradores: a) Frequências de 60-1800 Hz e b) Frequências 1800-3200Hz depois da substituição dos geradores	83
Figura 72. Temperatura do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora #02	92
Figura 73. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #02	92
Figura 74. Temperatura do óleo antes e depois da substituição do 3° estágio da caixa multiplicadora #04	94
Figura 75. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #04	95
Figura 76. Temperatura do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora #08	97
Figura 77. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #08	97
Figura 78. Temperatura do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora #11	99
Figura 79. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #11	99
Figura 80. Temperatura do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora #13	101
Figura 81. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #13	102
Figura 82. Temperatura do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora #18	103
Figura 83. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #18	104
Figura 84. Curvas de potência antes e depois da substituição do DE #01	111
Figura 85. Curvas de potência antes e depois da substituição do DE #04.....	111
Figura 86. Curvas de potência antes e depois da substituição do DE #08.....	111
Figura 87. Curvas de potência antes e depois da substituição do DE #13.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Mecanismos de desgaste e o tipo de partícula (Henneberg et al., 2015).....	19
Tabela 2. Principais parâmetros a controlar com o SACADA (Tautz-Weinert & Watson, 2017)	20
Tabela 3. Principais características de uma turbina Vesta V90-3.0 MW (Ventienty Energy, 2024).....	23
Tabela 4. Características técnicas do gerador (Nova, 2017)	24
Tabela 5. Componentes a monitorar com sensores de vibrações	31
Tabela 6. Parâmetros importantes na análise de óleos (Del Álamo et al., 2020)	32
Tabela 7. Principais indicadores de problemas de um sistema de transmissão (Silva Filho, 2020).....	34
Tabela 8. Características técnicas das turbinas da empresa VentientEnergy	39
Tabela 9. Substituições da caixa multiplicadora e os seus subcomponentes.....	45
Tabela 10. Tipo de óleos utilizados e limites de viscosidade a 100°C	52
Tabela 11. Tipo de óleos utilizados e limites de viscosidade a 40°C	54
Tabela 12. Tipo de óleos utilizados e os seus limites de índice de viscosidade	56
Tabela 13. Os níveis de limpeza utilizados em função do código utilizado.....	70
Tabela 14. Resumo das condições dos óleos relativamente ao nível de oxidação e do TAN84	
Tabela 15. Resumo das condições dos óleos relativamente a viscosidade a 100°C.....	85
Tabela 16. Resumo das condições dos óleos relativamente a viscosidade a 40°C.....	86
Tabela 17. Resumo das condições dos óleos relativamente ao seu índice de viscosidade	87
Tabela 18. Resumo das condições dos óleos relativamente ao conteúdo de silício e de água	88
Tabela 19. Resumo das condições dos óleos relativamente aos metais resultantes do desgaste	89
Tabela 20. Resumo do nível de limpeza dos óleos	89

LISTA DE ACRÓNIMOS

IRENA	Agência Internacional para as Energias Renováveis (do inglês <i>International Renewable Energy Agency</i>)
AGMA	<i>American Gear Manufacturers Association</i>
FMEA	Análise dos Modos e Efeito de Falha
COP	<i>Conference of the Parties</i>
DIN	Instituto Alemão de Normalização (do alemão <i>Deutsches Institut für Normung</i>)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
TAN	Número Total de Acidez (do inglês <i>Total Acid Number</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (do inglês <i>International Organization for Standardization</i>)
SCADA	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (do inglês <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>)

1

INTRODUÇÃO

A energia elétrica, independentemente da sua origem, é praticamente indispensável na nossa vida quotidiana, sendo que, dentre vários benefícios que colhemos, com ela conseguimos iluminar as nossas casas, acionar diferentes tipos de máquinas industriais, tais como: as de género alimentício, têxtil, automobilística, aeronáutica, telecomunicação, proporcionando o bem-estar da sociedade em geral. Os benefícios mencionados, podem-nos levar a concluir que a energia elétrica está largamente presente nas nossas vidas quotidianas e sem ela, a vida seria bastante complicada, em diversas áreas como é o caso de hospitais, nas escolas, nos campos agropecuárias, pisciculturas, entre outros lugares que necessitam desse precioso recurso.

Os problemas supracitados, devido a queima de combustíveis fósseis, fazem com que haja a necessidade de apostar em outras matrizes energéticas, sendo a energia eólica uma das potenciais no mercado energético atual.

Nos últimos tempos a energia eólica é vista como a fonte de energia renovável promissora para a produção de eletricidade, devido às vantagens por si apresentadas, tais como a segurança do aprovisionamento energético, o reduzido impacto ambiental, além de ser economicamente viável (Castro, 2009).

De acordo com o site energias de Portugal a potência instalada em Portugal com recurso à energia eólica situa-se nos 5,7 GW, atualmente representando 38,4% da capacidade instalada, logo abaixo da hídrica, representando 45,8%, Figura 1.

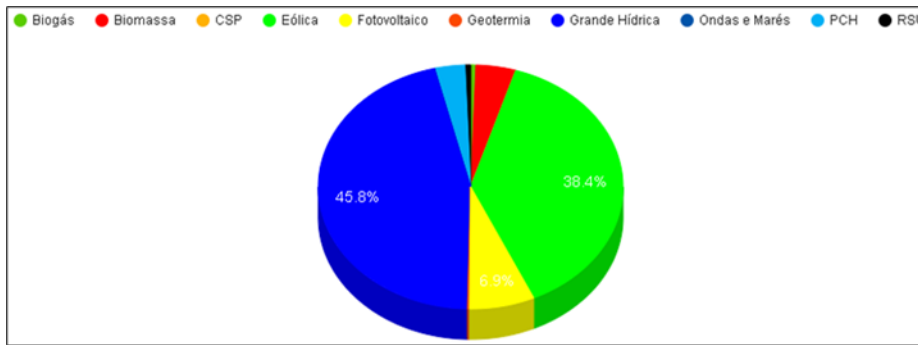


Figura 1. Potência instalada em Portugal com recurso à energia eólica (INEGI/APREN, 2024).

A presente dissertação irá concentrar-se na avaliação dos impactos dos planos de manutenção, com principal foco nas ações de manutenção condicionada em turbinas eólicas para garantir a máxima disponibilidade e a fiabilidade das mesmas. Esta avaliação das ações de manutenção condicionada, poderá introduzir algumas alterações nos planos de manutenção, podendo num futuro próximo contribuir para um aumento da produção de energia eólica. As principais ferramentas a serem estudadas e integradas serão as análises de vibrações, análises de óleo, o controlo da variável temperatura e por fim foram estudadas curvas de potência no mês antes da falha e no mês depois da falha, com o objetivo de compreender as alterações de produção no antes e depois da substituição de componentes mecânicos, tais como caixas multiplicadoras e rolamentos localizados na caixa e gerador.

É importante realçar que a caixa multiplicadora é o principal elemento mecânico nas turbinas eólicas, contribuindo para a máxima eficiência da turbina, pois a ação do vento induz uma rotação nas pás da turbina, as quais têm um rotor acoplado a um veio ligado à caixa multiplicadora, que aumenta num rácio de até 1:100 a velocidade de rotação de entrada. A rotação de saída é transportada através de um outro veio acoplado a um gerador que produz energia elétrica e a encaminha para a rede ou local de armazenamento.

1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O principal objetivo geral deste trabalho é de avaliar os impactos das estratégias utilizadas na manutenção de turbinas eólicas em relação à sua eficiência na produção de energia elétrica, propondo um novo planeamento integrando variáveis de manutenção condicionada de forma a minimizar os custos e aumentado a disponibilidade das turbinas.

Para que o objetivo geral deste trabalho seja concretizado, foi necessário analisar e estudar os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar os dados relacionados com as vibrações, fornecidas por CMS (*Condition Monitoring System*);
- Trabalhar os resultados das análises de óleos de caixas multiplicadoras provenientes dos laboratórios;
- Analisar os dados alusivos à temperatura, provenientes do SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*); e
- Comparar as curvas de potências para as duas abordagens em estudo, antes e depois de substituição de caixas multiplicadoras e rolamentos.
-

1.2 CONTEXTO DO TRABALHO

O mundo atual enfrenta várias crises relacionadas com a utilização das energias de origem fóssil, fazendo com que haja a necessidade de uma notável transição energética, das energias fósseis para as renováveis. Uma das principais motivações deste trabalho é contribuir para a melhoria dos planos de manutenção atuais das turbinas eólicas e a consequente melhoria na disponibilidade de energia produzida por estes equipamentos, visto que esta fonte de energias renováveis é uma das mais promissoras. Lidar com os equipamentos mecânicos que constituem uma turbina eólica é uma tarefa desafiadora, pois, requer a utilização de diversos sensores para o controlo de condição dos mesmos, visto que ao longo do seu funcionamento estão sujeitas a desgaste resultante de diferentes tipos de solicitações mecânicas, bem como adversidades ambientais.

As informações recolhidas sobre o estado de condição de óleos lubrificantes e das vibrações dos componentes, são extremamente relevantes neste estudo.

Através das amostras laboratoriais fornecidos pela empresa, catálogos com os detalhes sobre óleos, bem como as informações existentes nas normas aplicadas aos óleos, permitiram analisar e retirar conclusões, propondo algumas recomendações para melhoria do controlo de condição.

O funcionamento adequado das turbinas eólicas pode contribuir para o aumento produtividade, razão pela qual, correlacionar várias variáveis obtidas nesse estudo poderá ajudar na planificação das estratégias de manutenção, evitando desta forma o desgaste precoce das peças constituintes das turbinas eólicas e reduzir a probabilidade de paragens indesejáveis.

Apesar da taxa de falhas dos componentes mecânicos das caixas multiplicadoras ser menor do que a dos componentes elétricos, os problemas que se verificam nas caixas multiplicadoras podem causar paragens de longa duração na produção, isso é devido à complexidade de

alcançar as partes da caixa multiplicadora, que envolve sistemas de elevação e transporte, tais como gruas, elevando os custos das ações de manutenção e reparação, por esse motivo são utilizados sensores para o controlo de várias variáveis no interior das turbinas (Teng et al., 2021) e (Romero et al., 2016).

Segundo (Mao et al., 2023), a técnica baseada em análise de vibrações é mais utilizada devido à existência de algoritmos predefinidos para a análise de rodas dentadas, sendo que alguns estudos apontam para um aumento do nível global de vibrações com a presença de partículas contaminantes. Para a recolha de sinais de vibração utilizam-se acelerómetros que são instalados em diferentes pontos estratégicos.

A monitorização dos rolamentos é normalmente efetuada a partir de análise de sinais de vibração, com a utilização de acelerómetros situados nos locais estratégicos da caixa de multiplicadora, onde os sinais são analisados no domínio do tempo ou de frequência, com a utilização da transformada rápida de Fourier (FFT), transformada de Hilbert ou espectro de envelope, para o processamento de sinais, fornecendo informações relevantes sobre o estado de condição dos componentes (Koukoura et al., 2019) e (Romero et al., 2016). Seguidamente os valores globais em RMS (*Root mean square*), amplitudes e frequências utilizados para relacionar o sinal com os dados correspondentes a falhas conhecidas (Hart et al., 2020). As técnicas utilizadas para detetar falhas dos componentes de caixas multiplicadoras e geradores das turbinas eólicas através de vibrações são práticos, visto que a partir dessas técnicas é possível construir base de dados que indicam a condição de conjuntos e subconjuntos constituintes da caixa multiplicadora (Teng et al., 2021). A caixa multiplicadora de uma turbina eólica é constituída por diversos estágios, contendo rodas dentadas, veios e rolamentos (Koukoura et al., 2019).

A realização desta tese foi integrada no ambiente de empresa utilizando para o efeito dados provenientes de turbinas eólicas da empresa *VentientEnergy*, representando uma oportunidade de contribuição para a implementação de novos desafios de inovação na área da manutenção, bem como permitiu adquirir experiência em ambiente de trabalho real.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos.

O primeiro capítulo é referente à introdução, contextualização do tema, objetivos e relevância do estudo, é neste mesmo capítulo que se descreveu como é que o trabalho se encontra organizado.

No segundo capítulo, serão referenciados estudos que abordam o estado atual das turbinas eólicas, mostrando as vantagens da sua utilização, bem como das estratégias utilizadas na sua manutenção. Neste mesmo capítulo, será abordado o princípio de funcionamento das turbinas, bem como a descrição dos principais componentes das turbinas eólicas e sua manutenção.

No terceiro capítulo, será apresentado o caso de estudo, explicando as características técnicas das turbinas que foram estudadas, e enquadrando as análises de vibrações, análises de óleo, o controle da variável temperatura como ferramentas de um diagnóstico antecipado. A curva de potência foi produzida com dados de produção em dois períodos distintos, antes e depois da substituição de componentes principais, tais como caixas multiplicadoras, geradores e rolamentos.

No quarto capítulo, serão apresentados os resultados encontrados ao longo do estudo das variáveis, vibrações, óleos e curvas de potência, para uma análise cuidada de como se comportam estas variáveis no antes e depois da substituição.

No quinto capítulo, serão feitas as conclusões finais sobre os resultados obtidos e sugestões de trabalhos futuros, sobre todo o trabalho realizado.

2

ESTADO DA ARTE

Foram abordados os diferentes tipos de falhas e os principais componentes que constituem uma turbina eólica.

Os sistemas de avaliação de desempenho utilizam dados do sistema de controlo e aquisição de dados da turbina eólica (SCADA), bem como, são utilizados dados provenientes do sistema de aquisição de dados de vibração (CMS).

2.1 ENERGIA EÓLICA

O Acordo Verde Europeu (*European Green Deal*) divulgado em 2019, ajudou muito a impulsionar a área das energias renováveis nos países da União Europeia, conseguindo gerar empregos, refinar a tecnologia e lutar pela preservação do planeta. Com o objetivo de uma Europa neutra em emissão de carbono em 2050, os países europeus continuam a investir na energia eólica, perfazendo em 2020 uma capacidade total de 220 GW, Figura 2.

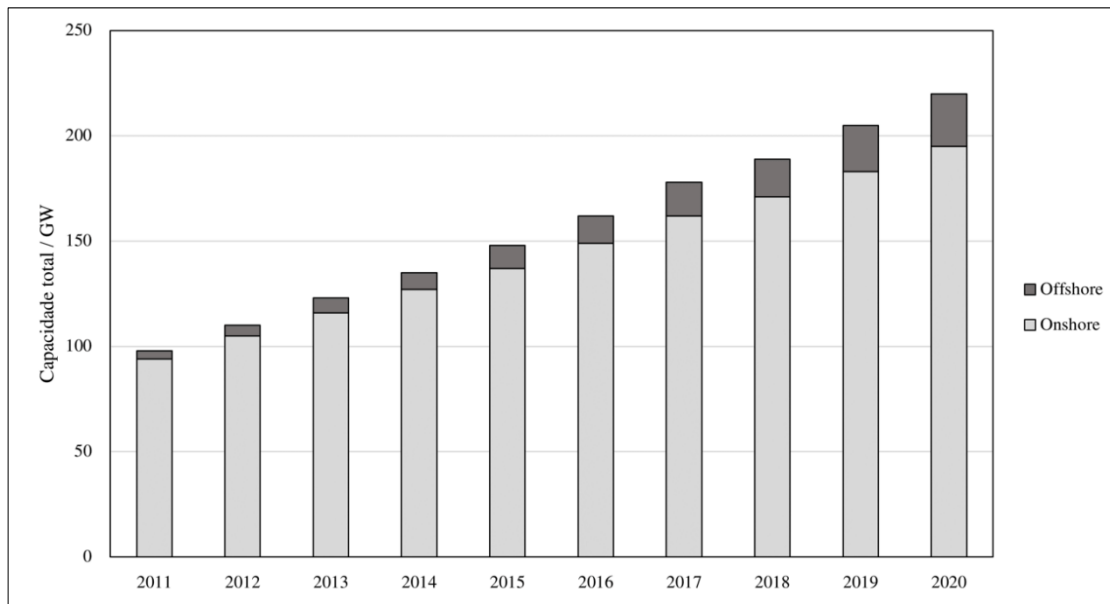


Figura 2. Evolução da capacidade de energia eólica na Europa nos últimos 10 anos (WindEurope, 2024)

Nos últimos anos a energia produzida a partir do vento tem tido muita concorrência, de acordo o relatório da *Global Wind Energy Council* (Conselho Global de Energia Eólica), que foi produzido antes da *United Climate Change Conference in Glasgow* (COP26), em 2021 foi o ano em que o mundo começou a libertar-se dos impactos negativos causados por Covid 19 e criando uma necessidade de reconstrução da economia em comunidades sustentáveis, além de ter sido um ano marcado pela transição energética para as matrizes renováveis com o objetivo de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂), fazendo com que a temperatura média global não aumentasse para mais de 1,50 °C (Joyce Lee, 2021) e (Satymov et al., 2022), por outro, está prevista uma redução de 70% das emissões causadas pela queima de combustíveis até o ano de 2050 (IRENA, 2019). Importa referir que em 2020 as instalações globais de energia eólicas ultrapassaram uma potência de 90GW, sendo assim, correspondente a um aumento de 53% em comparação com o ano de 2019 (Joyce Lee, 2021).

No futuro, as energias eólicas *onshore* e *offshore* poderão contribuir de forma ativa para a produção de energia verde, com a geração de mais de um terço, ou seja, 35% das necessidades totais de eletricidade, tornando-se a principal fonte de geração até 2050, com a previsão de uma instalação de 6000 GW. Contribuindo significativamente na redução de um quarto das emissões de carbono, correspondente a 6,3 Gt de CO₂, que equivale a 27% da diminuição de uma forma geral das emissões pretendidas para o alcance das metas climáticas de Paris (IRENA, 2019).

Em 2020 o mercado ligado ao recurso eólico progrediu de 86,9 GW de capacidade eólica *onshore*, constituindo um aumento anual de 59%, aumento este levado a cabo pela China e os Estados Unidos Estados (Joyce Lee, 2021).

Devido ao crescimento da produção de energia eólica, os custos das operações associadas à manutenção das turbinas eólicas têm sido diluídos ao longo da sua vida útil, uma vez que estão correlacionados ao seu funcionamento seguro e da sua longevidade (Pandit et al., 2023) e (Shafiee & Sørensen, 2019), os autores defendem que os gastos devido à manutenção de turbinas eólicas é aproximadamente a 15 ou 30% do valor total de geração de energia.

O plano das intervenções feitas para manter um bom funcionamento das turbinas é relevante, visto que pode evitar o desgaste e a substituição precoce dos seus componentes, por outro lado, na realização de intervenções frequentes, poderá correr riscos de elevados gastos na manutenção, por isso, há necessidade de estudos que possam garantir um bom equilíbrio entre o tempo das operações de manutenção (Shafiee & Sørensen, 2019).

De acordo com (European Wind Energy Association, 2023) a produção de energia eólica contribuiu consideravelmente na redução das emissões de CO₂, tendo evitado cerca de 138 milhões de toneladas de CO₂ em 2022, Figura 3.



Figura 3. Emissões de CO₂ evitados com a utilização de energia eólica (EWEA, 2024)

2.2 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO EM TURBINAS EÓLICAS

Nos planeamentos de manutenção, existem várias técnicas que são utilizadas com o objetivo de manter uma turbina eólica com elevada disponibilidade e baixos custos durante o seu funcionamento. Será feito um enquadramento do estado da arte, de forma a classificar estratégias predominantes na manutenção operacional, visto que as turbinas se encontram sujeitas a várias adversidades, a partir do meio em que são instaladas.

(El-Thalji & Liyanage, 2012), investigaram sobre diversas técnicas de manutenção operacional aplicável às turbinas eólicas baseando-se em diagnósticos e prognósticos, segundo (Pandit et al., 2023), a gestão de manutenção de turbinas eólicas pode ser agrupada em manutenção reativa e a proativa.

A manutenção reativa, é caracterizada por falhas que levam à paragem da turbina, e o seu objetivo é a retoma da condição normal de funcionamento, por outro, a manutenção proativa consiste na intervenção preventiva, que obriga à intervenção atempada na substituição de constituintes da turbina eólica evitando a falha da mesma (Pandit et al., 2023).

Os outros atores, como é o caso de (El-Thalji, 2010) e (Shafiee & Sørensen, 2019), agruparam às estratégias de manutenção em função da longevidade dos equipamentos tendo em conta as fases de projeção, conceção, diagnóstico, proativa e prognóstica.

2.2.1 MANUTENÇÃO BASEADA NA REVISÃO

De acordo com (Shafiee & Sørensen, 2019), a revisão realiza-se após um determinado tempo, e pode incluir a substituição dos órgãos da turbina, essa estratégia não pode ser vista como um recurso de longo prazo para a manutenção de equipamento muito suscetíveis a avarias, e estima que a revisão de uma turbina pode chegar a custar cerca de 20% do valor total de seu investimento inicial.

2.2.2 MANUTENÇÃO CORRETIVA

Segundo (Shafiee & Sørensen, 2019), a manutenção também pode ser do tipo corretiva (MC) consiste na aplicação de diferentes técnicas após uma avaria ou elevada redução da eficiência do equipamento, esta é viável quando se trata de turbinas que se encontram em locais de fácil acesso, como é o caso das *onshore*, em contra partida é onerosa para as turbinas que se encontram em locais de difícil acesso como é o caso das que se encontram em parques eólicos offshore, principalmente se estiver muito afastado da zona costeira.

2.2.3 MANUTENÇÃO BASEADA EM INSPEÇÃO DE ROTINA

Ao contrário da manutenção corretiva existem várias inspeções de rotina que ajudam a manter o bom funcionamento da turbina, promovem a deteção de falhas prestes a acontecer, ou seja, no início de alguma anomalia e a agir atempadamente. Essa manutenção pode ser feita em

períodos de curta duração (como por exemplo diariamente, semanalmente ou mesmo mensalmente), a inspeção pode ser feita por olhar nas peças ou através de equipamentos, podendo ser utilizado método de testes não destrutivos (NDT), ou por métodos ultrassónicos, radiográficos, termográficos eletromagnéticos e correntes parasitas (Shafiee & Sørensen, 2019).

2.2.4 MANUTENÇÃO BASEADA EM DESEMPENHO

Segundo (Karyotakis, 2011) e (Shafiee & Sørensen, 2019) podem ser aplicadas técnicas de manutenção que consistem na realização de atividades previstas dentro de um cronograma específico, em função da vida útil (idade) do equipamento, com a finalidade de minimizar a probabilidade de ocorrência de falhas. O objetivo é conhecer o tempo certo ou adequado para substituição dos componentes garantindo a fiabilidade e a segurança dos equipamentos, aumentando desta forma a disponibilidade da turbina eólica.

2.2.5 MANUTENÇÃO PREDITIVA CENTRADA NA CONFIABILIDADE (RCM)

De acordo com (Shafiee & Sørensen, 2019), a RCM é utilizada em turbinas eólicas, para definir o momento ótimo de intervenção, impedindo que um determinado equipamento esteja a funcionar próximo da faixa de perigo, mantendo a turbina num funcionamento seguro. A RCM, é usualmente aplicada a componentes cruciais, que no caso da sua paragem, pode comprometer a produtividade. Na RCM, normalmente utilizam-se ferramentas como por exemplo FMEA-Análise dos Modos e Efeito de Falha, que é uma técnica utilizada para definir, identificar e eliminar as falhas, esta técnica tem como objetivo identificar ações corretivas, evitando a ocorrência de avarias, bem como a utilização de árvores lógicas de eventos.

Na estratégia de manutenção preditiva, aplicam-se formas avaliação e processamento de sinais para prognosticar da maneira mais precisa as condições em que se encontram os componentes da turbina eólica, através da manutenção baseada na condição, *Condition Based Maintenance* (CBM).

2.2.6 A MANUTENÇÃO DE CAIXA MULTIPLICADORAS

Os períodos previstos para a execução da manutenção das caixas multiplicadoras de turbinas eólicas obedecem o tempo recomendado pelos fabricantes das mesmas, que geralmente tem

sido de 3, 6 e 12 meses, para verificar o estado de apoios, que consiste na deteção de fissuras nestes componentes. O período recomendado para inspecionar a caixa multiplicadora tem sido de 3 meses, 6 meses e 1 ano, em que se faz a verificação de ruído e das vibrações, o estado do lubrificante, partículas de desgaste, o grau de contaminação, etc. No período compreendido entre 6 em 6 meses, faz-se a recolha de amostras de óleo a partir de um bujão que se localiza a montante do filtro, importa referir que essa recolha deve ser feita o mais cedo possível após a paragem da máquina, que por sua vez é levado ao laboratório para a sua respetiva análise, os resultados laboratoriais são importante na decisão sobre a mudança do óleo, mas por outro lado, é possível que a substituição seja feita de acordo com a recomendação do fabricante, que normalmente tem sido de 2 a 3 anos. Em cada período de 12 meses efetua-se as substituições de filtros de ar. Num período de 1 ano deve-se verificar se os veios de saída da caixa multiplicadora e de entrada da turbina se encontra alinhados. É importante salientar que, em certos casos, pode-se intervir sem obedecer os intervalos de tempo descritos, isso é, porque pode haver situações inesperadas. A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (C. D. Sequeira, 2012).

2.2.7 A SUBSTITUIÇÃO DE ÓLEO

A substituição do óleo pode ser feita utilizando uma técnica que consiste na utilização de 2 tubos suficientemente compridos, de modo a alcançar o local das tomadas do óleo na caixa multiplicadora, a partir do veículo preparado para o transporte do óleo, Figura 4. Um desses tubos é utilizado para extrair o óleo e o outro para a reposição. Esses tubos são transportados por meio de monta-cargas existente nas instalações. A quantidade de óleo a substituir é 360 litros, o custo de cerca €5000. A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (C. D. Sequeira, 2012).

As três marcas de óleo utilizadas pela empresa *VentientEnergy* são: MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320, CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320 e a PLURASAFE GL PLUS 320.



Figura 4. Camião de transporte de óleo (C. D. Sequeira, 2012)

2.3 AS PRINCIPAIS FALHAS E MÉTODOS DE DIAGNOSTICO EM TURBINAS EÓLICAS

Os números das principais falhas de turbinas eólicas apontam para os problemas elétricos, contudo a caixa multiplicadora é o componente com maiores tempos de reparação. A caixa multiplicadora tem como função ajustar a frequência do rotor da turbina na faixa de 0,33 Hz (20 rpm) ou 0,5 Hz (30 rpm), a frequência do gerador, sendo que a da rede elétrica é de 50Hz, e este componente é crucial na transmissão de potência do rotor para o gerador da turbina, isto é, através da transmissão de energia do veio do rotor de baixa velocidade e alto binário para o de alta velocidade do gerador com baixo binário (Bhardwaj et al., 2019).

A falha de uma caixa multiplicadora afeta de forma significativa a disponibilidade da turbina, apesar da probabilidade de falhas de uma caixa multiplicadora ser muito menor em comparação com a de componentes elétricos e eletrónicos, segundo (Faulstich et al., 2011), (Tavner et al., 2007) e (Castro, 2009).

O tempo de inatividade devido à falha da caixa multiplicadora é prolongado, elevando os custos de operação e manutenção (OM), e toda a logística associada à substituição deste componente, afetando diretamente a competitividade de fornecimento da energia elétrica (Reliability & Projects, 2007), por outro, a caixa multiplicadora fica sujeita diversas falhas devido à sua complexidade estrutural e longo tempo de manutenção, daí que, o prognóstico e diagnóstico dos seus órgãos constituintes, ajuda na melhoria da manutenção e da consequente produtividade, garantindo a disponibilidade do fornecimento de energia elétrica.

Segundo (Carroll et al., 2016), o custo médio das reparações de uma caixa multiplicadora pode atingir 230 000 €, devido aos elevados custos, tem havido muitos investimentos relacionados com o estudo da melhoria da qualidade deste componente das turbinas eólicas (Jesus, 2020).

Os componentes de uma caixa multiplicadora estão sujeitos a grandes esforços ao longo do seu funcionamento, seja pela variação da velocidade do vento, temperatura, ou dos sistemas de controlo, sendo assim os requisitos da norma ISO/IEC 61400-4 DIS devem ser tomados em conta quando se projeta as caixas multiplicadoras de turbinas eólicas (Kr Singh et al., 2020) e (Salameh et al., 2018).

No presente trabalho são estudadas variáveis que ajudam no controlo e o na otimização da manutenção dos componentes das caixas multiplicadoras e dos geradores das turbinas eólicas do parque da Pampilhosa de Serra. Para uma análise cuidada é importante conhecer os principais constituintes da turbina, bem como o estado de condição dos veios e rolamentos de entrada (DE) e o da extremidade (NDE) dos geradores.

Os componentes de uma caixa multiplicadora mais suscetíveis a avarias são, as rodas dentadas, veios, rolamentos de baixa e alta velocidade, bem como todo o sistema de lubrificação (Salameh et al., 2018) e (Kr Singh et al., 2020).

As exigências tribológicas associadas ao bom funcionamento das engrenagens, exige conhecer a quantidade máxima aceitável das partículas resultantes deste desgaste. das peças.

As caixas multiplicadoras de uma turbina eólica são normalmente projetadas para uma longevidade de pelo menos 20 anos conforme a norma Comissão Eletrotécnica Internacional - *International Electrotechnical Commission* (IEC 61400-40) e a Associação Americana de Fabricantes de Engrenagens - *American Gear Manufacturers Association* (AGMA 6006).

Segundo os autores (Koukoura et al., 2019) e (C. D. Sequeira, 2012), a caixa multiplicadora e o gerador são os componentes com o maior tempo de inatividade de uma turbina eólica, como se pode ver na Figura 5. A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (Cláudia Dias Sequeira).

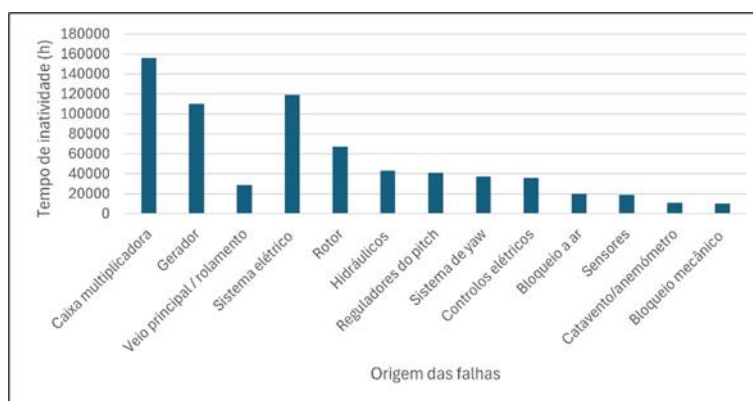


Figura 5. Tempos de paragem e origem das falhas

2.3.1 OS TIPOS DE FALHAS EM ROLAMENTOS

As principais causas de falhas que se verificam nos rolamentos da extremidade do gerador, pode se destacar as seguintes: alta velocidade de rotação, desalinhamentos entre os veios da caixa multiplicadora e os do gerador, deficiência na lubrificação e a corrosão elétrica (Teng et al., 2021).

As folgas em rolamentos acontecem de forma recorrente, principalmente nos rolamentos de veio de alta velocidade da caixa multiplicadora e do gerador, as folgas podem criar algumas inconveniências aos componentes de transmissão das turbinas eólicas, como é o caso de atrito indesejado entre as superfícies e elevação da temperatura (Teng et al., 2021).

Alguns defeitos que se podem verificar em rolamentos de veio intermediário de alta velocidade e nos veios de alta velocidade de uma caixa multiplicadora da turbina eólica são as fissuras que resultam em um brilho branco. Os casquilhos de ferro fundido, de aço e bronze são revestidos por um material branco que é resultante de ligas de estanho ou de chumbo misturados com cobre e antimônio. Essa anomalia pode ser resultados da derrapagem de rolamentos devido a penetração do hidrogénio na superfície do rolamento constituída por aço. Esse problema pode ser evitado com a utilização de aço de alta durabilidade (NSK, 2018).

O outro problema tem haver com o deslizamento da superfície externa da pista externa do rolamento Figura 6 a, do veio de baixa velocidade, veio intermediário de alta velocidade e do veio de alta velocidade, que pode ser evitado com a utilização de revestimento de óxido preto.

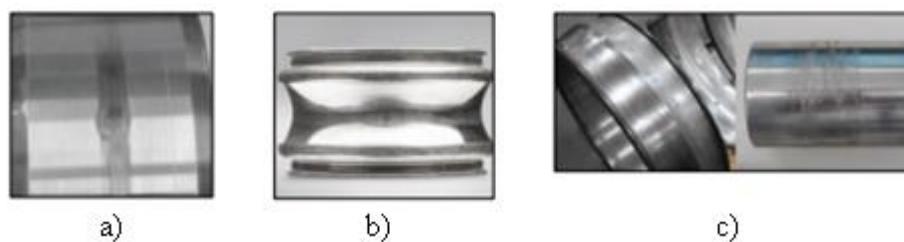


Figura 6. Defeitos em rolamento: a) Ranhuras na pista externa; b) Erosão elétrica; c) Desgaste adesivo

A erosão elétrica, Figura 6 b, é um dos defeitos que aparece na superfície da pista interna dos rolamentos de geradores de turbina eólicas, que pode ser evitado com a utilização de rolamentos com revestimentos cerâmicos. O desgaste adesivo Figura 6 c, que se verifica na zona de contacto entre o rolamento e veio que suporta o subconjunto planetário.

Os problemas que originam da má lubrificação dos rolamentos de geradores criam falhas cruciais nas turbinas eólicas, isso porque a imperfeita qualidade da lubrificação compromete

os pares em contato, causando rigidez dos componentes (Teng et al., 2021). A Figura 7 ilustra esquema de um rolamento com deficiência na lubrificação, onde o filme do lubrificante que se encontra entre os elementos rolantes e as pistas não suporta a carga, ocasionando a fricção e a conseqüente desgaste das peças (Teng et al., 2021).

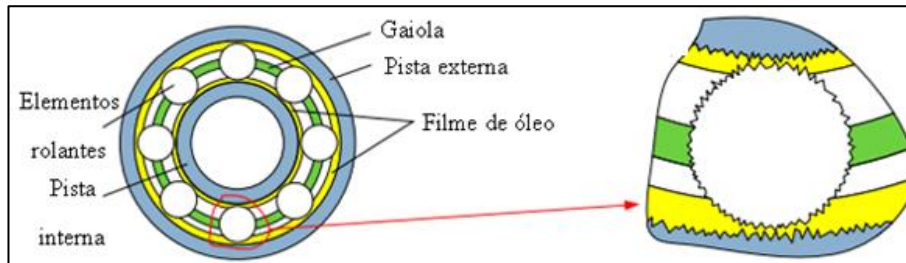


Figura 7. Rolamento com deficiência na lubrificação

Os defeitos em rolamentos supracitados podem levar ao aparecimento de problemas como o encravamento da chumaceira, empenamento do veio e do acoplamento. A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (C. D. Sequeira, 2012).

2.3.2 DEFEITOS EM ENGRENAGENS

Dentre as características que se associam as anomalias das rodas dentadas das caixas multiplicadoras das turbinas eólicas pode se destacar a *micropitting*, que é um fenômeno associado a fadiga superficial resultante das tensões superficiais ao longo de engrenamento, com a profundidade inferior a 10 micrômetro impossibilitando a sua visibilidade a olho nu. Este fenômeno tem como conseqüências o aparecimento de manchas, de pequenas fissuras, lascas, *microspalling*, *peeling* que se verificam logo no início do defeito. Portanto, as rodas dentadas de uma caixa multiplicadora estão sujeitas ao *micropitting*, como se pode ver na Figura 8, isso tem haver com os processos tecnológicos de fabricação, cargas de contato superficiais ou pontuais, tratamentos químicos e físicos em que as rodas dentadas são submetidas, etc. As condições do óleo lubrificante, como por exemplo: qualidade e a espessura do filme do óleo utilizado para a lubrificação das caixas multiplicadoras podem favorecer no aparecimento do *micropitting*, o *micropitting* pode evoluir ao *macropitting*, que é o estado mais avançado da degradação, que pode levar ao surgimento de dentes partidos, alto nível de vibrações e ruídos. A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (C. D. Sequeira, 2012) e (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021).

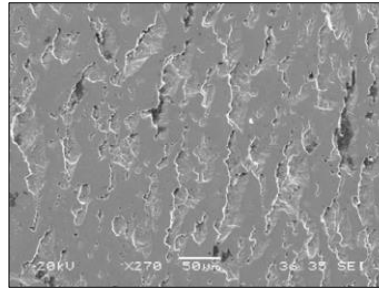


Figura 8. Micropitting numa roda dentada

2.3.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM CAIXA MULTIPLICADORA

Os mecanismos de uma caixa multiplicadora da turbina eólica estão sujeitos a deslocamentos em diversas direções ao longo do seu funcionamento, estas deslocamentos são causadas pelas cargas adversas que se verificam nos seus componentes, e precisam de ser controladas, uma vez que, não podem estar fora dos limites admissíveis.

Durante o projeto de caixas multiplicadoras, estas são estudadas para suportarem as condições ambientais críticas como por exemplo, temperatura e ventos excessivos, que podem levar a falhas dos seus acessórios por fadiga (Igba et al., 2016), as vibrações podem causar danos como por exemplo *pitting* nos rolamentos, fissuras nos veios ou mesmo rompimento dos dentes das engrenagens (Pandit et al., 2023), de acordo com (Sheng, 2015), aproximadamente 76% das falhas de uma caixa multiplicadora têm a sua origem nos rolamentos com a redução da sua vida nominal prevista para 5 anos para 1 a 2 anos (Wilkinson et al., 2010) são as razões pelas quais as vibrações devem ser controladas de modo a garantir a o bom funcionamento dos componentes (Sheng, 2015).

Segundo (Feng et al., 2013), de acordo com os dados de um estudo num parque eólico offshore holandês, o tempo inoperacional de uma turbina devido a falhas da caixa multiplicadora pode atingir cerca de 55,2% do tempo anual. O acompanhamento do estado das caixas multiplicadoras tem sido feito através de dois métodos que são: os de processamento de sinais e os baseados em dados, examinando o sinal obtido dos dispositivos acrescentados para o monitoramento de lubrificação, ruído e vibrações (Salameh et al., 2018).

2.3.4 LUBRIFICAÇÃO NA CAIXA MULTIPLICADORA

A lubrificação dos componentes de uma caixa multiplicadora constitui uma das tarefas mais importantes da manutenção preventiva, uma vez que, se a lubrificação estiver comprometida,

pode levar à falha dos órgãos da caixa multiplicadora, causando paragens não programadas para a manutenção corretiva, e a conseqüente redução na produção de energia.

Segundo (Jesus, 2020), a fricção que se verifica ao longo do funcionamento das peças móveis que se encontram na caixa multiplicadora, como é o caso de rolamentos, rodas dentadas e veios, origina uma perda energética, ou seja, as qualidades de óleo lubrificante contribuem significativamente para o desempenho da caixa multiplicadora de uma turbina eólica. As perdas em vazio, que se verificam quando a caixa roda sem carga no acoplamento com o gerador, contribuem para a redução da temperatura do lubrificante (Jesus, 2020).

Quando a turbina eólica se encontra inoperacional, o lubrificante da caixa multiplicadora, escoia até ao cárter devida à força de gravidade, fazendo com que ao voltar a operar, alguns componentes não se encontrem devidamente lubrificados (Jesus, 2020) e (Marques, 2012).

De acordo com (Mesquita Brandão et al., 2012), (Gon, 2019) e (Nova, 2017), as falhas que se verificam nas caixas multiplicadoras, são na sua maioria devido a problemas relacionados com a lubrificação, e conseqüente desgaste dos órgãos que compõem a caixa, como é caso de rodas dentadas, rolamentos, veios entre outros componentes. Assim sendo, é de extrema importância a utilização de lubrificante indicado para um certo tipo de máquina, e além disso, deve ser tomado em consideração todas especificações técnicas, referente ao tempo máximo de utilização, a quantidade que máxima do óleo no momento de manutenção, bem como a quantidade total de impurezas aceitáveis, para garantir um bom funcionamento da caixa multiplicadora.

O esquema da Figura 9 (Peng et al., 2022) mostra as causas das falhas na lubrificação de rolamentos de turbinas eólicas. Segundo (Kr Singh et al., 2020) pelo menos 1 em cada 15 turbinas eólicas verifica-se falhas relacionadas com o desgaste resultante da qualidade do óleo usado na lubrificação das caixas multiplicadoras, sendo que o investimento na substituição de óleos encontra-se na ordem dos \$12 000 a \$15 000 num período de dois anos.

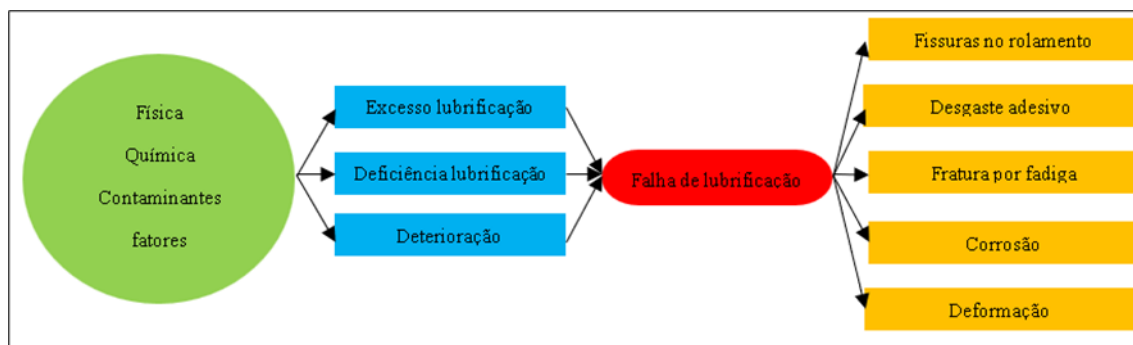


Figura 9. Falhas na lubrificação de rolamentos (Peng et al., 2022)

O nível de desgaste de uma máquina pode ser analisado a partir dos contaminantes presentes em óleos lubrificantes, e por sua vez, é possível determinar as condições de condição em que a máquina se encontra. As condições do óleo, partículas resultantes do desgaste de materiais, bem como os contaminantes, variam em tamanho, sendo assim, a segmentação em função do tamanho das partículas é importante quando se faz a análise de desgaste a partir de medições de partículas. A partir da Tabela 1 é possível ver os mecanismos de desgaste, os tipos de partículas, assim como os respectivos tamanhos das partículas (Henneberg et al., 2015).

Tabela 1. Mecanismos de desgaste e o tipo de partícula (Henneberg et al., 2015)

Mecanismo de desgaste	Tipo de partícula de desgaste	Tamanho de partícula (μm)
Abrasão	Fricção	< 15
Abrasão	Deslizamento	20–50
Fadiga	Laminar	20–50
Adesão/fadiga	Fadiga	> 50
Adesão	Deslizamento severo	> 50

2.3.5 TEMPERATURA NO INTERIOR DA CAIXA MULTIPLICADORA

Segundo (Jesus, 2020) e (Salameh et al., 2018), a temperatura de óleo influencia a viscosidade, uma vez que com o aumento da temperatura, a viscosidade reduz, afetando desta forma a lubrificação dos elementos da caixa multiplicadora.

O centro de controlo, recebe dados relacionados com a temperatura dos elementos que compõem a caixa multiplicadora, assim como a temperatura da *Nacelle*, provenientes do SCADA, que por sua vez recebe todas as informações em tempo real a partir de sensores montados em alguns pontos. (Jesus, 2020) *Supervisory Control and Data Acquisition* SCADA, é um *software* utilizado em processos industriais, com a função de recolher todas as informações a tempo real, ajudado as equipas de manutenção, não só no planeamento das suas atividades, mas também na seleção das ferramentas necessárias para as respetivas intervenções.

Nas turbinas eólicas, o SCADA faculta dados que facilitam o diagnostico e prognostico de falhas em vários componentes, fornecendo a informação confiável sobre a saúde da turbina. Segundo, (Tautz-Weinert & Watson, 2017) os principais parâmetros que se podem controlar com o auxílio do SCADA, encontra-se na Tabela 2.

(Nova, 2017) diz que, a temperatura de óleo deve se encontrar numa certa gama, se a temperatura for muito baixa, o óleo torna se mais viscoso, comprometendo a lubrificação dos órgãos por lubrificar, se a temperatura for elevada, pode fazer com que o óleo evapore até atingir *flash point*. O filme de lubrificante deve possuir uma espessura suficiente para minimizar o contato direto entre peças, evitando dessa forma o desgaste por fricção.

Tabela 2. Principais parâmetros a controlar com o SACADA (Tautz-Weinert & Watson, 2017)

Ambientais	Elétricas	Temperatura	Controlo de variáveis
Velocidade de vento	Potência de saída	Rolamento da caixa multiplicadora	Pista de rolamentos
Direção de vento	Fator de potência	Óleo lubrificante da caixa multiplicadora	<i>Yaw angle</i>
Temperatura ambiental	Potência reativa	Rotação do gerador	Velocidade do veio do rotor
Temperatura da nacelle	Tensão do gerador	Rolamento do gerador	Velocidade do gerador
	Fase do gerador	Rolamento principal	Velocidade/estado de pás
	Corrente elétrica	Veio do rotor	Estado da bomba de arrefecimento
	Frequência de voltagem	Veio do gerador	<i>Number of yaw</i>
		Anel de deslizamento do gerador	<i>Set pitch angle/deviation</i>
		Fase do inversor	Número de paragem/arranque
		Água de arrefecimento de conversor	Estado do código operacional
		Fase do transformador	
		Controlador de cubo	
		Controlador superior	
		Controlador de conversor	
		Barramento de rede	

2.4 OS PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

O processo de transmissão de calor que se verifica na atmosfera equipara-se a um ciclo de funcionamento de uma máquina térmica, isso é, ocorre a troca de calor entre a fonte quente, que é a energia solar e a fria, que é a zona com a baixa temperatura, ocasionando uma diferença de pressão. A gradiente de pressão faz com que o vento se dirija das zonas com pressões altas para as com pressões baixas, (Calhau et al., 2020).

As pás de uma turbina eólica são os componentes que recebem o fluxo do ar resultante do gradiente da pressão, gerando uma força de sustentação ascendente, provocando a rotação do rotor fazendo com que a energia mecânica obtida a partir da energia eólica seja convertida em energia elétrica a através de um gerador (Peng et al., 2023).

A partir da Figura 10, pode se ver as quatro principais regiões a identificar na curva de potência de uma turbinas eólicas, na primeira região não há geração de energia, a turbina começa a gerar a partir da velocidade de ativação; a segunda região é caracterizada por um aumento brusco de potência de saída, até a potência nominal, que é alcançada a uma velocidade designada por velocidade nominal; a terceira região é caracterizada pelo fato da turbina gerar energia a uma potência teórica máxima, até a velocidade de corte; e a última região começa a partir da velocidade de corte na qual, por questões de segurança, a turbina para de produzir A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (C. D. Sequeira, 2012) e (Bhardwaj et al., 2019).

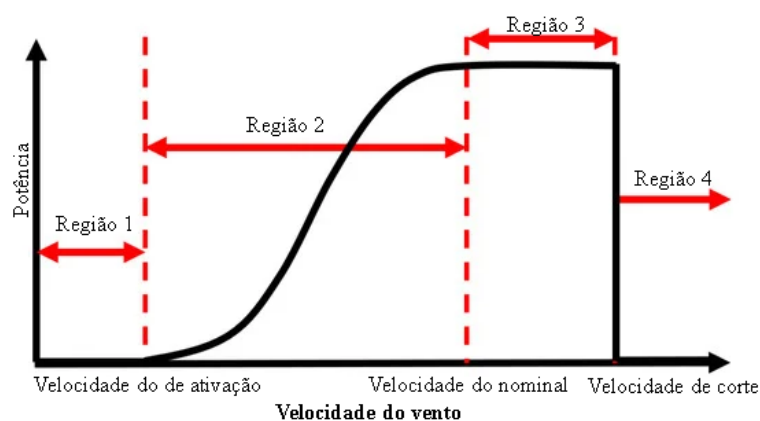


Figura 10. As principais regiões a identificar na curva de potência

2.5 OS COMPONENTES DE UMA TURBINA EÓLICA

As turbinas utilizadas na atualidade estão compostas por diversos componentes que contribuem para o seu normal funcionamento, dentre esses componentes, estão apresentados alguns na, Figura 11.

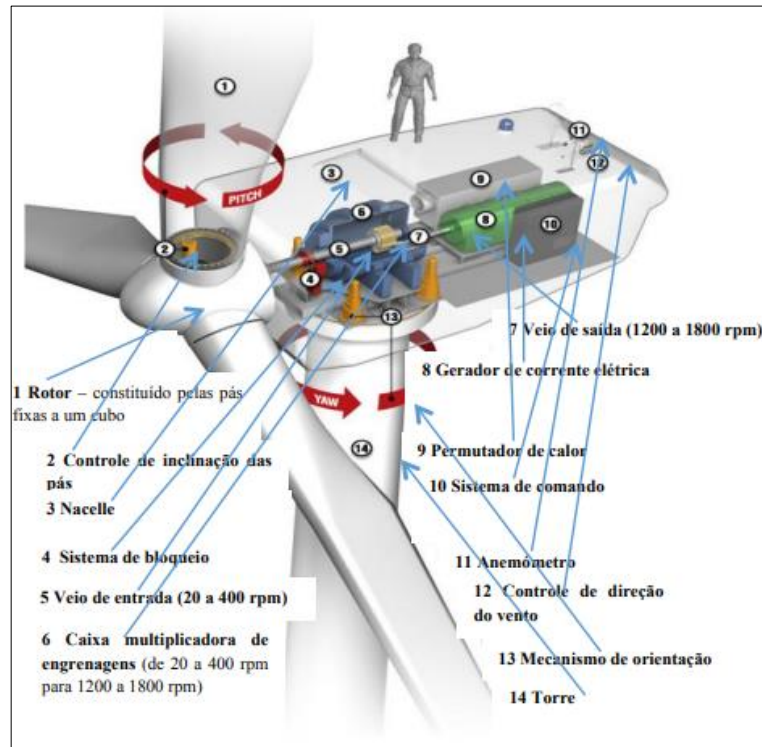


Figura 11. Principais componentes de uma turbina eólica (Calhau et al., 2020)

2.5.1 O ROTOR

O rotor de uma turbina eólica, um dos principais componentes, é constituído por um conjunto de pás, um cubo e o sistema de controle de inclinação das pás (*pitch*).

As pás são feitas de compósitos forçados com fibras, têm a função de absorver a energia cinética do vento e a converter em energia mecânica. O sistema *pitch* ajusta o ângulo das pás permitindo uma ótima produção e segurança da turbina. As pás e o sistema *pitch* encontram-se alojados no cubo. A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (C. D. Sequeira, 2012) e (Abolude & Zhou, 2017).

O rotor da turbina Vestas V90-3.0 MW possui as características técnicas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Principais características de uma turbina Vesta V90-3.0 MW (Ventienty Energy, 2024)

Caraterísticas técnicas Vestas V90-3.0 MW	
Diâmetro	90 m
Área varrida	6,362 m ²
Revoluções nominais	16.1 rpm
Intervalo operacional	8.6-18.4 rpm
Número de pás	3
Comprimento da pá	45 m
Altura do cubo	80 m
Massa	41 t
Regulação de potência	Controle de passo/velocidade variável
Freio a ar	Passo total da lâmina por três cilindros hidráulicos de passo

2.5.2 O VEIO DE ENTRADA

O veio de entrada faz parte do sistema de transmissão da turbina eólica, esse veio roda a baixa velocidade de rotação, transmitindo movimento entre o rotor e o primeiro estágio planetário.

2.5.3 A CAIXA MULTIPLICADORA

De acordo com (Zhao & Ji, 2015), (Calhau et al., 2020) e (Bhardwaj et al., 2019), a caixa multiplicadora de uma turbina eólica é a componente responsável no aumento da baixa velocidade e alto binário do veio acoplado ao rotor para alta velocidade necessária para a geração da corrente elétrica, a partir de um gerador, nesse processo ocorre a transformação da energia mecânica em energia elétrica.

A caixa multiplicadora é constituída por rodas dentadas, rolamentos, veios, etc., o aço é o material aplicado no fabrico das caixas multiplicadoras, sendo a sua vida útil prevista para 20 anos (Peng et al., 2023). As projeções de rodas dentadas utilizadas em turbinas eólicas são normalmente produzidas com base na norma ISSO 6336-5 em concordância com a norma IEC-61400, que dita os requisitos que se devem seguir nos projetos de caixas multiplicadoras de turbinas eólicas. Os aços com alto teor de cromo, como é o caso de 18CrNiMo7-6 são utilizados na construção de rodas dentadas, por oferecerem uma boa tenacidade (Márquez et al., 2019). Na Figura 12 é apresentado o exemplo de uma caixa multiplicadora aplicada em turbinas eólicas (Nova, 2017).



Figura 12. Caixa multiplicadora de uma turbina eólica (Nova, 2017)

2.5.4 O VEIO DE SAÍDA

O veio de saída faz parte do sistema de transmissão da turbina eólica, esse veio roda a alta velocidade de rotação, transmitindo movimento entre último estágio paralelo e o veio de entrada ao gerador (*drive end - DE*), através do acoplamento.

2.5.5 O GERADOR DE CORRENTE ELÉTRICA

O gerador é o componente que converte a energia mecânica em energia elétrica por meio de bobinas de cobre que geram um campo magnético e que por sua vez a energia elétrica é transmitida a rede através de um transformador (Nova, 2017).

O gerador encontra-se ligado ao veio de alta velocidade na saída da caixa multiplicadora através de um acoplamento e as suas características técnicas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Características técnicas do gerador (Nova, 2017)

Caraterísticas técnicas do gerador	
Tipo	Conversor assíncrono
Saída classificada (output)	3000 kW
Dados operacionais	60 Hz
	1000 V

2.5.6 OS ROLAMENTOS UTILIZADOS EM TURBINAS EÓLICAS

Os rolamentos são elementos de transmissão de movimentos rotativos entre veios e outras peças, portanto, o mau funcionamento desses componentes pode comprometer o funcionamento dos outros órgãos. Os rolamentos são constituídos por elementos rolantes,

gaiola, pistas internas e externas, esses elementos estão sujeitos a diferentes tipos de falhas resultantes de cargas em que estão sujeitos.

Recomende-se que o rolamento seja substituído em função do número de rotações alcançadas, mesmo que não se verifique defeito no mesmo. A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (C. D. Sequeira, 2012) e (Teng et al., 2021).

Os rolamentos de rolos cilíndricos e cónicos são utilizados para suportar o veio principal do rotor por resistirem altas cargas axiais e radiais. Nas caixas multiplicadoras são geralmente utilizados rolamentos de rolos cilíndricos, rolamentos de rolos cónicos e rolamentos de esferas para suportar os veios de rodas dentadas de planetários e paralelas. Quanto aos geradores, frequentemente são utilizados os rolamentos de esferas e os de rolos cilíndricos. Outro ponto importante para os rolamentos dos geradores tem haver com a corrente elétrica que pode criar defeitos aos componentes dos mesmos, esse problema pode ser evitado com a aplicação de um revestimento isolante.

Para o *yaw* e *pitch* aplicam-se os rolamentos de esferas, os cilíndricos, os rolamentos auto compensadores de rolos e os rolamentos de rolos cónicos (NSK, 2018).

Geralmente são utilizados diferentes tipos de materiais para a construção de rolamentos, sendo que para os rolamentos de rolos cilíndricos sem gaiola Figura 13 a, que suportam elevadas cargas e utilizados para o subconjunto planetário, esses rolamentos são feitos de aço revestido de óxidos.

Os rolamentos de rolos cilíndricos, com linha única, suportam elevadas cargas radiais e velocidades, além de funcionarem sem ruídos. Esses rolamentos são produzidos com aço e são utilizados para suportarem o veio intermediário de alta velocidade e o veio de alta velocidade, Figura 13 b.

Os rolamentos de esferas com o ângulo de contacto de 35° de quatro pontos e com o anel interno dividido na parte radial em duas peças. Esses rolamentos são feitos de aço com uma gaiola em latão, suportam cargas axiais puros ou cargas combinadas e são utilizados para suportarem veios intermediários de alta velocidade e veios de alta velocidade, Figura 13 c

Rolamentos de esferas profundos, possuem pistas com um bom acabamento, proporcionando um funcionamento silencioso, podendo suportar pequenas e mádias cargas radiais bem como pequenas cargas nas duas direções. As gaiolas podem de aço estampado ou latão usinado, aplicam se em tubo que suporta a roda dentada Figura 13 d.

Os rolamentos de rolos cónicos duplos, trabalham bem com cargas radiais e axiais e são feitos em aço podendo ser revestido em óxido preto. Esses rolamentos são utilizados para

suportarem os veios de alta velocidade, bem como os veios intermediários de baixa e de alta velocidade, Figura 13 e.

Os rolamentos cónicos de linha única, possuem uma boa resistência a cargas radiais e axiais, são feitos em aço com revestimento de óxido preto. Esses rolamentos são utilizados para o estágio planetário, Figura 13 f.

Os rolamentos de rolos cónicos em linha dupla, são caracterizados por duas gaiolas contendo rolos e dois anéis externos e um único anel interno, podendo suportar cargas radiais e axiais em ambas as direções e são feitos de aço e revestimento de óxido preto. Esses rolamentos suportam o eixo intermediário de baixa velocidade, Figura 13 g.

Os rolamentos isolantes revestidos em cerâmico combinado com o alumina Al_2O_3 , possuem boas propriedades contra a erosão resultante de cargas elétricas, uma vez que são utilizados em geradores e além de possuírem boas propriedades de dissipação de calor, Figura 13 h.

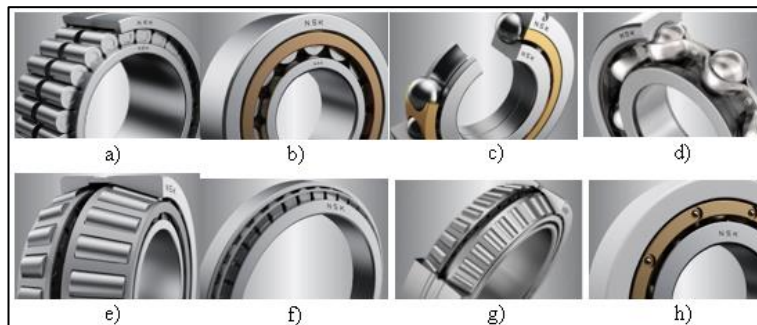


Figura 13. Diferentes tipos de materiais para a construção de rolamentos: a) Rolamentos de rolos cilíndricos sem gaiola; b) rolamentos de rolos cilíndricos, com linha única; c) Rolamentos de esferas com o ângulo de contacto de 35° d) Rolamentos de esferas profundos e) Rolamentos de rolos cónicos duplos f) Rolamentos cónicos de linha única g) Rolamentos de rolos cónicos em linha dupla e h) Rolamentos isolantes revestidos em cerâmico (NSK, 2018)

A partir da Figura 14, pode se ver a localização dos rolamentos em diferentes partes da caixa multiplicadora de uma turbina eólica (NSK, 2018).

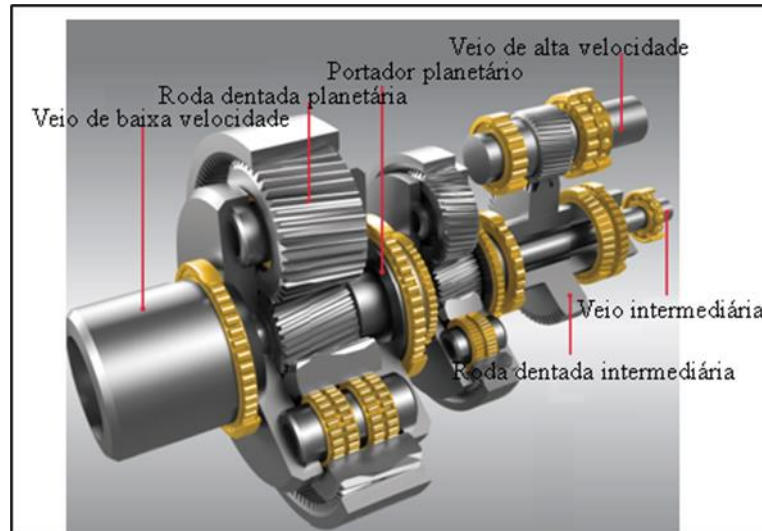


Figura 14. Localização dos rolamentos numa caixa multiplicadora (NSK, 2018)

2.6 SISTEMA DE CONTROLO E AQUISIÇÃO DE DADOS - SCADA (SUPERVISORY CONTROL AND DATA ACQUISITION)

O Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), em tempo real, através da combinação de software e hardware, fornece as informações pertinentes relacionadas com à produção, à velocidade, à direção do vento, bem como a temperatura na *nacelle* e na caixa multiplicadora da turbina eólica, Figura 15. O SCADA recolhe as informações relacionadas com as turbinas do parque eólico, como é o caso de dados sobre a posição de *nacelle*, posição das pás, o tempo de paragens para reações, etc., facilitando o controlo das operações. A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (Nova, 2017) e (C. D. Sequeira, 2012).

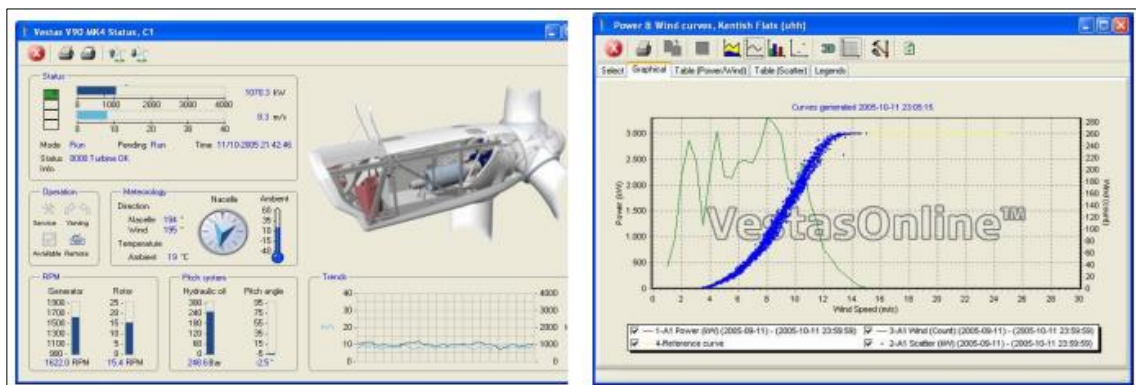


Figura 15. Sistema de controlo de dados (C. D. Sequeira, 2012)

2.7 CONTROLO DE DADOS DE VIBRAÇÕES - CMS (CONDITIONING MONITORING SYSTEM)

O Sistema de Controlo e Monitorização (CMS) de vibrações em tempo real possibilita ter as informações sobre as condições operacionais dos componentes das turbinas eólicas, isso é possível por meio de sensores que são instalados em locais estratégicos da turbina, como por exemplo chumaceiras principais, na caixa multiplicadora e no gerador. A partir das informações relativas a saúde dos equipamentos, é possível fazer o controlo dos níveis de vibrações, espectros e alarmes, Figura 16 (C. D. Sequeira, 2012).

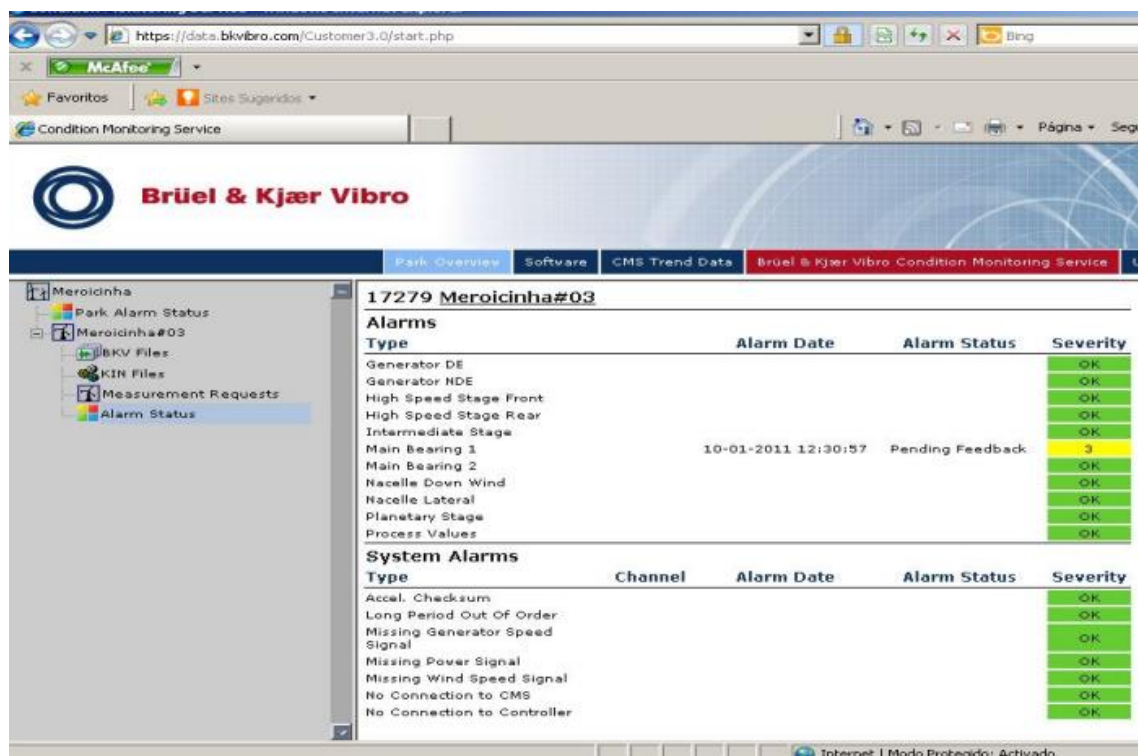


Figura 16. Sistema de Controlo e Monitorização (C. D. Sequeira, 2012)

Os autores (Romero et al., 2016), afirmam que a partir do trabalho desenvolvido pelo Consórcio de Tecnologias de Energia Eólica SuperGen do Reino Unido (*UK SuperGen Wind Energy Technologies Consortium*), foi possível constatar que 14 das 20 CMS amplamente difundidas são utilizadas para o monitoramento das vibrações nas caixas multiplicadoras das turbinas eólicas e por outro lado, as investigações feitas pela universidade Durham mostrou que 27 dos 36 CMS abundantes se baseiam na análise de vibrações nas caixas multiplicadoras.

Os autores (Mao et al., 2023) dizem que as técnicas *offline* e *online* têm sido utilizadas na análise das partículas residuais em óleos, resultantes do desgaste dos componentes, contudo o método *offline* ou portátil, Figura 17 (Teng et al., 2021), embora seja mais barato em relação ao sistema online, requer instalações preparadas para a análise das amostras, criando demoras na colheita, assim como no transporte, visto que esse processo requer a intervenção humana.



Figura 17.S Sistema portátil para aquisição de dados sobre vibrações (Teng et al., 2021)

O método online é o mais eficiente e não exige muita mão-de-obra, este método consiste na instalação de sensores acústicos ou de vibrações nas caixas multiplicadoras, essa forma de monitorização de condição tem como algumas vantagens, a redução do tempo de paragens dos equipamentos, tornando a manutenção economicamente viável, visto que os custos de manutenção contribuem significativamente no custo total de energia elétrica (Koukoura et al., 2019). A partir da aplicação das técnicas de monitorização dos subconjuntos mecânicos de uma caixa multiplicadora pode se propor as estratégias de manutenção mais eficazes, reduzindo os custos operacionais em turbinas eólicas, pois, pode se propor algumas melhorias aos fabricantes desses equipamentos (Teng et al., 2021).

O sistema CMS, é composto por transdutores que são acelerómetros e tacómetros, sistema de aquisição de dados e um sistema de processamento de dados, Figura 18 (Teng et al., 2021).

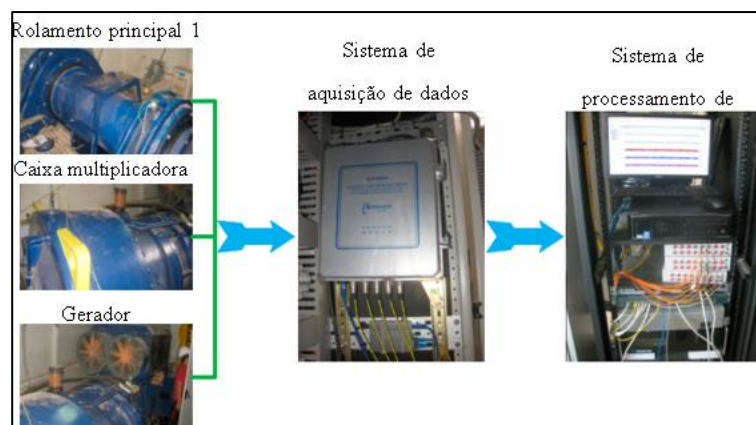


Figura 18. Sistema online para aquisição de dados sobre vibrações (Teng et al., 2021)

2.7.1 OS SENSORES

Os sinais de vibrações são obtidos a partir das medições feitas com a utilização de um dispositivo chamado transdutor, cujo mesmo converte energia de uma natureza para outra, por exemplo, pode converter o sinal de vibração mecânica para o sinal elétrico que caracteriza a vibração da máquina. A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores (C. D. Sequeira, 2012).

Nos sistemas de transmissão utilizados em turbinas eólicas normalmente aplica-se oito acelerómetros dispostos da seguinte maneira: dois nos rolamentos principais, quatro ao instalados na caixa multiplicadora e dois nos rolamentos do gerador (Teng et al., 2021).

O CMS utilizado pela empresa *VentientEnergy* para o controlo de vibrações é composto por 10 sensores montados de modo a recolherem da melhor maneira possível as informações relacionadas com as condições dos componentes do equipamento, e se encontram instalados o mais próximo possível de onde se faz a separação entre os órgãos dinâmicos e estáticos, nos rolamentos, Figura 19 e a legenda da mesma encontra-se na Tabela 5.

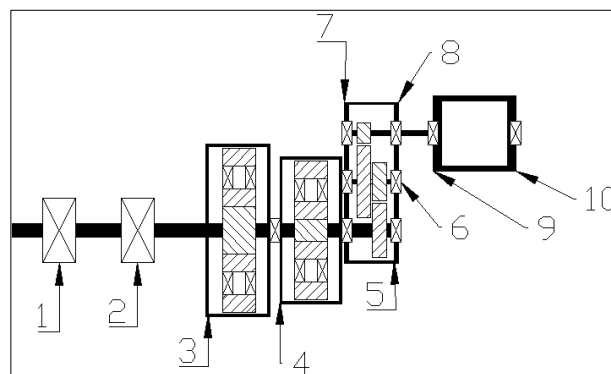


Figura 19. Localização de sensores para medição de vibrações

Tabela 5. Componentes a monitorar com sensores de vibrações

Sensor	Componente a monitorar	Localização
1	Rolamento principal 1	Antes da caixa multiplicadora
2	Rolamento principal 2	Antes da caixa multiplicadora
3	Roda dentada	Dentro da caixa multiplicadora
4	Roda dentada	Dentro da caixa multiplicadora
5	Rolamento (Veio de velocidade baixa)	Dentro da caixa multiplicadora
6	Rolamento (Veio de velocidade intermédia)	Dentro da caixa multiplicadora
7	Rolamento (Veio de velocidade alta/extremidade sem acionamento)	Dentro da caixa multiplicadora
8	Rolamento (Veio de velocidade alta/extremidade com acionamento)	Dentro da caixa multiplicadora
9	Rolamento (Extremidade com acionamento - “DE”)	Gerador
10	Rolamento (Extremidade sem acionamento- “NDE”)	Gerador

2.7.2 SELEÇÃO E INSTALAÇÃO DE SENSORES DE MEDIÇÃO

Ao longo da transmissão, verifica-se o aumento do valor das frequências de rotação a partir do veio solar até o veio de alta velocidade, com o consequente aumento das frequências que caracterizam as falhas das rodas dentadas, bem como dos rolamentos associados a esses componentes (Teng et al., 2021).

Para garantir a fiabilidade dos resultados esperados, é de extrema importância saber seleccionar os sensores adequados para cada aplicação, as instalações com base roscada, Figura 20 são as mais recomendadas, visto que garantem uma recolha segura de sinais de vibração.



Figura 20. Instalação do sensor com base roscada (Teng et al., 2021)

2.8 OS PROBLEMAS DE LUBRIFICAÇÃO

O óleo exerce um papel fundamental na minimização do atrito e do consequente desgaste das partes que compõem as peças da caixa multiplicadora, além de que com a análise das amostras do óleo utilizado para a lubrificação, é possível obter as informações sobre o estado em que se encontram algumas peças que compõem a caixa multiplicadora.

(Del Álamo et al., 2020), dizem que algumas das funções relevantes do óleo são de reduzir o contato direto entre as peças rotativas, dissipar o calor, evitar os efeitos da corrosão e absorver as partículas de desgaste. Para que essas funções sejam cumpridas, o óleo deve ao máximo resistir à oxidação, possuir baixa capacidade de formar espuma, ter uma boa capacidade de separar as partículas, alta capacidade de trabalhar sob efeito de pressão, boa viscosidade, o baixo nível de acidez, assim como um bom índice de viscosidade.

(Liton Hossain et al., 2018) e (Del Álamo et al., 2020) afirmam que as características das amostras do óleo como é caso da viscosidade, índice de viscosidade, TAN, partículas resultantes do desgaste, o teor dos aditivos, etc, auxiliam na detecção de defeitos nos componentes da caixa multiplicadora como por exemplo nos rolamentos e nos dentes das engrenagens.

A oxidação dos óleos utilizados em turbinas eólicas pode provocar o aumento da viscosidade, devido a depleção carga aditiva como fósforo, enxofre e zinco atuam como antioxidantes, ou seja, os aditivos que contrariam os efeitos de oxidação (Coronado & Wenske, 2018).

Os autores (Del Álamo et al., 2020), dizem que os principais parâmetros que podem ser estudados para a análise de óleos lubrificantes das caixas multiplicadoras das turbinas eólicas os que se encontram na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros importantes na análise de óleos (Del Álamo et al., 2020)

Condição do óleo	Aditivos	Elementos de desgaste	Elementos Contaminantes
Viscosidade a 40 °C		Alumínio	
Contagem de partículas		Cromo	
ISO 4406	Bário	Cobre	
Índice QP	Cálcio	Ferro	Boro
Acidez	Magnésio	Molibdênio	Potássio
Água	Fósforo	Níquel	Sódio
Aparência	Zinco	Chumbo	Silício
Nitração		Estanho	
Oxidação		Prata	

2.8.1 MONITORIZAÇÃO DA CONDIÇÃO DO ÓLEO LUBRIFICANTE

Dos métodos mais utilizados para a monitorização de óleos lubrificantes destaca-se a amostragem que reporta a situação em que o óleo se encontra, sendo que com este método, é possível analisar várias propriedades importantes para estudar e decidir em torno dos resultados obtidos (Coronado & Wenske, 2018).

Do resultado laboratorial das amostras, pode se obter dentre outras informações, as informações que dizem respeito a viscosidade a diferentes temperaturas, metálicos de desgaste, partículas, os aditivos, teor de água (Coronado & Wenske, 2018).

O outro método que se pode utilizar é baseado em sensores *online* que fornece as informações a cerca das condições em que o óleo e a caixa multiplicadora se encontram, através da leitura por meio de sensores de desgaste indutivo, é possível indicar partículas ferromagnéticas (Coronado & Wenske, 2018) e (Salameh et al., 2018).

O método de monitorização de partículas por resistência não é viável óleo que apresenta partículas metálicas. Embora o método de capacitância seja de elevada precisão, não consegue diferenciar as partículas metálicas contidas no óleo.

Quando se analisa os óleos lubrificantes para aferir o estado em que se encontram os componentes de um sistema de transmissão mecânica, é necessário ter o conhecimento sobre a origem de cada partícula que se revela nas amostras.

Segundo (Silva Filho, 2020), o indicador primário e secundário de um sistema de transmissão pode ser resumido conforme a Tabela 7.

Tabela 7. Principais indicadores de problemas de um sistema de transmissão (Silva Filho, 2020)

Problema	Indicador principal	Indicador secundaria
Mancais	Chumbo (Pb)	Cobre (Cu)
	Cobre (Cu)	Estanho (Sn)
Rolamentos	Ferro (Fe)	
	Ferro (Fe)	
Gaiolas de rolamentos	Cobre (Cu)	
	Cromo (Cr)	
Rodas dentadas	Ferro (Fe)	
Vedantes	Silício (Si)	
	Cobre (Cu)	
Permutador de calor	Alumínio (Al)	
Carcaça de bomba	Alumínio (Al)	
Buchas da bomba	Chumbo (Pb)	Cobre (Cu)
	Ferro (Fe)	Silício (Si)
Água salgada	Água	Sódio (Na)
		Magnésio (Mg)
		Cálcio (Ca)
		Potássio (k)
Oxidação	Oxidação	TAN
		Zinco (Zn)
Depleção de aditivo anti desgaste	AW (Anti Desgaste)	Fósforo (P)
		Molibdénio (Mo)
		Enxofre (S)
		Silício (Si)
Limpeza	Partículas ISO	

2.9 A ANÁLISE DOS DADOS RELATIVOS À TEMPERATURA

A análise de dados de temperatura é uma ferramenta indispensável para avaliar os impactos da mesma no óleo da caixa multiplicadora, bem como, na avaliação e monitorização do estado de condição dos componentes dos geradores de turbinas eólicas.

2.9.1 TEMPERATURA DE ÓLEO DA CAIXA MULTIPLICADORA

Segundo (Del Álamo et al., 2020), a temperatura de óleo lubrificante de uma caixa multiplicadora de turbina eólica deve ser monitorizada de forma contínua, de modo que os limites de temperatura estejam dentro de um intervalo recomendado, essa monitorização faz com que seja evitado os danos resultantes de processos térmicos, sendo que geralmente utiliza-se os sensores de temperatura para o controlo. As caixas multiplicadoras de uma turbina eólica

são providas de vedantes, filtros, bujões e outros componentes que em caso de alguma falha no funcionamento dos mesmos podem reduzir a hermeticidade, ocasionando uma perda de óleo por vazamento.

A redução do nível do óleo da caixa multiplicadora provoca um aumento da sua temperatura, razão pela qual, quando se atinge um certo nível de óleo, o alarme é acionado de modo a alertar a equipa de manutenção para a sua intervenção (Del Álamo et al., 2020) .

2.9.2 TEMPERATURA DE ROLAMENTOS DO GERADOR

Além do diagnóstico através da análise do óleo e de vibrações, o sistema SCADA pode fornecer as informações importantes relacionados com o estado de condição dos rolamentos. Por dificuldades na interpretação de sinais de temperatura, isso devido a influencia de várias fontes de calor existentes no *nacelle*, bem como a temperatura ambiental do local onde se encontra instalado o parque eólico, a monitorização de caixas multiplicadoras pode ser feita com a utilização de métodos que se baseia em transferência de calor, isso é feito por análise de tendência de sinal, usado os métodos estáticos, como a média, o desvio padrão e valores extremos (Cambron et al., 2017).

Os componentes constituintes de um gerador de turbina eólica devem funcionar eficientemente de modo a contribuir na produção de energia, sendo os rolamentos um dos componentes que mais sofre devido a elevadas cargas térmicas, vários estudos efetuados apontam os problemas relacionados como os rolamentos como a principal causa para as falhas que se verifica nos geradores de turbinas eólicas. A longevidade de rolamento de um gerador depende de aumento da temperatura dos mesmos ao longo do seu funcionamento, assim sendo para evitar o aumento excessivo da temperatura destes componentes, deve-se garantir uma lubrificação adequada para os rolamentos da extremidade acionada (DE), bem como para os da extremidade não acionada (NDE) (Singh & Sundaram, 2022).

De acordo com (Singh & Sundaram, 2022), o estudo realizado com 12000 geradores de turbinas eólicas, foi possível descobrir que os elementos com potenciais falhas são os rolamentos dos mesmos, Figura 21.

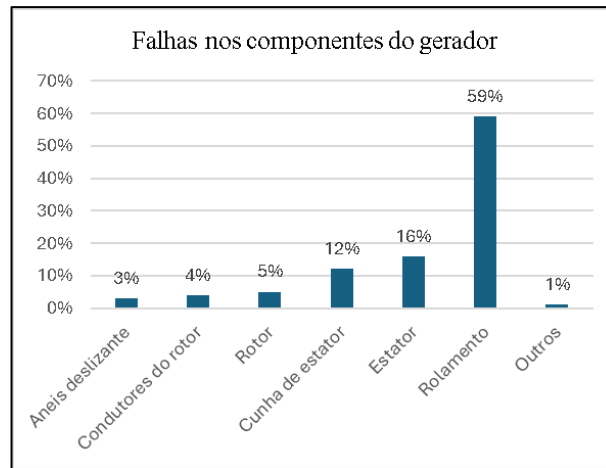


Figura 21. Distribuição de falhas em componentes de um gerador (Singh & Sundaram, 2022)

2.10 A ANÁLISE DE CURVAS DE POTÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

A curva de potência de uma turbina eólica descreve a dependência existente entre a velocidade do vento e a potência de saída, facilitando na avaliação de desempenho energético da turbina, bem como na sua monitorização. A curva real pode ter alguns desvios que revelam problemas em diferentes partes que a compõe, como é o caso de sistema de transmissão ou mesmo no gerador, comprometendo o funcionamento normal da turbina. As condições ambientais do local onde se encontra o parque eólico influencia significativamente as curvas de potência de uma turbina eólica (Bardal & Sætran, 2017) e (Sohoni et al., 2016).

3

DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO REALIZADO

O presente capítulo é um dos mais relevantes, uma vez que nos auxilia na compreensão de como o trabalho foi realizado e está organizado. O presente capítulo será dividido em 6 subcapítulos, sendo que no primeiro será feita a descrição do parque eólico estudado, no segundo serão descritas algumas características das turbinas eólicas existentes neste parque, é no terceiro que serão analisados os dados sobre vibrações, no quarto é feita uma análise dos vários parâmetros nas amostras de óleos, no quinto estudaremos a variável temperatura, e no último subcapítulo o foco será a análise de comportamento de curvas de potência.

Nesta seção, é crucial salientar os aspetos críticos e dificuldades deste tipo de estudos, mostrando as limitações dos resultados e, sempre que possível, devem ser feitas comparações com outros estudos na mesma área. Esta seção também apresenta uma oportunidade para introduzir novas abordagens na manutenção, nomeadamente a utilização de inteligência artificial com base em padrões, essa foi umas das preocupações no presente trabalho.

3.1 CASO DE ESTUDO

O caso de estudo utiliza 38 turbinas, localizadas no parque eólico da Pampilhosa da Serra, pertencentes à empresa *VentientEnergy* que adquiriu as mesmas à empresa nacional Iberwind. Todas as turbinas são da marca Vestas V90/3000, com uma capacidade total instalada de 114 MW, tendo começado a operar com 33 MW e em seguida com 81 MW, as duas fases de operação foram concluídas em 2006, a tensão de ligação à rede de 220 kV e com esse parque evita-se a emissão de 165846 toneladas de CO₂, com as características técnicas que se encontram apresentadas na tabela XXXXX (a baixo) (Nova, 2017b).

A empresa *VentientEnergy* é pan-europeia e possui 145 parques eólicos *onshore* e uma capacidade instalada de 2,8 GW. A mesma encontra-se distribuída por países apresentados no mapa, Figura 22 (Queensland Treasury, 2024).

O presente trabalho teve o foco baseado na avaliação dos impactos dos planos de manutenção utilizados pela empresa *VentientEnergy*, essa avaliação realizou-se com recurso a dados de vibrações, estado de condição de óleos, comportamento de temperaturas e curvas de potência, antes e depois de substituições dos componentes das turbinas eólicas dessa empresa. O estudo utilizou dados durante um período de 5 anos, ou seja, de 2019 a 2023, importa referir que ao longo das diferentes fases deste trabalho foram utilizadas várias normas recomendadas.



Figura 22. O mapa da *VentientEnergy* na Europa (Queensland Treasury, 2024)

A partir da Figura 23, pode se ver a zona em que se localiza o parque eólico da Pampilhosa da Serra em Portugal, (*VentientEnergy*, 2024).



Figura 23. Localização do parque da Pampilhosa da Serra

As características técnicas das turbinas da empresa *VentientEnergy* encontram-se descritas na Tabela 8.

Tabela 8. Características técnicas das turbinas da empresa *VentientEnergy*

Turbina Vestas V90/3000	
Fabricante	VESTAS
Modelo	V90 – 3.0 MW Contra
Orientação	corrente
N.º de pás	3
Potência nominal	3,0 MW
Velocidade de rotação	de 10,5 – 24,4 rpm
Velocidade de <i>cut-in</i>	4 m/s
Velocidade de <i>cut-out</i>	25 m/s
Altura da torre	80 m
Diâmetro do rotor	90 m
Massa (toneladas)	
<i>Nacelle</i>	68
Rotor	40
Torre	165

A partir da Figura 24, pode se ver a curva de potência nominal da turbina Vestas V90/3000, a sua região operacional encontra-se numa faixa de velocidade de vento entre 4 e 25 m/s, na qual a potência teórica é alcançada numa velocidade de vento de cerca de 14 m/s (Nova, 2017).

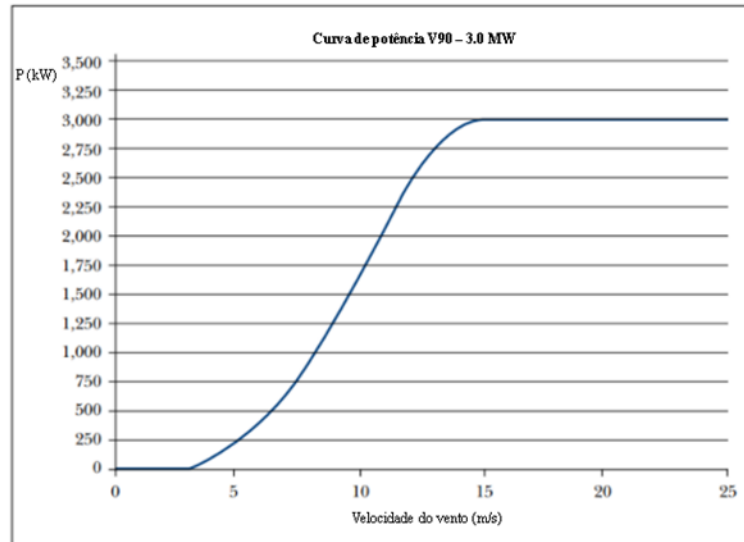


Figura 24. Curva de potência nominal da turbina Vestas V90/3000 (Nova, 2017)

3.2 METODOLOGIA

A metodologia usada neste trabalho foi feita em base nos dados reais, obtidos do parque eólico de Pampilhosa de Serra descrito anteriormente, os estudos utilizaram um período de 5 anos, ou seja, de 2019 a 2023.

A análise das variáveis, vibração, óleos, temperatura e curva de potência, requerem a utilização de um elevado volume de dados obtidos pelas leituras dos sensores instalados nas turbinas, bem como, relatórios em pdf provenientes dos laboratórios de análise de óleos, promovidos pela *Oelcheck* ver **Anexo A** (Os relatórios sobre óleos).

Todo o tratamento de dados utilizou o software Microsoft Excel, Matlab e respetivas ferramentas de cálculo.

O tratamento da informação sobre o estado de condição do óleo no antes e depois das substituições de caixas multiplicadoras, foram analisados e quantificados nos diferentes parâmetros. Durante o funcionamento das caixas multiplicadoras ou de geradores verificam-se vibrações que podem estar numa gama de amplitudes normais ou anormais. Os valores dessas amplitudes foram obtidos a partir de *Condition Monitoring System* (CMS).

Os dados relacionados com a temperatura, são provenientes do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados, *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), que faz o registo em cada 10 minutos em formato excel.

Para a análise da curva de potência foram utilizados dados provenientes do site RMS, renewables management system azure website.

Cada fabricante disponibiliza uma ficha técnica onde é possível caracterizar a curva de potência teórica, associada ao funcionamento de cada turbina. Nesta, é possível obter uma relação entre a potência esperada que cada turbina produzirá para as correspondentes velocidades, e a curva real de produção, com as velocidades de vento registadas no período de análise, permitindo observar as alterações na eficiência após substituições de componentes.

3.2.1 A METODOLOGIA USADA NA ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES

A recolha de dados de vibrações, foi realizada através de um sistema de monitorização de condição, instalado no interior da turbina. A localização dos sensores de vibração nos veios de baixa velocidade (LSS), estágios planetários e veios de alta velocidade (HSS), permitiu uma análise do comportamento destes valores no antes e depois da substituição de componentes mecânicos.

O mesmo procedimento foi utilizado no antes e depois das substituições dos geradores, bem como, nas substituições dos rolamentos DE e NDE localizados nos geradores, descritos em **Anexo B** (Os níveis de vibrações Caixa Multiplicadora e Gerador). Os valores das amplitudes de vibrações são lidos em gráficos de tendência, Figura 25 ou em gráficos de análise espectral, Figura 26.

DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO REALIZADO

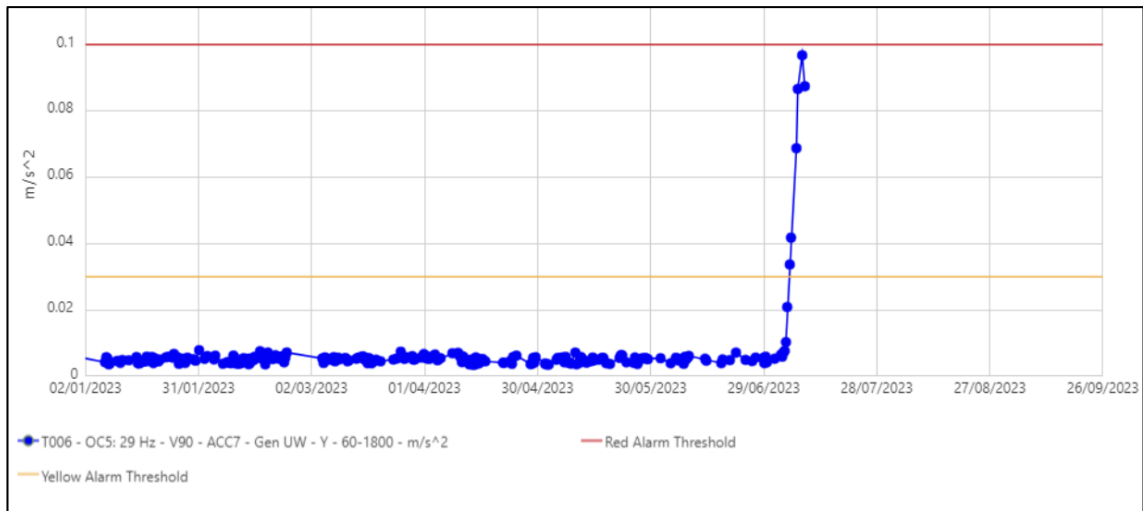


Figura 25. Gráfico de tendência (Exception Report, 2022)

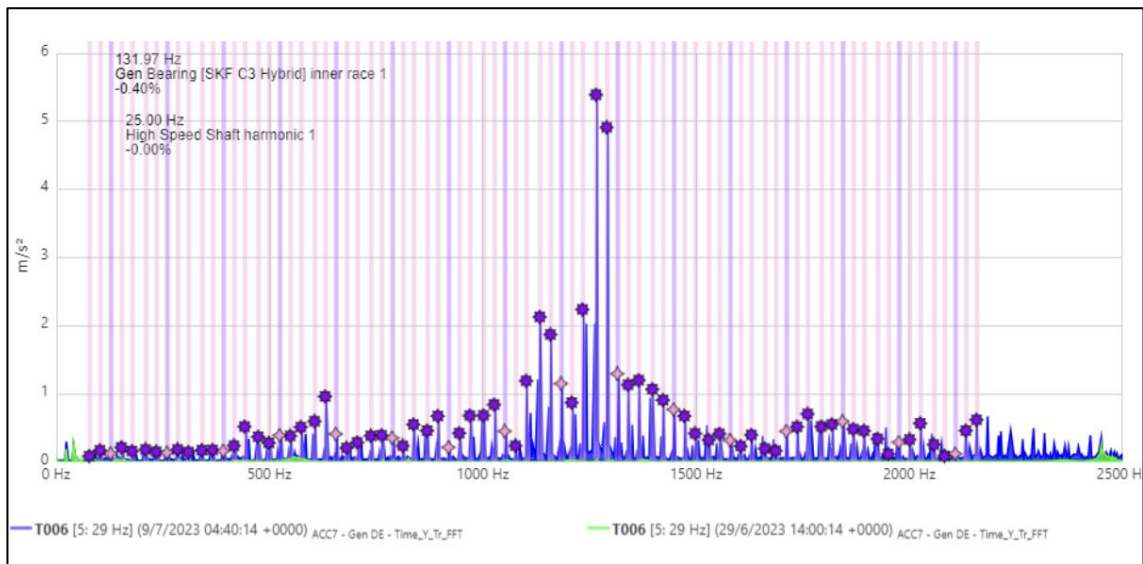


Figura 26. Análise espectral (Exception Report, 2022)

3.2.2 A METODOLOGIA UTILIZADA NA ANÁLISE DOS ÓLEOS LUBRIFICANTES

A análise dos lubrificantes foi feita com base na informação recolhida e que aparece como o mostrado no exemplo, Figura 27. Os dados sobre óleos encontram-se apresentados em **anexo A** (Os relatórios sobre óleos)

Utilizou-se para o efeito as análises na data anterior à substituição (antes) e resultados na data depois da substituição (depois).

Sample number:	1560946	1381522	1308069	1190166
Oil type: ⁽²⁾	CASTROL OPTIMISAR SYNTHETIC CT 320	MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320	MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320	MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320
Machine serv.: ⁽²⁾	180301 H	168513 H	45469 H	7098 H
Date sampled: ⁽²⁾	24/06/2020	19/02/2019	09/08/2018	14/06/2017
First Report date:	26/08/2020	07/03/2019	06/09/2018	02/08/2017
Oil condition				
Appearance (Adim)	Dark transp.	Dark transp.	Dark transp.	Bright Transp.
Water-Gas	N.D.			
Particles	N.D.			
IR Index (%)	99.91	99.91	99.73	
Oxidation (A/cm)	<1	1.5	2	2.9
TAN (mgr KOH/gr)	0.91	0.55	0.49	0.98
Viscosity 100°C (mm2/s)	38.29	35.65	36.4	36.71
Viscosity 40°C (mm2/s)	329.5	323	316.7	316.6
Visc. Index (Adim)	167	157	163	164

Figura 27. Exemplo do relatório do óleo (Oelcheck, 2020)

3.2.3 A METODOLOGIA UTILIZADA NA CONSTRUÇÃO DE GRÁFICOS DE TEMPERATURA E CURVAS DE POTÊNCIA

Os dados utilizados na construção de gráficos de temperatura de óleo de caixas multiplicadoras, bem como as curvas de potência, encontram-se no formato excel e constam no anexo C (Dados sobre temperatura de óleos em excel). Para uma fácil visualização gráfica procedeu-se à elaboração de códigos e algoritmos em matlab, Figura 28.

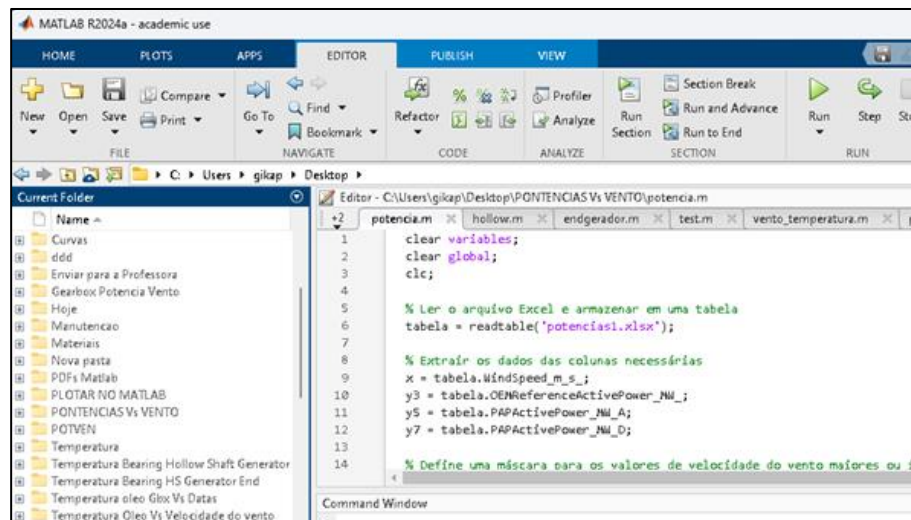


Figura 28. Exemplo de aplicação do algoritmo matlab

Como forma de comparação dos gráficos produzidos em MATLAB anteriormente, foi também utilizado o *site* RMS da *Iberwind* para a construção de curvas de potência, Figura 29

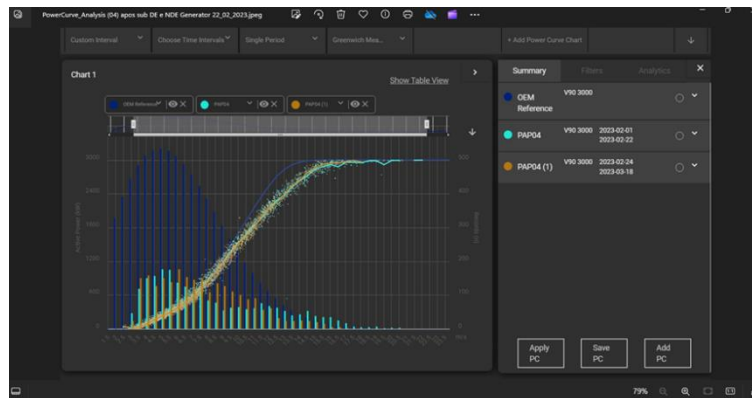


Figura 29. Exemplo de aplicação de RMS da Iberwind

3.2.4 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

3.2.4.1 Análise de Vibrações dos Componentes das Caixas Multiplicadoras

A análise de vibrações foi feita a partir de dados em formato excel, estes utilizam apenas os valores pico da amplitude do espectro de frequências, os mesmos foram fornecidos pela empresa *VentientEnergy Anexo B.1* (Os níveis de vibrações antes e depois da substituição dos componentes da caixa multiplicadora). De forma a facilitar a identificação dos componentes, bem como, das datas da substituição, foi necessário filtrar os dados. Começando pelas caixas multiplicadoras, das turbinas 02, 08, 13, 18, 21, 24, 28, 32, 36 e 38, seguindo-se as substituições do 3º estágio das caixas multiplicadoras das turbinas 04 e 37, Figura 30.

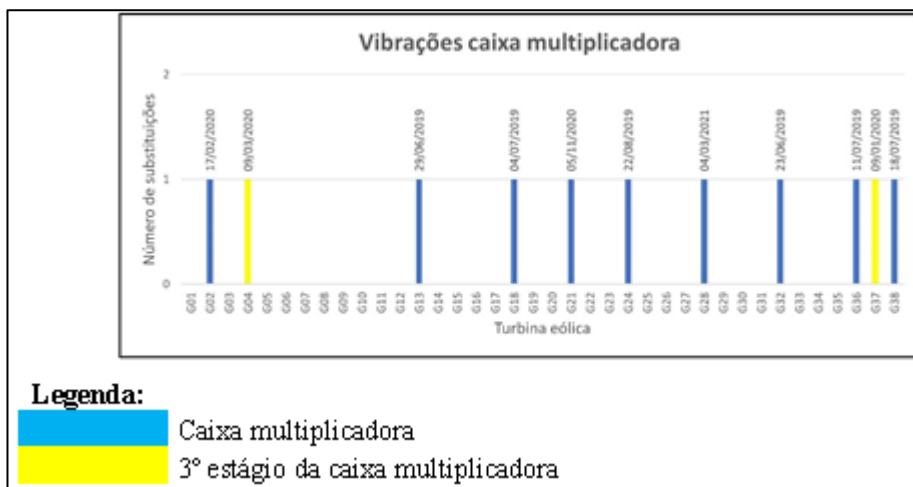


Figura 30. Substituições de componentes da caixa multiplicadora para análise de vibrações

Na Tabela 9 encontram-se as substituições e as respetivas datas.

Os componentes analisados contemplam, veios de baixa velocidade (LSS), os estágios planetários 1 e 2, rolamentos no ascendente (*Up Wind-UW*) e rolamentos no descendente (*Down Wind-DW*), para todas as gamas de frequências de rotações, desde as mais baixas até as mais altas, ou seja, nas gamas de frequências de rotação compreendidas entre 51-61 Hz até 2480-3200 Hz. **Anexo B1** (Os níveis de vibrações antes e depois da substituição dos componentes da caixa multiplicadora).

Tabela 9. Substituições da caixa multiplicadora e os seus subcomponentes

Turbina	Componente substituído	Data da substituição
02	Caixa multiplicadora	17/02/20
04	3º estágio da Caixa multiplicadora	09/03/20
13	Caixa multiplicadora	29/06/19
18	Caixa multiplicadora	04/07/19
21	Caixa multiplicadora	05/11/20
24	Caixa multiplicadora	22/08/19
28	Caixa multiplicadora	04/03/21
32	Caixa multiplicadora	23/06/19
36	Caixa multiplicadora	11/07/19
37	3º estágio da Caixa multiplicadora	09/01/20
38	Caixa multiplicadora	18/07/19

Com os dados dos níveis de vibração de caixa multiplicadora e seus componentes, Figura 31, foram construídos gráficos de dispersão, Figura 32, com o objetivo de se compreender a correlação entre nível de vibrações no antes e depois da substituição

1	Valores em m/s ²			LSS													
	2	3	4	51-61 Hz		63-74 Hz		76-136 Hz		140-274 Hz		278-408 Hz		420-810 Hz		830-1640 Hz	
5				6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Turbina	Componente substituído	Data da substituição	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
4	2	Gearbox	17/02/20	0.0017	0.00155	0.00222	0.00157	0.0032	0.00276	0.00688	0.00505	0.01007	0.00648	0.01549	0.01807	0.02298	0.02612
5	4	3º estágio da gearbox	09/03/20	0.00123	0.00141	0.00154	0.00178	0.00331	0.00369	0.00323	0.00627	0.00695	0.00912	0.01751	0.0187	0.0205	0.03958
6	13	Gearbox	29/06/19	0.00186	0.00123	0.00247	0.00169	0.00357	0.00334	0.01109	0.0059	0.00583	0.00763	0.02444	0.01801	0.04194	0.01975
7	18	Gearbox	04/07/19	0.00121	0.00103	0.00148	0.00176	0.00476	0.00371	0.00776	0.00593	0.0073	0.00426	0.0139	0.01212	0.04101	0.01972
8	21	Gearbox	05/11/20	0.00195	0.00157	0.01345	0.00157	0.01566	0.00406	0.03041	0.00623	0.02079	0.00622	0.03975	0.01865	0.06821	0.05037
9	24	Gearbox	22/08/19	0.00355	0.00145	0.00308	0.00165	0.00531	0.00436	0.00955	0.00958	0.00845	0.00935	0.02389	0.01927	0.06367	0.03624
10	28	Gearbox	04/03/21	0.00172	0.00139	0.00134	0.00147	0.00333	0.00403	0.00614	0.00584	0.00557	0.0046	0.01541	0.01208	0.02597	0.02056
11	32	Gearbox	23/06/19	0.00266	0.00212	0.00752	0.00202	0.00495	0.0037	0.01644	0.00675	0.03026	0.00619	0.07426	0.01205	0.07322	0.01983
12	36	Gearbox	11/07/19	N/A													
13	37	3º estágio da gearbox	09/01/20	0.00211	0.0017	0.00228	0.00153	0.00444	0.00442	0.00879	0.00581	0.00785	0.00517	0.02585	0.01643	0.03485	0.03185
14	38	Gearbox	18/07/19	N/A													

Figura 31. Exemplo de dados de níveis de vibrações de componentes da caixa multiplicadora (Exception Report, 2022)

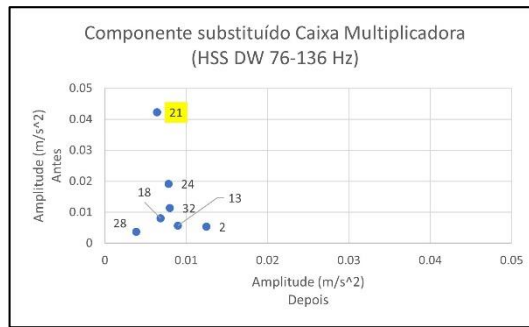


Figura 32. Exemplo de gráfico de dispersão para LSS

3.2.4.2 Análise de Vibrações dos Componentes do Gerador

Para os geradores, a análise de vibrações foi feita antes e depois de substituições dos rolamentos DE, NDE dos geradores, bem como, dos próprios geradores, Em primeiro lugar filtraram-se os dados dos rolamentos DE e NDE, bem como, dados relacionados com os geradores, Figura 33.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Valores em m/s ²			Gen DE					
2				60-1800 Hz		1800-3200 Hz		Pk-pk	
3	Turbina	Componente substituído	Data da substituição	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
4	1	DE bearing	06/04/20	0.02076	0.00963	0.03689	0.00089	53.95359	6.0408
5		DE bearing	23/12/21	0.08491	0.00515	0.06205	0.01136	101.0621	8.55976
6		NDE bearing	12/06/19	-	-	-	-	-	-
7	2	DE bearing	03/12/19	0.22021	0.01226	0.06512	0.00573	96.28147	6.94001
8		NDE bearing	04/12/19	0.22022	0.01227	0.06512	0.00573	96.28147	6.94001
9		NDE bearing	26/10/23	-	-	-	-	-	-
10	3	DE bearing	29/10/19	0.01602	0.01445	0.00951	0.01538	21.00382	16.83475
11		NDE bearing	28/10/19	-	-	-	-	-	-
12	4	DE bearing	24/02/23	0.02002	0.00356	0.00972	0.01134	24.21517	9.53444

Figura 33. Exemplo de dados de níveis de vibrações DE (Exception Report, 2022)

Para uma visualização das substituições produziu-se um gráfico em histograma, Figura 34, Figura 35 e Figura 36, facilitando a identificação das datas e de número de vezes em que cada um destes componentes foi substituído.

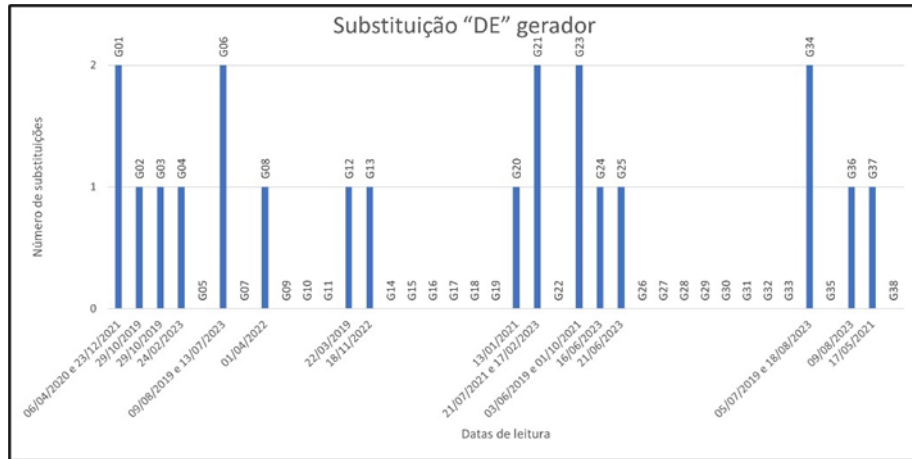


Figura 34. Datas e o número de vezes das substituições de rolamento DE dos geradores

O histograma a baixo mostra as datas e o número de vezes das substituições de rolamento NDE dos geradores, entre 2019 e 2023, Figura 35.

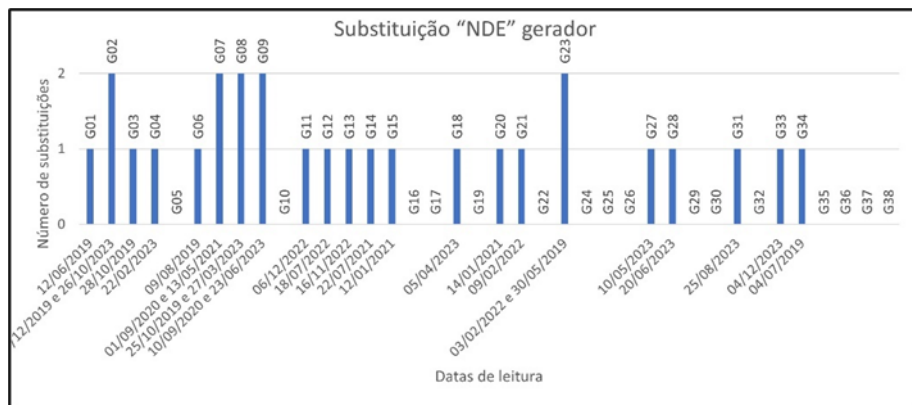


Figura 35. Datas e o número de vezes das substituições de rolamento NDE dos geradores

O histograma a baixo mostra as datas e o número de vezes das substituições dos geradores, entre 2019 e 2023, Figura 36.

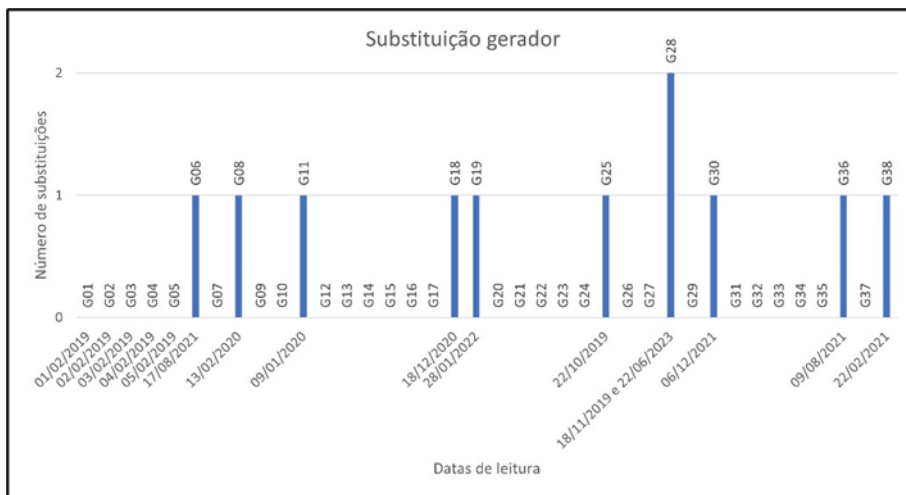


Figura 36. Datas e o número de vezes das substituições dos geradores

3.2.5 ANÁLISE DE ÓLEOS ANTES E DEPOIS DE SUBSTITUIÇÕES DAS CAIXAS MULTIPLICADORAS

O estudo dos óleos lubrificantes teve início com a análise do número de substituições de caixas multiplicadores e 3º estágio, durante o período de estudo, Figura 37.

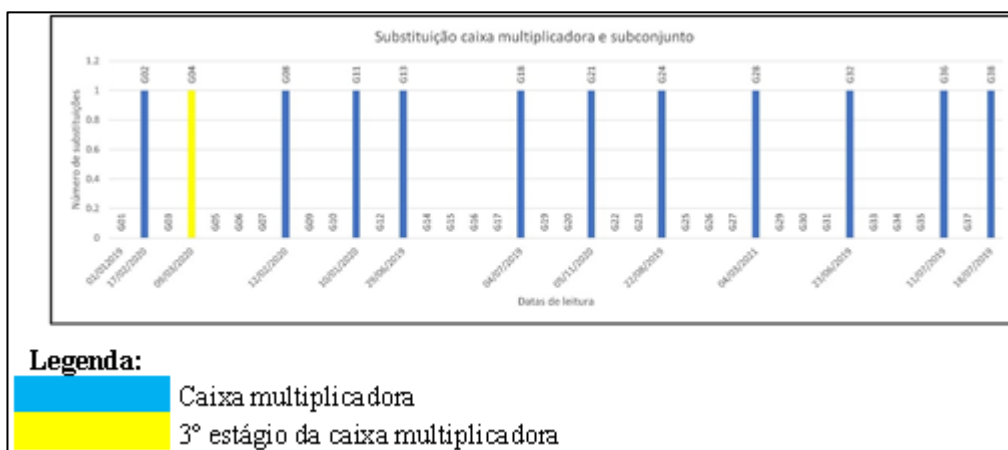


Figura 37. Substituições de componentes da caixa multiplicadora para análise de óleos

Com a informação apresentada na Figura 37, recorreu-se aos relatórios de análise laboratorial de óleos fornecidos pela empresa *Oelcheck Anexo A* (Condições do óleo), cujos mesmos indicam de forma clara, para cada amostra analisada, os resultados relativos à marca do óleo utilizado, condições do óleo (viscosidade, índice de viscosidade, número total de acidez-TAN, teor conteúdo de água, oxidação, etc.), nível de contaminação (boro, potássio, silício, etc.),

elementos de desgaste (cromo, estanho, molibdênio, cobre, ferro, etc.) bem como o nível de limpeza dos óleos (partículas de tamanhos: $\geq 4 \mu\text{m}$, $\geq 6 \mu\text{m}$ e $\geq 14 \mu\text{m}$).

3.2.5.1 A Condição do Óleo das Caixas Multiplicadoras

3.2.5.1.1 Oxidação

No que respeita a análise de óleos, primeiro analisou-se o nível de oxidação do óleo, obedecendo às normas recomendadas por diferentes autores.

Segundo (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021), o nível normal de oxidação deve ser inferior a 1 abs/cm, sendo que a partir de valores superiores ou iguais a 5 abs/cm estaremos em situação de alerta e quando o teor de oxidação alcançar os valores maiores ou iguais a 10 abs/cm a substituição do mesmo é aconselhada..

A partir dos dados fornecidos e com base no conhecimento sobre os valores máximos admissíveis do nível de oxidação, produziu-se o histograma que facilita a identificação do estado de oxidação do óleo (normal ou atenção), Figura 38.

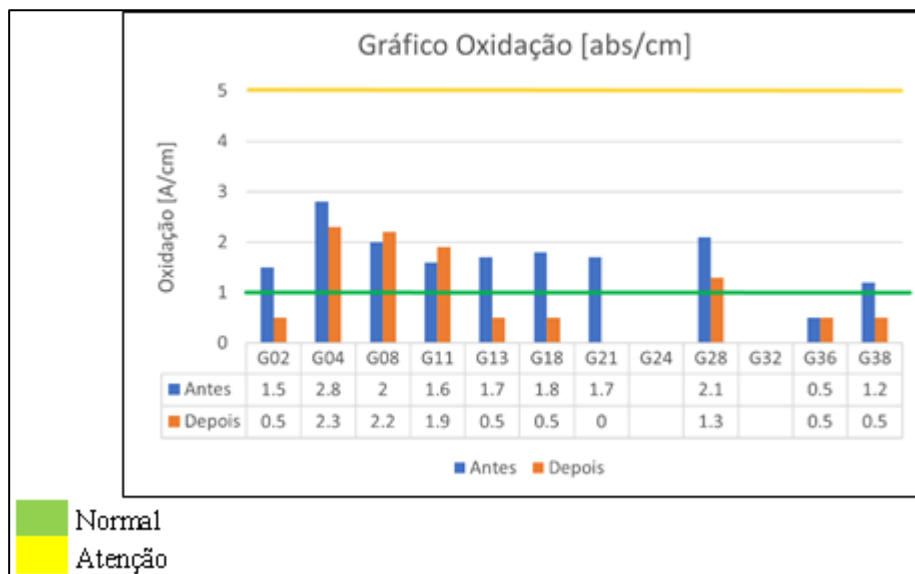


Figura 38. Estado de oxidação do óleo antes e depois das substituições dos componentes das caixas multiplicadoras

Com as informações lidas no histograma da Figura 38 e com os dados do **Anexo A** (Condições do óleo) foi possível fazer uma análise profunda sobre o nível de oxidação de todas as turbinas cujas suas caixas multiplicadoras foram substituídas, e com os resultados obtidos produziu-se

o **Apêndice A1** (Oxidação), que mostra o teor de oxidação no antes e no depois das substituições, bem como a data em que foi feita a substituição das caixas multiplicadoras.

Por exemplo, o óleo da caixa multiplicadora da turbina 21, cerca de 7 meses antes da sua substituição apresenta um nível de oxidação acima do valor normal, tendo se tornando nulo cerca de 7 meses depois da substituição da mesma, Figura 39.

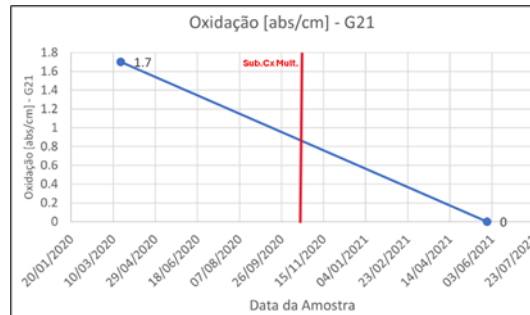


Figura 39. O estado de oxidação antes e depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 21

3.2.5.1.2 Viscosidade do óleo

A viscosidade, é uma das propriedades relevantes na seleção do tipo de óleo a ser utilizado, em particular na caixa multiplicadora. A análise de viscosidade do óleo lubrificante das caixas multiplicadoras foi feita para a temperatura de 40°C e 100°C.

É importante cumprir as recomendações do fabricante, seja no tipo do óleo a utilizar, bem como, o tempo máximo para a substituição do mesmo. O lubrificante deve ser viscoso o suficiente para proteger as peças do desgaste, contudo, não deve ser espesso ao ponto de dificultar o movimento dos componentes a lubrificar.

Um dos fatores que contribui para o aumento da viscosidade do óleo é a sua contaminação por substâncias como *grease*, ou por outro óleo com a viscosidade acima da do que está a ser utilizado no sistema, ao contrário disso, se o óleo for contaminado por fluido com menor viscosidade, como é o caso de agente frigorígenos ou por outro óleo com viscosidade a baixo do óleo em uso, a sua viscosidade reduz (Zou et al., 2023).

A viscosidade dos líquidos reduz com o aumento da temperatura, se a temperatura for muito elevada, pode correr o risco de reduzir a viscosidade a níveis não aceitáveis para garantir uma boa lubrificação. Com a redução da viscosidade, o lubrificante passa enfrentar dificuldades de aderir as superfícies dos componentes como rolamentos que giram em altas velocidades de rotação gerando elevadas forças centrífugas e consequente deficiência na lubrificação (Peng et al., 2022).

(Zou et al., 2023) e (Coronado & Wenske, 2018), afirmam que por questões de precaução, a viscosidade de óleo lubrificante utilizado em turbinas eólicas deve estar dentro dos limites de $\pm 10\%$ da viscosidade recomendada pelo fabricante. Se a viscosidade do óleo alcançar $\pm 15\%$ do valor teórico, a caixa multiplicadora estará em risco iminente a perigo (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021).

A partir das informações existentes em **Anexo A** (Condições do óleo), foi possível encontrar catálogos das 3 marcas de óleos utilizados, Figura 40 a, b e c, com as características típicas, como a viscosidade a 40°C, viscosidade a 100°C e o índice de viscosidade, dos óleos lubrificantes utilizados nas caixas multiplicadoras das turbinas em estudo.

Typical properties*		Castrol		Typical properties			
Mobilgear SHC XMP Series	320	Optigear Synthetic CT Synthetic Gear Oil	Typical Characteristics		Properties	Unit	Plurasafe GL Plus 320
ISO Viscosity Grade	320		Name		Viscosity at 40 °C	mm ² /s	310
Viscosity, ASTM D 445			ISO Viscosity Grade		Viscosity at 100 °C	mm ² /s	55.8
cSt @ 40°C	335		Appearance		Viscosity index	-	247
cSt @ 100°C	38.3	Density @ 15°C / 59°F		Pour point	°C	-39	
Viscosity Index, ASTM D 2270	164	Kinematic Viscosity @ 40°C / 104°F		Flash point (COC)	°C	282	
		Kinematic Viscosity @ 100°C / 212°F		Density at 15 °C	g/cm ³	1.058	
				FZG A/8,3/90	FLS	> 12	

Figura 40. As 3 marcas de óleos lubrificantes utilizadas: a) MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320 (MOBIL, 2024); b) CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320 (CASTROL, 2024) e c) PLURASAFE GL PLUS 320 (Plurasafe® & Plus, 2024)

3.2.5.1.2.1 Limites de Viscosidade a 100°C

De acordo com a informação que consta em **Anexo A** (Os relatórios sobre óleos) fornecidos pela empresa *VentientEnergy* utilizaram-se 3 tipos de óleos sintéticos cujas marcas encontram-se apresentadas na Tabela 10.

As marcas dos 3 óleos que foram utilizados estão apresentados por cores, onde a cor azul representa o óleo da MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320, a verde representa o óleo da CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320 e a amarela representa o da PLURASAFE GL PLUS 320.

Tabela 10. Tipo de óleos utilizados e limites de viscosidade a 100°C

Viscosidade 100°C [mm²/s]			
Tipo de Óleo	Atenção		
	Limite inferior	Condição nominal	Limite Superior
MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320	34	38	42
CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320	36	40	44
PLURASAFE GL PLUS 320	50	56	61
	Alarme		
	Limite inferior	Condição nominal	Limite Superior
MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320	33	38	44
CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320	34	40	46
PLURASAFE GL PLUS 320	47	56	64

A partir da informação apresentada na Tabela 10 e com base nos dados dos relatórios das amostras analisadas no laboratório da empresa *Oelcheck*, foi possível produzir o histograma do apresentado na Figura 41, que mostra os limites de viscosidade a uma temperatura de 100°C, bem como as marcas dos óleos utilizados antes e depois da substituição dos componentes das multiplicadoras.

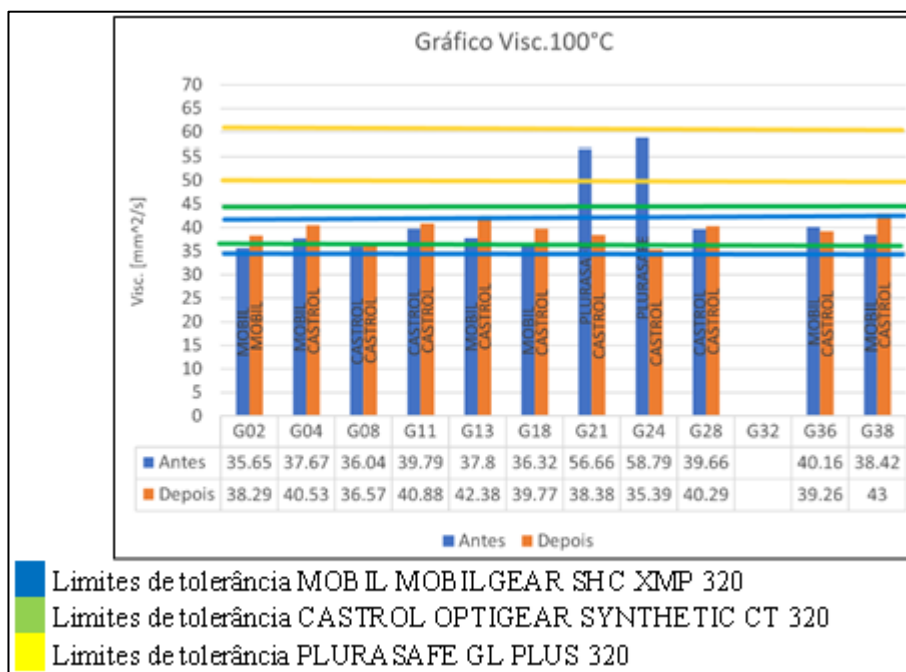


Figura 41. Limites de viscosidade a uma temperatura de 100°C

Através das informações lidas no histograma foi possível fazer uma análise mais detalhada acerca da viscosidade do óleo a uma temperatura de 100°C. Com os resultados obtidos produziu-se os gráficos do **Apêndice A2** (Viscosidade do óleo a 100°C), que mostra os valores de viscosidade no antes e no depois das substituições, bem como a data em que foi feita a substituição dos componentes das caixas multiplicadoras.

Por exemplo, a caixa multiplicadora da turbina 24 trabalhou com dois tipos de óleo, antes da sua substituição utilizava o óleo da *Plurasafe* e nessa altura a viscosidade do óleo encontrava-se dentro dos limites normais, mas depois da sua substituição, passou a funcionar com o óleo da Castrol, que passou a estar ligeiramente abaixo do limite normal, Figura 42.

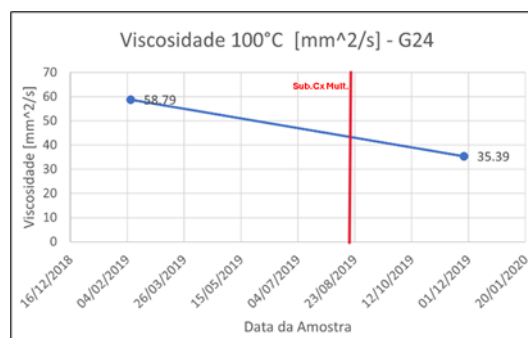


Figura 42. Viscosidade a 100°C, antes e depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 24

3.2.5.1.2.2 Limites de Viscosidade a 40°C

A analogia que se aplicou para análise de viscosidade à temperatura de 100°C, foi a mesma que foi utilizada para a temperatura 40°C.

As cores apresentadas na Tabela 11, destacam as marcas de óleos que foram utilizados, sendo que a cor azul representa o óleo da MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320 e o da CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320, por possuírem as mesmas viscosidades e por fim, a amarela representa o da PLURASAFE GL PLUS 320.

Tabela 11. Tipo de óleos utilizados e limites de viscosidade a 40°C

Viscosidade 40°C [mm ² /s]			
Tipo de Óleo	Atenção		
	Limite inferior	Condição nominal	Limite Superior
MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320	302	335	369
CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320	302	335	369
PLURASAFE GL PLUS 320	279	310	341
	Alarme		
	Limite inferior	Condição nominal	Limite Superior
MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320	285	335	385
CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320	285	335	385
PLURASAFE GL PLUS 320	264	310	357

A partir da informação apresentada na Tabela 11 e com base nos dados lidos dos relatórios das amostras analisadas no laboratório da empresa *Oelcheck Anexo A* (Os relatórios sobre óleos), foi possível produziu-se o histograma da Figura 43, que mostra os limites de viscosidade à temperatura de 40°C, para cada marca do óleo utilizado antes e depois da substituição dos componentes das caixas multiplicadoras.

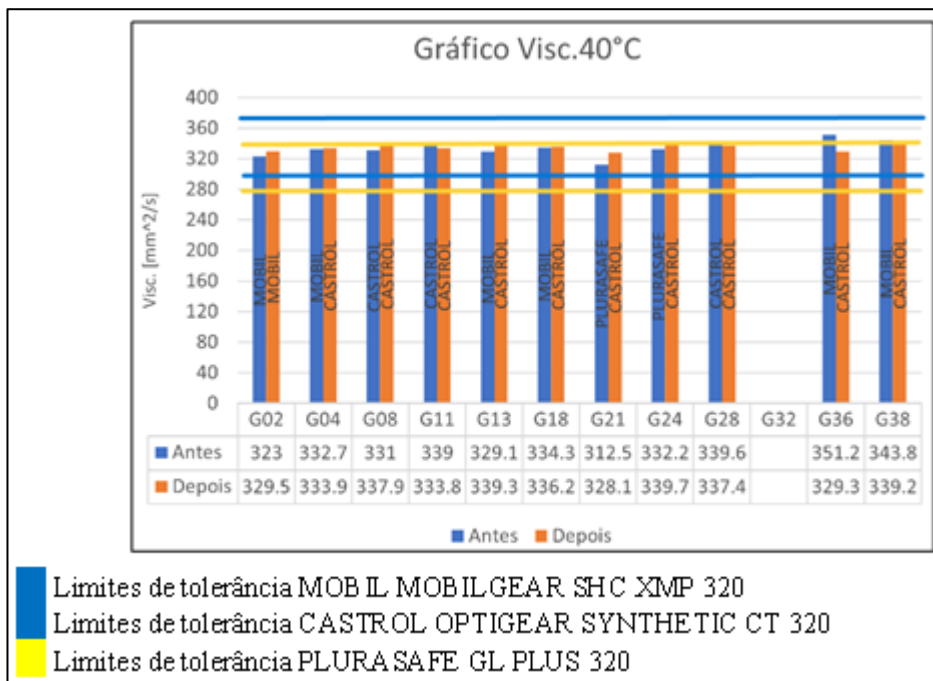


Figura 43. Limites de viscosidade a uma temperatura de 40°C

Através das informações lidas no histograma da Figura 43, e com base nos dados do **anexos A** (Os relatórios sobre óleos) foi possível fazer uma análise profunda acerca da viscosidade do óleo à 40°C, e com os resultados obtidos produziu-se os gráficos do **Apêndice A3** (Viscosidade do óleo a 40°C), que mostra os valores de viscosidade no antes e no depois das substituições, bem como a data em que os componentes das caixas multiplicadoras.

3.2.5.1.3 Índice de viscosidade

O índice de viscosidade de óleo é um parâmetro que exprime o nível de sensibilidade da viscosidade do óleo em relação a variação de temperatura. Importa referir que quando maior for o índice de viscosidade, menor é a variação da viscosidade quando o óleo estiver sujeito a temperaturas diferentes, ou seja, possuem uma boa estabilidade térmica, essa vantagem é mais notável nos óleos sintéticos do que nos minerais o que os torna relativamente mais onerosos. Contudo, os fabricantes de turbinas eólicas recomendam a utilização dos óleos sintéticos para a lubrificação das caixas multiplicadoras, devendo serem obedecidos os requisitos da norma DIN 51517-3, que dita os requisitos mínimos que os óleos utilizados em turbinas eólicas devem possuir (Coronado & Wenske, 2018) e (Kr Singh et al., 2020), a utilização de óleos que não satisfazem os requisitos exigidos pode causar danos enormes comprometendo a produção de energia.

Segundo (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021), por questões de segurança os limites de tolerância para o índice de viscosidade devem ser de $\pm 10\%$ do valor correspondente a óleo novo, os valores de $\pm 15\%$ do valor teórico, representam perigo iminente.

Os óleos das caixas multiplicadoras utilizadas pela empresa *VentientEnergy* possuem os índices de viscosidade apresentados na Tabela 12.

As cores apresentadas na Tabela 12, distinguem as marcas de óleos que foram utilizados, sendo que a cor azul representa o óleo da MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320, a cor verde representa o óleo da CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320 e a amarela representa o da PLURASAFE GL PLUS 320.

Tabela 12. Tipo de óleos utilizados e os seus limites de índice de viscosidade

Índice de Viscosidade			
Tipo de Óleo	Atenção		
	Limite inferior	Condição nominal	Limite Superior
MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320	148	164	180
CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320	155	172	189
PLURASAFE GL PLUS 320	222	247	272
Alarme			
	Limite inferior	Condição nominal	Limite Superior
MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320	139	164	189
CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320	146	172	198
PLURASAFE GL PLUS 320	210	247	284

Com base nos dados apresentados na Tabela 12 e juntamente com a informação lida dos relatórios das amostras analisadas no laboratório da empresa *Oelcheck*, **anexo A** (Os relatórios sobre óleos), foi possível produzir o histograma da Figura 44 que mostra os valores limites do índice de viscosidade dos óleos utilizados antes e depois da substituição dos componentes das caixas multiplicadoras.

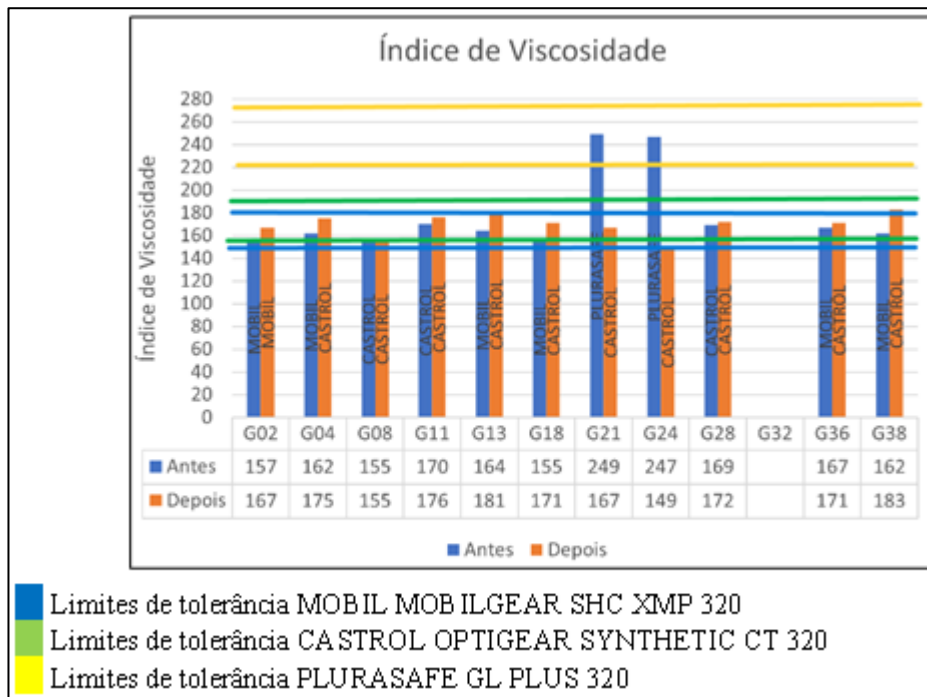


Figura 44. Limites de índice de viscosidade dos óleos

Através das informações lidas no histograma da Figura 44, e com base nos dados do **anexo A** (Os relatórios sobre óleos) foi possível fazer uma análise profunda acerca do índice de viscosidade do óleo no antes e no depois das substituições dos componentes da caixa multiplicadora e com os resultados obtidos produziu-se o **Apêndice A4** (Índice de viscosidade), que mostra os valores de viscosidade no antes e no depois das substituições, bem como a data da substituição do componente.

Por exemplo, a partir do gráfico da Figura 45, pode se ver que a primeira amostra do óleo da caixa multiplicadora da turbina 24 foi analisada cerca de 6 meses antes da sua substituição e voltou a ser analisada cerca de 3 meses depois da sua substituição.

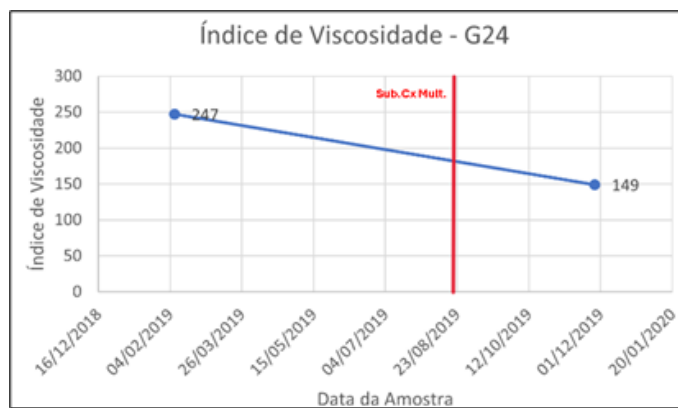


Figura 45. Índice de viscosidade do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 24

3.2.5.1.4 Número Total de Acidez (TAN)

O TAN é o parâmetro que indica o nível de acidez que o óleo apresenta, ou seja, indica o volume dos compostos alcalinos necessários para neutralizar o ácido contido em cada grama de amostra do óleo, sendo que os seus valores são dados mg KOH/g.

O ácido contido no óleo lubrificante é resultante do desgaste dos seus aditivos (anticorrosivo e antioxidantes) que se verifica ao longo do tempo, portanto o teor desse ácido deve ser limitado de modo que não possa causar a corrosão dos componentes e a consequente redução da vida útil dos mesmos (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021) e (Coronado & Wenske, 2018).

Segundo autores (Zou et al., 2023), o TAN ao longo do funcionamento não deve estar acima de 2 mg KOH/g conforme as experiências da indústria de energia eólica e de testes de oxidação.

A análise do TAN foi feita com base na informação lida dos relatórios das amostras fornecidas pela empresa *Oelcheck* e as datas de substituição dos componentes, produziu-se o histograma da Figura 46.

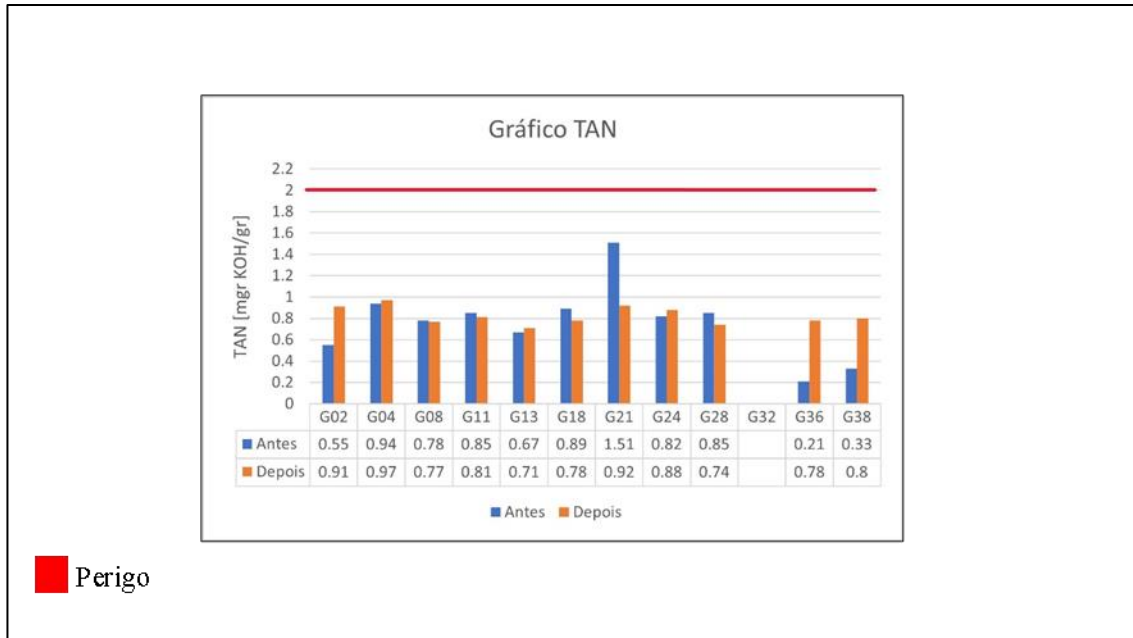


Figura 46. TAN antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras

A partir do histograma da Figura 46, é possível ver o nível do TAN encontrava-se dentro do valor recomendado, antes e depois da substituição dos componentes das caixas multiplicadoras.

3.2.5.2 Aditivos no Óleo

Segundo (Coronado & Wenske, 2018), os aditivos que são utilizados em óleos de caixas multiplicadoras de turbinas eólicas são os de limpeza, antioxidantes, anti desgastantes, aditivos de pressão, antiespumantes, e aditivos de proteção contra corrosão, cada um deles representa um papel importante na manutenção das propriedades do óleo.

Os antioxidantes impedem o alastramento da oxidação do óleo lubrificante devido aos efeitos do oxigênio e das temperaturas elevadas, protegendo as partes das peças contra a corrosão, como exemplo desse tipo de aditivos, pode se mencionar o molibdênio, o zinco, enxofre e fósforo (Coronado & Wenske, 2018).

Aditivos anti desgaste e de pressão são responsáveis por proteger as partes das peças contra atrito causado por contato e pressão entre as superfícies e normalmente utiliza-se enxofre e

fósforo para esse propósito. Aditivos antiespumantes também são amplamente utilizados nas caixas multiplicadoras de turbinas eólicas, sendo o silício o composto que se destaca para esta finalidade, por outro lado, os aditivos anti corrosão, como o nome já diz, esses aditivos impedem ações agressivas causadas pela presença de humidade e ácidos, inibindo o aparecimento da corrosão (Coronado & Wenske, 2018).

Os autores (Del Álamo et al., 2020), afirmam que os principais elementos a se ter em conta na análise de óleo de uma caixa multiplicadora são: bário, cálcio, magnésio, molibdénio, fósforo e zinco. Todos os esses elementos serão analisados no presente estudo, com a exceção de bário. O bário não será analisado, por não haver informações do mesmo nas amostras do óleo do **anexo A** (Os relatórios sobre óleos), fornecidas pela empresa.

A depleção dos aditivos contidos em óleos lubrificantes das caixas multiplicadoras de turbinas eólicas pode significar a redução da capacidade do óleo em proteger os componentes como rolamentos e engrenagens (Del Álamo et al., 2020).

3.2.5.2.1 Cálcio

O cálcio é um dos aditivos que se encontram nos óleos sintéticos utilizados para a lubrificação das caixas multiplicadoras das turbinas eólicas, esse elemento serve como um detergente, constituindo um filme protetor que auxilia na remoção de produtos que aceleram o processo de envelhecimento, evitando as fissuras nas superfícies dos componentes (Coronado & Wenske, 2018) e (Richardson et al., 2019).

Com base em relatórios laboratoriais fornecidos pela empresa do **anexo A** (Os relatórios sobre óleos), produziu-se histograma Figura 47, que mostra de uma forma clara sobre a concentração do cálcio nos óleos, seja no antes como no depois das substituições dos componentes das caixas multiplicadoras.

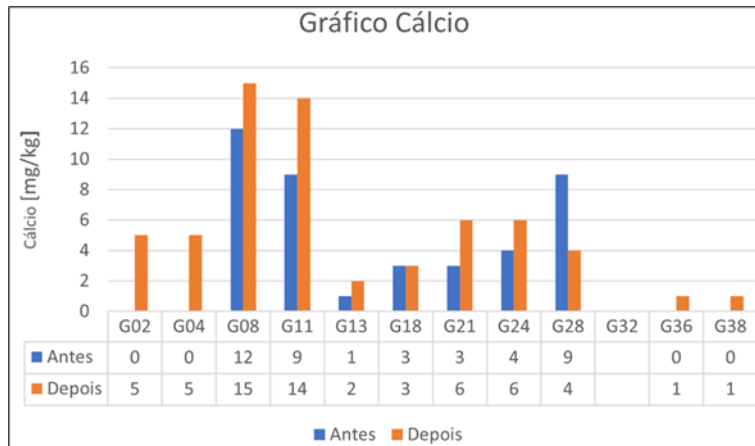


Figura 47. Concentração do cálcio no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras

Com a informação do histograma da Figura 47, foi possível dar detalhes sobre os valores do cálcio, antes e depois das substituições, como se pode ver nos gráficos do **apêndice B1** (Cálcio).

Por exemplo, a partir do gráfico, Figura 48 é possível ver que o nível de cálcio no óleo da caixa multiplicadora 02 foi analisado cerca de 12 meses antes e voltou a ser analisado cerca de 4 meses depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 02.

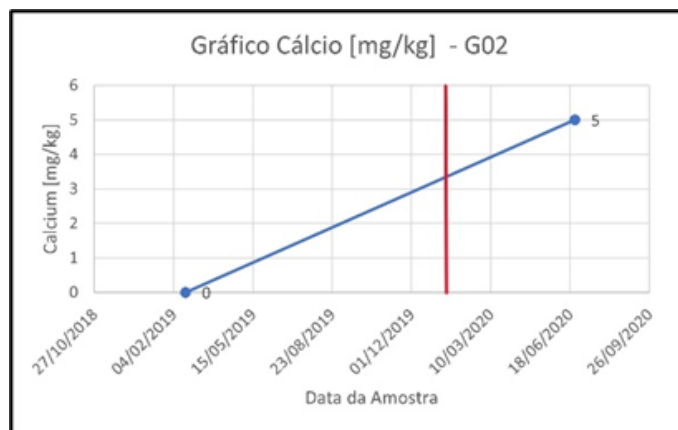


Figura 48. Concentração do cálcio no óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora 02

3.2.5.2.2 Magnésio

O magnésio assim como o cálcio e o bário são os agentes de limpeza, sendo importantes na manutenção dos níveis de acidez nos lubrificantes.

Para os aditivos como o magnésio, molibdênio, fósforo, zinco, boro e enxofre, não foram encontradas as informações que especifica sobre as concentrações recomendadas de estes elementos no óleo.

A partir da análise feita pode-se afirmar que os óleos de todas as caixas multiplicadoras apresentaram os valores de concentração de magnésio iguais a zero, antes assim como depois da substituição das caixas multiplicadoras, com a exceção da turbina 24.

A amostra do óleo da turbina 24 foi analisada cerca de 6 meses antes da substituição da caixa multiplicadora e voltou a ser analisada cerca de 3 mês depois da substituição da caixa multiplicadora, Figura 49. Antes da substituição da caixa multiplicadora, o óleo apresentava alguma concentração de magnésio, mas depois passou a ser nula.

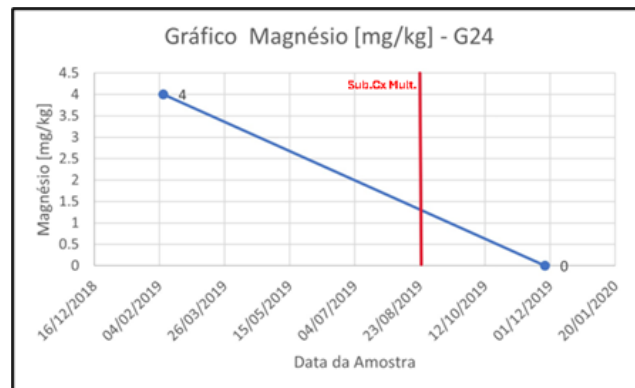


Figura 49. Concentração do magnésio no óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora 24

3.2.5.2.3 Molibdênio

Com a redução do teor de molibdênio no lubrificante pode acelerar o nível do desgaste da superfície dos dentes das engrenagens (Zou et al., 2023).

Do estudo feito, foi possível ver que apenas as caixas multiplicadoras das turbinas 18 e 24 apresentaram algumas partículas de molibdênio, como se pode ver no **Apêndice B2** (magnésio, molibdênio e boro).

3.2.5.2.4 Fósforo

O fósforo faz parte dos aditivos anti desgaste e de pressão, protegendo assim as partes das peças sujeitas a fricção (Coronado & Wenske, 2018).

A partir dos relatórios laboratoriais fornecidos pela empresa dos **anexo A** (Os relatórios sobre óleos) produziu-se histograma, Figura 50, no qual encontram-se apresentadas as concentrações do fósforo nos óleos lubrificantes, seja no antes como no depois das substituições dos componentes das caixas multiplicadoras.

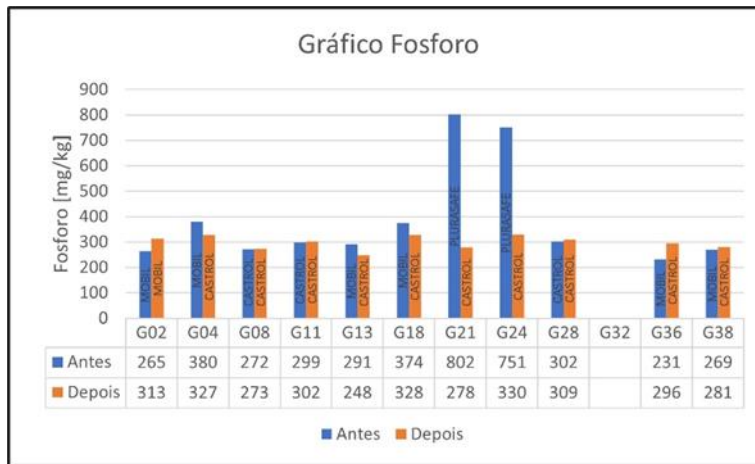


Figura 50. Concentração do fósforo no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras

Com base na leitura do histograma da Figura 50, foi possível produzir os gráficos do **apêndice B3** (Fósforo), que mostra como esse elemento se encontrava em função das datas de leitura.

3.2.5.2.5 Zinco

O zinco é um dos aditivos utilizados em lubrificantes de caixas multiplicadoras de turbinas eólicas, este aditivo atua como um antioxidante, evitando a degradação do óleo bem como o desgaste das peças (Coronado & Wenske, 2018).

Com uma análise de dados dos relatórios laboratoriais do **anexo A** (Os relatórios sobre óleos), produziu-se o histograma da Figura 51, no qual se pode afirmar que o óleo lubrificante de todas as caixas multiplicadoras das turbinas eólicas apresentou maior conteúdo de zinco antes de serem substituídas, com a exceção das turbinas 08 e 23, que antes das substituições apresentavam menores valores deste aditivo.



Figura 51. Concentração do zinco no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras

Com base na informação lida na Figura 51, foi possível produzir os gráficos apresentados no **apêndice B4** (Zinco), nos quais se pode ter a informação sobre o tempo em que esse aditivo foi analisado, antes e depois das substituições efetuadas.

3.2.5.2.6 Boro e enxofre

As informações sobre o boro e o enxofre foram obtidas a partir relatórios laboratoriais do **Anexo A** (Os relatórios sobre óleos), com os mesmos foi possível produzir os gráficos dos **apêndices B 2.3.** (Boro) e **apêndice B5** (Enxofre), respetivamente, que mostram exatamente os valores indicados para cada elemento antes e depois das substituições dos componentes das caixas multiplicadoras.

3.2.5.3 Contaminantes

A utilização do óleo contaminado pode comprometer o processo de lubrificação, sendo assim, é importante prestar atenção nos sensores de controlo, na integridade dos componentes lubrificados, bem como no funcionamento de todo o sistema de modo a evitar a perda de confiabilidade na produção de energia devido as falhas.

As partículas contaminantes do óleo podem estar associadas ao seu processo de armazenamento e manuseamento. Os principais contaminantes são fragmentos metálicos de diferentes tipos e tamanhos, como é o caso de ferro e cobre que originam do desgaste das peças, além das impurezas associadas a poeira que se encontra no ambiente ou devido a falta de medidas de higiene por parte dos operários da manutenção. Em alguns casos as partículas

entram no sistema de lubrificação no momento da substituição do óleo ou de elementos que fazem parte do sistema de lubrificação como é o caso de filtros.

Dos principais contaminantes analisados em óleos da caixa multiplicadora, destacam-se o boro, potássio, sódio e silício (Del Álamo et al., 2020).

Os relatórios das análises laboratoriais indicam que para o presente trabalho, o elemento que mais se revela é silício, sendo que os outros praticamente não sofreram alterações no antes e no depois das substituições das caixas multiplicadoras.

3.2.5.3.1 Silício

O silício é um elemento que além de se encontrar presente no óleo como contaminante, pode estar presente no óleo novo como aditivo atuando como um antiespumante, evitando a formação excessiva de bolhas, sendo que o seu nível de concentração deve estar dentro de limites recomendados (Coronado & Wenske, 2018).

Segundo (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021), o valor normal das partículas de silício não deve exceder 10 ppm sendo 20 ppm o valor de chamada de atenção e acima dos 20 ppm trata-se de perigo.

Com base nos dados lidos dos relatórios das amostras analisadas no laboratório da empresa *Oelcheck*, **anexo A** (Os relatórios sobre óleos), foi possível produzir o histograma da Figura 52, que mostra o limite normal e de perigo para o silício no óleo lubrificante, antes e depois da substituição dos componentes das caixas multiplicadoras. Por exemplo, a partir do histograma é possível ver que os lubrificantes utilizados nas turbinas 02, 13, 18 e 24 alcançaram os níveis de alerta.

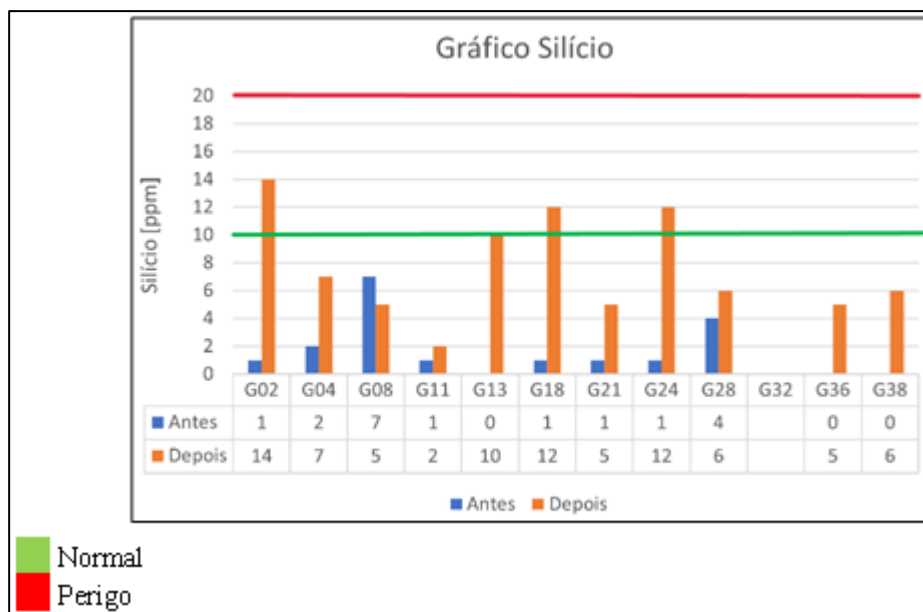


Figura 52. Concentração do silício no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras

Esta análise permitiu elaborar os gráficos do **apêndice C1** (Sílicio), que mostra o teor desse contaminante antes e depois da substituição dos componentes das caixas multiplicadoras.

3.2.5.3.2 Água

Segundo (Wang et al., 2023), uma das causas para a contaminação do óleo por água nas caixas multiplicadoras das turbinas eólicas se deve ao facto de operarem por muito tempo em condições adversas e uma das consequência é a deterioração dos componentes da caixa devido a corrosão.

De acordo com (Peng et al., 2022), quando as partículas resultantes do desgaste dos componentes se misturam com água criam uma resistência que pode levar a danos aos rolamentos.

Segundo (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021), o valor normal do teor da água no óleo lubrificante da caixa multiplicadora de uma turbina eólica deve se situar a baixo de 50 ppm sendo 200 ppm o valor de chamada de atenção e acima dos 400 ppm considerar o nível de perigo.

A partir da compilação dos dados reais fornecidos pela empresa *VentientEnergy*, **anexo A** (Os relatórios sobre óleos), e em conjunto com a informação obtida através de diferentes autores, foi possível traçar o histograma da Figura 53, no qual é possível ver que de modo geral o conteúdo de água antes das substituições das caixas multiplicadoras encontrava-se dentro do limite normal recomendando.

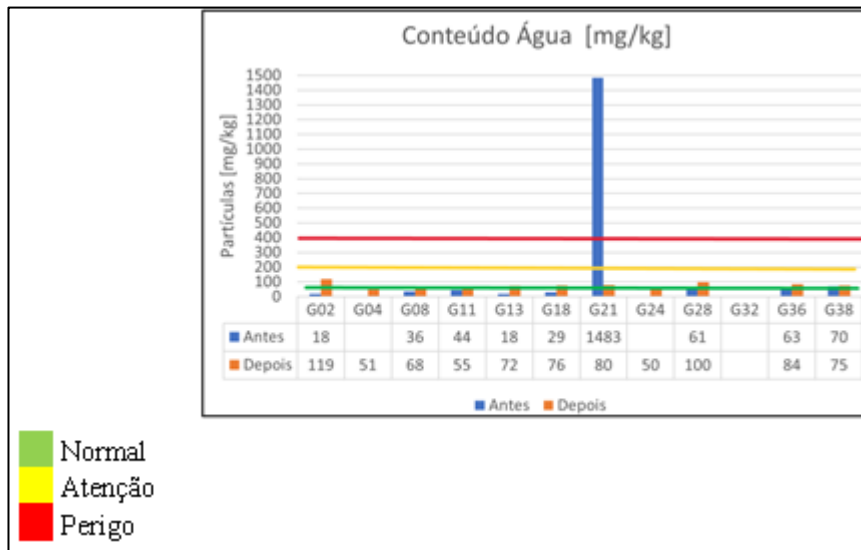


Figura 53. Conteúdo de água antes e depois das substituições dos componentes das caixas multiplicadoras

Os detalhes sobre o conteúdo de água presente nos óleos, seja antes como depois das substituições efetuadas encontra-se nos gráficos do **apêndice C2** (Água). Como exemplo, a partir do gráfico da Figura 53, é possível ver que cerca de 7 meses antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 21 o conteúdo de água encontrava-se com o valor muito alto, tendo reduzido significativamente depois da substituição da caixa multiplicadora.

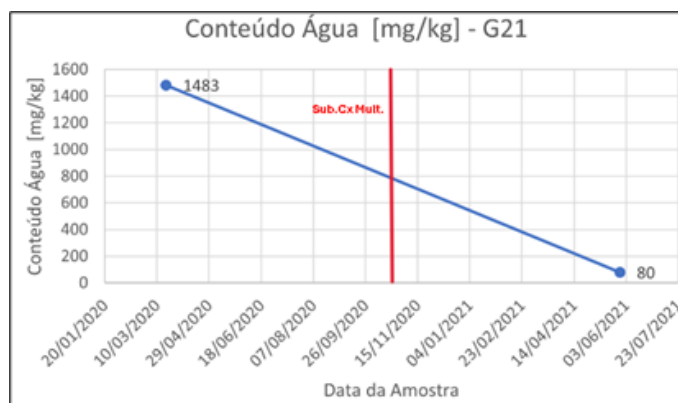


Figura 54. Conteúdo da água no óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora 21

3.2.5.3.3 Potássio e sódio

O potássio assim como o sódio, fazem parte dos contaminantes do óleo, não foram encontradas as informações sobre os limites máximos admissíveis para esses dois elementos.

De modo geral o nível de contaminação por potássio, assim como por sódio em óleos lubrificantes de todas as caixas multiplicadoras que foram substituídas apresentou valores muito baixos.

3.2.5.4 Os metais resultantes do desgaste

Segundo (Del Álamo et al., 2020), os principais elementos resultantes do desgaste são: alumínio, cromo, cobre, ferro, molibdênio, níquel, chumbo, estanho e prata.

O cobre e ferro são os elementos que mais se revelaram nesse estudo, os outros metais resultantes do desgaste apresentam valores muito baixo, alguns nem aparecem nas amostras estudadas.

3.2.5.4.1 Cobre

O cobre e ferro são os elementos que pode fornecer informação importante sobre o desgaste dos componentes da caixa multiplicadora (Coronado & Wenske, 2018) e (Zou et al., 2023).

Segundo (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021), o valor normal das partículas de cobre não deve exceder 10 ppm sendo 20 ppm o valor de chamada de atenção e acima dos 20 ppm trata-se de perigo.

A partir da informação existente nos relatórios, **anexo A** (Os relatórios sobre óleos), fornecidos pela empresa produziu-se o histograma da Figura 55, que permite com alguma facilidade identificar os valores que representam a quantidade de partículas deste elemento no óleo.

Por exemplo, é possível ver que a concentração de cobre nos lubrificantes utilizados nas caixas multiplicadoras das turbinas 02, 13, 36 e 38 atingiram valores alarmantes, antes das substituições das suas caixas multiplicadoras.

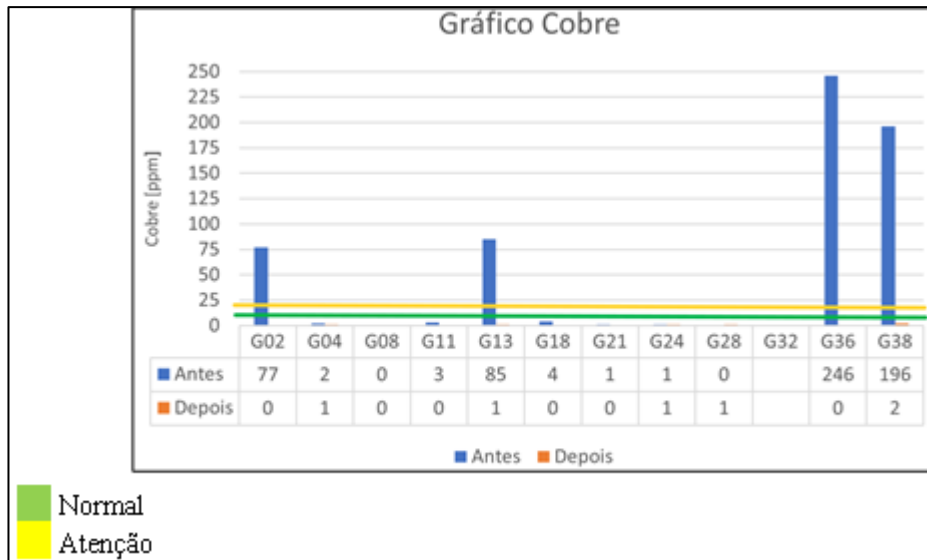


Figura 55. Concentração do cobre no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras

Com a informação da Figura 55, produziu-se o **Apêndice D1** (Cobre), em que cada gráfico nele existente mostra os valores bem como as datas, antes e depois das substituições efetuadas. Por exemplo, a partir do gráfico da Figura 56 no qual é possível ver que cerca de 11 meses antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 36, verificou-se que o nível de concentração de cobre na amostra do lubrificante encontrava-se num nível elevado, entretanto, cerca de 1 mês depois da substituição da caixa multiplicadora, o teor do cobre reduziu bastante.

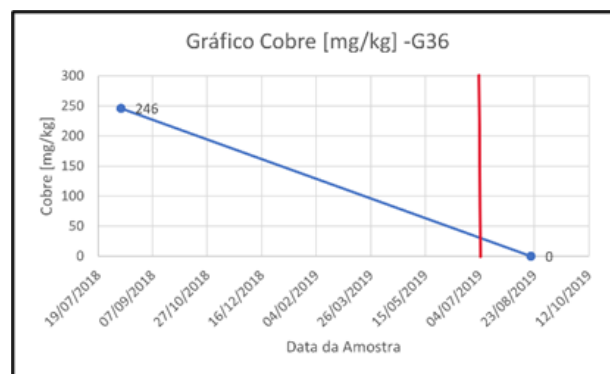


Figura 56. Concentração do cobre no óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora 36

3.2.5.4.2 Ferro

Segundo (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021), a concentração normal das partículas de ferro numa amostra de óleo utilizado na lubrificação das caixas multiplicadoras não deve

exceder 40 ppm e o nível de alerta é dado quando o teor de ferro alcançar os 60 ppm, sendo que acima deste valor estaremos numa situação de perigo.

Com os dados fornecidos nos relatórios do **anexo A** (Os relatórios sobre óleos), foi possível analisar esse elemento, através desta análise produziu-se o histograma da Figura 57, no qual se pode ver que nenhuma das turbinas funcionou com o óleo contendo o ferro acima do nível normal, contudo, verificou-se elevados valores desse elemento em óleos de das caixas multiplicadoras de algumas turbinas.

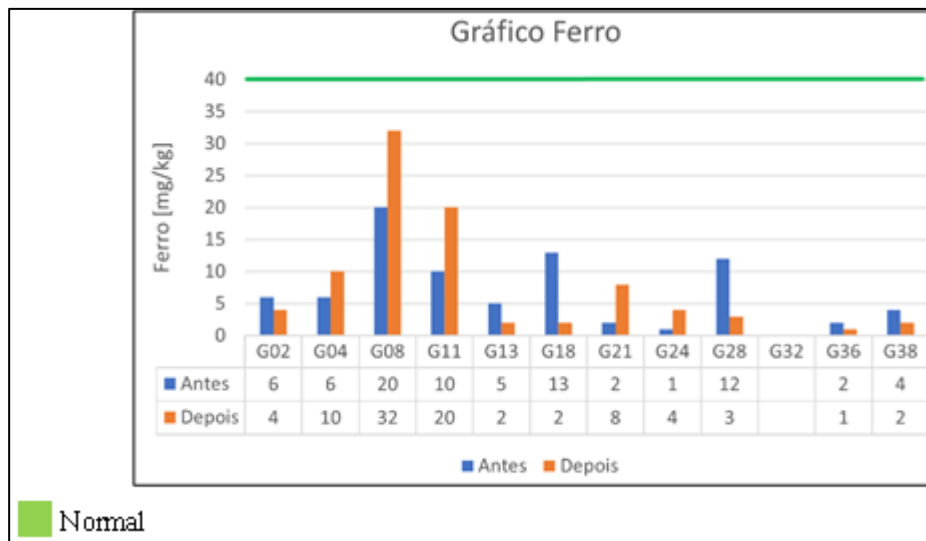


Figura 57. Concentração do ferro no óleo antes e depois das substituições das caixas multiplicadoras

A partir da informação da Figura 57, foram contruídos os gráficos do **Apêndice D2** (Ferro), que mostram os valores do conteúdo de ferro no antes, assim como no depois das substituições feitas e os tempos correspondentes.

3.2.5.4.3 Chumbo e alumínio

A concentração de chumbo e do alumínio apresentaram valores muito baixos nas amostras estudadas, como se pode ver no **Apêndice D3** (Alumínio e chumbo).

3.2.5.5 O Nível de Limpeza do Óleo

O aumento das partículas de metais ou sedimentos pode causar danos aos rolamentos e dentes das rodas dentadas e outros componentes que se encontram dentro da caixa multiplicadora (Del Álamo et al., 2020).

Segundo (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021), a contagem de número de partículas de 4, 6 e 14 micrometro deve ser feita de acordo com os três códigos que são: 17/15/12 (normal), 19/17/14 (atenção) e 20/18/15 (perigo).

As análises do nível de limpeza dos óleos utilizados no presente trabalho obedecem os três níveis de rigor (normal, atenção, perigo) de acordo com os autores (Jesús Terradillos & José Ignacio Ciria, 2021) as análises estão em conformidade com ISO 4406:1999, como se pode ver na Tabela 13.

Tabela 13. Os níveis de limpeza utilizados em função do código utilizado

Código	Normal	Atenção	Perigo
	17/15/12	19/17/14	20/18/15
$\geq 4 \mu\text{m}$	640-1300	2500-5000	5000-10000
$\geq 6 \mu\text{m}$	160-320	640-1300	1300-2500
$\geq 14 \mu\text{m}$	20-40	80-160	160-320

3.2.5.5.1 Partículas de tamanho $\geq 4 \mu\text{m}$

Com os dados dos relatórios do **Anexo A** (Os relatórios sobre óleos), fornecidos pela empresa, foi possível estudar o nível de limpeza nos óleos que foram utilizados.

Do histograma da Figura 58, obtido a partir da análise dos resultados laboratoriais, é possível ver que somente a turbina 28 apresentou o óleo lubrificante com as partículas maiores ou iguais a 4 micrometro dentro do limite normal recomendado, tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora.

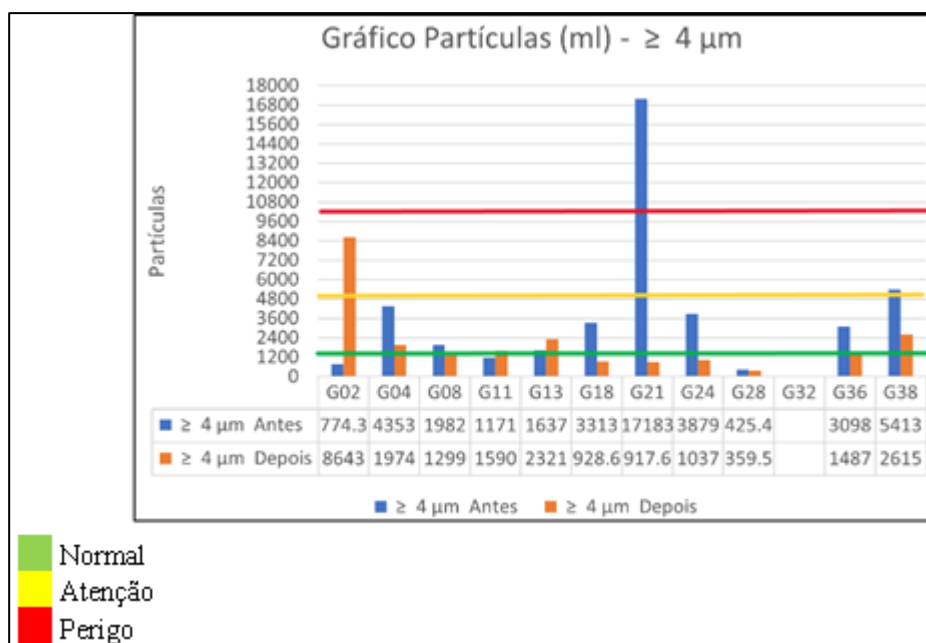


Figura 58. Partículas de tamanho $\geq 4 \mu\text{m}$ no óleo

Com a informação fornecida no histograma da Figura 58, foi possível produzir os gráficos do **Apêndice E1** (Partículas > 4 micron), que mostram os detalhes sobre o tempo no antes e no depois das substituições feitas, em relação a análise das partículas de tamanho superiores ou iguais a 4 micron no óleo lubrificante.

3.2.5.5.2 Partículas de tamanho $\geq 6 \mu\text{m}$

Com base nos resultados laboratoriais, produziu-se o histograma da Figura 59, no qual é possível ver que apenas o óleo lubrificante da turbina 28 apresentou partículas de tamanho de 6 micron dentro do limite normal recomendado, tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora.

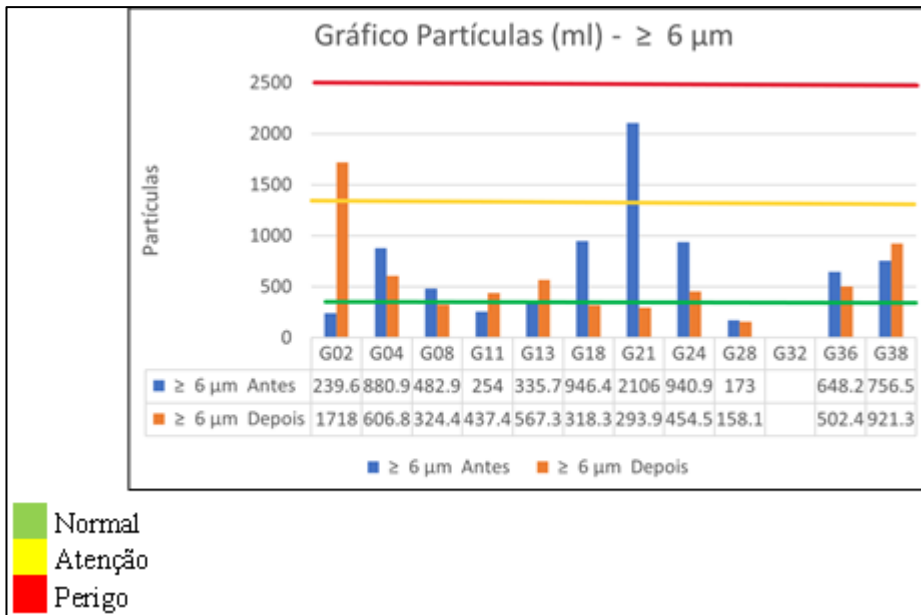


Figura 59. Partículas de tamanho $\geq 6 \mu\text{m}$ no óleo

A partir do histograma da Figura 59, foi possível produzir os gráficos do **Apêndice E2** (Partículas > 6 micron), que mostram os detalhes sobre o tempo no antes e no depois das substituições feitas, em relação a análise das partículas de tamanho superiores ou iguais a 6 micron no óleo lubrificante.

3.2.5.5.3 Partículas de tamanho $\geq 14 \mu\text{m}$

O histograma da Figura 60, foi obtido a partir da análise dos resultados laboratoriais, com o mesmo, é possível ver que os lubrificantes das turbinas 08, 11 e 28 são os únicos que apresentavam o nível de partículas superiores ou iguais a 14 micron dentro do limite normal recomendado, tanto no antes como no depois da substituição das caixas multiplicadoras.

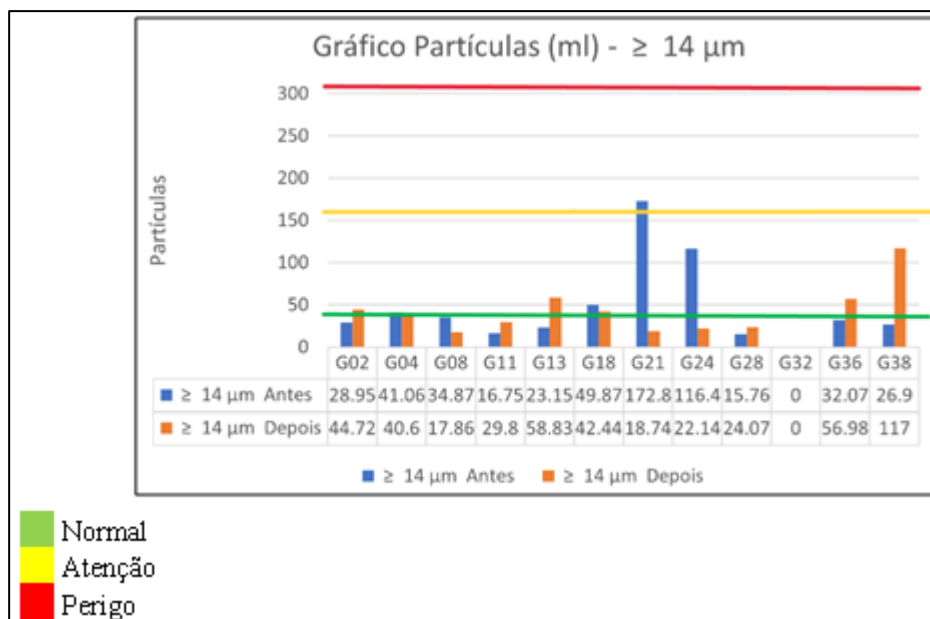


Figura 60. Partículas de tamanho $\geq 14 \mu\text{m}$ no óleo

Com a informação do histograma da Figura 60, foi possível produzir os gráficos do **Apêndice E3** (Partículas >14 micron), que mostram os detalhes sobre o tempo no antes e no depois das substituições feitas, em relação a análise das partículas de tamanho superiores ou iguais a 14 micron no óleo lubrificante.

3.2.6 ANÁLISE DE TEMPERATURA

A análise de temperatura foi feita para caixas multiplicadoras e seus componentes, bem como, para os geradores e seus componentes.

3.2.6.1 Análise de temperatura de óleos antes e depois da substituição das caixas multiplicadoras e dos seus componentes

Uma das causas para o aumento da temperatura de uma caixa multiplicadora, está relacionada com a força de atrito resultante do contato entre componentes em movimento como é o caso de rodas dentadas e rolamentos que trabalham em altas rotações. O calor gerado dissipa-se por diversos elementos constituintes da caixa multiplicadora, o que pode comprometer o normal funcionamento dos mesmos. O óleo lubrificante de uma caixa multiplicadora de turbina eólica, deve estar entre os 45°C e 65°C . A temperatura do óleo da caixa multiplicadora assim como a de componentes como rolamentos, é registada em cada período de 10 minutos através do sistema SCADA, a faixa de temperatura recomendada é garantida por meio de um permutador

de calor que atua assim que a temperatura do óleo alcançar 62°C, sendo que, se a temperatura do óleo baixar até 58°C, a bomba de recirculação do óleo entra em funcionamento, impulsionando o caudal maior caudal que passa pelo permutador, por outro, se a temperatura do óleo reduzir até 48°C, a bomba de recirculação passa para o seu primeiro estágio de velocidade, reduzindo o caudal do óleo (C. Sequeira et al., 2019) e (Liang et al., 2018).

Ao longo do estudo foi analisada a relação existente entre o tempo de leitura das amostras e da velocidade do vento, antes e depois da substituição das caixas multiplicadoras e dos 3º estágios das mesmas. Essa análise foi feita em matlab, a partir de dados importados do excel, fornecidos pela empresa.

3.2.6.2 Análise de temperatura do rolamento DE, NDE, antes e depois das substituições dos componentes dos geradores

As diferentes causas do aquecimento de rolamentos DE e NDE dos geradores, podem estar associados a vibrações resultantes de desalinhamentos entre veios ou desapertos.

A temperatura máxima que os rolamentos de um gerador podem alcançar é de cerca de 90°C, acima desse valor, o sistema de proteção entrará automaticamente em funcionamento (Feliciano et al., 2021).

3.2.7 ANÁLISE DE CURVAS DE POTÊNCIA

Segundo (Bardal & Sætran, 2017) e (Sohoni et al., 2016), a curva de potência é uma das ferramentas muito importante para a monitorização, bem como para o controlo da eficiência da geração de energia. Os desvios que se verificam entre a curva nominal e a curva real, podem estar relacionados com os problemas existente nos componentes da turbina.

4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta secção foram feitos os resumos e discussão de resultados obtidos durante o desenvolvimento no capítulo 4.

4.1 OS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Como forma de facilitar a percepção da análise feita sobre o nível de vibrações dos componentes das caixas multiplicadoras e dos geradores, os resultados serão mostrados em forma de gráficos de dispersão, onde cada um dos gráficos possui a mesma escala de amplitudes de vibrações, seja no antes, como no depois da substituição dos componentes.

Os gráficos apresentados nesse capítulo, mostram apenas casos específicos, em que houve uma redução considerável, ou aumento do valor das amplitudes das vibrações.

4.1.1 OS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DOS COMPONENTES DAS CAIXAS MULTIPLICADORAS

4.1.1.1 Os Resultados de Vibrações de LSS

Na Figura 61 a, b e c, encontram-se apresentados os níveis de vibrações do LSS, nas gamas de frequências de 63-74 Hz, 76-136 Hz e 830-1640 Hz respetivamente. A partir dos mesmos gráficos é possível ver que a amplitude de vibrações de LSS das turbinas 21, 24 e 32 reduziram significativamente, após a substituição.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

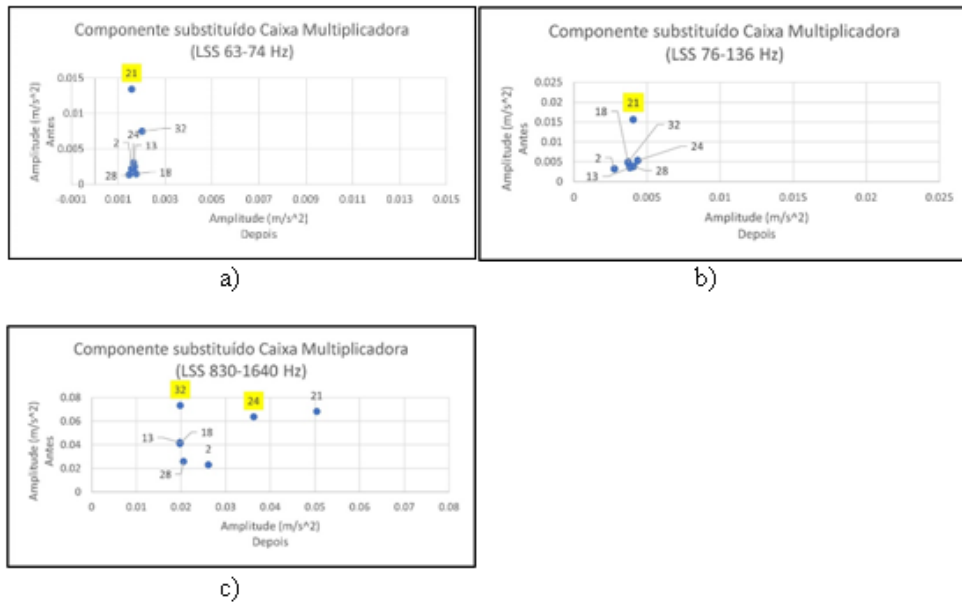


Figura 61. Níveis de vibrações do LSS: a) Frequências de 63-74 Hz, b) Frequências 76-136 Hz e c) Frequências 830-1640 Hz

4.1.1.2 Os Resultados de vibrações do planetário 1

Os gráficos da Figura 62 a, b e c, apresentam os níveis de vibrações do planetário 1, nas gamas de frequências de 63-74 Hz, 76-136 Hz e 140-274 Hz respectivamente. A partir dos mesmos é possível ver que a amplitude de vibrações de planetário 1 da turbina 28 reduziram significativamente, após a substituição.

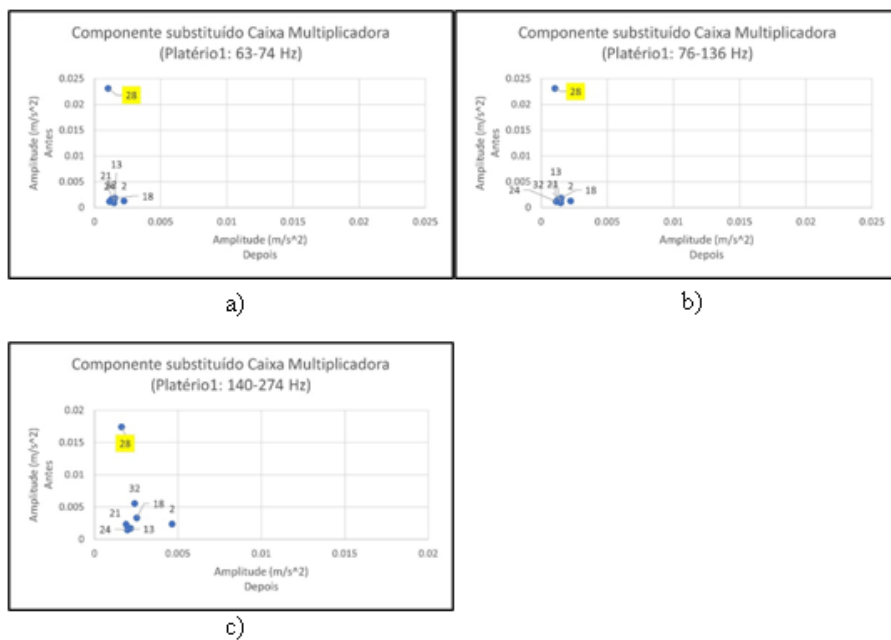


Figura 62. Níveis de vibrações do planetário 1: a) Frequências de 63-74 Hz, b) Frequências 76-136 Hz e c) Frequências 140-274 Hz

4.1.1.3 Os Resultados de vibrações do planetário 2

Os gráficos da Figura 63 a, b e c, apresentam os níveis de vibrações do planetário 2, nas gamas de frequências de 3-20 Hz, 43-49 Hz e 140-274 Hz respectivamente. A partir dos mesmos é possível ver que as amplitudes de vibrações do planetário 2 da turbina 13 reduziram de forma significativa.

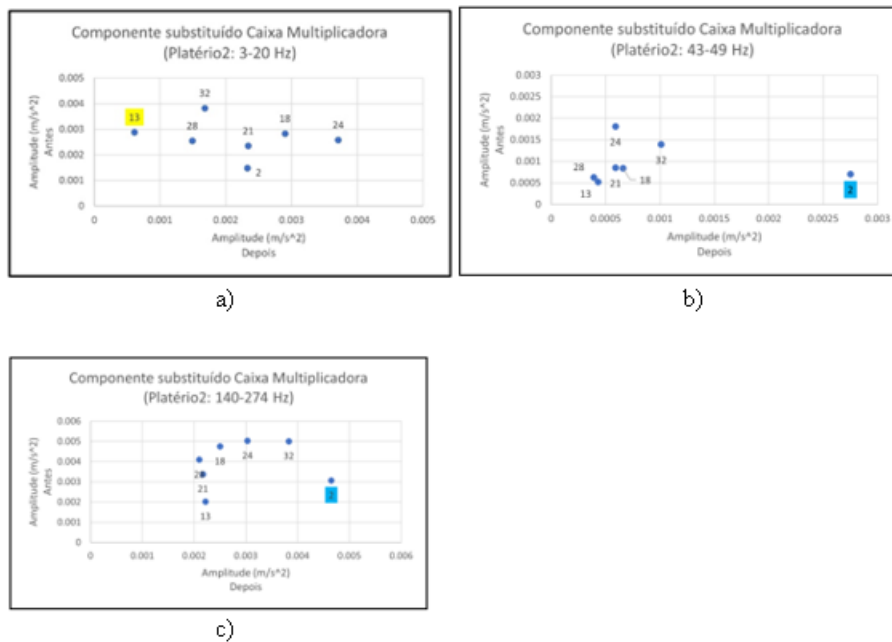


Figura 63. Níveis de vibrações do planetário 2: a) Frequências de 3-20 Hz, b) Frequências 43-49Hz e c) Frequências 140-274 Hz

4.1.1.4 Os Resultados de vibrações do HSS UW

Nos gráficos apresentados na Figura 64 a, b, c, e d, estão apresentados os níveis de vibrações do HSS UW, nas gamas de frequências de 76-136 Hz, 140-274 Hz, 278-408 Hz, 420-810 Hz. A partir dos mesmos é possível ver apenas a turbina 02, teve um aumento da amplitude de vibrações depois da substituição da sua caixa multiplicadora.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

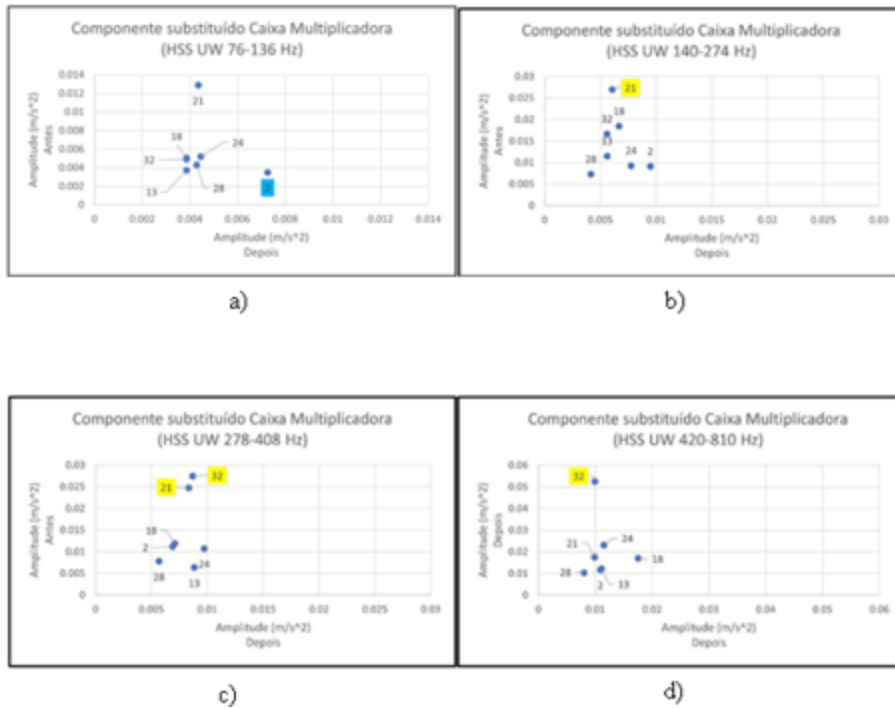


Figura 64. Níveis de vibrações do HSS UW: a) Frequências de 76-136 Hz, b) Frequências 140-274Hz e c) Frequências 278-408 Hz e d) Frequências 420-810 Hz

A partir dos gráficos apresentados na Figura 65 a, b, e d, é possível ver que a amplitude das vibrações do HSS UW, nas gamas de frequências de 830-1640 Hz, 1660-2460 Hz, e 2480-3200 Hz respectivamente, diminuiram de modo geral. Sendo que as amplitudes de vibrações dos HSS UW das turbinas 24 e 32, são as que mais reduziram os seus valores depois das substituições feitas.

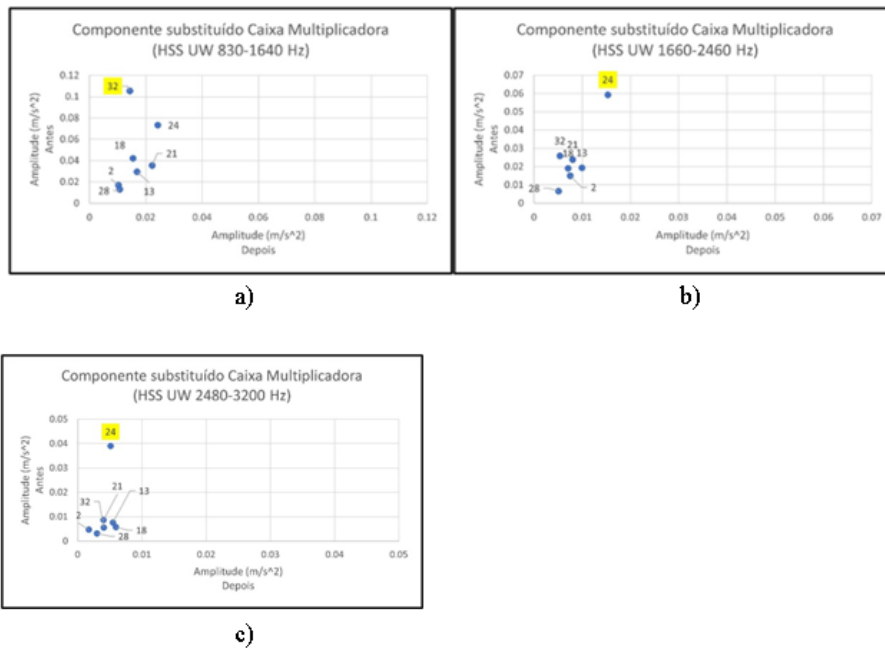


Figura 65. Níveis de vibrações do HSS UW: a) Frequências de 830-1640 Hz, b) Frequências 1660-2460Hz e c) Frequências 2480-3200 Hz

4.1.1.5 Os Resultados de vibrações do HSS DW

Na Figura 66 a, b, c e d, é possível ver que os níveis de vibrações do HSS DW, nas gamas de frequências de 76-136 Hz, 140-274 Hz, 278-408 Hz e 420-810 Hz, respetivamente, reduziram significativamente após as substituições das caixas multiplicadoras das turbinas 21 e 32.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

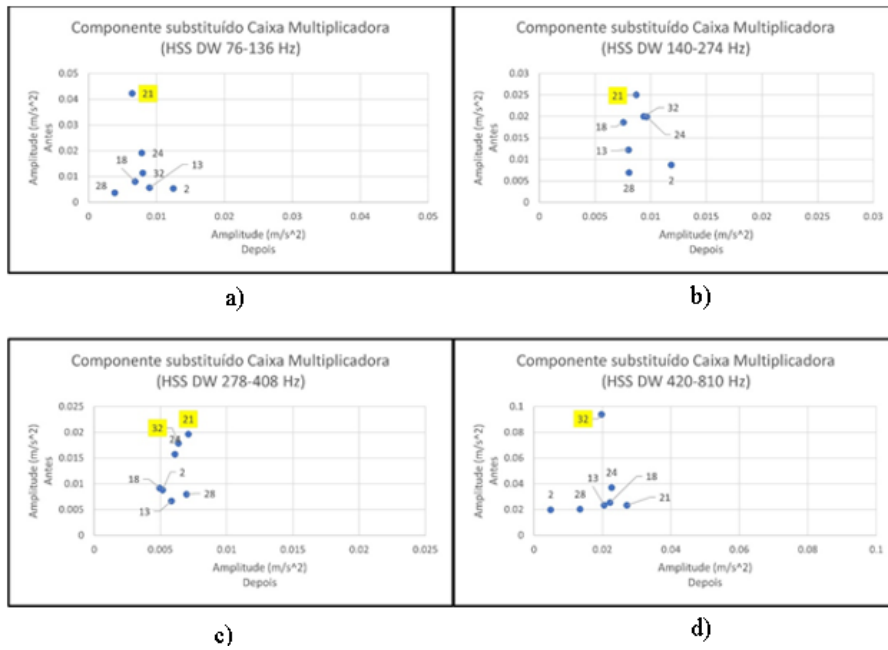


Figura 66. Níveis de vibrações do HSS DW: a) Frequências de 76-136 Hz, b) Frequências 140-274Hz e c) Frequências 278-408 Hz e d) Frequências 420-810 Hz

Os níveis de vibrações do HSS DW, nas gamas de frequências de Hz, 830-1640 Hz, 1660-2460 Hz e 2480- 3200 Hz respectivamente. A partir dos gráficos da Figura 67 a, b, e c, é possível ver que as amplitudes de vibrações do HSS DW das turbinas 21, 24 e 32 diminuíram, mas na turbina 28 aumentaram. A 24 apresentava altas amplitudes de vibrações para todas gamas de frequências.

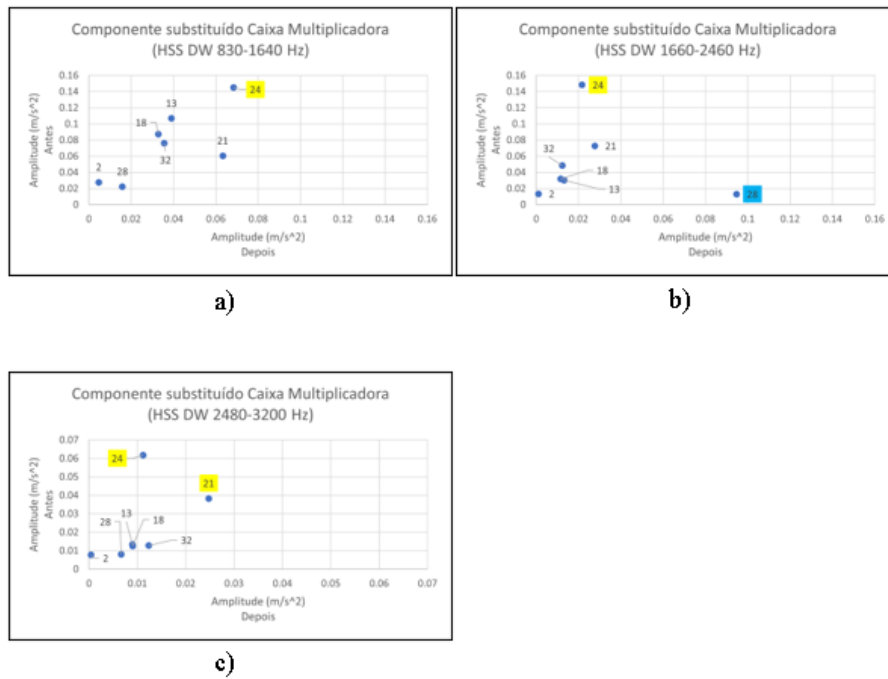


Figura 67. Níveis de vibrações do HSS DW: a) Frequências de 830-1640 Hz, b) Frequências 1660-2460Hz e c) Frequências 2480-3200 Hz

4.1.2 OS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DOS COMPONENTES DOS GERADORES

4.1.2.1 Os Resultados de vibrações do DE do gerador

Na Figura 68 a e b estão apresentados os níveis de vibrações do DE, nas gamas de frequências de 60-1800 Hz e 1800-3200 Hz, antes e depois da substituição do rolamento DE do gerador. Esses resultados mostram que houve uma redução significativa de amplitude de vibrações do DE, após a substituição de DE dos geradores das turbinas 02, 08, 23 e 34.

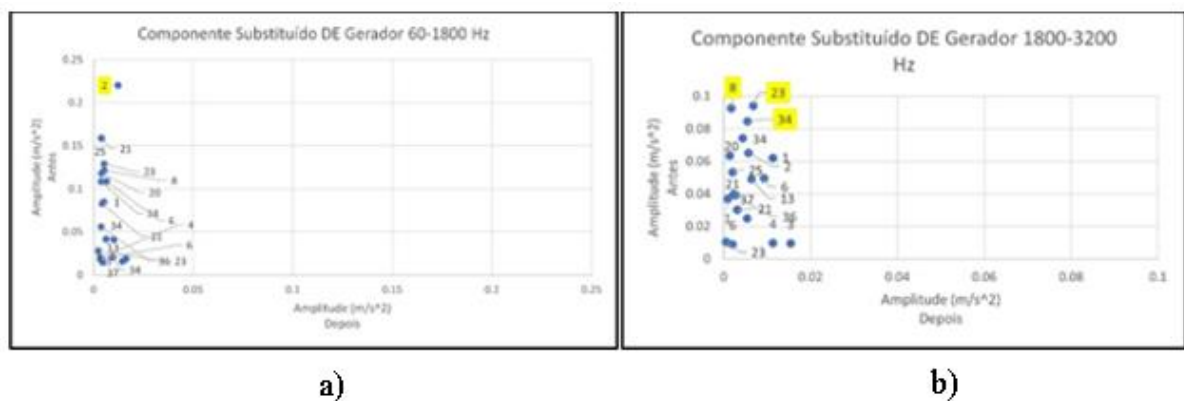


Figura 68. Níveis de vibrações dos rolamentos DE dos geradores: a) Frequências de 60-1800 Hz e b) Frequências 1800-3200Hz depois da substituição dos DE do gerador

Os gráficos mostram que houve um aumento significativo dos níveis de vibrações de rolamentos DE do gerador, nas gamas de frequência de 60- 1800 Hz, depois da substituição do gerador da turbina 25. Ao contrário, na turbina 8 houve uma redução do nível de vibrações no DE, na gama de frequência de 1800 e 3200 Hz, depois da substituição do gerador, Figura 69.

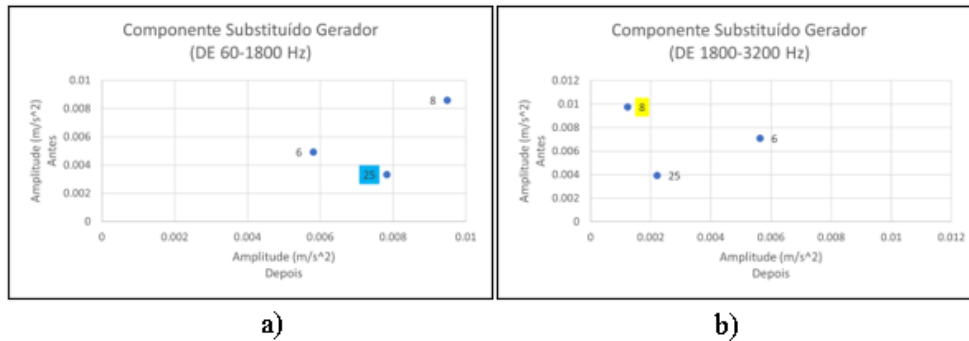


Figura 69. Níveis de vibrações dos rolamentos DE dos geradores: a) Frequências de 60-1800 Hz e b) Frequências 1800-3200Hz depois da substituição dos geradores

4.1.2.2 Os Resultados de vibrações do NDE do gerador

A Figura 70 a e b representa os níveis de vibrações do NDE, nas gamas de frequências de 60- 1800 Hz e 1800-3200 Hz, antes e depois da substituição do rolamento NDE do gerador. Esses resultados mostram que houve uma redução significativa de amplitude de vibrações do NDE, após a substituição de NDE dos geradores das turbinas 04 e 07. Contudo, houve um aumento no valor das amplitudes das vibrações do NDE dos geradores das turbinas 13 e 21.

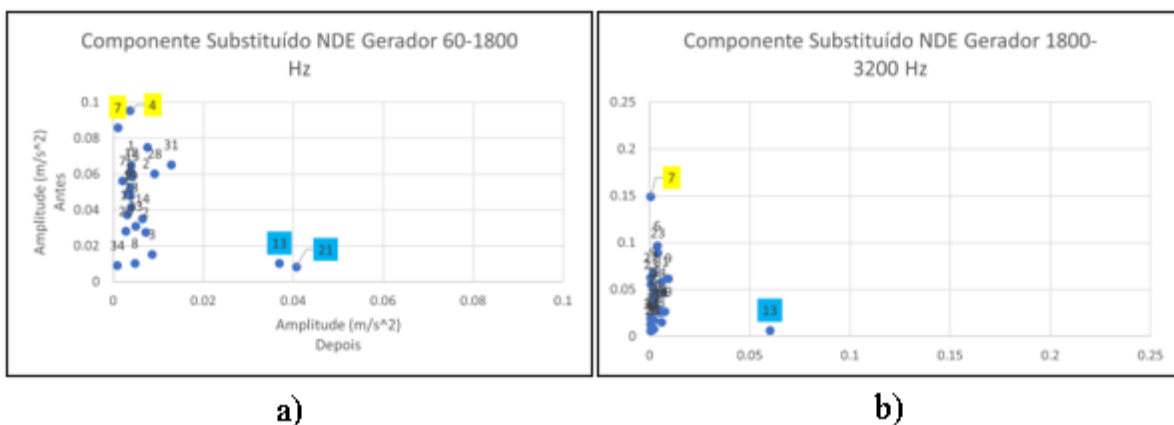


Figura 70. Níveis de vibrações dos rolamentos NDE dos geradores: a) Frequências de 60-1800 Hz e b) Frequências 1800-3200Hz depois da substituição dos NDE dos geradores

A Figura 71 a e b, mostram que houve redução significativa dos níveis de vibrações de rolamentos NDE do gerador, nas gamas de frequência de 60- 1800 Hz e de 1800-3200 Hz, depois da substituição do gerador da turbina 06.

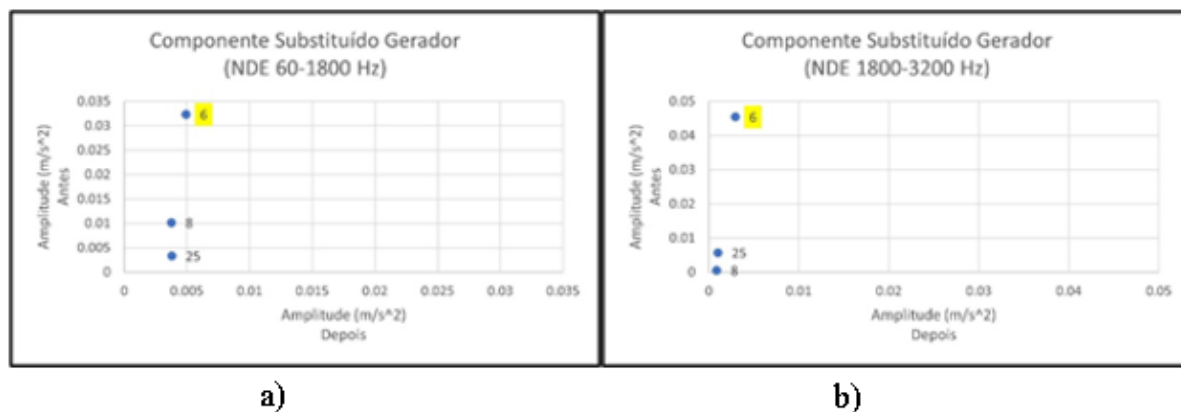


Figura 71. Níveis de vibrações dos rolamentos NDE dos geradores: a) Frequências de 60-1800 Hz e b) Frequências 1800-3200Hz depois da substituição dos geradores

4.2 OS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A ANÁLISE DE ÓLEOS

4.2.1 OS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A ANÁLISE DE OXIDAÇÃO E DO TAN

Como forma de facilitar a percepção da análise feita no subcapítulo 3.2.5 em relação ao nível de oxidação e o TAN do óleo lubrificante, foi produzida a Tabela 14 que resume os resultados do estudo desenvolvido em torno destas duas condições em que o óleo se apresentava antes e depois das substituições feitas. Os resultados desta análise ajudam na elaboração das conclusões que serão discutidas no subcapítulo 4.2.1.

Tabela 14. Resumo das condições dos óleos relativamente ao nível de oxidação e do TAN

Caixa Multiplicadora	Oxidação [abs/cm]		TAN	
	Antes	Depois	Antes	Depois
G02	△	✓	✓	✓
G04	△	△	✓	✓
G08	△	△	✓	✓
G11	△	△	✓	✓
G13	△	✓	✓	✓
G18	△	✓	✓	✓
G21	△	✓	✓	✓
G24			✓	✓
G28	△	△	✓	✓
G32				
G36	✓	✓	✓	✓
G38	△	✓	✓	✓

Legenda:

- ✓ Normal
 × Atenção

4.2.2 OS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A ANÁLISE DA VISCOSIDADE A 100°C

Com base na análise desenvolvida ao longo do subcapítulo 3.2.5, foi produzida a Tabela 15, que diz se a viscosidade dos óleos a temperatura de 100°C se encontrava no limite normal ou se passou para o nível de atenção. Esta informação refere-se sempre ao antes e depois de intervenções.

Tabela 15. Resumo das condições dos óleos relativamente a viscosidade a 100°C

Turbina	Tipo de Óleo (Viscosidade 100°C)		
	MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320	PLURASAFE GL PLUS 320	CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320
G02	✓ ✓		
G04	✓		✓
G08			✓ ✓
G11			✓ ✓
G13	✓		✓
G18	✓		✓
G21		✓	✓
G24		✓	△
G28			✓ ✓
G32			
G36	✓		✓
G38	✓		✓

Legenda:

- ✓ Normal
- △ Atenção

4.2.3 RESUMO SOBRE A VISCOSIDADE 40°C

Depois do estudo feito no subcapítulo 3.2.5, elaborou-se a Tabela 16, que ilustra como a viscosidade dos óleos a temperatura de 40°C encontrava-se, ou seja, se estava no limite normal ou se passou para o nível de atenção. Esta informação refere-se sempre ao antes e depois de intervenções.

Tabela 16. Resumo das condições dos óleos relativamente a viscosidade a 40°C

Turbina	Tipo de Óleo (Viscosidade 40°C)		
	MOBIL MOBILGEAR SHC XMP 320	PLURASAFE GL PLUS 320	CASTROL OPTIGEAR SYNTHETIC CT 320
G02	✓ ✓		
G04	✓		✓
G08			✓ ✓
G11			✓ ✓
G13	✓		✓
G18	✓		✓
G21		✓	✓
G24		✓	✓
G28			✓ ✓
G32			
G36	✓		✓
G38	✓		✓

Legenda:

- ✓ Normal
- △ Atenção

4.2.4 OS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A ANÁLISE DO ÍNDICE DE VISCOSIDADE

A Tabela 17, mostra o resumo dos resultados obtidos depois da análise do índice de viscosidade dos óleos lubrificantes que foi feita no subcapítulo 3.2.5, antes e depois das substituições efetuadas.

Tabela 17. Resumo das condições dos óleos relativamente ao seu índice de viscosidade

Turbina	Índice de Viscosidade			
	MOBIL SHC XMP 320	MOBILGEAR	PLURASAFE GL PLUS 320	CASTROL SYNTHETIC CT 320 OPTIGEAR
G02		✓ ✓		
G04		✓		✓
G08				✓ ✓
G11				✓ ✓
G13		✓		✓
G18		✓		✓
G21			✓	✓
G24			✓	△
G28				✓ ✓
G32				
G36		✓		✓
G38		✓		✓

Legenda:

- ✓ Normal
- △ Atenção

4.2.5 OS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A ANÁLISE DO SILÍCIO E ÁGUA

De modo a facilitar a perceção da análise feita em relação a concentração de silício e de água no subcapítulo 3.2.5, foi produzida a Tabela 18, que mostra o resumo dos resultados obtidos do estudo destes contaminantes, seja no antes como no depois das substituições feitas.

Tabela 18. Resumo das condições dos óleos relativamente ao conteúdo de silício e de água

Caixa Multiplicadora	Silício [ppm]		Água [mg/kg]	
	Antes	Depois	Antes	Depois
G02	✓	△	✓	△
G04	✓	✓	✓	△
G08	✓	✓	✓	△
G11	✓	✓	✓	△
G13	✓	△	✓	△
G18	✓	△	✓	△
G21	✓	✓	✗	△
G24	✓	△		△
G28	✓	✓	△	△
G32				
G36	✓	✓	△	△
G38	✓	✓	△	△

- ✓ Normal
- △ Atenção
- ✗ Perigo

4.2.6 OS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A ANÁLISE DO COBRE E FERRO

De acordo com o estudo desenvolvido no subcapítulo 3.2.5, foi possível observar que o ferro e cobre são os metais de desgaste com mais presença nas amostras do óleo lubrificantes das caixas multiplicadoras das turbinas estudadas, onde cada um desses metais resultantes do desgaste aparece em diferentes quantidades como se pode ver na tabela do resumo dos resultados, Tabela 19.

Tabela 19. Resumo das condições dos óleos relativamente aos metais resultantes do desgaste

Caixa Multiplicadora	Cobre [mg/kg]		Ferro [mg/kg]	
	Antes	Depois	Antes	Depois
G02	↑			
G04				↑
G08				↑
G11				↑
G13	↑			
G18			↑	
G21				↑
G24				↑
G28			↑	
G32				
G36	↑			
G38	↑			

↑ Alto

4.2.7 O RESUMO DO RESULTADOS SOBRE A LIMPEZA DO ÓLEO

A Tabela 20, mostra o resumo do nível de limpeza de óleo de caixa das turbinas estudadas, a mesma informação foi obtida graças ao estudo desenvolvido no subcapítulo 3.2.5.5.

Tabela 20. Resumo do nível de limpeza dos óleos

Turbina	Part. $\geq 4 \mu\text{m}$		Part. $\geq 6 \mu\text{m}$		Part. $\geq 14 \mu\text{m}$	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
G02	✓	△	✓	△	✓	△
G04	△	△	△	△	△	△
G08	△	✓	△	✓	✓	✓
G11	✓	△	✓	△	✓	✓
G13	△	△	△	△	✓	△
G18	△	✓	△	✓	△	△
G21	✗	✓	△	✓	△	△
G24	△	✓	△	△	△	✓
G28	✓	✓	✓	✓	✓	✓
G32						
G36	△	△	△	△	✓	△
G38	△	△	△	△	✓	△

Legenda:

- ✓ Normal
- △ Acima do Normal
- ✗ Perigo

4.3 DISCUSSÃO

Nesta secção serão discutidos os resultados obtidos do capítulo anterior, sobre análise de vibrações e óleos e é neste mesmo capítulo em que serão feitas as conclusões preliminares sobre os níveis de vibrações dos DE, NDE, dos geradores, bem como dos LSS, HSS e dos estágios planetários.

4.3.1 TURBINA 02

4.3.1.1 Discussão após a análise de vibrações da turbina 02

4.3.1.1.1 Discussão após a análise de vibrações dos componentes da caixa multiplicadora da turbina 02

A partir dos resultados obtidos depois de análise de vibrações, pode se concluir que de modo geral houve uma melhoria muito significativa, ou seja, as amplitudes de vibrações baixaram no seu conjunto.

O planetário 2 da caixa multiplicadora da turbina 02 apresentou uns valores de amplitude de vibrações relativamente menor, na gama de frequências de 43-49 Hz e 140-274 Hz, antes da substituição da caixa multiplicadora, contudo após a substituição verificou-se um aumento de amplitude.

Antes da substituição da caixa multiplicadora, o veio de alta velocidade (HSS UW) apresentou uma amplitude de vibrações menor do que a que passou a apresentar após a substituição da caixa multiplicadora, isso verificou-se na gama de frequências de 76-136 Hz.

4.3.1.1.2 Discussão após a análise de vibrações dos componentes do gerador da turbina 02

Dois dias antes da substituição do rolamento DE do gerador da turbina 02, a sua amplitude de vibrações apresentava um valor significativamente alto, contudo, dois dias após a substituição desse componente, notou-se uma redução considerável da amplitude de vibrações, isso na gama de frequências de 60-1800 Hz.

4.3.1.2 Discussão após a análise de óleo da turbina 02

Para a turbina 02, pode se concluir que cerca de 12 meses antes da substituição da caixa multiplicadora, o teor de oxidação era alto, contudo, cerca de 4 meses depois da substituição, o nível de oxidação do óleo reduziu.

Quanto aos aditivos, de modo geral notou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 02. O fósforo apresentou valores significativos, seja no antes assim como no depois da substituição da caixa, o zinco era ligeiramente alto antes, depois reduziu, por outro, o enxofre aumentou bastante na segunda amostra (anexo enxofre).

Em relação a concentração dos contaminantes, o silício e a água são os que mais se revelaram, tendo apresentado valores baixos antes da substituição da caixa multiplicada. Depois da substituição da caixa multiplicadora verificou-se um aumento de teor silício e a água ao ponto de ultrapassarem os valores recomendados. Os teores de potássio e de sódio, eram nulos antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 02, mas depois disso, houve um ligeiro aumento desses contaminantes.

No que respeita aos metais de desgaste, o cobre e o ferro são os que mais se destacaram. Para o óleo da caixa multiplicadora da turbina 02, verificou-se um alto teor de cobre antes da substituição da mesma, contudo, essa concentração foi nula depois da substituição. O ferro apresentou valores ligeiramente baixos tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora.

No que se refere ao nível de limpeza do óleo lubrificante, verificou-se que antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 02, a quantidade de partículas de todos os tamanhos encontrava-se abaixo do limite normal recomendado, contudo, depois da substituição da caixa multiplicadora, a quantidade das mesmas aumentou até ultrapassar o limite normal.

4.3.1.3 Discussão após a análise da temperatura do óleo da turbina 02

4.3.1.3.1 A temperatura de óleo em função das datas de leitura, turbina 02

A partir do gráfico da Figura 72 é possível ver que houve um aumento no valor mínimo da temperatura do óleo da caixa multiplicadora da turbina 02, com a diferença de 5,96 °C entre o antes e o depois da substituição da caixa multiplicadora, o que mostra alguma melhoria. Contudo, em relação a diferença entre as temperaturas máximas, pode se ver que a diferença amplitude térmica de foi de 2 °C.

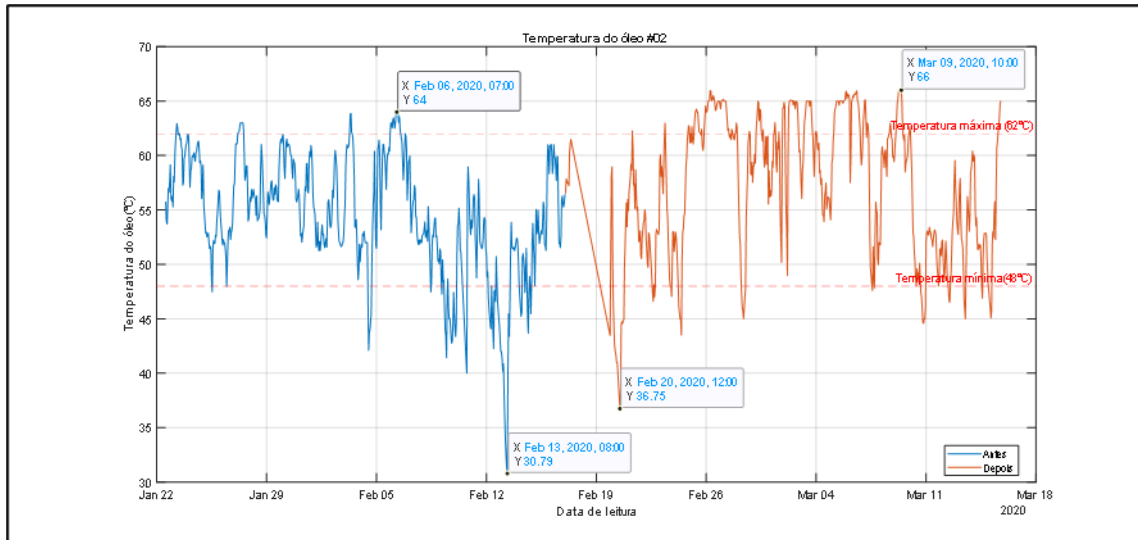


Figura 72. Temperatura do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora #02

4.3.1.3.2 A temperatura de óleo em função da velocidade do vento, turbina 02

A maior temperatura do óleo em função da velocidade do vento verificou-se depois da substituição da caixa multiplicadora, Figura 73. Contudo, houve alguns pontos no gráfico que mostram uma grande diferença entre as temperaturas no antes e no depois, sendo o mais notável, temperaturas baixas do óleo antes da substituição da caixa multiplicadora, isso para a faixa de velocidade abaixo de cerca de 12m/s e voltou a se notar o mesmo acontecimento nas velocidades acima de cerca de 14 m/s, mas neste último caso, foi após a substituição da caixa multiplicadora.

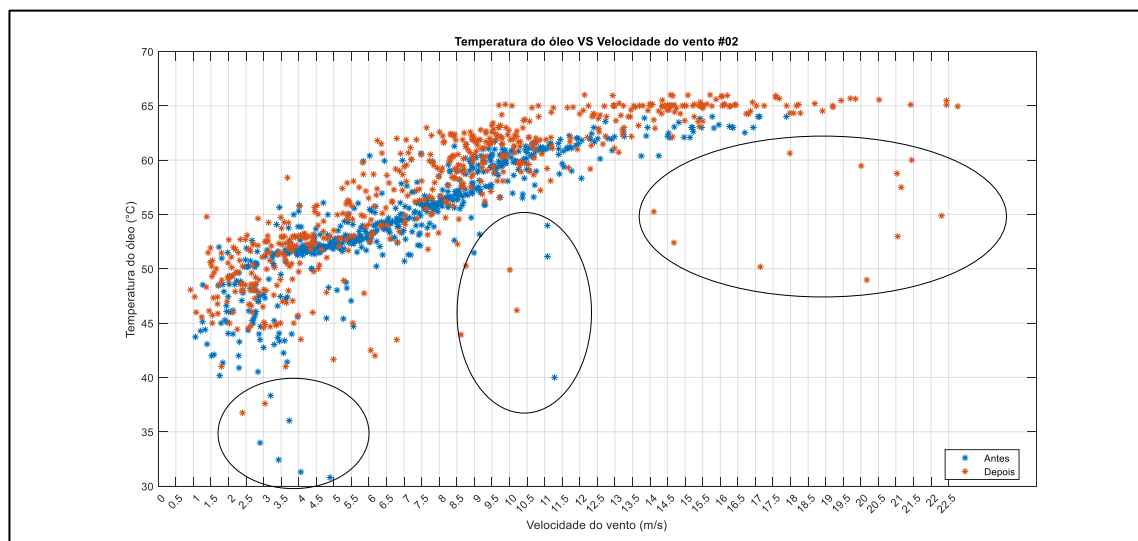


Figura 73. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #02

4.3.2 TURBINA 04

4.3.2.1 Discussão após a análise de vibrações da turbina 04

4.3.2.1.1 Discussão após a análise de vibrações dos componentes da caixa multiplicadora da turbina 04

Depois da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora da turbina 04, verificou-se um aumento de valores das amplitudes de vibrações do planetário 2, isso verificou-se nas gamas de frequências de 3-20 Hz e 43-49 Hz.

4.3.2.1.2 Discussão após a análise de vibrações dos componentes do gerador da turbina 04

Os resultados mostram que houve uma redução significativa de amplitude de vibrações do NDE, após a substituição de NDE do gerador da turbina 04.

4.3.2.2 Discussão após a análise de óleo da turbina 04

O óleo da caixa multiplicadora da turbina 04 apresentou valor de oxidação alto cerca de 12 meses antes da substituição do terceiro estágio da mesma, embora se tenha verificado alguma redução do nível de oxidação do óleo cerca de 7 meses depois da substituição do terceiro estágio, o nível de oxidação ainda continuava alto.

De modo geral verificou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora da turbina 04. O fósforo apresentou valores significativos, seja no antes assim como no depois deste componente, o zinco era ligeiramente alto antes, depois reduziu consideravelmente, e o enxofre aumentou bastante na segunda amostra.

Em relação a concentração dos contaminantes, a água são os que mais se revelaram, sendo que o teor de silício esteve dentro dos limites recomendados, tanto no antes como no depois. O teor de água era baixo antes da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora 04, mas depois da substituição da mesma, subiu até ultrapassar o valor recomendado. Os teores de potássio e de sódio eram nulos antes da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora da turbina 04, mas depois disso, houve um ligeiro aumento desses contaminantes.

No que respeita aos metais de desgaste, o cobre e o ferro são os que mais se destacaram. Para o óleo da caixa multiplicadora da turbina 04, verificou-se o teor de cobre relativamente baixo tanto no antes como no depois da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora.

Embora o teor de ferro não tenha alcançado o limite recomendado, verificou-se um aumento considerável deste metal depois da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora. O teor de chumbo antes da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora era nulo, mas depois disso, houve um pequeno aumento desse metal.

No que se refere ao nível de limpeza do óleo lubrificante, verificou-se que antes da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora da turbina 04, a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 4 micron, 6 micron e 14 micron encontrava-se acima do limite normal recomendado, tanto no antes assim como no depois da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora 04.

4.3.2.2.1 A temperatura de óleo em função das datas de leitura, turbina 04

A partir do gráfico da Figura 74, é possível ver que a temperatura do óleo da caixa multiplicadora da turbina 04, teve uma diferença entre as temperaturas mínimas de 2,88 °C entre o antes e o depois da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora, o que mostra alguma melhoria. Contudo, em relação a diferença entre as temperaturas máximas, pode se ver que a diferença amplitude térmica de foi de 0,37 °C.

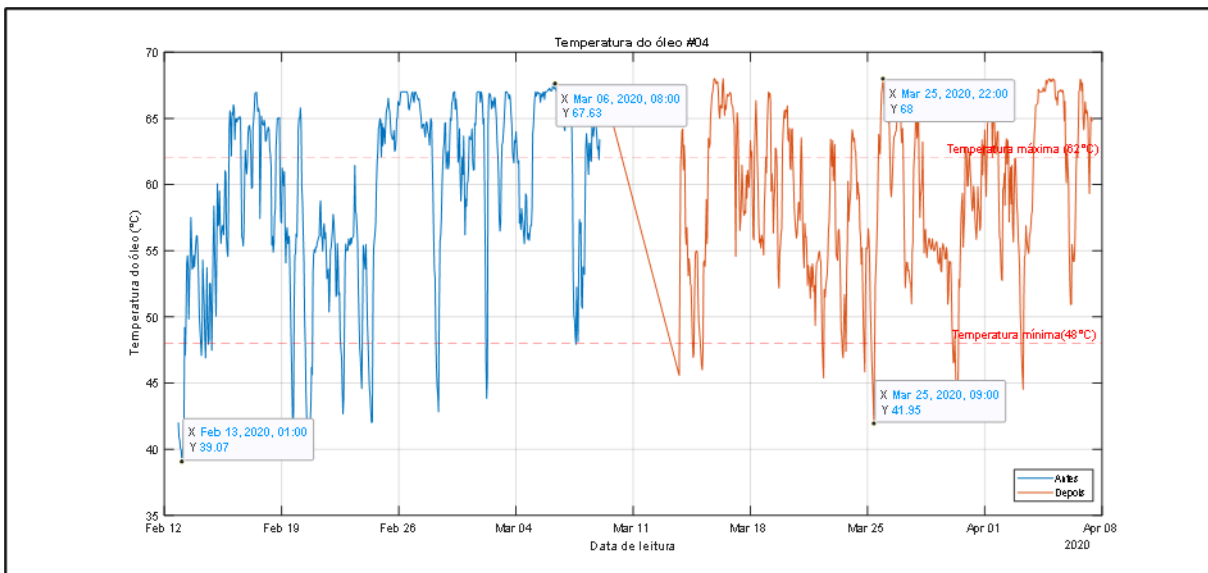


Figura 74. Temperatura do óleo antes e depois da substituição do 3º estágio da caixa multiplicadora #04

4.3.2.2.2 A temperatura de óleo em função da velocidade do vento, turbina 04

A maior temperatura do óleo em função da velocidade do vento verificou-se depois da substituição do terceiro estágio da caixa multiplicadora, Figura 75. A velocidades a baixo de 9 m/s, alguns pontos alguns pontos depois da substituição do terceiro estágio da caixa

multiplicadora da caixa multiplicadora apresentavam temperatura muito acima da temperatura que foi registrada em ambos casos, por outro, acima de 16m/s, a temperatura do óleo apresentava valores relativamente baixas, em comparação com os valores dos apresentados nas duas abordagens a mesma velocidade.

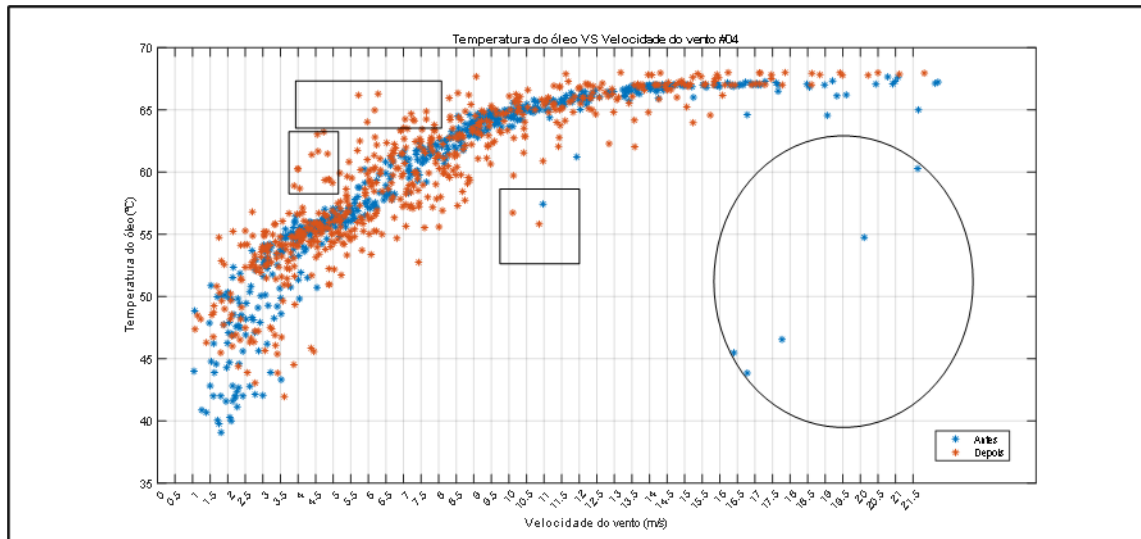


Figura 75. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #04

4.3.3 TURBINA 08

4.3.3.1 Discussão após a análise de vibrações da turbina 08

4.3.3.1.1 Discussão após a análise de vibrações dos componentes do gerador da turbina 08

Dois dias antes da substituição do rolamento DE do gerador e da substituição do próprio gerador da turbina 08, a sua amplitude de vibrações apresentava um valor significativamente alto, contudo, dois dias após a substituição desse componente, notou-se uma redução considerável da amplitude de vibrações, isso na gama de frequências de 1800-3200 Hz.

4.3.3.2 Discussão após a análise de óleo da turbina 08

Nas duas amostras fornecidas cerca de 10 meses antes e 8 meses depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 08, o lubrificante apresentou valores altos.

, de modo geral notou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 08. O cálcio, o fósforo e o zinco apresentaram valores significativos antes e depois da substituição da caixa, por outro lado o enxofre aumentou bastante na segunda amostra.

Em relação a concentração dos contaminantes, o silício e a água são os que mais se revelaram, sendo que o teor de silício esteve dentro dos limites recomendados, tanto no antes como no depois. O teor de água era baixo antes da substituição da caixa multiplicadora 08, mas depois da substituição da mesma, subiu até ultrapassar o valor recomendado.

No que respeita aos metais de desgaste, o ferro é o que mais se destacou, tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora. O teor de alumínio foi nulo antes da substituição da caixa multiplicadora, mas depois disso, houve um pequeno aumento desse metal.

No que se refere ao nível de limpeza do óleo lubrificante, verificou-se que antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 08, a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 4 e 6 micrometro encontravam-se um acima do limite normal recomendado, contudo, depois da substituição da caixa multiplicadora, a quantidade dessas partículas reduziu até estar no limite normal. Tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora, a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 14 micrometro encontravam-se no nível normal recomendado.

4.3.3.2.1 A temperatura de óleo em função das datas de leitura, turbina 08

A partir do gráfico da Figura 76 é possível ver que a temperatura do óleo da caixa multiplicadora da turbina 08, teve uma diferença entre as temperaturas mínimas de 1,68 °C entre o antes e o depois da substituição da caixa multiplicadora, o que mostra alguma melhoria. Contudo, em relação a diferença entre as temperaturas máximas, pode se ver que a diferença amplitude térmica de foi de 0,42 °C.

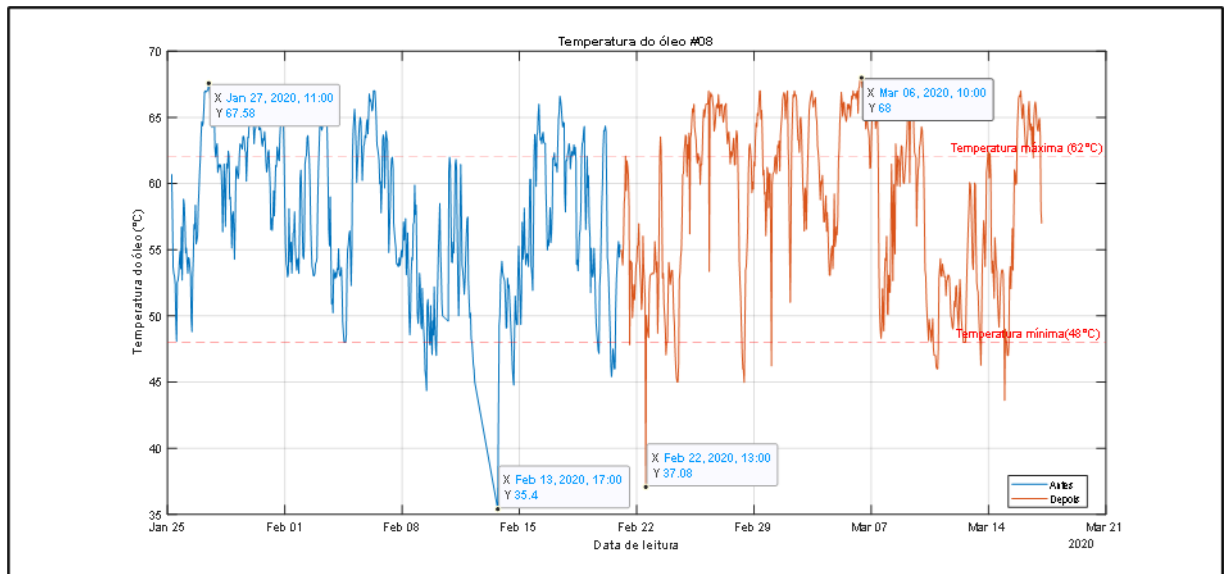


Figura 76. Temperatura do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora #08

4.3.3.2.2 A temperatura de óleo em função da velocidade do vento, turbina 08

De modo geral, é possível ver que a temperatura do óleo em função da velocidade do vento apresentou valores próximos, no antes e no depois da substituição feitas. Contudo, a velocidades de vento abaixo de 5 m/s, é possível ver da Figura 77 que a temperatura do óleo depois da substituição apresentava valores acima dos valores comuns apresentados em ambos casos. O mesmo voltou a se verificar a velocidades acima de 13 m/s, também após a substituição da caixa multiplicadora dessa mesma turbina.

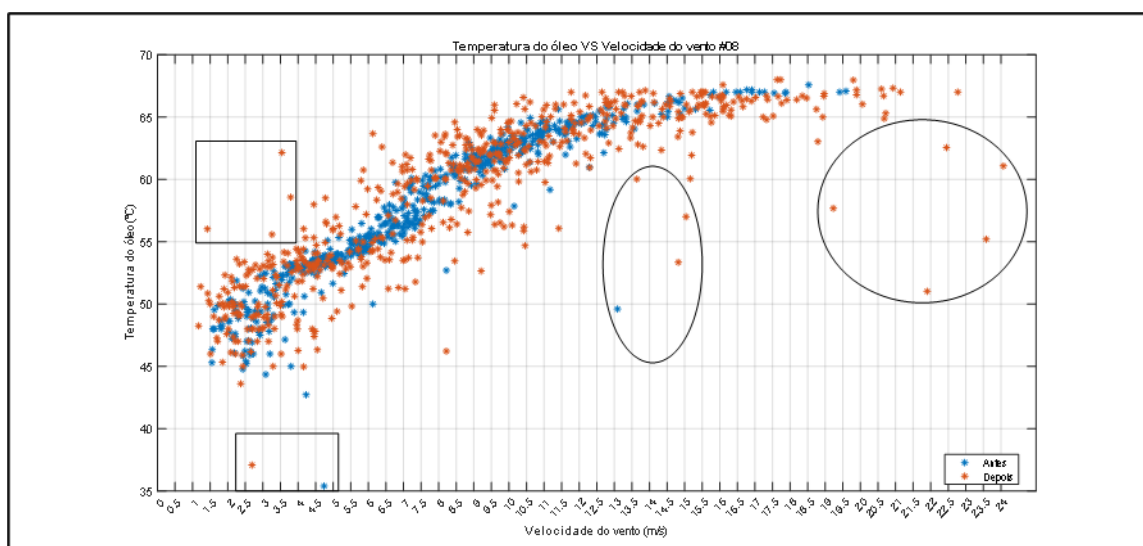


Figura 77. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #08

4.3.4 TURBINA 11

4.3.4.1 Discussão após a análise de vibrações da turbina 11

4.3.4.2 Discussão após a análise de óleo da turbina 11

Nas duas amostras fornecidas cerca de 8 meses antes e 8 meses depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 11, o lubrificante apresentou valores altos.

Quanto aos aditivos, de modo geral notou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 11. O cálcio, fósforo e o zinco apresentaram valores significativos antes e depois da substituição da caixa, por outro lado o enxofre aumentou bastante na segunda amostra.

Em relação a concentração dos contaminantes, o silício apresentou valores baixos tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora 11. O teor de água era baixo antes da substituição da caixa multiplicadora, mas depois da substituição da mesma, subiu até ultrapassar o valor recomendado.

Para o óleo da caixa multiplicadora da turbina 11, verificou-se um baixo teor de cobre antes da substituição da mesma, tendo ficado nula depois da substituição. O ferro é o que mais se destacou, tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora. O teor de alumínio foi nulo antes da substituição da caixa multiplicadora, mas depois disso, houve um pequeno aumento desse metal.

No que se refere ao nível de limpeza do óleo lubrificante, verificou-se que antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 11, a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 4 e 6 micrometro encontrava-se no limite normal recomendado, contudo, depois da substituição da caixa multiplicadora, a quantidade dessas partículas aumentou até estar acima do normal. Tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora, a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 14 micrometro encontrava-se dentro do nível normal recomendado.

4.3.4.2.1 A temperatura de óleo em função das datas de leitura, turbina 11

A partir do gráfico da Figura 78, é possível ver que a temperatura do óleo da caixa multiplicadora da turbina 11, teve uma diferença entre as temperaturas mínimas de 0,67 °C entre o antes e o depois da substituição da caixa multiplicadora, o que mostra alguma melhoria.

Contudo, em relação a diferença entre as temperaturas máximas, pode se ver que a diferença amplitude térmica de foi de 6,33 °C.

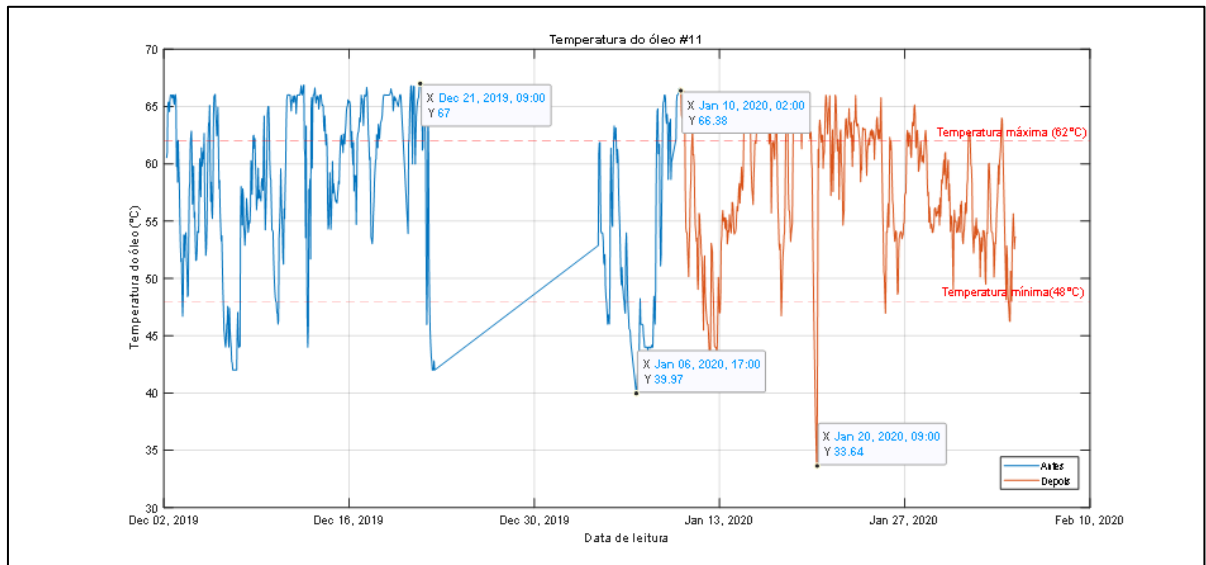


Figura 78. Temperatura do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora #11

4.3.4.2.2 A temperatura de óleo em função da velocidade do vento, turbina 11

A temperatura do óleo da turbina 11, no antes e no depois das substituições da caixa multiplicadora, apresentou valores muito próximos, embora no intervalo de velocidades entre 7m/s e 16 m/s, bem como para as velocidades acima de 20 m/s, ter sido verificado alguns pontos com temperatura relativamente baixa, Figura 79.

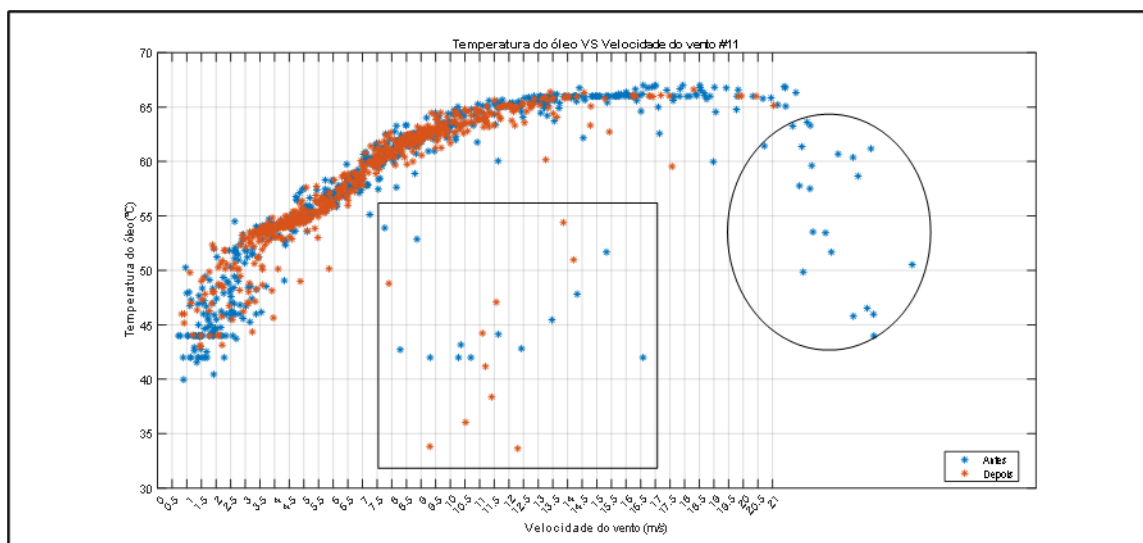


Figura 79. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #11

4.3.5 TURBINA 13

4.3.5.1 Discussão após a análise de vibrações da turbina 13

4.3.5.1.1 Discussão após a análise de vibrações dos componentes da caixa multiplicadora da turbina 13

A partir dos resultados obtidos depois de análise de vibrações, pode se concluir que de modo geral houve uma melhoria muito significativa, ou seja, as amplitudes de vibrações baixaram no seu conjunto.

O planetário 2 da caixa multiplicadora da turbina 13 apresentou um valor de amplitude de vibrações relativamente alto, na gama de frequências de 3-20 Hz, antes da substituição da caixa multiplicadora, contudo após a substituição mostrou um valor consideravelmente baixo.

4.3.5.1.2 Discussão após a análise de vibrações dos componentes do gerador da turbina 13

A amplitudes das vibrações do NDE do gerador das turbinas 13 aumentou após a substituição do rolamento NDE do gerador, isso é, para as frequências de 60-1800 Hz, bem como para as frequências de 1800-3200 Hz.

4.3.5.2 Discussão após a análise de óleo da turbina 13

Para a turbina 13, pode se concluir que cerca de 1 mês antes da substituição da sua caixa multiplicadora, o teor de oxidação era alto, contudo, cerca de 2 meses depois da substituição da caixa multiplicadora, o nível de oxidação do óleo reduziu significativamente.

Quanto aos aditivos, de modo geral notou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 13. O fósforo apresentou valor significativo antes e depois da substituição da caixa. O zinco era alto, contudo, baixou muito depois da substituição da caixa multiplicadora, e o enxofre era baixo e aumentou na segunda amostra.

Em relação a concentração dos contaminantes, o silício foi nulo antes da substituição da caixa multiplicadora 13, mas depois da substituição verificou-se que houve uma subida até ao nível recomendado, embora não tenha ultrapassado. O teor de água era baixo antes da substituição da caixa multiplicadora, mas depois da substituição da mesma, subiu até ultrapassar o valor recomendado. O potássio era nulo antes, contudo, teve um pequeníssimo aumento depois da substituição da caixa multiplicadora.

No que respeita aos metais de desgaste, o cobre e o ferro são os que mais se destacaram. Para o óleo da caixa multiplicadora da turbina 13, verificou-se um alto teor de cobre antes da substituição da mesma, contudo, essa concentração reduziu bastante depois da substituição. O ferro apresentou valores ligeiramente baixos tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora.

No que se refere ao nível de limpeza do óleo lubrificante, verificou-se que antes, assim como depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 13, a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 4 e 6 micrón encontravam-se acima do limite normal recomendado. A quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 14 micrón encontrava-se dentro do limite normal recomendado, mas depois da substituição da caixa multiplicadora passou a estar acima do nível normal.

4.3.5.2.1 A temperatura de óleo em função das datas de leitura, turbina 13

A partir do gráfico da Figura 80, é possível ver que a temperatura do óleo da caixa multiplicadora da turbina 13, teve uma diferença entre as temperaturas mínimas de 3,63 °C entre o antes e o depois da substituição da caixa multiplicadora, o que mostra alguma melhoria. Contudo, em relação a diferença entre as temperaturas máximas, pode se ver que a diferença amplitude térmica de foi de 6,9 °C.

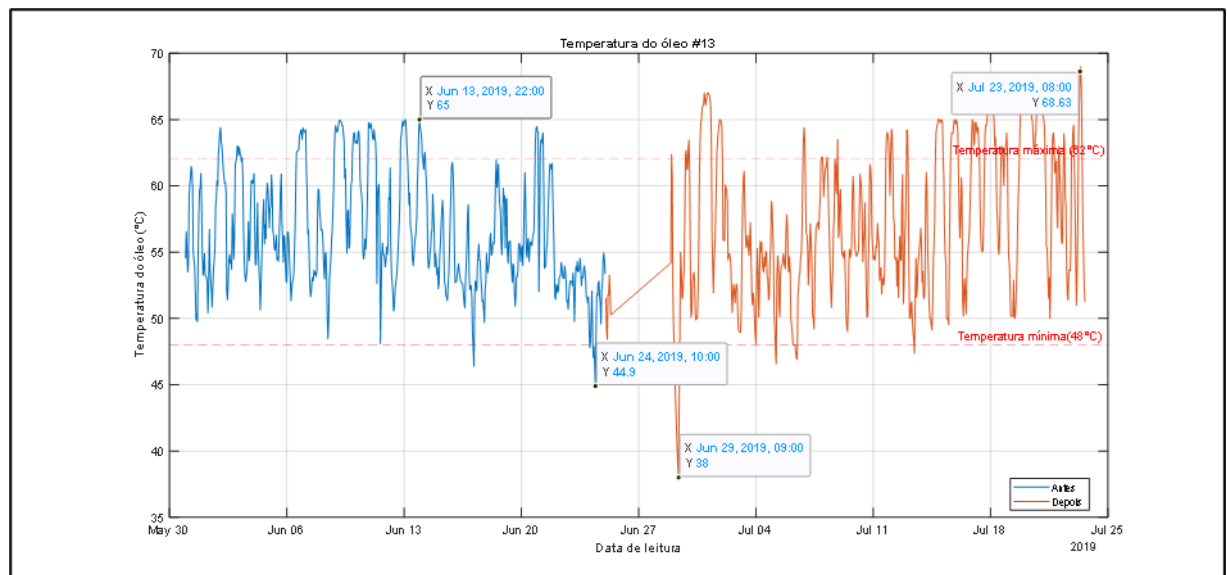


Figura 80. Temperatura do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora #13

4.3.5.2.2 A temperatura de óleo em função da velocidade do vento, turbina 13

O óleo da caixa multiplicadora da turbina 13 apresentou valores elevados antes da substituição da caixa multiplicadora, contudo nota-se que houve uma redução após a substituição da caixa, isso para quase toda a faixa de velocidades, Figura 81.

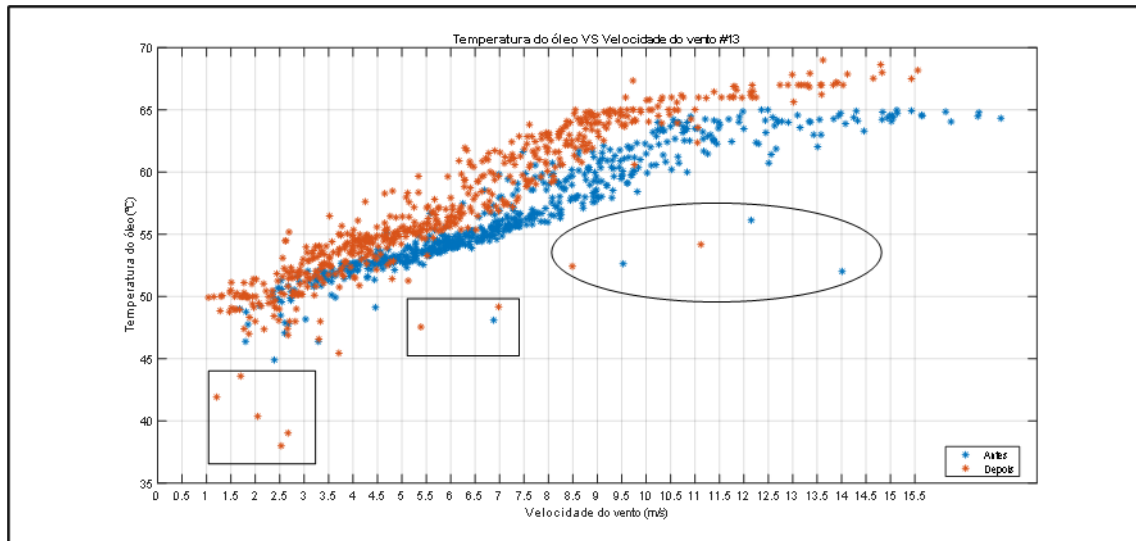


Figura 81. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #13

4.3.6 TURBINA 18

4.3.6.1 Discussão após a análise de óleo da turbina 18

Para a turbina 18, pode se concluir que cerca de 5 meses antes da substituição da sua caixa multiplicadora, o teor de oxidação era alto, contudo, cerca de 1 mês depois da substituição da caixa multiplicadora, o nível de oxidação do óleo reduziu significativamente.

Quanto aos aditivos, de modo geral notou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 18. O molibdênio apresentou um valor ligeiro antes da substituição, mas depois, baixou até se tornar nulo, a concentração do fósforo foi significativa em ambas as amostras. O teor de zinco era alto, tendo reduzido bastante na segunda amostra e em contrapartida, o enxofre eram relativamente baixo antes, mas aumentou bastante na segunda amostra.

Em relação a concentração dos contaminantes, o silício apresentou valor muito baixo antes da substituição da caixa multiplicadora 18, mas depois da substituição verificou-se que houve uma subida até ultrapassar nível recomendado. O teor de água era baixo antes da substituição da caixa multiplicadora, mas depois da substituição da mesma, subiu até ultrapassar o valor recomendado. O potássio era nulo antes, contudo, teve um pequeníssimo aumento depois da

substituição da caixa multiplicadora e o sódio apresentou valor baixo antes, mas depois da substituição da caixa, verificou-se um ligeiro aumento do mesmo.

No que respeita aos metais de desgaste, o cobre apresentou valor muito baixo antes da substituição da caixa multiplicadora e depois da substituição passou a ser nulo. O teor de ferro foi o que mais se destacou no antes, mas depois da substituição da caixa multiplicadora passou a ter um valor muito baixo.

No que se refere ao nível de limpeza do óleo lubrificante, verificou-se que antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 18, a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 4 e 6 micrón encontravam-se fora do limite normal recomendado, e depois da substituição da caixa multiplicadora, verificou-se uma redução da quantidade destas partículas, até estar dentro do normal.

Tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora, a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 14 micrón encontrava-se acima do nível normal recomendado.

4.3.6.1.1 A temperatura de óleo em função das datas de leitura, turbina 18

A partir do gráfico da Figura 82, é possível ver que a temperatura do óleo da caixa multiplicadora da turbina 18, teve uma diferença entre as temperaturas mínimas de 3,92 °C entre o antes e o depois da substituição da caixa multiplicadora, o que mostra alguma melhoria. Contudo, em relação a diferença entre as temperaturas máximas, pode se ver que a diferença amplitude térmica de foi de 4,27 °C.

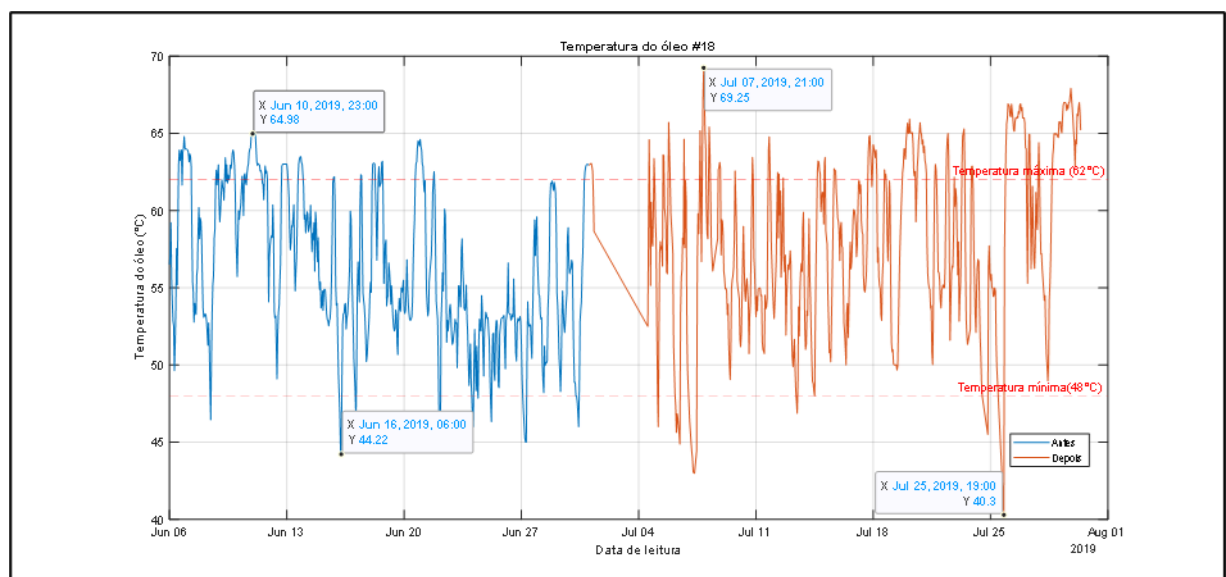


Figura 82. Temperatura do óleo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora #18

4.3.6.1.2 A temperatura de óleo em função da velocidade do vento, turbina 18

O óleo da caixa multiplicadora da turbina 18 apresentou valores elevados antes da substituição da caixa multiplicadora, contudo nota-se que houve uma redução após a substituição da caixa, isso para quase toda a faixa de velocidades, Figura 83.

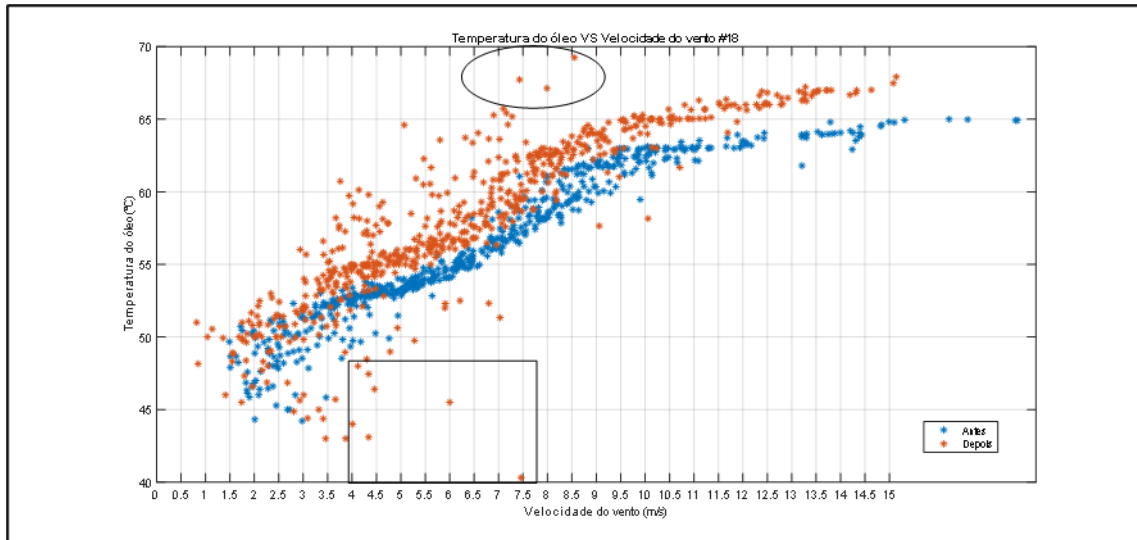


Figura 83. Temperatura do óleo em função da velocidade do vento #18

4.3.7 TURBINA 21

4.3.7.1 Discussão após a análise de vibrações da turbina 21

4.3.7.1.1 Discussão após a análise de vibrações dos componentes da caixa multiplicadora da turbina 21

A partir dos resultados obtidos depois de análise de vibrações, pode se concluir que de modo geral houve uma melhoria muito significativa, ou seja, as amplitudes de vibrações baixaram no seu conjunto.

O veio de baixa velocidade (LSS) da caixa multiplicadora da turbina 21 apresentou um valor de amplitude de vibrações relativamente alto, nas gamas de frequências de 63-74 Hz e 76-136 Hz, antes da substituição da caixa multiplicadora, contudo após a substituição mostrou valores consideravelmente baixos.

O veio de alta velocidade (HSS UW) da caixa multiplicadora desta mesma turbina mostrou uma redução significativa de amplitude na gama de frequências de 140-274 Hz e 278-408 Hz depois da substituição da caixa multiplicadora da mesma.

O veio de alta velocidade (HSS DW) apresentou os valores de amplitudes de vibrações altas antes da substituição da caixa multiplicadora, mas depois da substituição da mesma, esses valores reduziram significativamente, isso verificou-se nas gamas de frequências de 76-136 Hz, 140-274 Hz, 278-408 Hz e 2480-3200 Hz.

4.3.7.1.2 Discussão após a análise de vibrações dos componentes do gerador da turbina 21

Da análise feita verificou-se que dois dias antes da substituição do rolamento NDE do gerador da turbina 21, a sua amplitude de vibrações apresentava um menor do que o valor que passou a apresentar dois dias após a sua substituição, isso na gama de frequência de 60-1800 Hz.

4.3.7.2 Discussão após a análise de óleo da turbina 21

Para a turbina 21, pode se concluir que cerca de 7 meses antes da substituição da sua caixa multiplicadora, o teor de oxidação do lubrificante era alto, e cerca de 7 meses depois da substituição da mesma o teor de oxidação era nulo. O teor de acidez do óleo lubrificante da turbina 21, embora tenha estado dentro de valores recomendados, apresentou um valor relativamente baixo depois da substituição da caixa multiplicadora.

Quanto aos aditivos, de modo geral notou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 21. Antes a substituição da caixa multiplicadora essa turbina utilizava o óleo da *Plurasafe*, o valor de fósforo era relativamente alto, tendo reduzido muito na segunda amostra quando passou a utilizar o óleo da marca Castrol. O zinco apresentou valor baixo antes e depois da substituição da caixa multiplicadora. Em relação a concentração dos contaminantes, o silício apresentou valores baixos tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora 21. O teor de água era muito alto antes da substituição da caixa multiplicadora, mas depois da substituição da mesma, baixou muito, embora não tenha baixado até o valor recomendado. O potássio era nulo antes, contudo, teve um pequeníssimo aumento depois da substituição da caixa multiplicadora e o sódio apresentou valor baixo antes, mas depois da substituição da caixa, verificou-se um ligeiro aumento do mesmo.

Para o óleo da caixa multiplicadora da turbina 21, verificou-se um teor de cobre muito antes da substituição da mesma, tendo ficado nula depois da substituição. O ferro é o que mais se destacou, antes da substituição da caixa multiplicadora apresentava um valor relativamente baixo, mas depois verificou-se um aumento considerável.

No que se refere ao nível de limpeza do óleo lubrificante, verificou-se que antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 21, a quantidade de partículas de todos os tamanhos encontrava-se fora do limite recomendado, e depois da substituição da caixa multiplicadora, a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 4 e 6 microns, passaram a apresentar valores dentro do limite norma. Contudo as de tamanho superior ou igual a 14 microns continuavam-se fora do limite recomendado.

4.3.8 TURBINA 24

4.3.8.1 Discussão após a análise de vibrações da turbina 24

A partir dos resultados obtidos depois de análise de vibrações, pode se concluir que de modo geral houve uma melhoria muito significativa, ou seja, as amplitudes de vibrações baixaram no seu conjunto.

O veio de baixa velocidade (LSS) da caixa multiplicadora da turbina 24 apresentou um valor de amplitude de vibrações relativamente alto, na gama de frequências de 830-1640 Hz, antes da substituição da caixa multiplicadora, contudo após a substituição mostrou um valor consideravelmente baixo.

O veio de alta velocidade (HSS UW) da caixa multiplicadora da turbina 24 mostrou uma redução significativa de amplitude na gama de frequências de 1660-2460 Hz e 2480-3200 Hz, depois da substituição da caixa multiplicadora da mesma.

O veio de alta velocidade (HSS DW) apresentou os valores de amplitudes de vibrações altas antes da substituição da caixa multiplicadora, mas depois da substituição da mesma, esses valores reduziram significativamente, isso verificou-se nas gamas de frequências de 830-1640 Hz, 1660-2460 Hz e 2480-3200 Hz.

4.3.8.2 Discussão após a análise de óleo da turbina 24

Verificou-se uma redução significativa de índice de viscosidade de óleo da turbina 24 cerca de 3 meses depois da substituição da caixa multiplicadora.

Quanto aos aditivos, de modo geral notou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 24. Antes a substituição da caixa multiplicadora o teor de cálcio era baixo, tendo aumentado ligeiramente depois da substituição da caixa da mesma, o magnésio apresentou um valor ligeiro antes da substituição da caixa,

contudo, depois passou a ser nulo. Tanto o fósforo quanto o zinco possuíam valores relativamente altos antes quando utilizavam o óleo da marca *Plurasafe* e verificou-se uma redução significativa na segunda amostra quando já utilizava o óleo da marca Castrol.

Em relação a concentração dos contaminantes, o silício apresentou valor muito baixo antes da substituição da caixa multiplicadora 24, mas depois da substituição verificou-se que houve uma subida até ultrapassar nível recomendado. O teor de água alcançou o valor recomendado depois da substituição da caixa multiplicadora.

Para o óleo da caixa multiplicadora da turbina 24, verificou-se o teor de cobre muito baixo tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora. O teor de ferro era baixo antes da substituição da caixa multiplicadora, mas depois houve um aumento ligeiro deste metal.

No que se refere ao nível de limpeza do óleo lubrificante, verificou-se que antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 24, a quantidade de partículas de todos os tamanhos encontrava-se fora do limite recomendado, mas depois da substituição da caixa multiplicadora, apenas as de tamanho maior ou igual a 6 continuavam a apresentar os valores fora do normal.

4.3.9 TURBINA 28

4.3.9.1 Discussão após a análise de vibrações da turbina 28

A partir dos resultados obtidos depois de análise de vibrações, pode se concluir que de modo geral houve uma melhoria muito significativa, ou seja, as amplitudes de vibrações baixaram no seu conjunto.

O planetário 1 da caixa multiplicadora da turbina 28 apresentou uns valores de amplitude de vibrações relativamente altos, nas gamas de frequências de 63-74 Hz, 76-136 Hz e 140-274 Hz, antes da substituição da caixa multiplicadora, contudo após a substituição mostrou um valor consideravelmente baixo.

Houve um aumento de amplitude de vibrações do veio de alta velocidade (HSS DW) depois da substituição da caixa multiplicadora, isso verificou-se na gama de frequências de 1660-2460 Hz.

4.3.9.2 Discussão após a análise de óleo da turbina 28

O óleo da caixa multiplicadora da turbina 28 apresentou valor de oxidação alto cerca de 10 meses antes da substituição da caixa multiplicadora, embora se tenha verificado alguma redução do nível de oxidação do óleo cerca de 4 meses depois, o nível de oxidação ainda continuava alto.

Quanto aos aditivos, de modo geral notou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 28. O cálcio o zinco e enxofre apresentaram um teor ligeiramente alto antes da substituição da caixa multiplicadora, tendo reduzido um pouco depois da substituição. A concentração de fosforo foi ligeiro em ambas as amostras.

Em relação a concentração dos contaminantes, o silício e a água são os que mais se revelaram, sendo que o teor de silício esteve dentro dos limites recomendados, tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora 28. O teor de água apresentou valores fora do limite recomendado, tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora. O potássio era nulo antes, contudo, teve um pequeníssimo aumento depois da substituição da caixa multiplicadora. O teor de sódio era nulo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 28, mas depois disso, houve um ligeiro aumento desse contaminante.

Para o óleo da caixa multiplicadora da turbina 28, verificou-se que o teor de cobre era nulo antes da caixa multiplicadora, mas depois houve um pequeno aumento deste metal. O teor de ferro era significativamente alto antes da substituição da caixa multiplicadora, tendo tido uma ligeira redução depois da substituição.

No que se refere ao nível de limpeza do óleo lubrificante, verificou-se que tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora da turbina 28, a quantidade de partículas de todos os tamanhos encontrava-se dentro do limite normal recomendado.

4.3.10 TURBINA 36

4.3.10.1 Discussão após a análise de vibrações da turbina 36

4.3.10.2 Discussão após a análise de óleo da turbina 36

O óleo lubrificante da caixa multiplicadora desta turbina 36 apresentou o nível de oxidação baixo nas duas amostras, seja na amostra de cerca de 11 meses antes da substituição da caixa multiplicadora desta turbina, assim como em cerca de 1 mês depois de ter sido substituída.

Quanto aos aditivos, de modo geral notou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 36. A concentração de fósforo foi significativa, por outro lado, os teores de zinco e boro eram altos antes da substituição da caixa multiplicadora e reduziram muito depois da substituição da mesma. Verificou-se um nível baixo de enxofre que veio a aumentar depois da substituição da caixa multiplicadora.

Em relação a concentração dos contaminantes, o silício foi nulo antes da substituição da caixa multiplicadora 36, mas depois da substituição verificou-se que houve uma subida, mas mesmo assim, não alcançou o nível recomendado. O teor de água apresentou valores fora do limite recomendado, tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora. O potássio era nulo antes, contudo, teve um pequeníssimo aumento depois da substituição da caixa multiplicadora. O teor de sódio era nulo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 36, mas depois disso, houve um ligeiro aumento desse contaminante.

Para o óleo da caixa multiplicadora da turbina 36, verificou-se um alto teor de cobre antes da substituição da mesma, contudo, essa concentração foi nula depois da substituição. O ferro apresentou valores ligeiramente baixos tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora.

Antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 36, apenas a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 14 micron (apêndice 4 micron) encontrava-se dentro do limite normal recomendado.

4.3.11 TURBINA 38

4.3.11.1 Discussão após a análise de óleo da turbina 38

Para a turbina 38, pode se concluir que cerca de 11 meses antes da substituição da caixa multiplicadora da mesma, o teor de oxidação era alto, contudo, cerca de 1 meses depois da substituição, o nível de oxidação do óleo reduziu consideravelmente.

Quanto aos aditivos, de modo geral notou-se um baixo teor da carga aditiva no óleo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 38. A concentração de fósforo foi significativa, por outro lado, os teores de zinco e boro eram altos antes da substituição da caixa multiplicadora e reduziram muito depois da substituição da mesma. Verificou-se um nível baixo de enxofre que veio a aumentar depois da substituição da caixa multiplicadora.

Em relação a concentração dos contaminantes, o silício foi nulo antes da substituição da caixa multiplicadora 38, mas depois da substituição verificou-se que houve uma subida, mas mesmo

assim, não alcançou o nível recomendado. O teor de água apresentou valores fora do limite recomendado, tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora. O potássio era nulo antes, contudo, teve um pequeníssimo aumento depois da substituição da caixa multiplicadora. O teor de sódio era nulo antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 38, mas depois disso, houve um ligeiro aumento desse contaminante.

Para o óleo da caixa multiplicadora da turbina 38, verificou-se um alto teor de cobre antes da substituição da mesma, contudo, essa concentração baixou muito depois da substituição. O ferro apresentou valores ligeiramente baixos tanto no antes como no depois da substituição da caixa multiplicadora e o chumbo foi quase insignificante na primeira amostra, na segunda amostra não se verificou partículas de chumbo.

Antes da substituição da caixa multiplicadora da turbina 38, apenas a quantidade de partículas de tamanho maior ou igual a 14 micron encontrava-se dentro do limite normal recomendado.

4.4 CURVAS DE POTÊNCIA

4.4.1 CURVAS DE POTÊNCIA ANTES E DEPOIS DE SUBSTITUIÇÃO DOS ROLAMENTOS DRIVE *END E NONE DRIVE END*

A partir de análise dos dados fornecidos pela *VentientEnergy*, foi possível construir as curvas de potência nominal, potência antes e depois de substituição de rolamentos DE dos geradores das turbinas 01, 04, 06 e 13, respectivamente.

Com estas curvas pode se ver que de modo geral, houve alguma melhoria em termos de potência de saída para as mesmas velocidades de vento.

Os gráficos apresentam as curvas de potência no antes e depois da substituição do rolamento DE do gerador, e é possível ver que houve uma melhoria na geração de energia em todas as turbinas, Figura 84, Figura 85, Figura 85, Figura 86 e Figura 87.

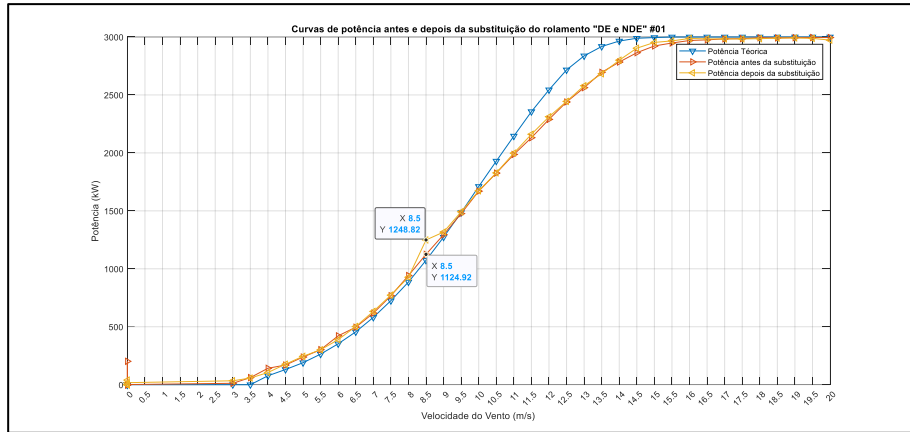


Figura 84. Curvas de potência antes e depois da substituição do DE #01

#04

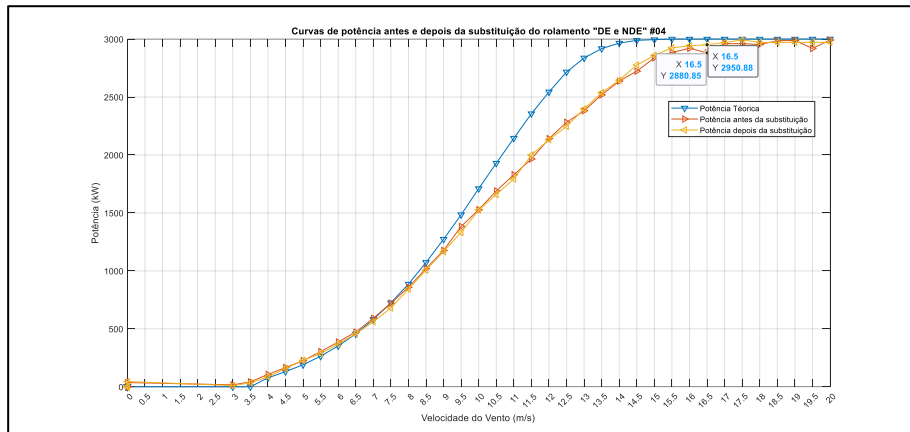


Figura 85. Curvas de potência antes e depois da substituição do DE #04

#06

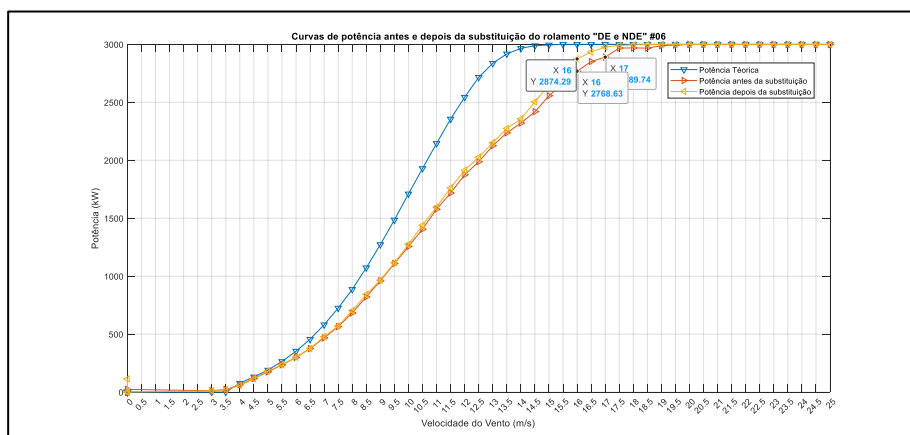


Figura 86. Curvas de potência antes e depois da substituição do DE #08

#13

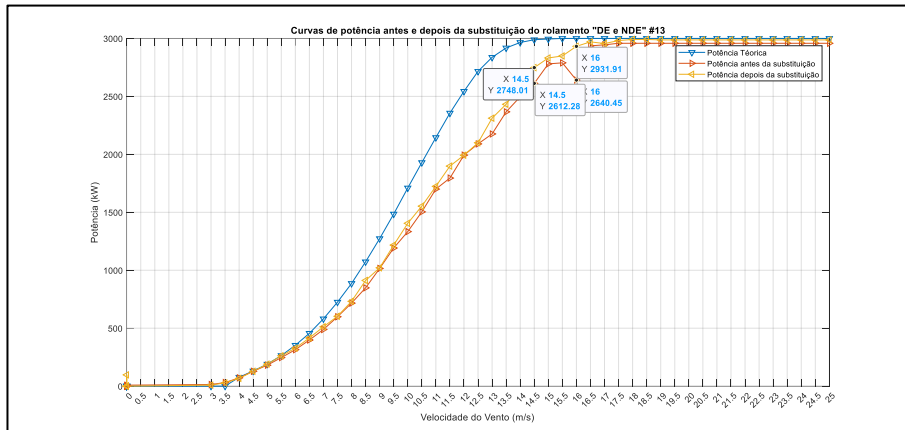


Figura 87. Curvas de potência antes e depois da substituição do DE #13

5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 ANÁLISE DO TRABALHO REALIZADO

O presente trabalho teve como principal objetivo a avaliação dos planos de manutenção existentes no parque eólico de Pampilhosa da Serra, e depois de analisados diferentes parâmetros, tais como a análise de vibrações, óleos e temperaturas, conclui-se que as vibrações são as variáveis que apresentam um melhor comportamento no antes e depois das substituições. Assim será de extrema relevância a continuidade da utilização desta ferramenta na melhoria dos planos de manutenção, pois os mesmos contemplam muitas vezes ações de manutenção preventiva e com a utilização destas variáveis todo o planeamento poderá ser ajustado. Contudo deve ser realçado o fato de utilizarmos mais do que uma variável na previsão da falha, tais como análise de óleos e a temperatura, estas podem ajudar no replaneamento das ações de manutenção.

Como observado as vibrações são as primeiras a fornecerem informação de que a falha está no seu estado inicial. Ao utilizarmos a análise de óleo e da temperatura, estas permitem estender o prazo de intervenção até ao momento em que as previsões de vento indicam que a turbina não funcionará.

No tratamento dos dados sobre os níveis de vibrações, estes indicaram uma melhoria relativamente às amplitudes de vibrações entre o antes e depois das substituições, quer para as caixas multiplicadoras como para os geradores.

Quanto aos óleos lubrificantes, estes podem ajudar na identificação da causa de falha, pois quando o ferro e o cobre apresentavam valores elevados, a degradação da caixa multiplicadora implicava a sua substituição por completo. Na maior parte das turbinas estudadas, verificou-se um elevado estado de envelhecimento dos óleos lubrificantes das caixas multiplicadoras, devido aos elevados níveis oxidação. A oxidação dos óleos, pode ter sido resultante da redução dos aditivos, visto que, quando as caixas multiplicadoras e os seus subconjuntos foram

substituídos, apresentavam valores baixos da carga aditiva e em alguns casos nulos, por outro lado, notou-se um elevado índice de contaminantes, geralmente o silício e água.

Em termos de metais de desgaste, foi evidente que o cobre e o ferro são os mais se revelaram, o que pode se associar ao desgaste dos rolamentos e das rodas dentas existentes nas caixas multiplicadoras.

No entanto, na variável temperatura e análises de óleos não se encontrou um padrão entre o antes e depois da substituição.

Relativamente às curvas de potência existe uma pequena melhoria no depois das substituições, contudo esta não será uma variável fácil de utilizar na avaliação das ações de manutenção.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do estudo do impacto da velocidade do vento em relação a temperatura dos óleos lubrificantes, foi possível notar pontos dispersos, não sendo possível identificar com clareza qual a razão pela qual os pontos estão dispersos da linha teórica, seria importante que o efeito do vento em relação à temperatura dos óleos fosse estudado nos trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- Abolude, A., & Zhou, W. (2017). A preliminary analysis of wind turbine energy yield. *Energy Procedia*, 138, 423–428. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.189>
- Bardal, L. M., & Sætran, L. R. (2017). Influence of turbulence intensity on wind turbine power curves. *Energy Procedia*, 137, 553–558. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.384>
- Bhardwaj, U., Teixeira, A. P., & Soares, C. G. (2019). Reliability prediction of bearings of an offshore wind turbine gearbox. *Advances in Renewable Energies Offshore - Proceedings of the 3rd International Conference on Renewable Energies Offshore, RENEW 2018, July 2021*, 779–787.
- Calhau, F., Pintassilgo, P., & Guerreiro, J. (2020). *Comunidades energéticas sustentáveis. 1*, 238.
- Cambron, P., Tahan, A., Masson, C., & Pelletier, F. (2017). Bearing temperature monitoring of a Wind Turbine using physics-based model. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 23(4), 479–488. <https://doi.org/10.1108/JQME-06-2016-0028>
- Carroll, J., McDonald, A., & McMillan, D. (2016). Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines. *Wind Energy*, 19(6), 1107–1119. <https://doi.org/10.1002/we.1887>
- Castro, R. (2009). Introdução à Energia Eólica, Energias Renováveis e Produção Descentralizada. *Energias Renováveis e Produção Descentralizada, 2009*(edição 4), 94. http://enerp4.ist.utl.pt/RuiCastro/download/Eolica_ed4.pdf
- CASTROL. (2024). *CASTROL Optigear Synthetic CT*. [https://msdspds.castrol.com/bpglis/FusionPDS.nsf/Files/DEA5BA71A44DA288802581E9003D5BEA/\\$File/BPXE-AU2JDS.pdf](https://msdspds.castrol.com/bpglis/FusionPDS.nsf/Files/DEA5BA71A44DA288802581E9003D5BEA/$File/BPXE-AU2JDS.pdf)
- Coronado, D., & Wenske, J. (2018). Monitoring the oil of wind-turbine gearboxes: Main degradation indicators and detection methods. *Machines*, 6(2), 1–24. <https://doi.org/10.3390/MACHINES6020025>
- Del Álamo, J. R., Duran, M. J., & Muñoz, F. J. (2020). Analysis of the gearbox oil maintenance

- procedures in wind energy. *Energies*, 13(13), 1–18. <https://doi.org/10.3390/en13133414>
- El-Thalji, I. (2010). Systems Dependability Engineering for Wind Power Applications: Challenges, Concepts, and System-Level Methodologies. *Engineering*.
- El-Thalji, I., & Liyanage, J. P. (2012). On the operation and maintenance practices of wind power asset: A status review and observations. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(3), 232–266. <https://doi.org/10.1108/13552511211265785>
- EWEA. (2024). *European Wind Energy Association*. <https://www.ewea.org/>
- Exception Report. (2022). ventientenergy.com
- Faulstich, S., Hahn, B., & Tavner, P. J. (2011). Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment. *Wind Energy*, 14(3), 327–337. <https://doi.org/10.1002/we.421>
- Feliciano, Y. A., Trinchet Varela, C. A., Vargas Guativas, J. A., Lorente-Leyva, L. L., & Peluffo-Ordóñez, D. H. (2021). Evaluation of working temperature in wind turbine bearings by simulation of lubricant level. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 16(1), 99–104. <https://doi.org/10.18280/ij dne.160113>
- Feng, Y., Qiu, Y., Crabtree, C. J., Long, H., & Tavner, P. J. (2013). Monitoring wind turbine gearboxes. *Wind Energy*, 16(5), 728–740. <https://doi.org/10.1002/we.1521>
- Gon, P. (2019). *Análise de perdas de produção eólica associadas a trocas de rolamentos em aerogeradores* *Análise de perdas de produção eólica associadas a trocas de rolamentos em aerogeradores*.
- Hart, E., Clarke, B., Nicholas, G., Kazemi Amiri, A., Stirling, J., Carroll, J., Dwyer-Joyce, R., McDonald, A., & Long, H. (2020). A review of wind turbine main bearings: Design, operation, modelling, damage mechanisms and fault detection. *Wind Energy Science*, 5(1), 105–124. <https://doi.org/10.5194/wes-5-105-2020>
- Henneberg, M., Eriksen, R. L., Jørgensen, B., & Fich, J. (2015). A quasi-stationary approach to particle concentration and distribution in gear oil for wear mode estimation. *Wear*, 324–325, 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.012>
- Igba, J., Alemzadeh, K., Durugbo, C., & Eiriksson, E. T. (2016). Analysing RMS and peak values of vibration signals for condition monitoring of wind turbine gearboxes. *Renewable Energy*, 91, 90–106. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.006>
- INEGI/APREN. (2024). *Energias Endógenas de Portugal*. <https://e2p.inegi.up.pt/index.php?Lang=PT>
- IRENA. (2019). Future of Wind (Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects). In *International Renewable Energy Agency (IRENA) is*.
- Jesus, P. M. P. G. De. (2020). *Análise de perdas de produção eólica através da monitorização*

- da variável temperatura em caixas multiplicadoras*. Universidade do Algarve.
- Jesús Terradillos, M. B., & José Ignacio Ciria, A. M. (2021). Bureau Veritas 2021. *Bureau Veritas*, 2. https://group.bureauveritas.com/sites/g/files/zypfnx196/files/media/document/Bureau-Veritas_2021_Universal_Registration_Document_vFinal.pdf
- Joyce Lee, F. Z. (2021). Global Wind Report 2021| Gwec. *Global Wind Energy Council*, 75.
- Karyotakis, A. (2011). On the optimisation of operation and maintenance strategies for offshore wind farms. *Mechanical Engineering*, February, 1–12. <http://discovery.ucl.ac.uk/1302066/>
- Koukoura, S., Carroll, J., & McDonald, A. (2019). On the use of AI based vibration condition monitoring of wind turbine gearboxes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1222(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1222/1/012045>
- Kr Singh, D., Kurien, J., & Villayamore, A. (2020). Study and analysis of wind turbine gearbox lubrication failure and its mitigation process. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3976–3983. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.047>
- Liang, T., Yang, G., Dong, Y., Qian, S., & Xu, Y. (2018). Predicting temperatures of wind turbine gearbox by a variable-weight combined model. *ICAC 2018 - 2018 24th IEEE International Conference on Automation and Computing: Improving Productivity through Automation and Computing*, September, 1–6. <https://doi.org/10.23919/IConAC.2018.8749036>
- Liton Hossain, M., Abu-Siada, A., & Muyeen, S. M. (2018). Methods for advanced wind turbine condition monitoring and early diagnosis: A literature review. *Energies*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/en11051309>
- Mao, Y., Tong, J., Chin, Z. Y., Borghesani, P., & Peng, Z. (2023). Transmission-error- and vibration-based condition monitoring of gear wear with contaminated lubricant. *Wear*, 523(January), 204760. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204760>
- Marques, P. M. T. (2012). *Efficiency of a Gearbox Lubricated with Wind Mill gear Oils* (Issue July).
- Márquez, F. P. G., Papaelias, M., & Karyotakis, A. (2019). Introduction to non-destructive testing and condition monitoring techniques for renewable energy industrial assets. In *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring Techniques for Renewable Energy Industrial Assets*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101094-5.09990-1>
- Mesquita Brandão, R. F., Beleza Carvalho, J. A., & MacIel Barbosa, F. P. (2012). Forecast of faults in a wind turbine gearbox. *Proceedings of 9th International Conference*,

- ELEKTRO* 2012, May, 170–173. <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2012.6225632>
- MOBIL. (2024). *Mobilgear SHC™XMP* 320. <https://www.mobil.com/en/sap/lubricants/products/mobilgear-shc-xmp-320>
- Nova, R. F. C. C. (2017). *Análise da potência observada num parque eólico nacional*. <http://hdl.handle.net/10400.21/8301>
- NSK. (2018). *ADVANCED BEARING SOLUTIONS FOR THE WIND INDUSTRY*. <https://www.nsk.com/content/dam/nsk/common/catalogs/ctrGpdf/bearings/e1285.pdf>
- Oelcheck. (2020). *TEST REPORT*. lubrication-management.com
- Pandit, R. K., Astolfi, D., & Durazo Cardenas, I. (2023). A Review of Predictive Techniques Used to Support Decision Making for Maintenance Operations of Wind Turbines. *Energies*, 16(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/en16041654>
- Peng, H., Li, S., Shangguan, L., Fan, Y., & Zhang, H. (2023). Analysis of Wind Turbine Equipment Failure and Intelligent Operation and Maintenance Research. *Sustainability (Switzerland)*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/su15108333>
- Peng, H., Zhang, H., Shangguan, L., & Fan, Y. (2022). Review of Tribological Failure Analysis and Lubrication Technology Research of Wind Power Bearings. *Polymers*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/polym14153041>
- Plurasafe®, & Plus, G. (2024). *Plurasafe® GL Plus*. https://www.ilco-chemie.de/downloads/Plurasafe_GL_Plus.pdf
- Queensland Treasury. (2024). *Queensland Sustainability Report 2023*. May. https://s3.treasury.qld.gov.au/files/2023_Queensland_Sustainability_Report.pdf
- Reliability, G., & Projects, C. (2007). *Collaborative Increases Gearbox Reliability and Helps Reduce Cost of Wind Energy*.
- Richardson, A. D., Evans, M. H., Wang, L., Ingram, M., Rowland, Z., Llanos, G., & Wood, R. J. K. (2019). The effect of over-based calcium sulfonate detergent additives on white etching crack (WEC) formation in rolling contact fatigue tested 100Cr6 steel. *Tribology International*, 133(January), 246–262. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.005>
- Romero, A., Lage, Y., Soua, S., Wang, B., & Gan, T. H. (2016). Vestas V90-3MW Wind Turbine Gearbox Health Assessment Using a Vibration-Based Condition Monitoring System. *Shock and Vibration*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/6423587>
- Salameh, J. P., Cauet, S., Etien, E., Sakout, A., & Rambault, L. (2018). Gearbox condition monitoring in wind turbines: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 111, 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.03.052>
- Satymov, R., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2022). Global-local analysis of cost-optimal

- onshore wind turbine configurations considering wind classes and hub heights. *Energy*, 256, 124629. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124629>
- Sequeira, C. D. (2012). *A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores*. 183.
- Sequeira, C., Pacheco, A., Galego, P., & Gorbeña, E. (2019). Analysis of the efficiency of wind turbine gearboxes using the temperature variable. *Renewable Energy*, 135, 465–472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.040>
- Shafiee, M., & Sørensen, J. D. (2019). Maintenance optimization and inspection planning of wind energy assets: Models, methods and strategies. *Reliability Engineering and System Safety*, 192(November 2017). <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.10.025>
- Sheng, S. (2015). Wind Turbine Gearbox Reliability Database, Condition Monitoring, and Operation and Maintenance Research Update. *National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy*, 21. <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66028.pdf>
- Silva Filho, L. P. da. (2020). Análise preditiva do óleo lubrificante usado em sistemas automotivos de equipamentos e maquinário pesado. *Revista Gestão Industrial*, 16(1), 40–63. <https://doi.org/10.3895/gi.v16n1.11392>
- Singh, G., & Sundaram, K. (2022). Methods to improve wind turbine generator bearing temperature imbalance for onshore wind turbines. *Wind Engineering*, 46(1), 150–159. <https://doi.org/10.1177/0309524X211015292>
- Sohoni, V., Gupta, S. C., & Nema, R. K. (2016). A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems. *Journal of Energy*, 2016(region 4), 1–18. <https://doi.org/10.1155/2016/8519785>
- Tautz-Weinert, J., & Watson, S. J. (2017). Using SCADA data for wind turbine condition monitoring - A review. *IET Renewable Power Generation*, 11(4), 382–394. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0248>
- Tavner, P. J., Xiang, J., & Spinato, F. (2007). Reliability analysis for wind turbines. *Wind Energy*, 10(1), 1–18. <https://doi.org/10.1002/we.204>
- Teng, W., Ding, X., Tang, S., Xu, J., Shi, B., & Liu, Y. (2021). Vibration Analysis for Fault Detection of Wind Turbine Drivetrains—A Comprehensive Investigation. *Sensors*, 21(5), 1686. <https://doi.org/10.3390/s21051686>
- Ventienty Energy. (2024). *Parque Eólica da Pampilhosa*. <https://www.ventientenergy.com/our-portfolio/pampilhosa/>
- Wang, M. H., Chen, F. H., & Lu, S. Der. (2023). Research on Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox with Snowflake Graph and Deep Learning Algorithm. *Applied Sciences*

REFERÊNCIAS

- (Switzerland), 13(3). <https://doi.org/10.3390/app13031416>
- Wilkinson, A. M., Hendriks, B., Spinato, F., Gomez, E., Bulacio, H., Tavner, P., Feng, Y., & Long, H. (2010). 2010 - Wilkinson, Hendriks, Spinato, Gomez, Bulacio, Roca, Tavner, Feng, Long - Methodology and results of the Reliawind ... (+++).pdf. Ewec.
- WindEurope. (2024). *Wind energy and the economy*. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-and-the-economy/>
- Zhao, M., & Ji, J. C. (2015). Nonlinear torsional vibrations of a wind turbine gearbox. *Applied Mathematical Modelling*, 39(16), 4928–4950. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.03.026>
- Zou, X., Zhang, J., Chen, J., Orozovic, O., Xie, X., & Li, J. (2023). Oil Monitoring and Fault Pre-Warning of Wind Turbine Gearbox Based on Combined Predicting Method. *Sustainability (Switzerland)*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/su15043802>

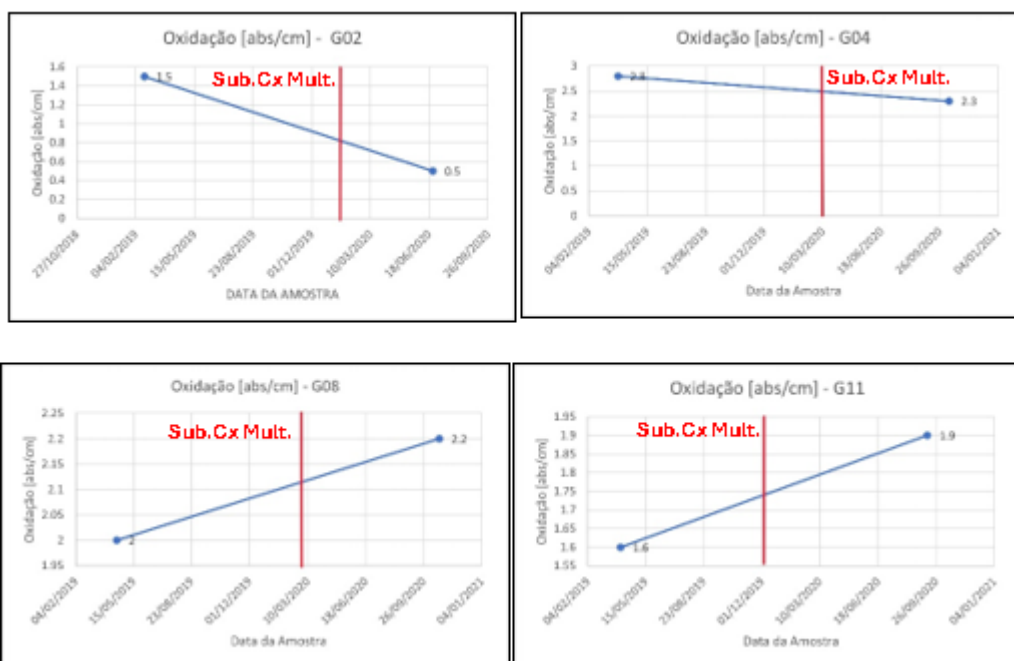
APÊNDICES

- Apêndice A – Condições do óleo
- Apêndice B – Aditivos no óleo
- Apêndice C – Contaminantes
- Apêndice D– Metais de desgaste
- Apêndice E– Nível de limpeza do óleo

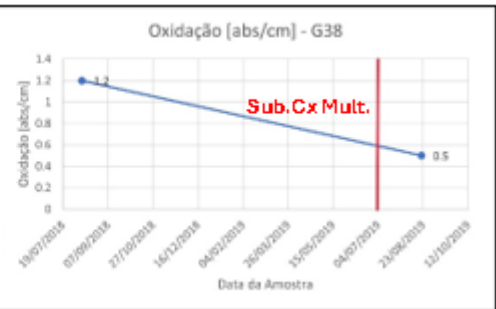
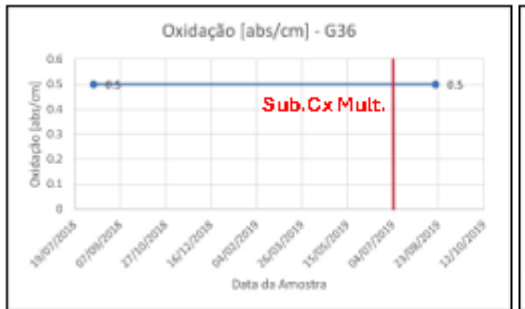
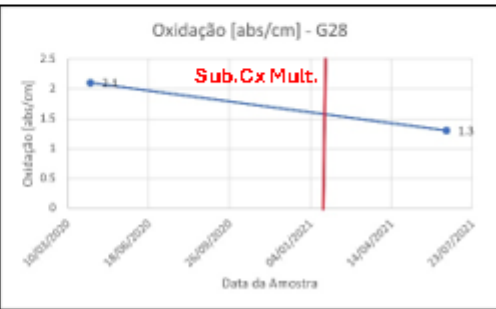
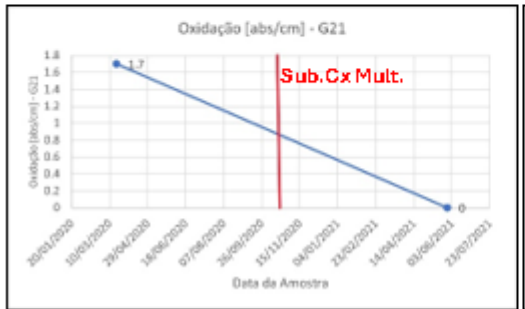
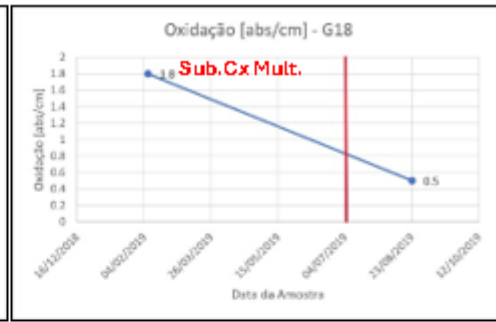
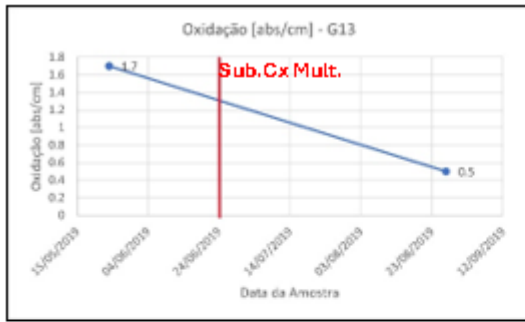


CONDIÇÕES DO ÓLEO

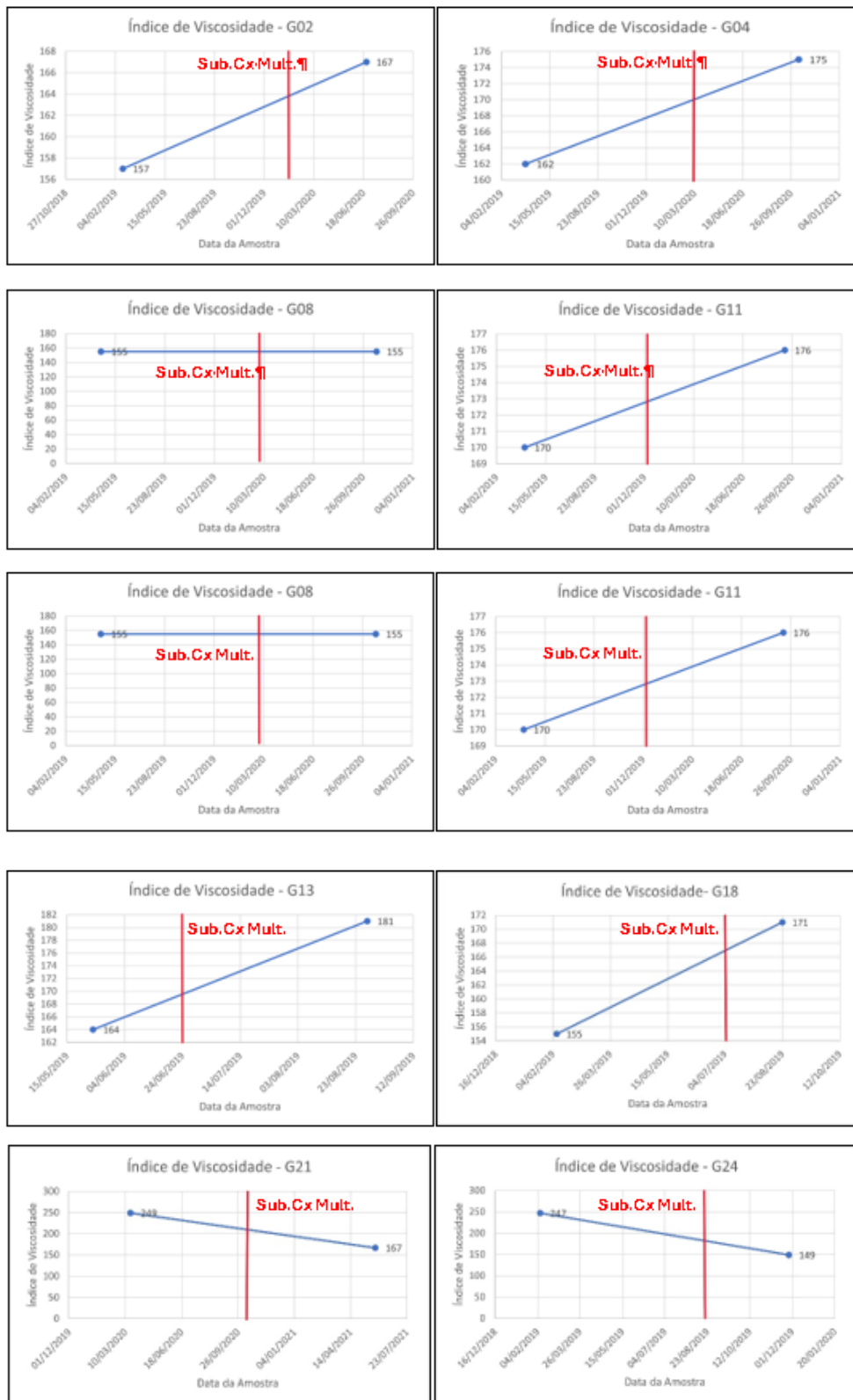
A.1 OXIDAÇÃO



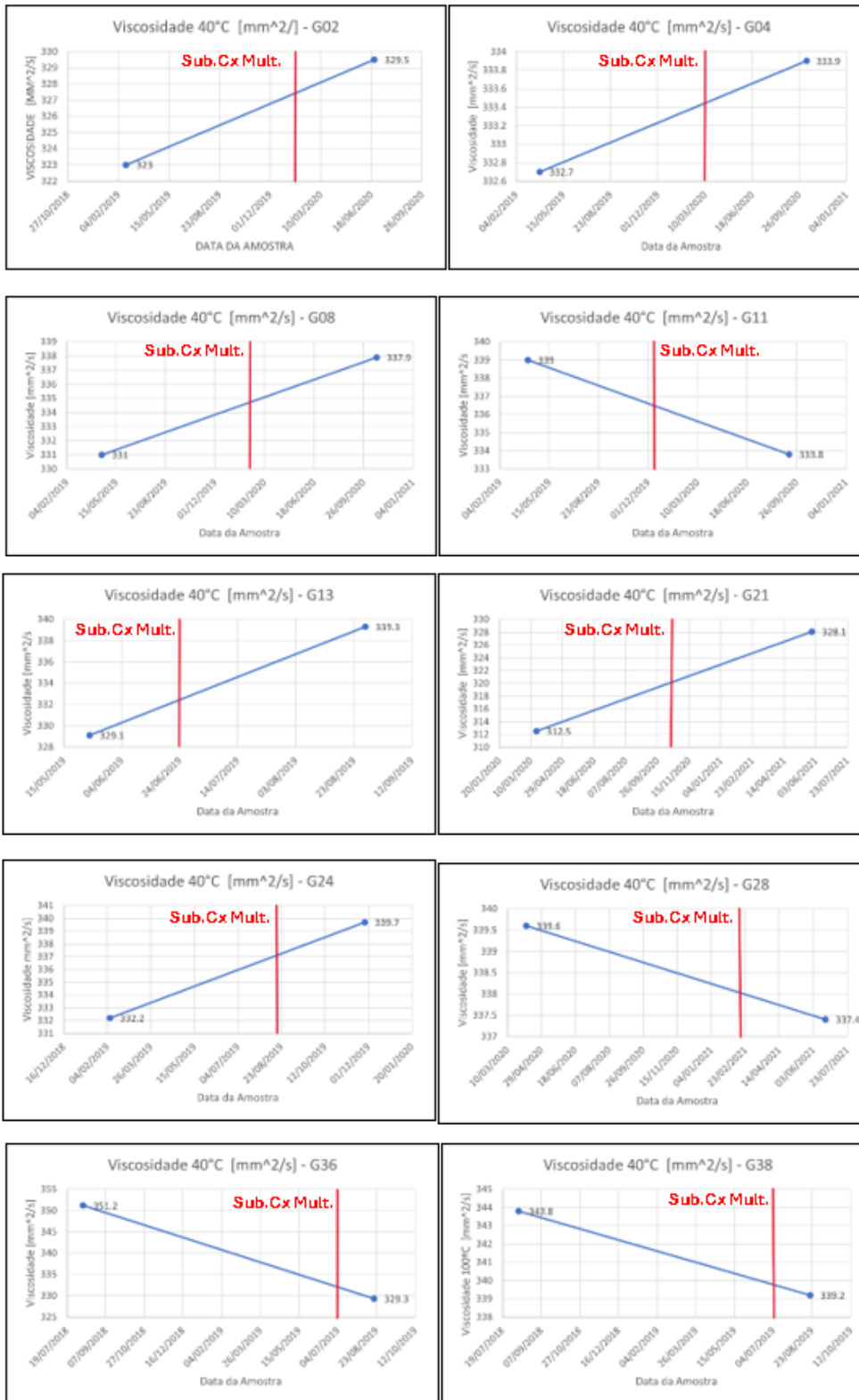
CONDIÇÕES DO ÓLEO



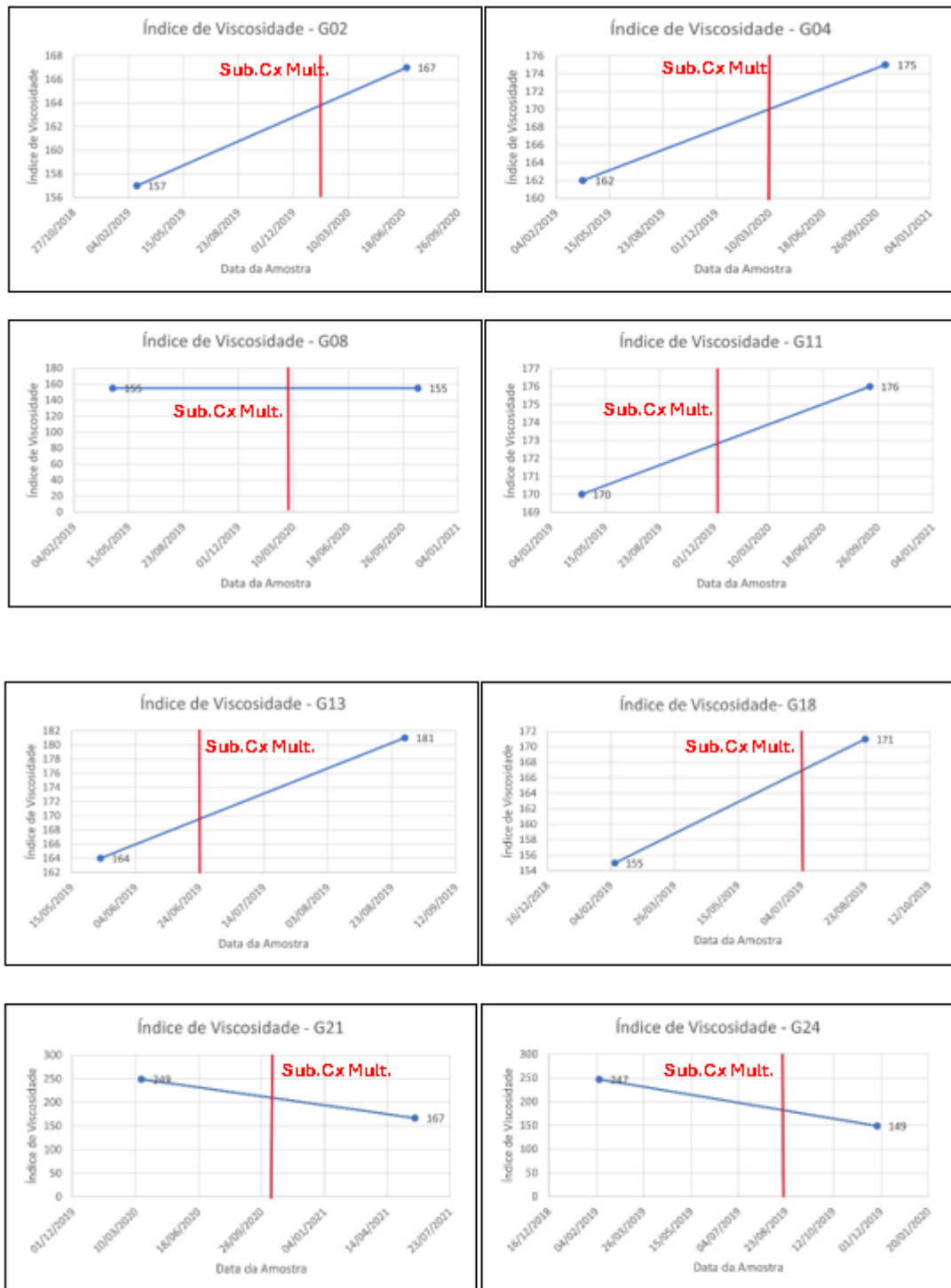
A.2 VISCOSIDADE DO ÓLEO A 100°C



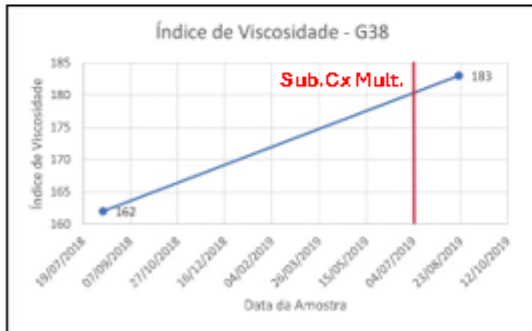
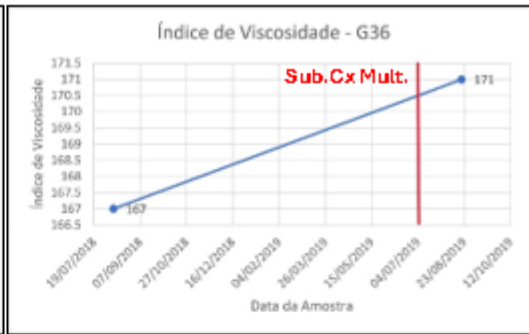
A.3 VISCOSIDADE DO ÓLEO A 40°C



A.4 ÍNDICE DE VISCOSIDADE



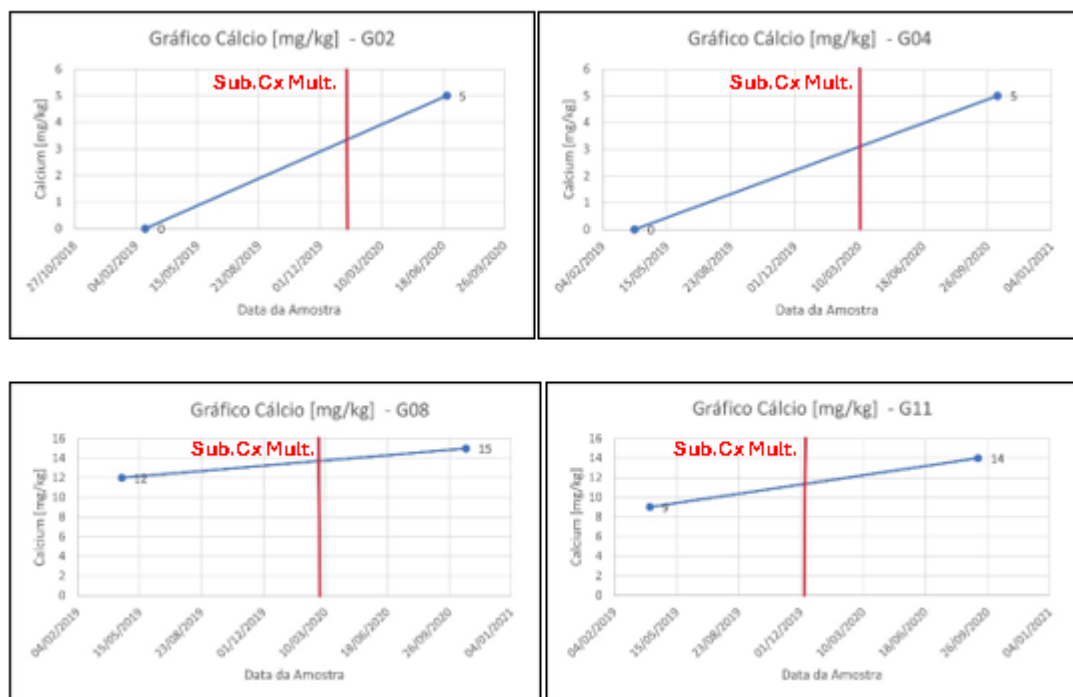
CONDIÇÕES DO ÓLEO

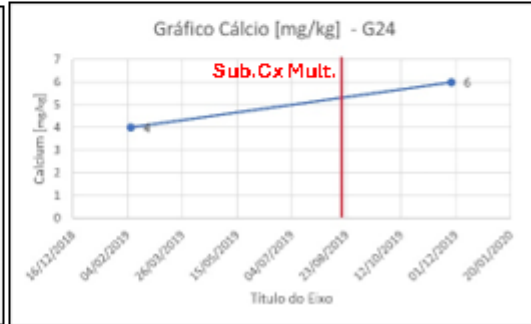
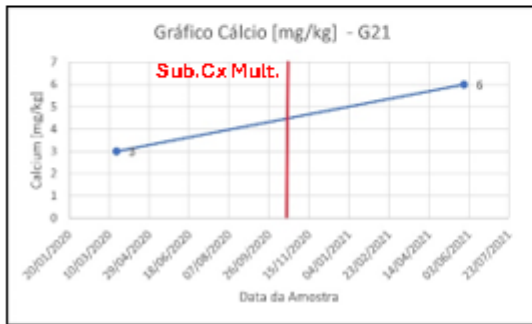
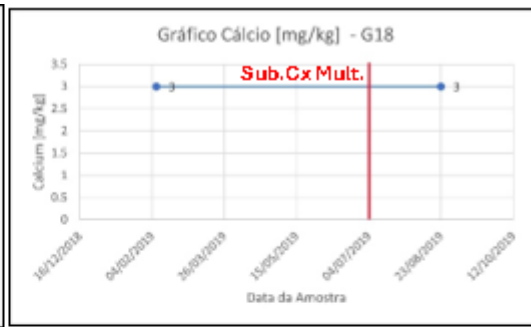
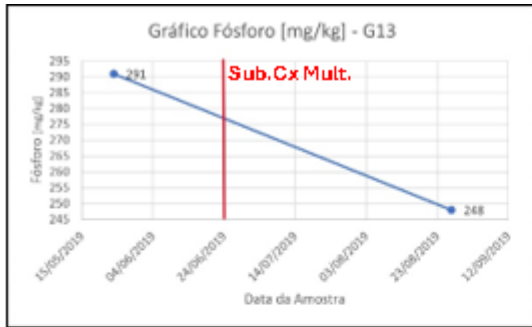


B

ADITIVOS NO ÓLEO

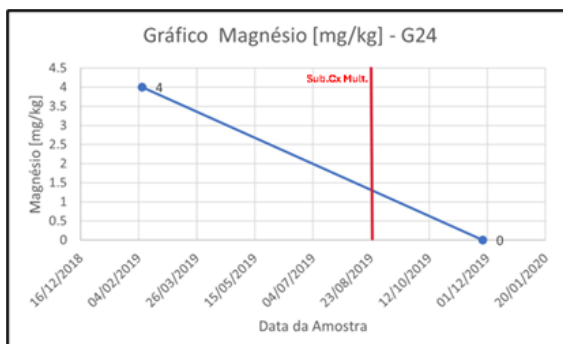
B.1 CÁLCIO



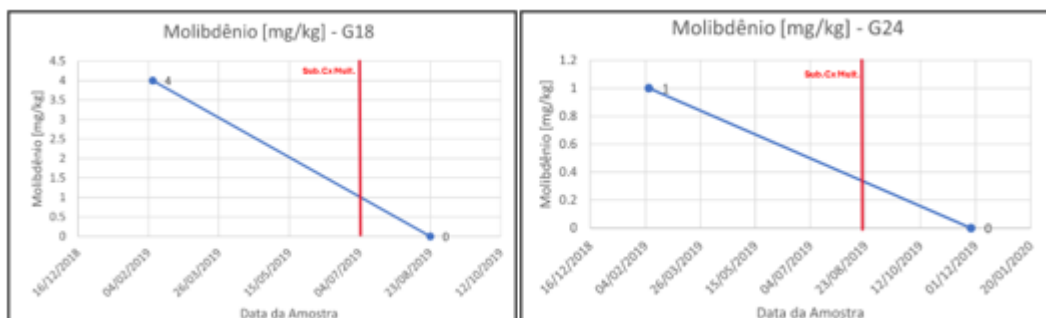


B.2 MAGNÉSIO, MOLIBDÊNIO E BORO

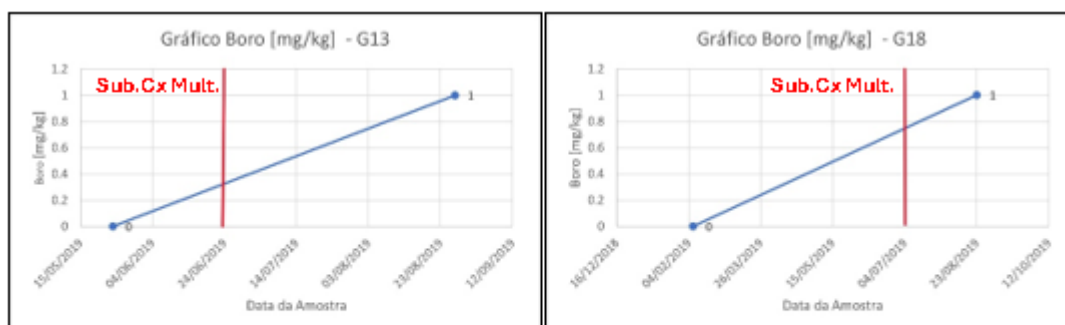
B.2.1 MAGNÉSIO

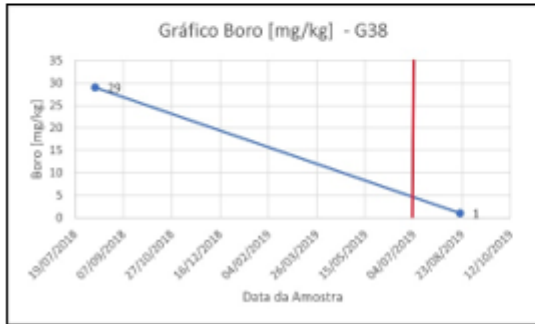
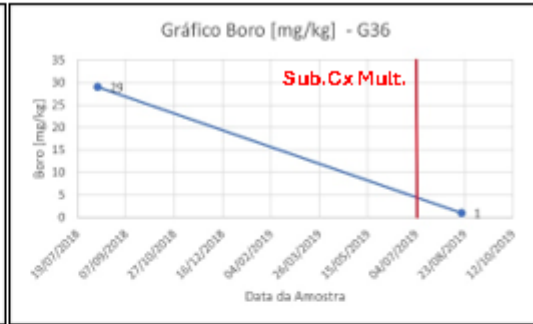
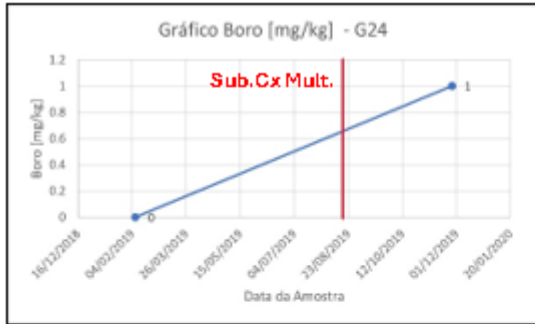


B.2.2 MOLIBDÊNIO

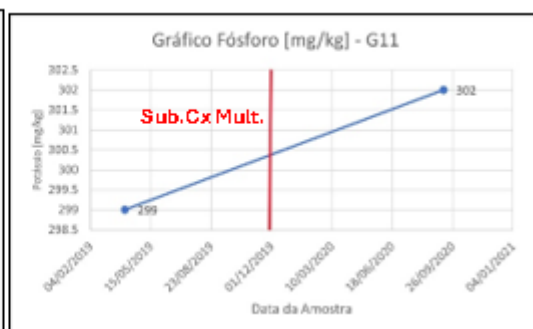
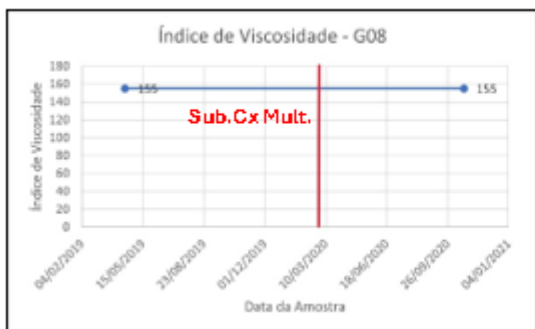
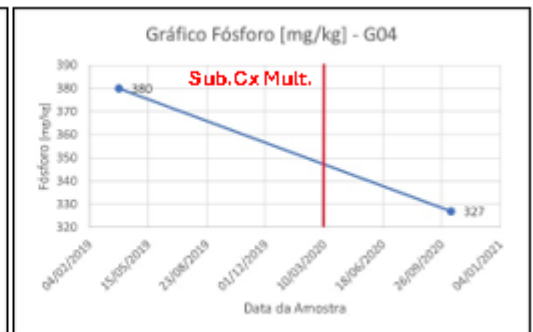
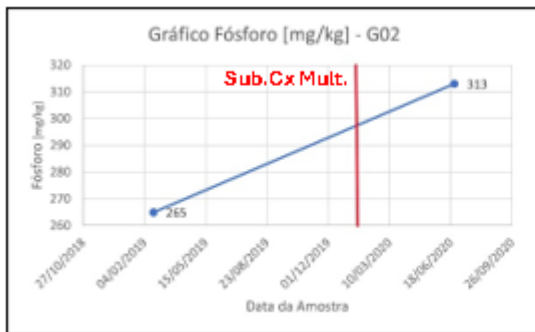


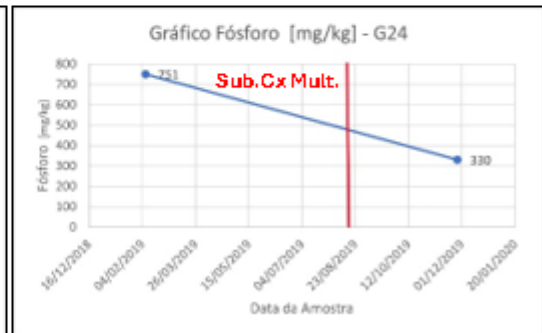
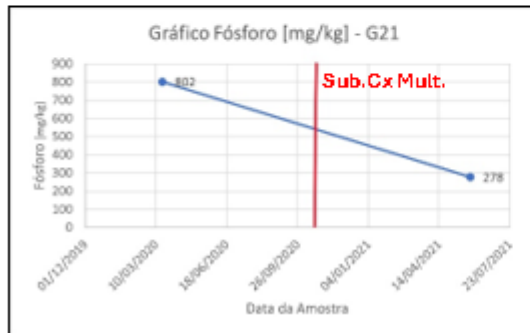
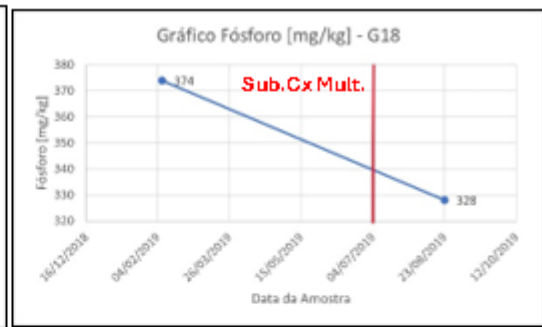
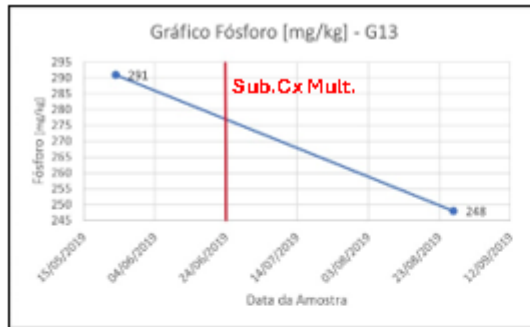
B.2.3 BORO



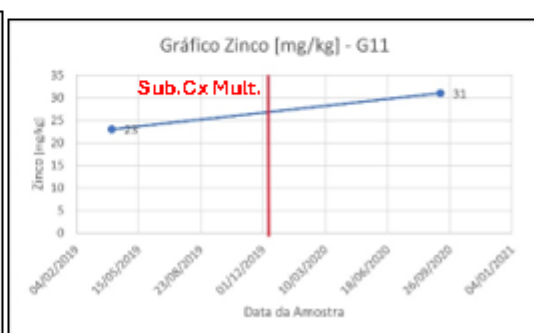
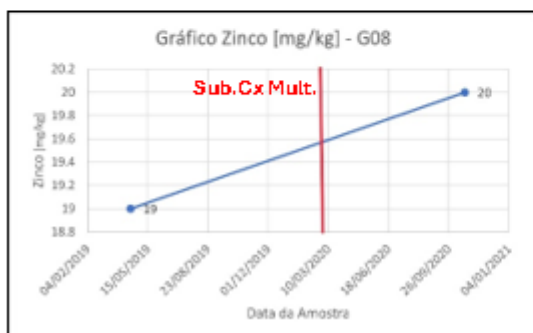
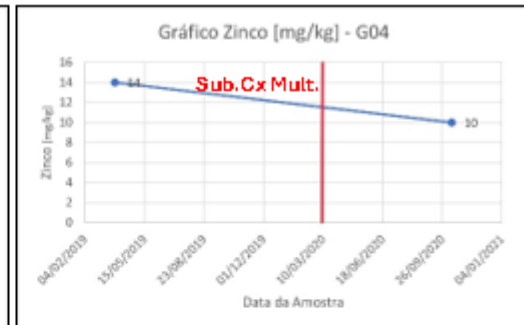
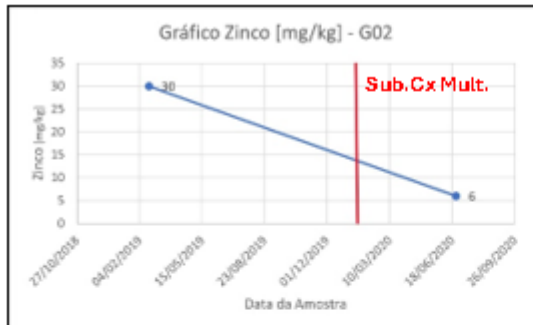


B.3 FÓSFORO

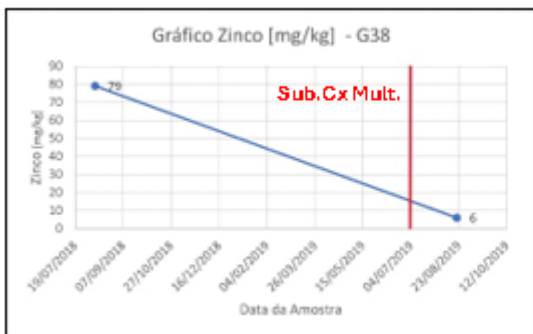
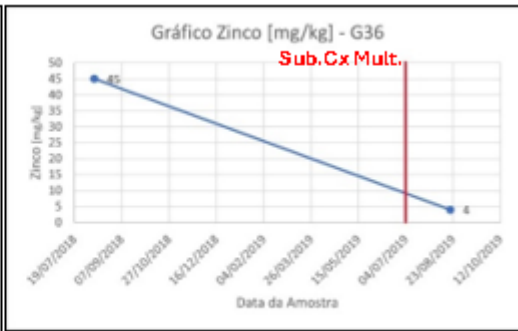
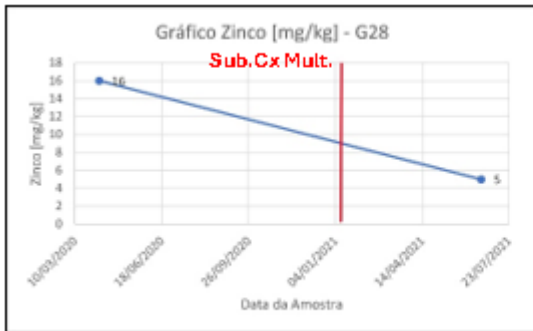
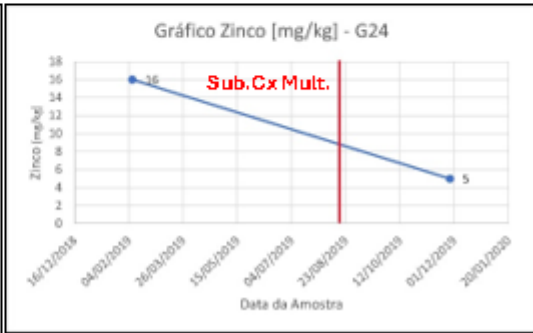
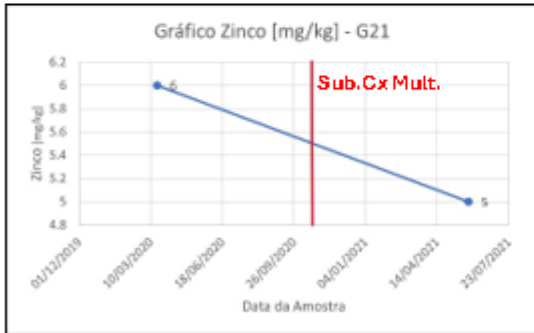
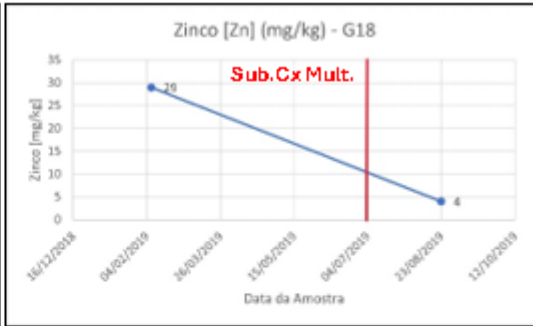
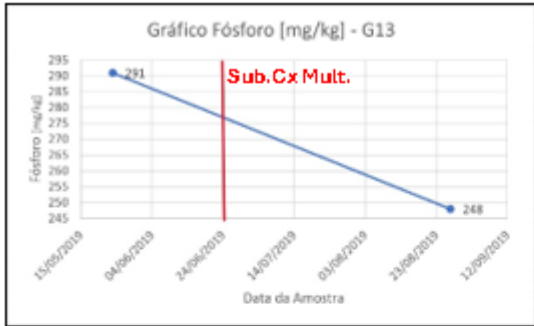




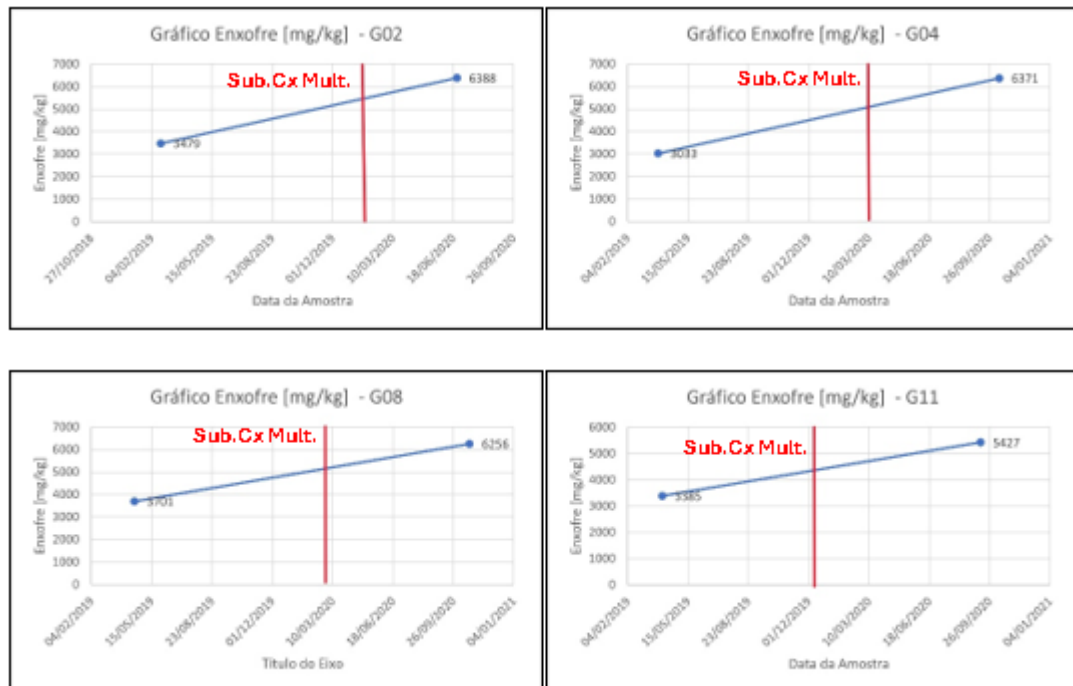
B.4 ZINCO



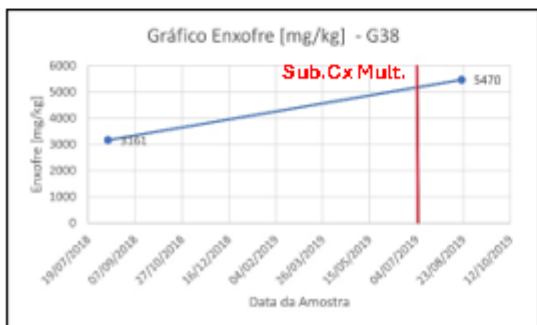
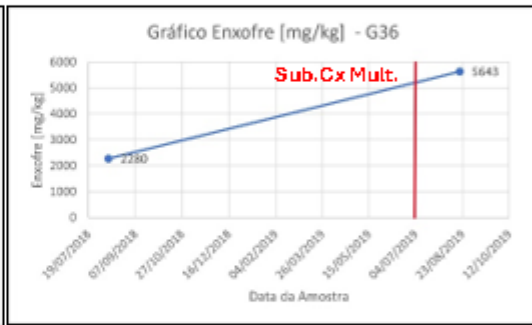
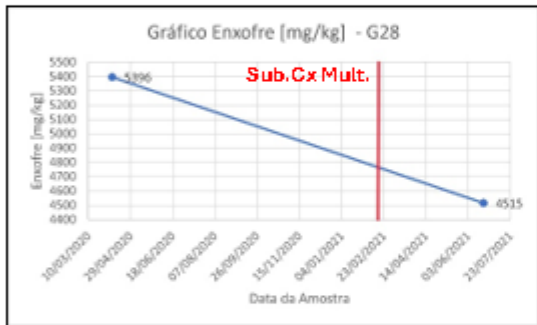
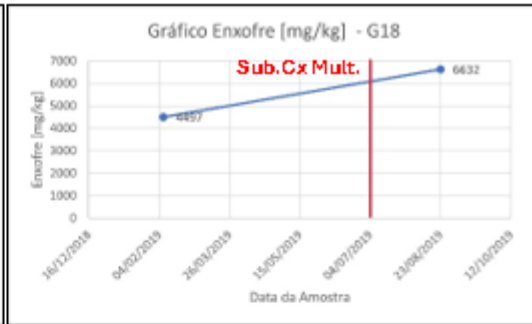
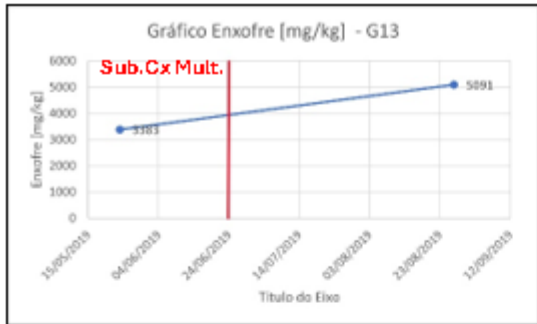
ADITIVOS NO ÓLEO



B.5 ENXOFRE



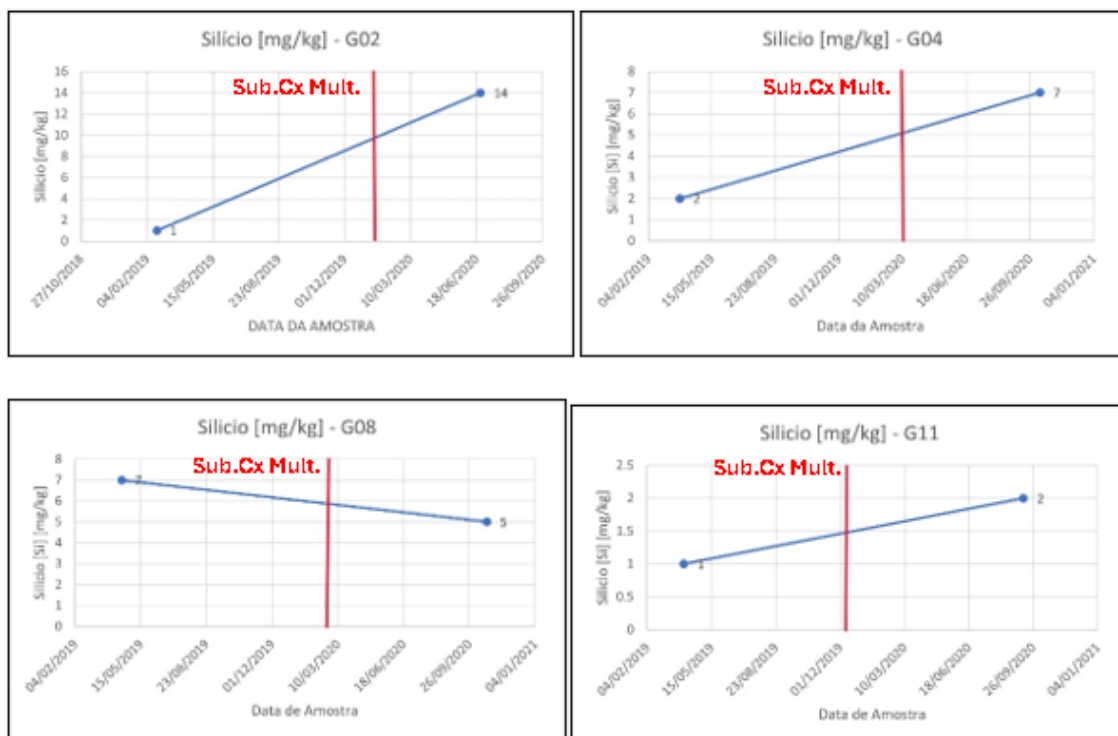
ADITIVOS NO ÓLEO



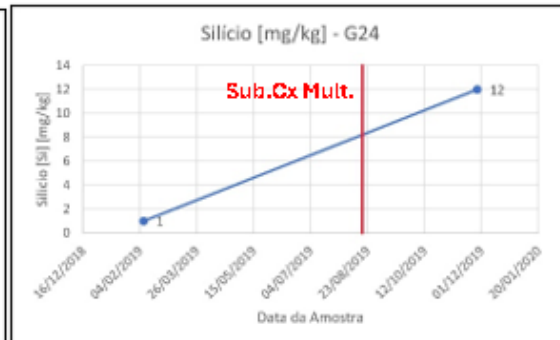
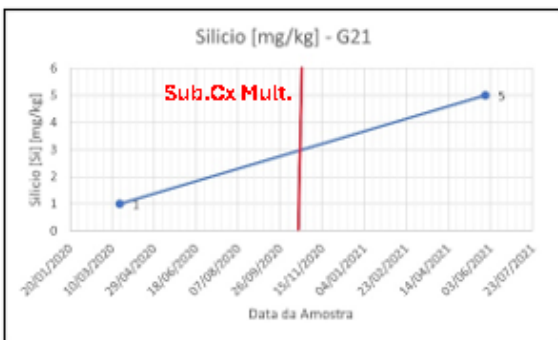
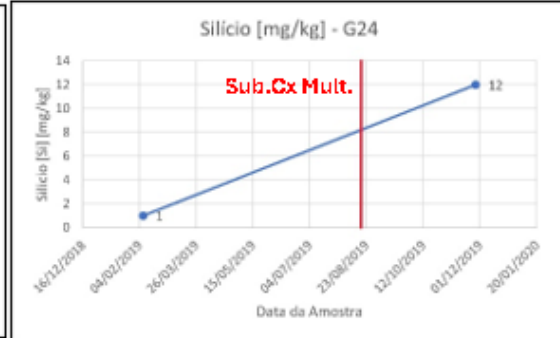
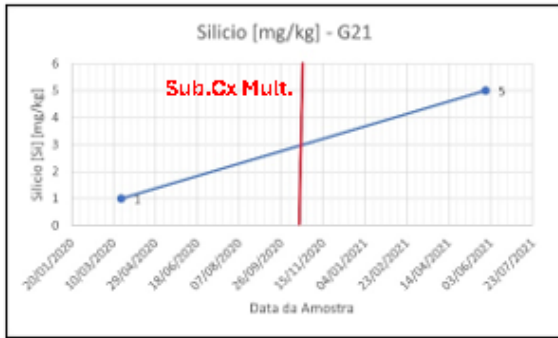
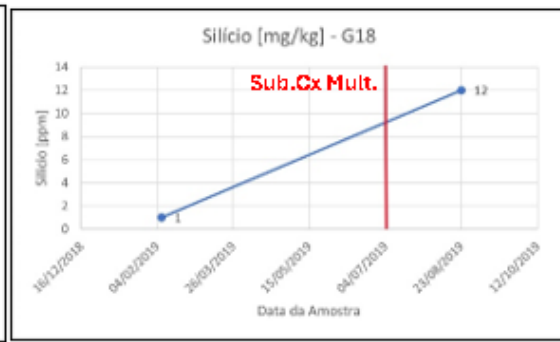
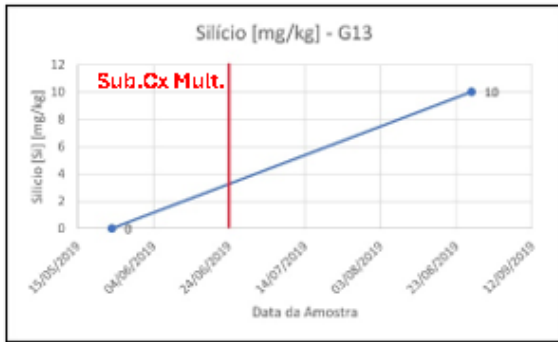
C

CONTAMINANTES

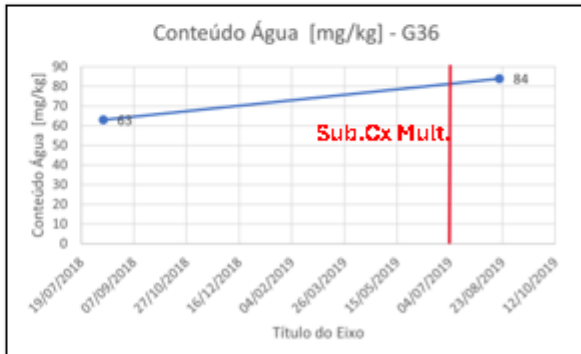
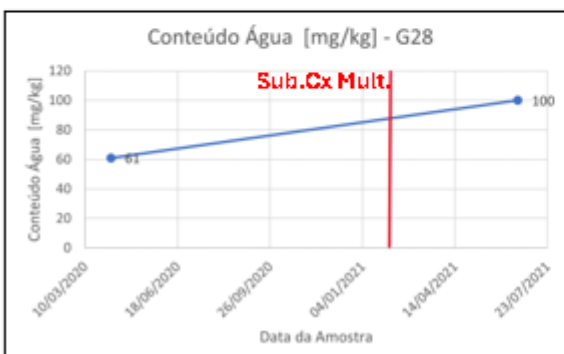
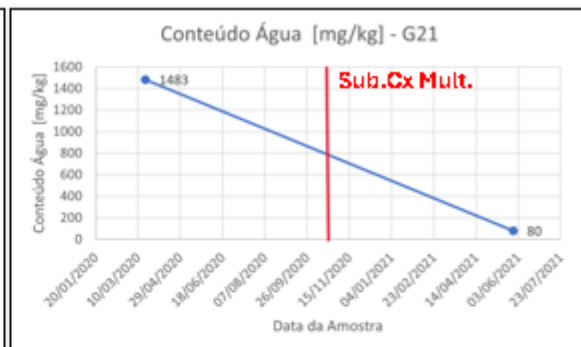
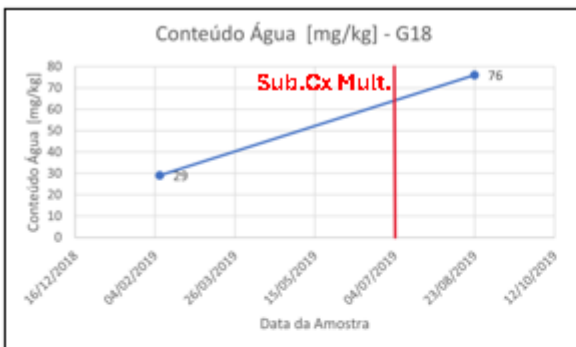
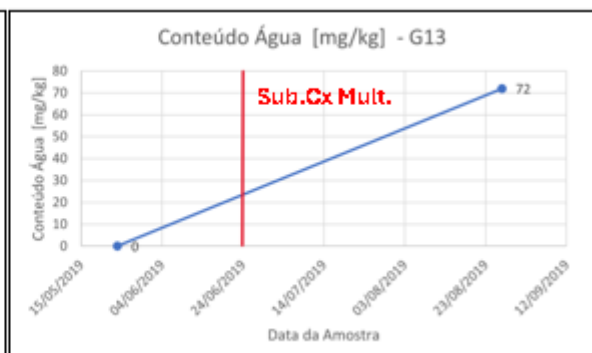
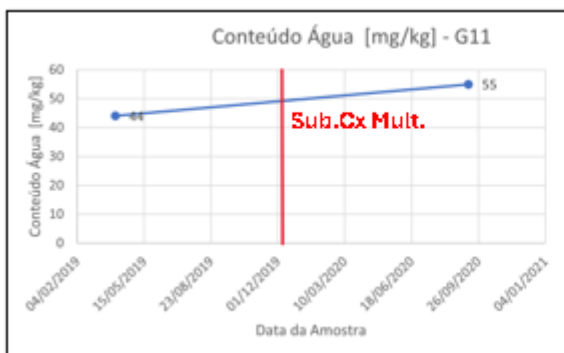
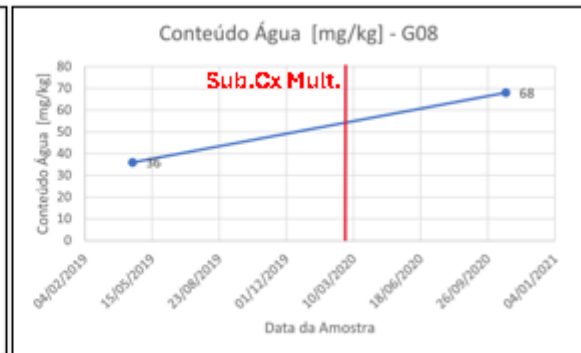
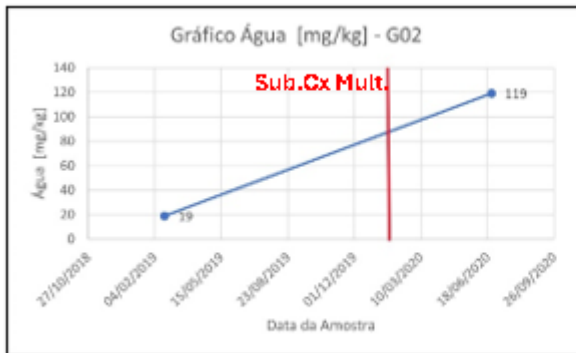
C.1 SÍLCIO



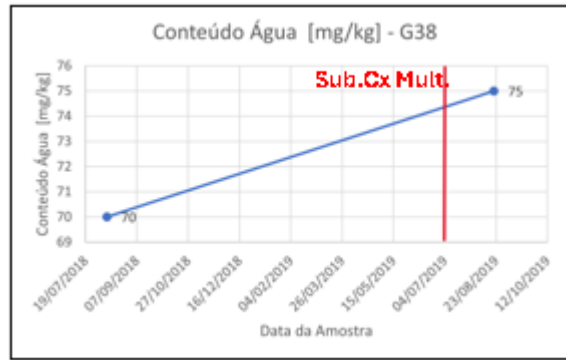
CONTAMINANTES



C.2 ÁGUA



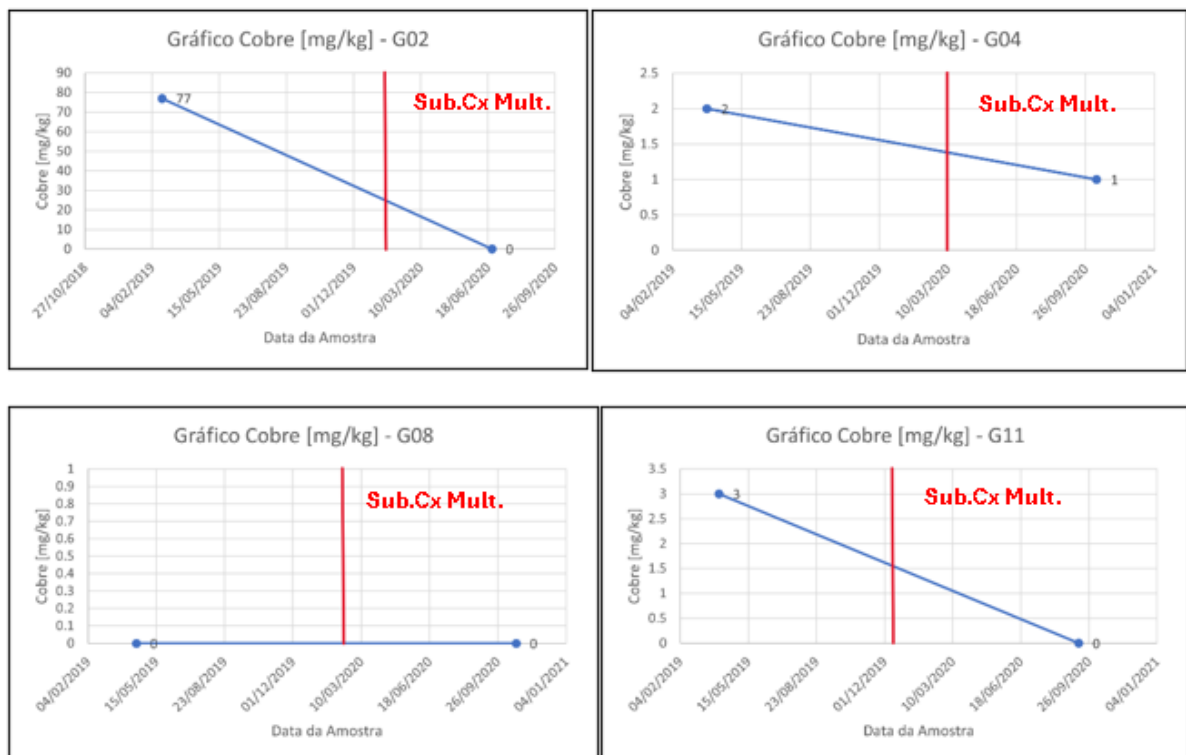
CONTAMINANTES



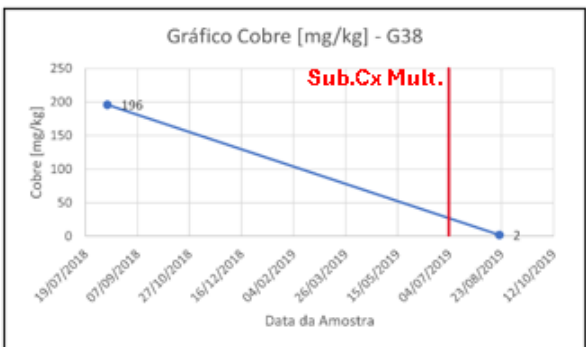
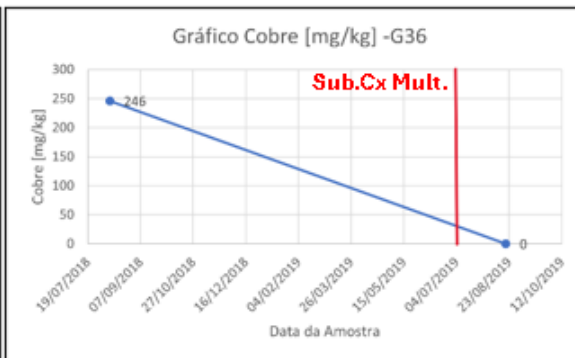
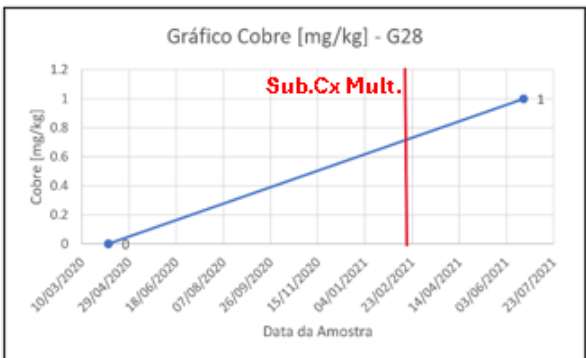
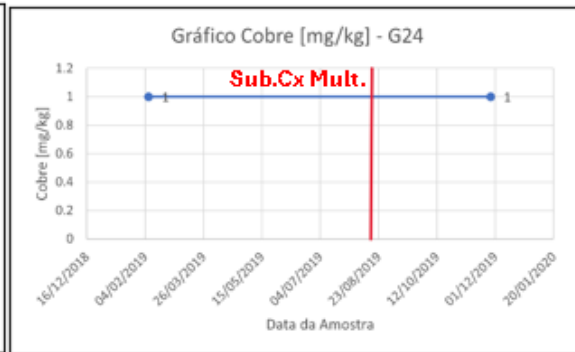
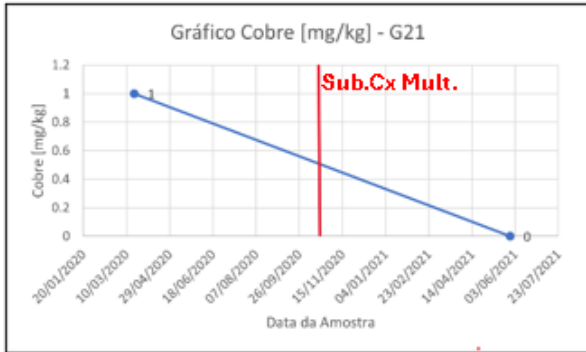
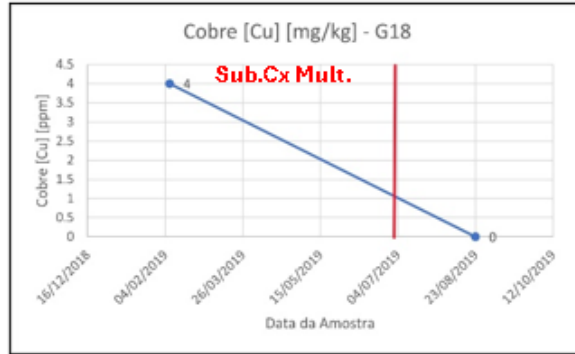
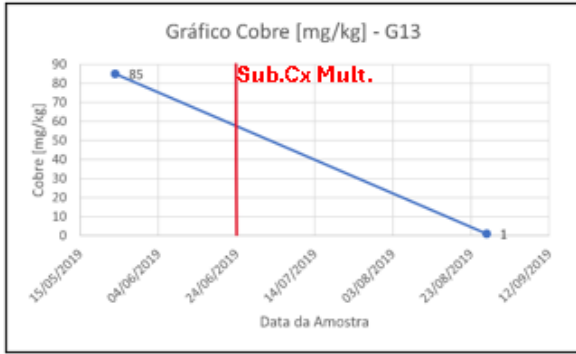
D

METAIS DE DESGASTE

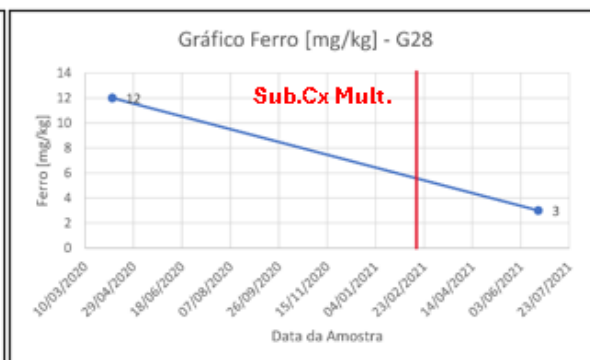
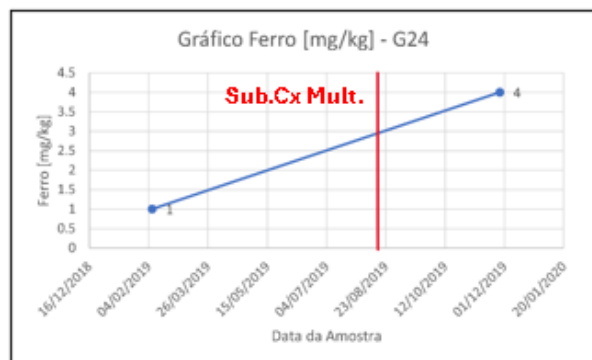
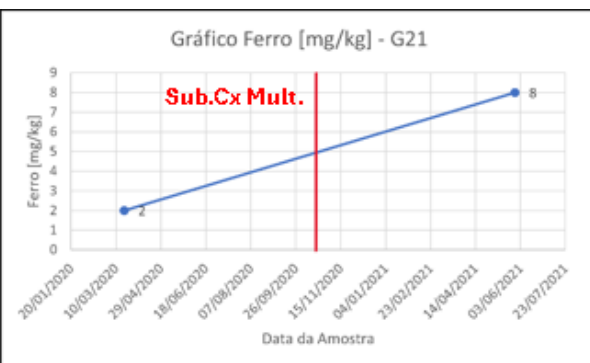
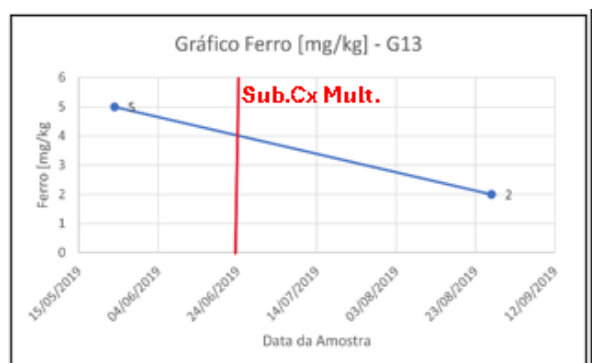
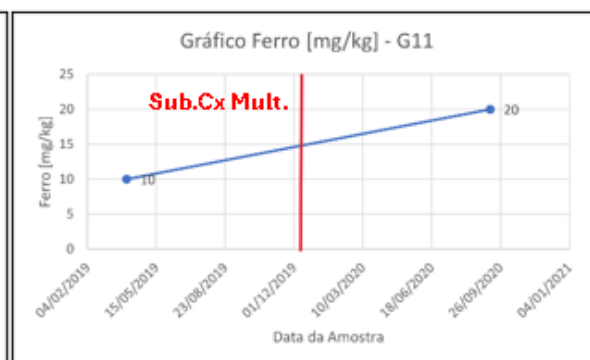
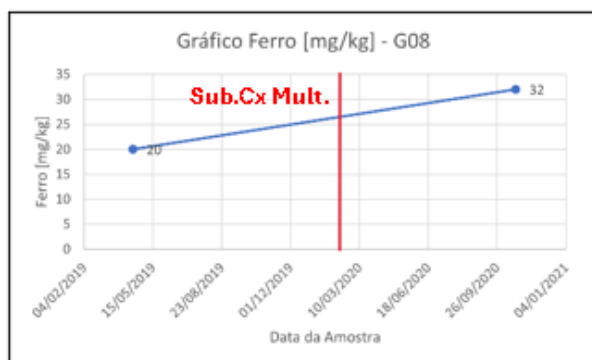
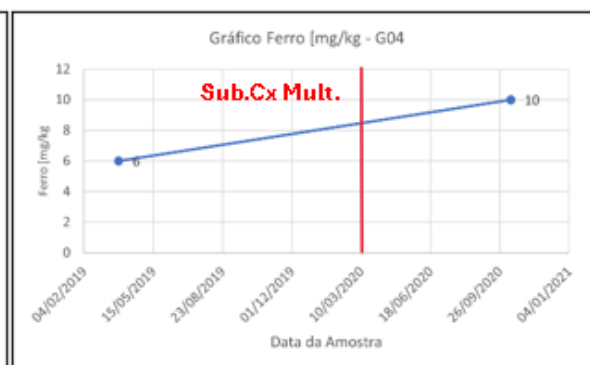
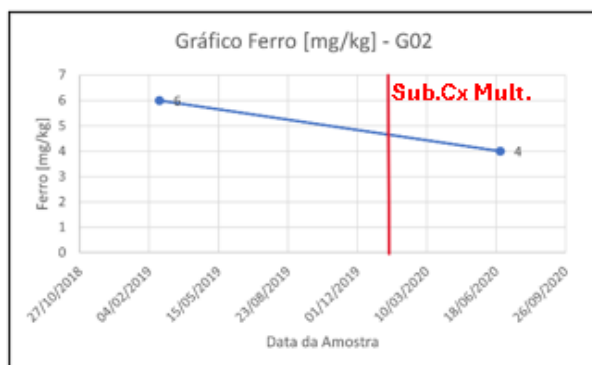
D.1 COBRE



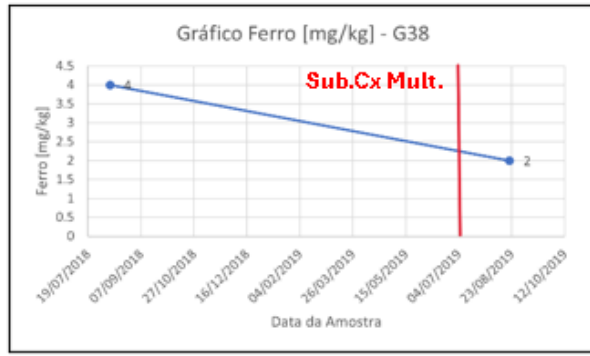
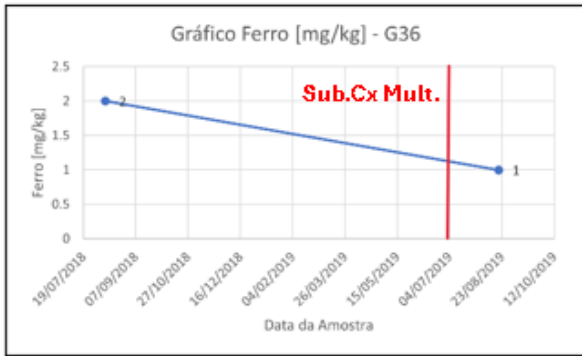
METAIS DE DESGASTE



D.2 FERRO

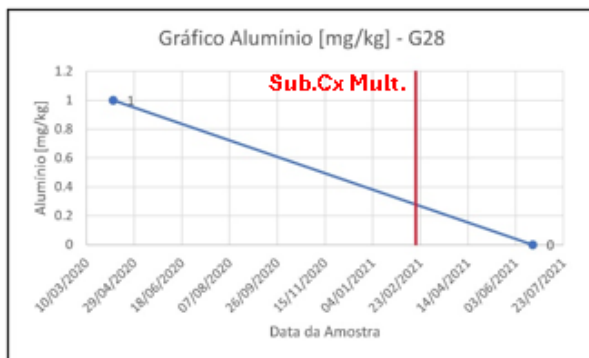
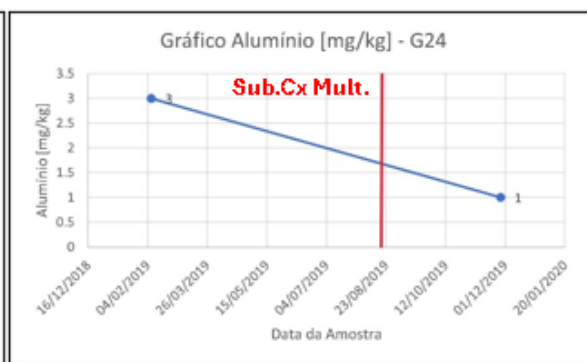
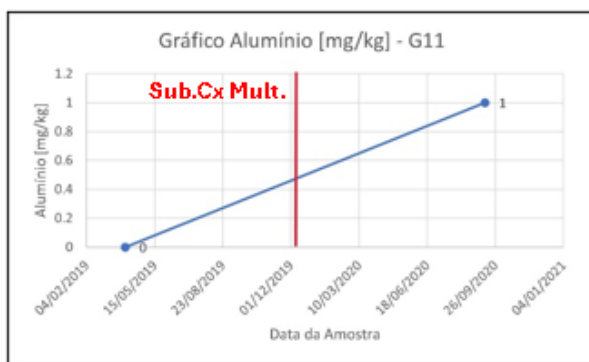
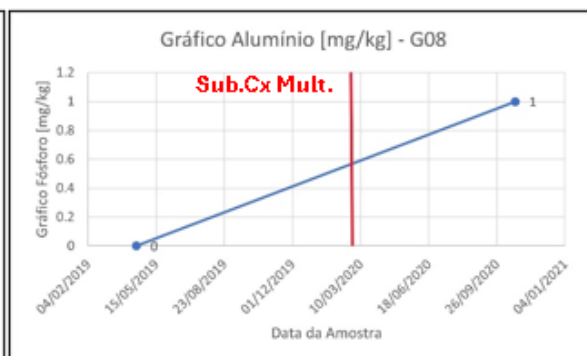
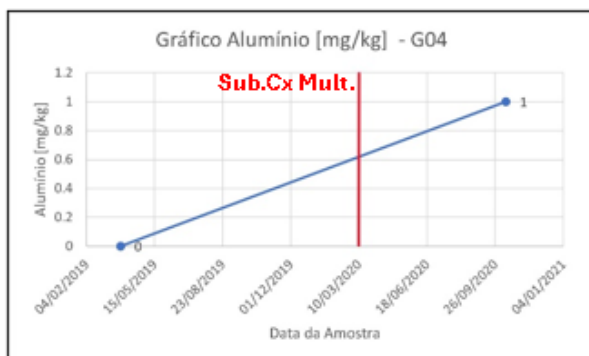


METAIS DE DESGASTE

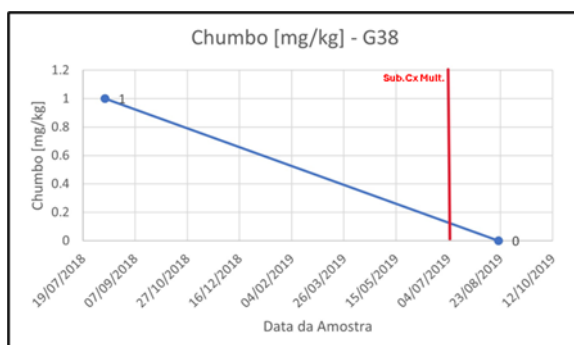


D.3 ALUMÍNIO E CHUMBO

D.3.1 ALUMÍNIO



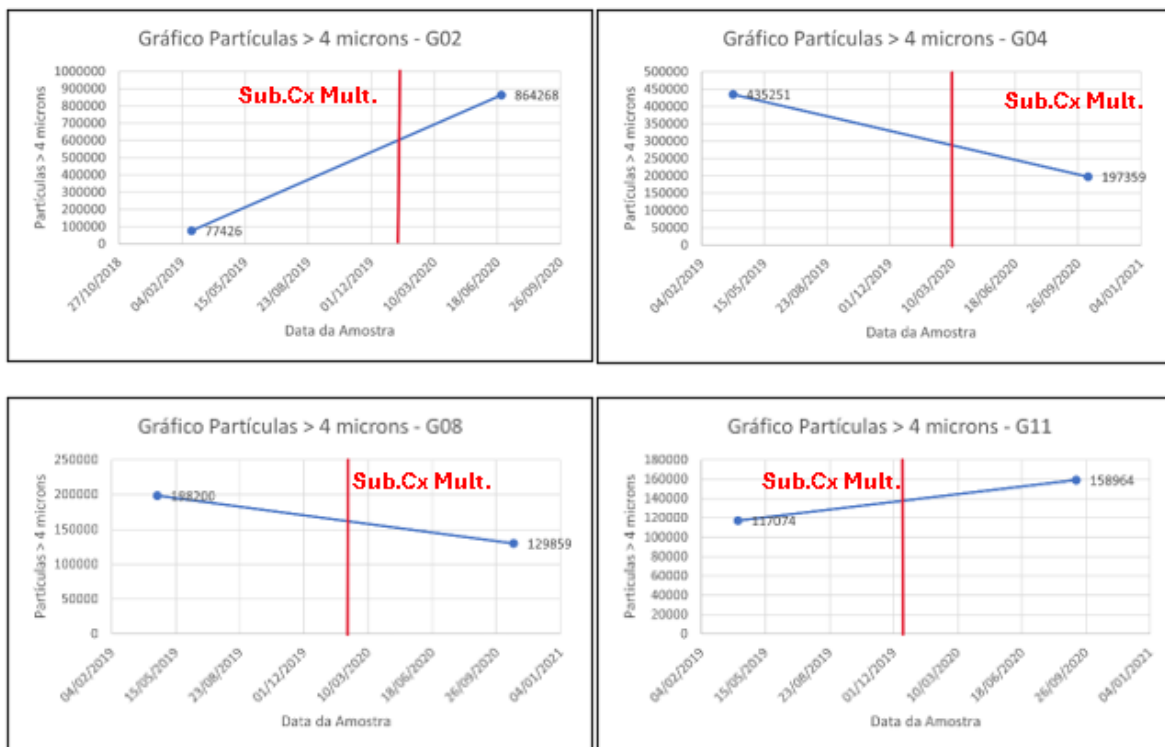
D.3.2 CHUMBO



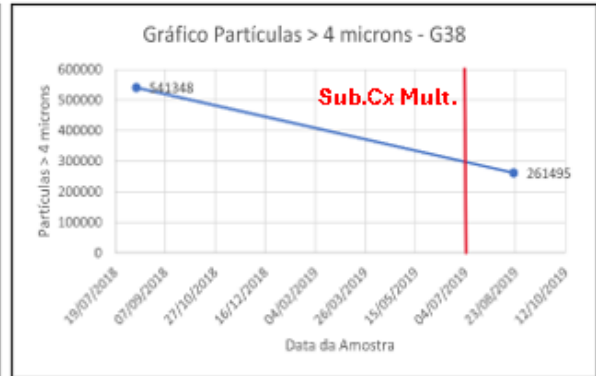
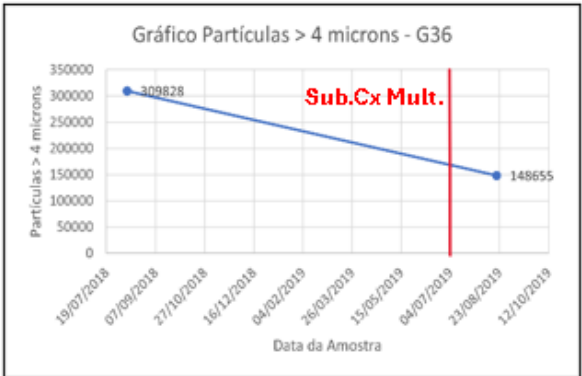
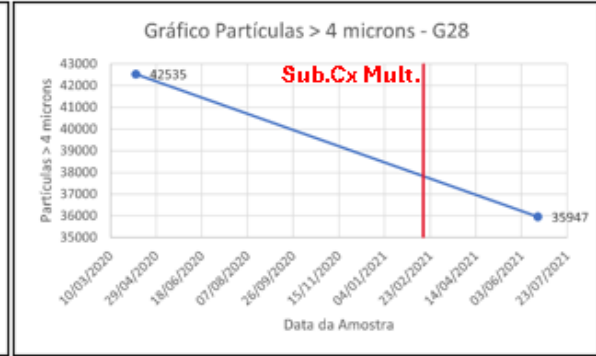
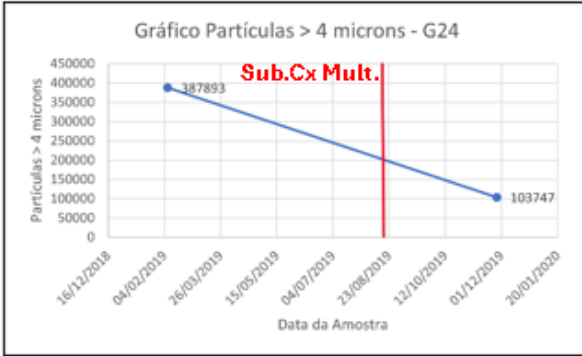
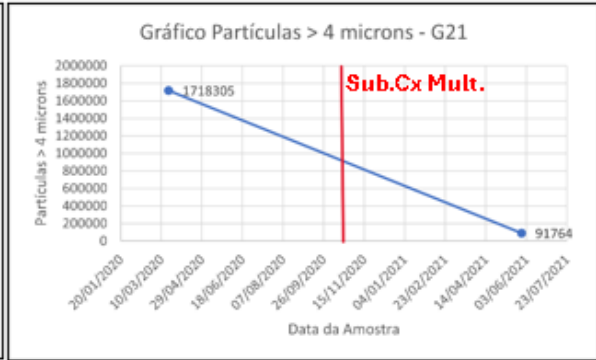
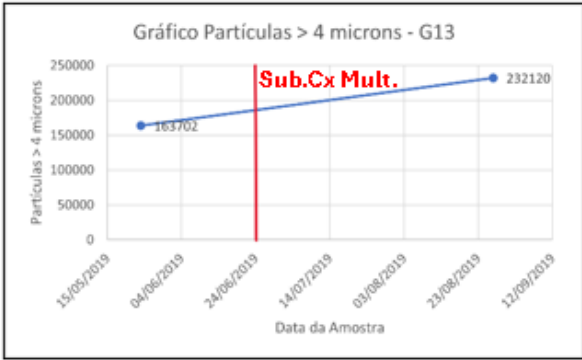
E

NÍVEL DE LIMPEZA DO ÓLEO

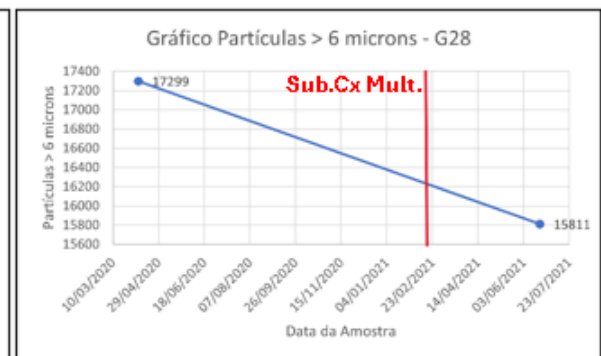
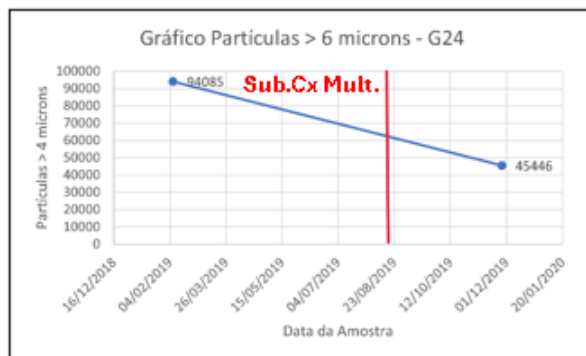
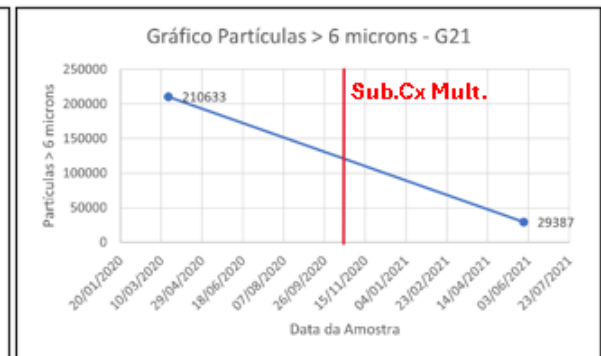
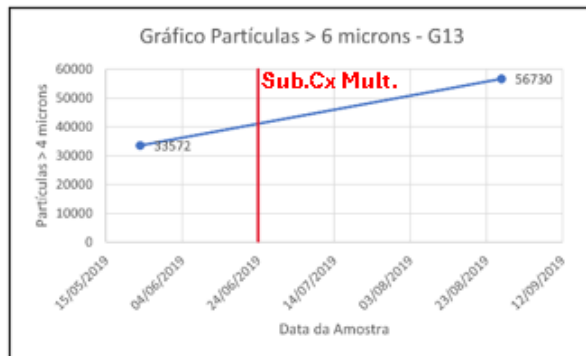
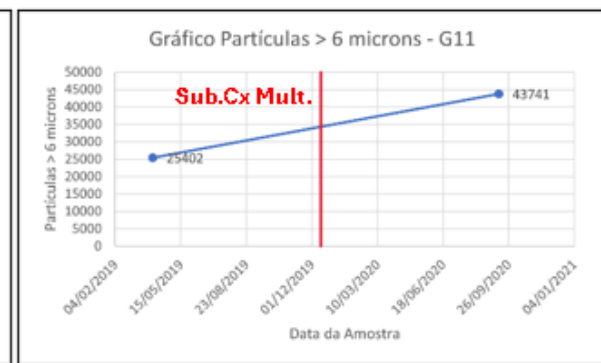
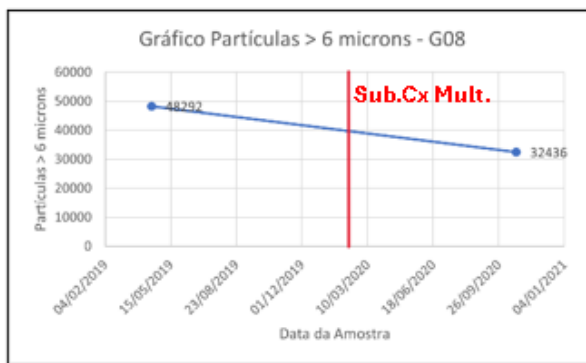
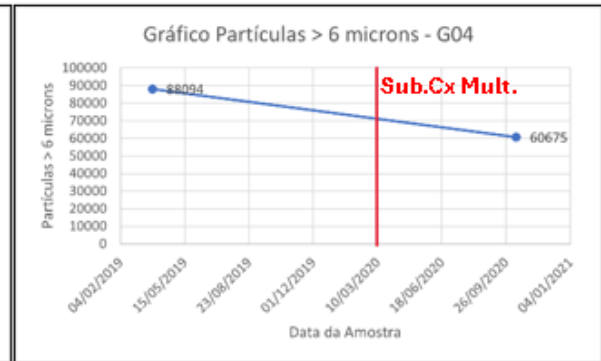
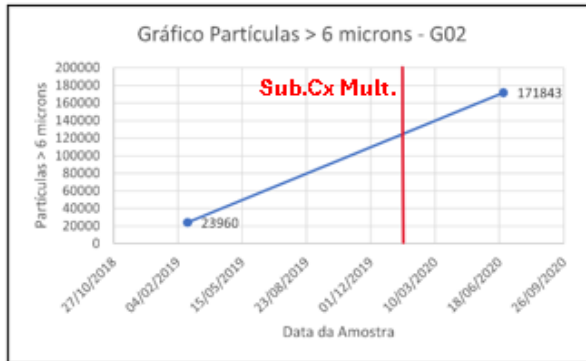
E.1 PARTÍCULAS > 4 MÍCRON

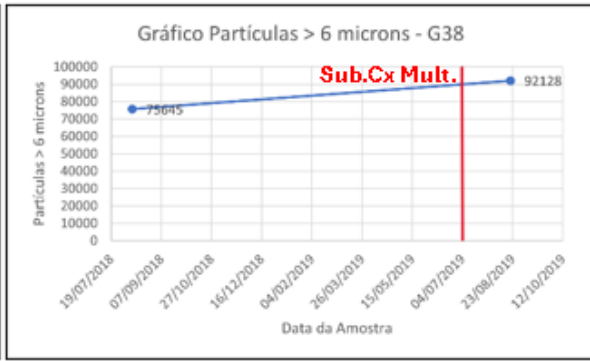
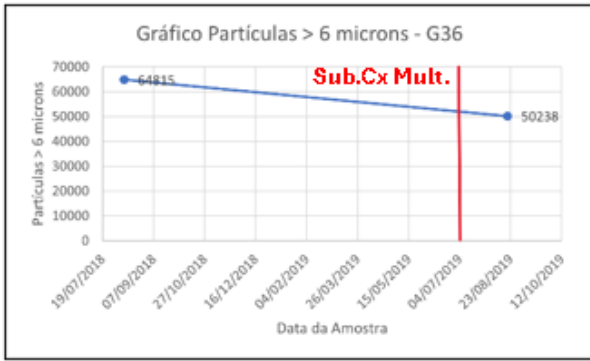


NÍVEL DE LIMPEZA DO ÓLEO

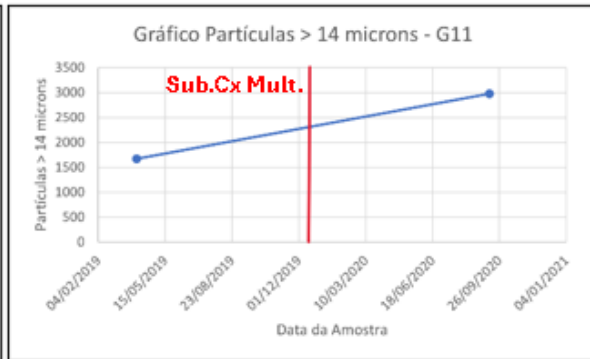
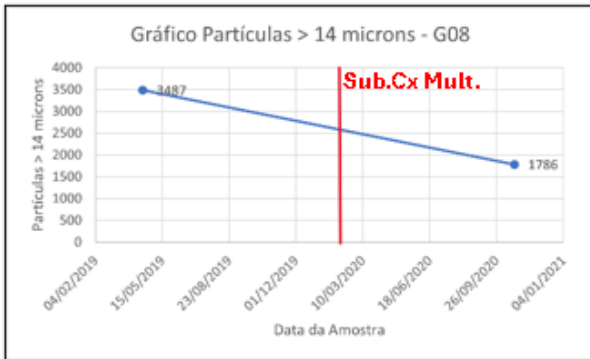
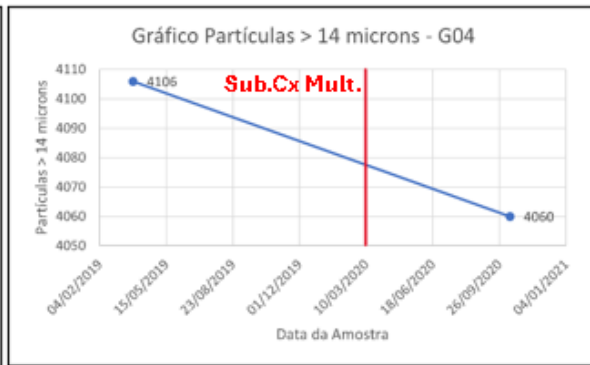
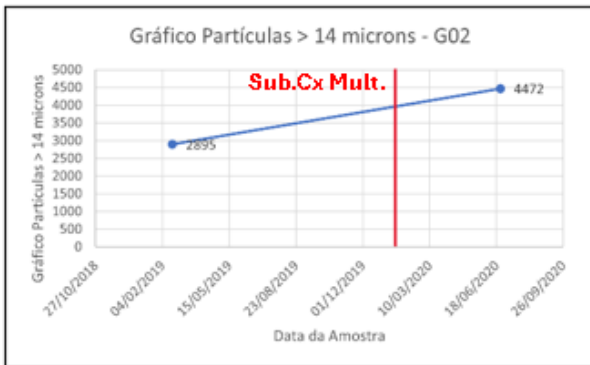


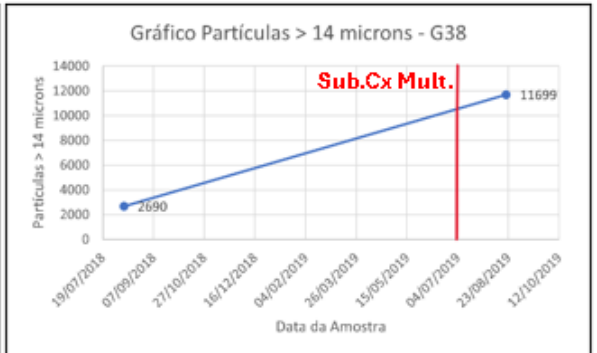
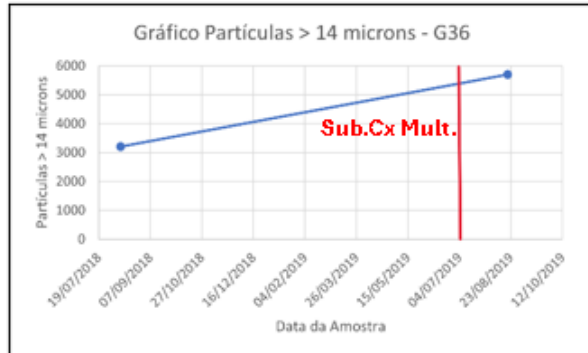
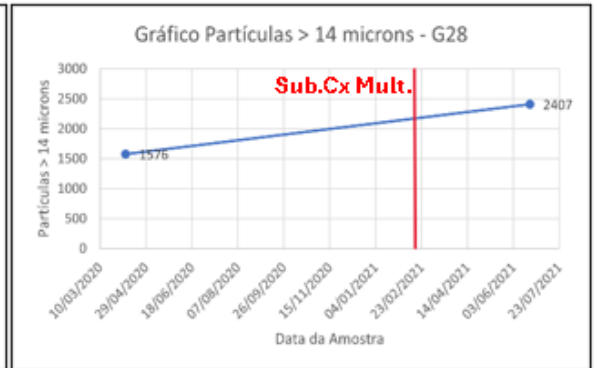
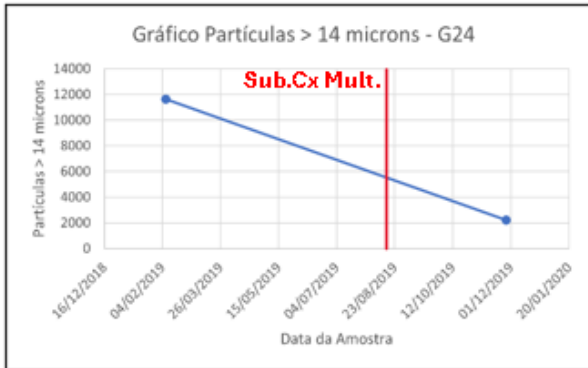
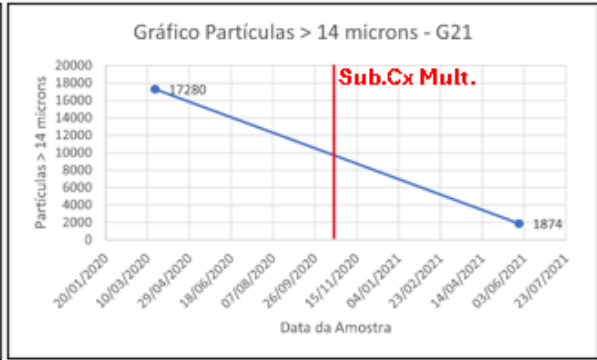
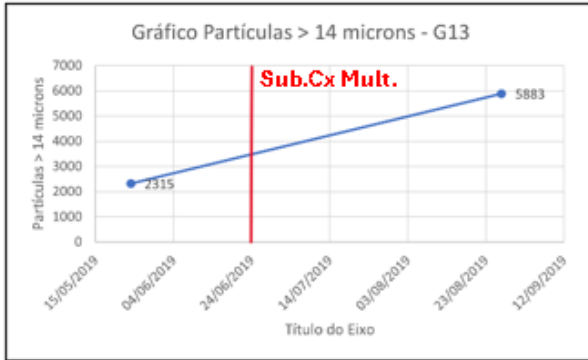
E.2 PARTÍCULAS > 6 MÍCRON





E.3 PARTÍCULAS >14 MÍCRON





ANEXOS

- Anexo A – Relatórios sobre óleos
- Anexo B – Níveis de vibrações caixa multiplicadora e gerador
- Anexo C – Dados sobre temperatura de óleos em excel



OS RELATÓRIOS SOBRE ÓLEOS

A.1 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS #02

RESULTS				
Sample number:	1560946	1381522	1308069	1190166
Oil type: ⁽²⁾	CONTROL OPTIMUM SYNTHETIC CT 500	MOBIL MOBILGARD SHC SHP 500	MOBIL MOBILGARD SHC SHP 500	MOBIL MOBILGARD SHC SHP 500
Machine serv.: ⁽²⁾	180301 H	168513 H	45469 H	7098 H
Date sampled: ⁽²⁾	24/06/2020	19/02/2019	09/08/2018	14/06/2017
First Report date:	26/08/2020	07/03/2019	06/09/2018	02/08/2017
Oil condition				
Appearance (Adim)	Dark transp.	Dark transp.	Dark transp.	Bright Transp.
Water-Gas	N.D.			
Particles	N.D.			
IR Index (%)	99.91	99.91	99.73	
Oxidation (A/cm)	<1	1.5	2	2.9
TAN (mgr KOH/gr)	0.91	0.55	0.49	0.98
Viscosity 100°C (mm2/s)	38.29	35.65	36.4	36.71
Viscosity 40°C (mm2/s)	329.5	323	316.7	316.6
Visc. Index (Adim)	167	157	163	164
Boron [B] (mg/kg)	0	0	<30	<30
Barium [Ba] (mg/kg)	0	0	0	0
Calcium [Ca] (mg/kg)	5	0	0	0

Sample:

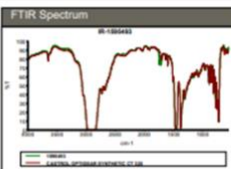
A.2 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS #04


RESULTS				
Sample number:	1705044	1643768	1595486	1397919
Oil type: ⁽²⁾	CONTROL OPTIMUM SYNTHETIC CT 500	CONTROL OPTIMUM SYNTHETIC CT 500	CONTROL OPTIMUM SYNTHETIC CT 500	MOBIL MOBILGARD SHC SHP 500
Oil change date: ⁽²⁾		13/03/2020	13/03/2020	
Machine serv.: ⁽²⁾	190498 H	132912 H	129115 H	115536 H
Date sampled: ⁽²⁾	19/08/2021	19/03/2021	12/10/2020	26/03/2019
First Report date:	27/09/2021	19/04/2021	30/11/2020	02/05/2019
Oil condition				
Appearance (Adim)	Dark transp.	Dark transp.	Dark transp.	Dark transp.
Water-Gas	N.D.	N.D.	N.D.	
Particles	N.D.	N.D.	N.D.	
IR Index (%)	99.82	99.80	99.82	99.81
Oxidation (A/cm)	2.2	2.7	2.3	2.8
TAN (mg KOH/g)	0.82	0.81	0.97	0.94
Viscosity 100°C (mm2/s)	37.94	39.51	40.53	37.67
Viscosity 40°C (mm2/s)	328.7	333.4	333.9	332.7
Visc. Index (Adim)	165	170	175	162
Boron [B] (mg/kg)	0	1	0	0
Barium [Ba] (mg/kg)	0	0	0	0

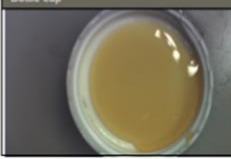
Sample:

A.3 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS #08

RESULTS				
Sample number:	1595493	1397911	1302991	1210539
Oil type: [®]	CONTROL OPTIGRADE SYNTHETIC CI 300	CONTROL OPTIGRADE SYNTHETIC CI 300	CONTROL OPTIGRADE SYNTHETIC CI 300	CONTROL OPTIGRADE SYNTHETIC CI 300
Oil change date: [®]	05/03/2015	05/03/2015		05/03/2015
Machine serv.™	129114 H	115737 H	109361 H	22145 H
Date sampled: [®]	23/10/2020	16/04/2019	23/07/2018	15/09/2017
First Report date:	25/11/2020	02/05/2019	21/08/2018	09/10/2017
Oil condition				
Appearance (Adim)	Dark transp.	Dark transp.	Bright Transp.	Dark transp.
Water-Gas	N.D.			
Particles	N.D.			
IR Index (%)	99.95	99.96	99.93	
Oxidation (A/cm)	2.2	2	2.9	1.9
TAN (mgr KOH/gr)	0.77	0.78	0.76	0.74
Viscosity 100°C (mm2/s)	36.57	36.04	35.72	35.71
Viscosity 40°C (mm2/s)	337.9	331	333.9	331.5
Visc. Index (Adim)	155	155	153	154
Boron [B] (mg/kg)	0	0	<30	<30
Barium [Ba] (mg/kg)	0	0	0	0
Calcium [Ca] (mg/kg)	15	12	9	8
Magnesium [Mg] (mg/kg)	0	0	0	0
Molybdenum [Mo] (mg/kg)	0	0	0	0
Phosphorus [P] (mg/kg)	273	272	232	285
Sulfur [S] (mg/kg)	6256	3701	5120	
Zinc [Zn] (mg/kg)	20	19	15	14
Contamination				
Water content (mg/kg)	68	36	74	20
Potassium [K] (mg/kg)	0	1	1	1

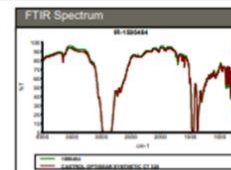








A.4 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS #11

RESULTS				
Sample number:	1595484	1397913	1303001	1190175
Oil type: [®]	CONTROL OPTIGRADE SYNTHETIC CI 300	CONTROL OPTIGRADE SYNTHETIC CI 300	CONTROL OPTIGRADE SYNTHETIC CI 300	MOBIL MOBILGRAX SAE 040
Oil change date: [®]	16/02/2018	16/02/2018		
Machine serv.™		116609 H	110224 H	73896 H
Date sampled: [®]	11/09/2020	02/04/2019	09/07/2018	13/06/2017
First Report date:	25/11/2020	02/05/2019	21/08/2018	03/08/2017
Oil condition				
Appearance (Adim)	Dark transp.	Dark transp.	Bright Transp.	Dark transp.
Water-Gas	N.D.			
Particles	N.D.			
IR Index (%)	99.86	99.84	99.79	
Oxidation (A/cm)	1.9	1.6	1.9	2.3
TAN (mgr KOH/gr)	0.81	0.85	0.84	0.89
Viscosity 100°C (mm2/s)	40.88	39.79	40.17	38.86
Viscosity 40°C (mm2/s)	333.8	339	330.2	341.4
Visc. Index (Adim)	176	170	175	164
Boron [B] (mg/kg)	0	0	<30	<30
Barium [Ba] (mg/kg)	0	0	0	0
Calcium [Ca] (mg/kg)	14	9	6	0
Magnesium [Mg] (mg/kg)	0	0	0	0
Molybdenum [Mo] (mg/kg)	0	0	0	0
Phosphorus [P] (mg/kg)	302	299	277	323
Sulfur [S] (mg/kg)	5427	3385	5573	
Zinc [Zn] (mg/kg)	31	23	16	44
Contamination				
Water content (mg/kg)	55	44	83	28
Potassium [K] (mg/kg)	1	1	1	2

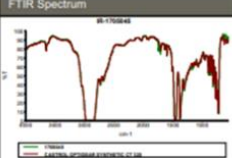








A.5 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS #13

RESULTS				
Sample number:	1705045	1560947	1445474	1415821
Oil type:	CELTICA SUPERIOR	CELTICA SUPERIOR	CELTICA SUPERIOR	WELB. SUPERIOR SUC. SUP.
Oil change date:		28/06/2019	28/06/2019	
Machine serv.:	135543 H	125541 H	117932 H	115409 H
Date sampled:	20/08/2021	09/07/2020	27/08/2019	24/05/2019
First Report date:	27/09/2021	21/08/2020	20/09/2019	26/06/2019
Oil condition				
Appearance (Adm)	Dark transp.	Dark transp.	Bright Transp.	Particles
Water-Gas	N.D.	N.D.	N.D.	
Particles	N.D.	N.D.	N.D.	
IR Index (%)	99.84	99.81	89.65	99.95
Oxidation (A/cm)	2.2	2.1	<1	1.7
TAN (mg KOH/g)	0.80	0.74	0.71	0.67
Viscosity 100°C (mm2/s)	39.28	38.06	42.38	37.8
Viscosity 40°C (mm2/s)	334.2	327.1	339.3	329.1
Visc. Index (Adm)	169	166	181	164
Boron [B] (mg/kg)	0	0	1	0
Barium [Ba] (mg/kg)	0	0	0	0
Calcium [Ca] (mg/kg)	12	10	2	1
Magnesium [Mg] (mg/kg)	0	0	0	0
Molybdenum [Mo] (mg/kg)	0	0	0	0
Phosphorus [P] (mg/kg)	295	279	248	291
Sulfur [S] (mg/kg)	4375	5315	5091	3383
Zinc [Zn] (mg/kg)	15	10	4	12
Contamination				
Water content (mg/kg)	93	80	72	<20
Potassium [K] (mg/kg)	2	2	1	0

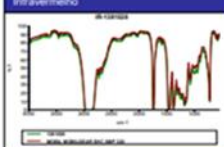








A.6 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS #18(1)

RESULTADOS				
Ref. Amostra:	1381520	1242866	1148987	1052077
Lubrif. (F)	WELB. SUPERIOR SUC. SUP.	WELB. SUPERIOR SUC. SUP.	WELB. SUPERIOR SUC. SUP.	WELB. SUPERIOR SUC. SUP.
Serv. máquina (F)	117023 H	107879 H	99984 H	91247 H
Servico óleo (F)				69641 H
Data recolha (F)	07/02/2019	22/01/2018	27/02/2017	29/02/2016
First Report date:	11/03/2019	01/02/2018	16/03/2017	12/04/2016
Estado Físico-Químico				
Aparência (Adm)	Limpido Escuro	Limpido Claro	Limpido Claro	Limpido Claro
IR Index (%)	99.89			
Oxidação (A/cm)	1.8	2	<1	<1
TAN (mgr KOH/gr)	0.89	0.79	0.91	0.73
Viscosidade a 100°C (mm2/s)	36.32	39.29	37.19	37.1
Viscosidade a 40°C (mm2/s)	334.3	335.2	331.6	324.8
Índice de Viscosidade (Adm)	155	169	161	163
Boro [B] (mg/kg)	0	<30	<30	<30
Bário [Ba] (mg/kg)	0	0	1	0
Cálcio [Ca] (mg/kg)	3	0	0	0
Magnésio [Mg] (mg/kg)	0	0	0	0
Molibdênio [Mo] (mg/kg)	4	0	0	0
Fósforo [P] (mg/kg)	374	350	374	376
Enxofre [S] (mg/kg)	4497			
Zinco [Zn] (mg/kg)	29	29	29	29
Contaminação				
Teor em Água (mg/kg)	29	31	33	53
Potássio [K] (mg/kg)	0	1	0	0
Sódio [Na] (mg/kg)	1	0	0	0
Silício [Si] (mg/kg)	1	1	1	2
ISO 4406/99 (Adm)	19/17/13	17/15/12	16/14/10	17/15/9
Part > 4 microns (100ml)	331338	76780	45666	79251
Part > 6 microns (100ml)	94636	28764	15585	17683
Part >14 microns (100ml)	4987	2852	806	448

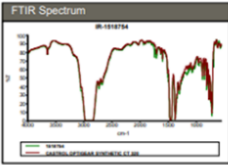







A.7 RELATÓRIOS SOBRE ÓLEOS #18 (2)

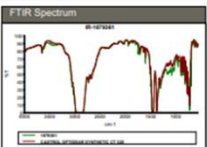
RESULTS			
Sample number:	1518754	1445471	
Oil type: ¹⁸			
Oil change date: ¹⁸	03/07/2019	02/07/2019	
Machine serv.: ¹⁸	126741 H	121728 H	
Date sampled: ¹⁸	18/03/2020	23/08/2019	
First Report date:	06/05/2020	20/09/2019	
Oil condition			
Appearance (Adim)	Dark transp.	Bright Transp.	
Water-Gas	N.D.	N.D.	
Particles	N.D.	N.D.	
IR Index (%)	99.76	99.82	
Oxidation (A/cm)	2.8	<1	
TAN (mgr KOH/gr)	0.79	0.78	
Viscosity 100°C (mm2/s)	40.02	39.77	
Viscosity 40°C (mm2/s)	336.9	336.2	
Visc. Index (Adim)	171	171	
Boron [B] (mg/kg)	0	1	
Barium [Ba] (mg/kg)	0	0	
Calcium [Ca] (mg/kg)	8	3	
Magnesium [Mg] (mg/kg)	0	0	
Molybdenum [Mo] (mg/kg)	0	0	
Phosphorus [P] (mg/kg)	279	328	
Sulfur [S] (mg/kg)	6243	6632	
Zinc [Zn] (mg/kg)	6	4	






A.8 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS #21

RESULTS				
Sample number:	1679361	1518758	1381517	1242873
Oil type: ¹⁸				
Oil change date: ¹⁸		15/06/2016		
Machine serv.: ¹⁸		123984 H	114299 H	105143 H
Oil serv.: ¹⁸	134419 H			
Date sampled: ¹⁸	28/05/2021	19/03/2020	07/02/2019	24/01/2018
First Report date:	15/07/2021	12/05/2020	22/03/2019	02/02/2018
Oil condition				
Appearance (Adim)	Dark transp.	Dark transp.	Dark transp.	Dark transp.
Water-Gas	N.D.	N.D.		
Particles	N.D.	N.D.		
IR Index (%)	99.46	99.93	99.97	
PAG BS-I (A/0.1mm)	0	1.7	0.9	2.8
PAG BS-II (A/0.1mm)	24.4	4.5	4.8	4
TAN (mg KOH/g)	0.92	1.51	0.75	1.35
Viscosity 100°C (mm2/s)	38.38	56.66	56.34	56.67
Viscosity 40°C (mm2/s)	328.1	312.5	310.1	316.8
Visc. Index (Adim)	167	249	249	247






A.9 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS #24

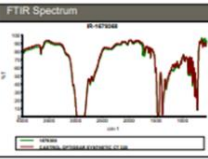

RESULTS				
Sample number:	1679365	1518746	1481076	1381531
Oil type: ¹⁸				
Oil change date: ¹⁸	20/09/2008	21/08/2019	21/08/2019	05/05/2017
Machine serv.: ¹⁸	134134 H	123431 H	120553 H	113523 H
Oil serv.: ¹⁸	15031 H			
Date sampled: ¹⁸	15/06/2021	26/03/2020	27/11/2019	07/02/2019
First Report date:	14/07/2021	06/05/2020	30/12/2019	22/03/2019
Oil condition				
Appearance (Adim)	Dark transp.	Dark transp.	Dark transp.	Dark transp.
Water-Gas	N.D.	N.D.	N.D.	
Particles	N.D.	Particles	N.D.	
IR Index (%)	99.96	99.96	66.17	99.31
Oxidation (A/cm)	1.7	1.4	<1	
TAN (mg KOH/g)	0.85	0.9	0.88	0.82
Viscosity 100°C (mm2/s)	35.25	34.93	35.39	58.79
Viscosity 40°C (mm2/s)	331.4	337.2	339.7	332.2
Visc. Index (Adim)	151	148	149	247
Boron [B] (mg/kg)	0	0	1	0





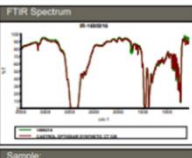


A.10 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS #28

RESULTS				
Sample number:	1679368	1518748	1397915	1308071
Oil type:™	CENTRAL OPTIMUM	CENTRAL OPTIMUM	CENTRAL OPTIMUM	CENTRAL OPTIMUM
Oil change date:™	19/06/2018	19/06/2018		
Machine serv.:™	136631 H	126069 H	116882 H	11867 H
Oil serv.:™	26303 H			
Date sampled:™	21/06/2021	07/04/2020	21/03/2019	24/08/2018
First Report date:	14/07/2021	06/05/2020	02/05/2019	05/09/2018
Oil condition				
Appearance (Adim)	Bright Transp.	Dark transp.	Dark transp.	Dark transp.
Water-Gas	N.D.	N.D.		
Particles	N.D.	N.D.		
IR Index (%)	99.85	99.91	99.83	99.81
Oxidation (A/cm)	1.3	2.1	1.6	<1
TAN (mg KOH/g)	0.74	0.85	0.97	0.85
Viscosity 100°C (mm ² /s)	40.29	39.66	38.08	39.93
Viscosity 40°C (mm ² /s)	337.4	339.6	336.1	335.3
Visc. Index (Adim)	172	169	163	172
Boron [B] (mg/kg)	0	0	0	<30

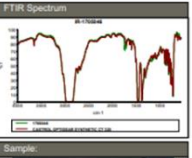


A.11 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS#36

RESULTS				
Sample number:	1695016	1595482	1445472	1308068
Oil type:™	CENTRAL OPTIMUM	CENTRAL OPTIMUM	CENTRAL OPTIMUM	SELENIA SAE 10W-60
Oil change date:™	11/07/2019	11/07/2019	11/07/2019	
Machine serv.:™	136320	129547	119105	110082
Date sampled:™	06/08/2021	28/10/2020	20/08/2019	09/08/2018
First Report date:	27/08/2021	24/11/2020	20/09/2019	06/09/2018
Oil condition				
Appearance (Adim)	Bright Transp.	Dark transp.	Bright Transp.	Dark transp.
Water-Gas	N.D.	N.D.	N.D.	
Particles	N.D.	N.D.	N.D.	
IR Index (%)	99.86	99.86	89.23	99.88
Oxidation (A/cm)	2.4	2.2	<1	<1
TAN (mg KOH/g)	0.8	0.84	0.78	0.21
Viscosity 100°C (mm ² /s)	38.52	41.03	39.26	40.16
Viscosity 40°C (mm ² /s)	337.2	337.1	329.3	351.2
Visc. Index (Adim)	165	176	171	167
Boron [B] (mg/kg)	0	0	1	<30
Barium [Ba] (mg/kg)	0	0	0	0
Calcium [Ca] (mg/kg)	15	11	1	0
Magnesium [Mg] (mg/kg)	1	0	0	0
Molybdenum [Mo] (mg/kg)	0	0	0	0
Phosphorus [P] (mg/kg)	321	304	296	231
Sulfur [S] (mg/kg)	3586	5383	5643	2280
Zinc [Zn] (mg/kg)	17	11	4	45
Contamination				
Water content (mg/kg)	61	45	84	63
Potassium [K] (mg/kg)	2	2	1	0

A.12 RELATÓRIO SOBRE ÓLEOS#38

RESULTS				
Sample number:	1705046	1595483	1445473	1308070
Oil type:™	CENTRAL OPTIMUM	CENTRAL OPTIMUM	CENTRAL OPTIMUM	SELENIA SAE 10W-60
Oil change date:™	16/07/2019	16/07/2019	16/07/2019	
Machine serv.:™	135213	127386	117428	108377
Date sampled:™	31/08/2021	09/10/2020	21/08/2019	09/08/2018
First Report date:	27/09/2021	24/11/2020	20/09/2019	06/09/2018
Oil condition				
Appearance (Adim)	Dark transp.	Dark transp.	Bright Transp.	Dark transp.
Water-Gas	N.D.	N.D.	N.D.	
Particles	Particles	N.D.	N.D.	
IR Index (%)	99.83	99.88	89.04	99.88
Oxidation (A/cm)	2.3	2.1	<1	1.2
TAN (mg KOH/g)	0.78	0.77	0.80	0.33
Viscosity 100°C (mm ² /s)	39.73	41.54	43	38.42
Viscosity 40°C (mm ² /s)	341.5	344	339.2	343.8
Visc. Index (Adim)	168	175	183	162
Boron [B] (mg/kg)	0	0	1	<30
Barium [Ba] (mg/kg)	0	0	0	0
Calcium [Ca] (mg/kg)	10	8	1	0
Magnesium [Mg] (mg/kg)	0	0	0	0
Molybdenum [Mo] (mg/kg)	0	0	0	0
Phosphorus [P] (mg/kg)	310	275	281	229
Sulfur [S] (mg/kg)	3628	5038	5470	3161
Zinc [Zn] (mg/kg)	25	16	6	39
Contamination				
Water content (mg/kg)	61	53	75	70
Potassium [K] (mg/kg)	3	2	1	0

B

OS NÍVEIS DE VIBRAÇÕES CAIXA MULTIPLICADORA E GERADOR

B.1 OS NÍVEIS DE VIBRAÇÕES ANTES E DEPOIS DA SUBSTITUIÇÃO DOS COMPONENTES DA CAIXA MULTIPLICADORA

B.1.1 NÍVEIS DE VIBRAÇÕES DE LSS

Valores em m/s ²			LSS													
Turbina	Componente substituído	Data da substituição	51-61 Hz		63-74 Hz		76-136 Hz		140-274 Hz		278-408 Hz		420-810 Hz		830-1640 Hz	
			Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
2	Gearbox	17/02/20	0.0017	0.00155	0.00222	0.00157	0.0032	0.00276	0.00688	0.00505	0.01007	0.00648	0.01549	0.01807	0.02298	0.02612
4	3º estágio da gearbox	09/03/20	0.00123	0.00141	0.00154	0.00178	0.00381	0.00369	0.00823	0.00627	0.00695	0.00912	0.01751	0.0187	0.0205	0.03958
13	Gearbox	29/06/19	0.00186	0.00123	0.00247	0.00169	0.00357	0.00384	0.01109	0.0059	0.00588	0.00763	0.02444	0.01801	0.04194	0.01975
18	Gearbox	04/07/19	0.00121	0.00103	0.00148	0.00176	0.00476	0.00371	0.00776	0.00593	0.0073	0.00426	0.0139	0.01212	0.04101	0.01972
21	Gearbox	05/11/20	0.00195	0.00157	0.01345	0.00157	0.01566	0.00406	0.03041	0.00623	0.02079	0.00622	0.03975	0.01865	0.06821	0.05037
24	Gearbox	22/08/19	0.00355	0.00145	0.00308	0.00165	0.00531	0.00436	0.00955	0.00958	0.00845	0.00935	0.02389	0.01927	0.06367	0.03624
28	Gearbox	04/03/21	0.00172	0.00139	0.00134	0.00147	0.00383	0.00408	0.00614	0.00584	0.00557	0.0046	0.01541	0.01208	0.02597	0.02056
32	Gearbox	23/06/19	0.00266	0.00212	0.00752	0.00202	0.00495	0.0037	0.01644	0.00675	0.03026	0.00619	0.07426	0.01205	0.07322	0.01983
36	Gearbox	11/07/19	N/A													
37	3º estágio da gearbox	09/01/20	0.00211	0.0017	0.00228	0.00153	0.00444	0.00442	0.00879	0.00581	0.00765	0.00517	0.02585	0.01643	0.03485	0.03185
38	Gearbox	18/07/19	N/A													

B.1.2 NÍVEIS DE VIBRAÇÕES DE PLANETÁRIO 1

Valores em m/s ²			Planet 1													
Turbina	Componente substituído	Data da substituição	3-20 Hz		27-40 Hz		43-49 Hz		51-61 Hz		63-74 Hz		76-136 Hz		140-274 Hz	
			Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
2	Gearbox	17/02/20	0.00149	0.00189	N/A	0.00049	0.00047	0.00066	0.00048	0.00061	0.00053	0.00127	0.00223	0.00237	0.00465	
4	3º estágio da gearbox	09/03/20	0.00169	0.00151	N/A	0.00037	0.00036	0.00043	0.00037	0.00042	0.00041	0.00169	0.00149	0.00225	0.00189	
13	Gearbox	29/06/19	0.0031	0.00058	N/A	0.0004	0.00034	0.00042	0.0004	0.0005	0.00046	0.00093	0.00148	0.00169	0.00216	
18	Gearbox	04/07/19	0.00299	0.00411	N/A	0.0005	0.00058	0.00069	0.00056	0.00065	0.00046	0.00185	0.00153	0.00334	0.00253	
21	Gearbox	05/11/20	0.00239	0.00238	N/A	0.00062	0.00045	0.00065	0.00052	0.00115	0.00048	0.00159	0.00142	0.00231	0.0019	
24	Gearbox	22/08/19	0.00043	0.0026	N/A	0.00034	0.00045	0.0004	0.00039	0.0004	0.00041	0.00116	0.00113	0.00146	0.00197	
28	Gearbox	04/03/21	0.00264	0.00114	N/A	0.00075	0.00031	0.00039	0.00051	0.00079	0.00036	0.02311	0.00103	0.01743	0.00162	
32	Gearbox	23/06/19	0.00242	0.00115	N/A	0.00064	0.00045	0.00065	0.00050	0.00357	0.00044	0.00156	0.00127	0.00556	0.00241	
36	Gearbox	11/07/19	N/A													
37	3º estágio da gearbox	09/01/20	0.00378	0.00285	N/A	0.00061	0.00054	0.00058	0.00054	0.00069	0.00047	0.00115	0.00099	0.00214	0.00191	
38	Gearbox	18/07/19	N/A													

B.1.3 NÍVEIS DE VIBRAÇÕES DE PLANETÁRIO 2

Valores em m/s ²			Planet 2													
			3-20 Hz		27-40 Hz		43-49 Hz		51-61 Hz		63-74 Hz		76-136 Hz		140-274 Hz	
Turbina	Componente substituído	Data da substituição	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
2	Gearbox	17/02/20	0.00148	0.00233	N/A		0.0007	0.00275	0.00103	0.00248	0.00101	0.00135	0.00173	0.00203	0.00306	0.00465
4	3º estágio da gearbox	09/03/20	0.0015	0.00447	N/A		0.00045	0.00093	0.00046	0.00092	0.00057	0.00088	0.00214	0.00167	0.00218	0.00232
13	Gearbox	29/06/19	0.00288	0.00061	N/A		0.00052	0.00043	0.00057	0.00054	0.00074	0.00062	0.00132	0.00174	0.00202	0.00222
18	Gearbox	04/07/19	0.00283	0.0029	N/A		0.00084	0.00066	0.00113	0.00058	0.00107	0.00071	0.00231	0.00179	0.00475	0.0025
21	Gearbox	05/11/20	0.00235	0.00234	N/A		0.00085	0.00059	0.00112	0.00075	0.00275	0.00065	0.00222	0.00171	0.00338	0.00217
24	Gearbox	22/08/19	0.00258	0.00371	N/A		0.00181	0.00059	0.00175	0.0008	0.00179	0.00073	0.00249	0.00183	0.00503	0.00303
28	Gearbox	04/03/21	0.00255	0.00149	N/A		0.00063	0.00039	0.00086	0.00067	0.00088	0.00046	0.0031	0.00153	0.00409	0.0021
32	Gearbox	23/06/19	0.00382	0.00168	N/A		0.00139	0.00101	0.00092	0.00103	0.00195	0.0009	0.00232	0.00265	0.00501	0.00383
36	Gearbox	11/07/19	N/A													
37	3º estágio da gearbox	09/01/20	0.00346	0.00263	N/A		0.0008	0.00078	0.00093	0.0009	0.00137	0.001	0.00145	0.00136	0.004	0.00224
38	Gearbox	18/07/19	N/A													

B.1.4 NÍVEIS DE VIBRAÇÕES DE HSS UW

Valores em m/s ²			HSS UW													
			76-136 Hz		140-274 Hz		278-408 Hz		420-810 Hz		830-1640 Hz		1660-2460 Hz		2480-3200 Hz	
Turbina	Componente substituído	Data da substituição	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
2	Gearbox	17/02/20	0.00349	0.00726	0.00911	0.00947	0.01114	0.00889	0.0117	0.01089	0.01702	0.0103	0.01503	0.00754	0.00475	0.00175
4	3º estágio da gearbox	09/03/20	0.00357	0.00309	0.00525	0.00609	0.00777	0.00783	0.0125	0.00897	0.00548	0.01057	0.01192	0.02289	0.00398	0.00414
13	Gearbox	29/06/19	0.00372	0.00385	0.01152	0.0056	0.00636	0.00884	0.01218	0.0111	0.02955	0.01684	0.01938	0.00995	0.00759	0.00548
18	Gearbox	04/07/19	0.00506	0.00386	0.01845	0.00667	0.01193	0.00708	0.01703	0.01751	0.04227	0.01549	0.01911	0.00709	0.0057	0.00596
21	Gearbox	05/11/20	0.01289	0.00435	0.02699	0.00606	0.02471	0.00832	0.0175	0.00987	0.03546	0.02231	0.02387	0.00804	0.00863	0.00401
24	Gearbox	22/08/19	0.00518	0.00446	0.00928	0.00776	0.01074	0.00972	0.02312	0.01154	0.07328	0.02423	0.05931	0.01532	0.03898	0.00513
28	Gearbox	04/03/21	0.00428	0.00428	0.00731	0.00415	0.00779	0.00568	0.01027	0.00803	0.01305	0.01075	0.00657	0.00511	0.00319	0.00299
32	Gearbox	23/06/19	0.00491	0.00385	0.01663	0.00559	0.02745	0.00869	0.05246	0.0099	0.10544	0.01435	0.02594	0.00539	0.00553	0.00405
36	Gearbox	11/07/19	N/A													
37	3º estágio da gearbox	09/01/20	0.00438	0.00366	0.01034	0.00682	0.0098	0.00643	0.01118	0.01541	0.02061	0.03834	0.01163	0.01734	0.00423	0.01175
38	Gearbox	18/07/19	N/A													

B.1.5 NÍVEIS DE VIBRAÇÕES DE HSS DW

Valores em m/s ²			HSS DW													
			76-136 Hz		140-274 Hz		278-408 Hz		420-810 Hz		830-1640 Hz		1660-2460 Hz		2480-3200 Hz	
Turbina	Componente substituído	Data da substituição	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
2	Gearbox	17/02/20	0.00529	0.01249	0.0087	0.01186	0.00883	0.00517	0.01994	0.0049	0.02782	0.00465	0.01348	0.00104	0.00771	0.0004
4	3º estágio da gearbox	09/03/20	0.00754	0.00648	0.00749	0.00901	0.00695	0.01124	0.02357	0.02365	0.03029	0.07232	0.01264	0.02891	0.0081	0.01356
13	Gearbox	29/06/19	0.0056	0.00896	0.01219	0.00802	0.00667	0.00584	0.02331	0.02048	0.10692	0.03903	0.03013	0.0132	0.01348	0.00899
18	Gearbox	04/07/19	0.00799	0.00684	0.01861	0.00755	0.00917	0.00494	0.02549	0.02219	0.08745	0.03279	0.03206	0.01161	0.01257	0.00905
21	Gearbox	05/11/20	0.04223	0.00639	0.025	0.0087	0.01962	0.00711	0.02342	0.02715	0.06059	0.06327	0.07288	0.02771	0.03829	0.02475
24	Gearbox	22/08/19	0.01916	0.00784	0.01992	0.00965	0.01574	0.0061	0.03716	0.02271	0.14505	0.06832	0.14827	0.02169	0.06175	0.01117
28	Gearbox	04/03/21	0.00367	0.00384	0.00689	0.00805	0.00799	0.00696	0.02025	0.01349	0.02234	0.01584	0.01309	0.0946	0.00807	0.00668
32	Gearbox	23/06/19	0.01132	0.00799	0.01995	0.00939	0.01789	0.00635	0.09384	0.01973	0.07608	0.03562	0.04847	0.01232	0.01277	0.01232
36	Gearbox	11/07/19	N/A													
37	3º estágio da gearbox	09/01/20	0.00973	0.00916	0.01015	0.00552	0.00714	0.00536	0.01766	0.02694	0.0415	0.05876	0.0248	0.01664	0.01184	0.01141
38	Gearbox	18/07/19	N/A													

B.2 OS NÍVEIS DE VIBRAÇÕES DOS ROLAMENTOS DE E NDE DE GERADORES

Valores em m/s ²			Gen DE						Gen NDE					
Turbina	Componente substituído	Data da substituição	60-1800 Hz		1800-3200 Hz		Pk-pk		60-1800 Hz		1800-3200 Hz		Pk-pk	
			Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
1	DE bearing	06/04/20	0.02076	0.00963	0.03689	0.00089	53.95359	6.0408	-	-	-	-	-	-
	DE bearing	23/12/21	0.08491	0.00515	0.06205	0.01136	101.0621	8.55976	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	12/06/19	-	-	-	-	-	-	0.06477	0.00401	0.04734	0.00255	54.27307	5.86901
2	DE bearing	03/12/19	0.22021	0.01226	0.06512	0.00573	96.28147	6.94001	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	04/12/19	0.22022	0.01227	0.06512	0.00573	96.28147	6.94001	0.07498	0.00763	0.00791	0.00208	39.49409	5.8675
	NDE bearing	26/10/23	-	-	-	-	-	-	0.02754	0.00722	0.0307	0.00248	53.76841	8.23938
3	DE bearing	29/10/19	0.01602	0.01445	0.00951	0.01538	21.00382	16.83475	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	28/10/19	-	-	-	-	-	-	0.01524	0.00867	0.01497	0.00597	25.34688	13.05004
4	DE bearing	24/02/23	0.02002	0.00356	0.00972	0.01134	24.21517	9.53444	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	22/02/23	-	-	-	-	-	-	0.09537	0.00374	0.04652	0.00665	92.64421	5.85596
6	Gerador	17/08/21	0.00492	0.00581	0.00708	0.00563	10.07715	4.15366	0.03235	0.00494	0.0455	0.00296	9.91867	5.34658
	DE bearing	09/08/19	0.01876	0.00349	0.00895	0.00205	15.18215	3.21335	-	-	-	-	-	-
	DE bearing	13/07/23	0.10883	0.00652	0.04959	0.00932	100.6811	9.23888	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	09/08/19	-	-	-	-	-	-	0.1965	0.00464	0.09667	0.00387	93.03699	6.01555
7	NDE bearing	01/09/20	-	-	-	-	-	-	0.08579	0.0103	0.14921	0.00044	86.73112	1.2626
	NDE bearing	13/05/21	-	-	-	-	-	-	0.05617	0.00212	0.01914	0.00043	3.68969	20.40116
	Gerador	13/02/20	0.00859	0.00949	0.00975	0.00123	13.11619	20.1962	0.01014	0.00378	0.00052	0.00087	36.44255	4.0353
8	DE bearing	01/04/22	0.12132	0.00532	0.09271	0.0017	109.5801	17.74072	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	25/10/19	-	-	-	-	-	-	0.01028	0.00484	0.00603	0.00048	N/A	-
	NDE bearing	27/03/23	-	-	-	-	-	-	0.02555	0.00379	0.03983	0.00213	85.02373	5.51642
9	NDE bearing	10/09/20	-	-	-	-	-	-	0.19939	0.00727	0.06167	0.00938	N/A	-
	NDE bearing	23/06/23	-	-	-	-	-	-	0.04862	0.00338	0.06807	0.00191	74.06654	4.00367
11	Gerador	09/01/20	Electrical issue						-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	06/12/22	-	-	-	-	-	-	0.03723	0.0031	0.02551	0.00579	65.45198	5.37938
12	DE bearing	22/03/19	N/A						-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	18/07/22	-	-	-	-	-	-	0.18278	0.00211	0.04766	0.00215	101.5355	3.75192
13	DE bearing	18/11/22	0.01867	0.01627	0.04918	0.00642	43.16744	16.69945	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	16/11/22	-	-	-	-	-	-	0.0102	0.03696	0.00612	0.00002	13.115	63.29223
14	NDE bearing	22/07/21	-	-	-	-	-	-	0.03505	0.00648	0.01752	0.00206	56.86308	6.39244
	NDE bearing	12/01/21	-	-	-	-	-	-	0.05863	0.00415	0.03254	0.00222	N/A	-
18	Gerador	18/12/20	Electrical issue						-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	05/04/23	-	-	-	-	-	-	0.06069	0.00406	0.02842	0.00484	89.71185	5.44198
19	Gerador	28/01/22	Electrical issue						-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	06/12/23	-	-	-	-	-	-	0.04783	0.0038	0.02634	0.00758	65.83432	16.08531
20	DE bearing	13/01/21	0.1179	0.00402	0.06339	0.00142	N/A	-	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	14/01/21	-	-	-	-	-	-	0.02821	0.00282	0.00608	0.00112	N/A	-
21	DE bearing	21/07/21	0.08271	0.0043	0.03039	0.0031	N/A	-	-	-	-	-	-	-
	DE bearing	17/02/23	0.1584	0.00413	0.03919	0.00273	97.31563	4.45428	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	09/02/22	-	-	-	-	-	-	0.00827	0.0407	0.0076	0.0018	24.93528	4.17087
23	DE bearing	03/06/19	0.02799	0.00236	0.01039	0.0005	N/A	-	-	-	-	-	-	-
	DE bearing	01/10/21	0.12888	0.00527	0.09423	0.0068	N/A	-	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	03/02/22	-	-	-	-	-	-	0.04148	0.00402	0.08998	0.00409	N/A	-
24	NDE bearing	30/05/19	-	-	-	-	-	-	0.14218	0.00681	0.05551	0.00073	N/A	-
	DE bearing	16/06/23	0.10834	0.00376	0.1007	0.00262	105.7421	4.44837	-	-	-	-	-	-
25	Gerador	22/10/19	0.00332	0.00783	0.00393	0.00221	N/A	-	0.00332	0.00381	0.00572	0.00102	N/A	-
	DE bearing	21/06/23	0.1591	0.00394	0.05333	0.00203	92.20003	4.71249	-	-	-	-	-	-
27	NDE bearing	10/05/23	-	-	-	-	-	-	0.11674	0.00251	0.06261	0.00047	86.06715	4.22738
	Gerador	18/11/19	Electrical issue						-	-	-	-	-	-
28	Gerador	22/06/23	Electrical issue						-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	20/06/23	-	-	-	-	-	-	0.06017	0.00919	0.0258	0.0053	72.37727	11.1795
30	Gerador	06/12/21	Electrical issue						-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	25/08/23	-	-	-	-	-	-	0.06517	0.0129	0.0583	0.00598	81.8543	13.84422
33	NDE bearing	04/12/23	-	-	-	-	-	-	0.03096	0.005	0.01452	0.00108	53.49215	6.12792
	DE bearing	05/07/19	0.0413	0.01019	0.08456	0.0055	N/A	-	-	-	-	-	-	-
34	DE bearing	18/08/23	0.04161	0.00624	0.07428	0.00437	76.00397	6.21719	-	-	-	-	-	-
	NDE bearing	04/07/19	-	-	-	-	-	-	0.00906	0.00093	0.01261	0.00048	N/A	-
	Gerador	09/08/21	Electrical issue						-	-	-	-	-	-
36	DE bearing	09/08/23	0.05576	0.00379	0.0399	0.00227	86.97209	4.01738	-	-	-	-	-	-
	DE bearing	17/05/21	0.01444	0.00459	0.02486	0.00539	41.9843	6.51704	-	-	-	-	-	-
38	Gerador	22/02/21	Electrical issue						-	-	-	-	-	-



DADOS SOBRE TEMPERATURA DE ÓLEOS EM EXCEL

C.1 DADOS SOBRE A TEMPERATURA DO ÓLEO #02

Date Time	Pampilhosa PAP WT02 Gearbox oil temperature [DEGC]	Pampilhosa PAP WT02 Wind Speed [M/S]
2020-01-22 14:00:00	55.73	7.03
2020-01-22 15:00:00	53.98	6.14
2020-01-22 16:00:00	53.7	5.89
2020-01-22 17:00:00	55.65	8.25
2020-01-22 18:00:00	57	9.17
2020-01-22 19:00:00	56.62	8.36
2020-01-22 20:00:00	57.57	9.4
2020-01-22 21:00:00	59.15	10.49
2020-01-22 22:00:00	56.07	6.89
2020-01-22 23:00:00	55.82	7.63
2020-01-23 00:00:00	56.25	7.8
2020-01-23 01:00:00	55.27	7.65
2020-01-23 02:00:00	58.07	9.95
2020-01-23 03:00:00	57.55	8.95
2020-01-23 04:00:00	60.12	12.58
2020-01-23 05:00:00	61.37	11.89
2020-01-23 06:00:00	62.22	13.89
2020-01-23 07:00:00	62.95	15.82
2020-01-23 08:00:00	62.58	13.25
2020-01-23 09:00:00	61.9	11.45
2020-01-23 10:00:00	61.93	12.91
2020-01-23 11:00:00	62.03	12.27
2020-01-23 12:00:00	61.44	11.17
2020-01-23 13:00:00	61.58	10.67
2020-01-23 14:00:00	60.7	10.5
2020-01-23 15:00:00	60.55	9.95
2020-01-23 16:00:00	57.27	8.57
2020-01-23 17:00:00	57.53	9.12

C.2 DADOS SOBRE A TEMPERATURA DO ÓLEO #04

Date Time	Bearing Hollow Shaft Generator	WT04 Bearing HS Generator End Tempa	PAP WT04 Gearbox oil temperatu
20-02-12 20:00:(	42.07	41.43	42
20-02-12 21:00:(	39.9	39.9	40.87
20-02-12 22:00:(	38.97	39	40.68
20-02-12 23:00:(	38.5	39	40.05
20-02-13 00:00:(	38	38.85	40
20-02-13 01:00:(	37.45	38	39.07
20-02-13 02:00:(	38.03	38.45	39.77
20-02-13 03:00:(	39.73	38.95	40.28
20-02-13 04:00:(	43.65	41.3	42.13
20-02-13 05:00:(	57.78	48.87	49.2
20-02-13 06:00:(	48.77	46.95	47.1
20-02-13 07:00:(	55.88	49.67	49.87
20-02-13 08:00:(	63.63	54.63	54
20-02-13 09:00:(	64.7	55.57	54.63
20-02-13 10:00:(	59.52	53.37	53.68
20-02-13 11:00:(	51.12	49.33	49.83
20-02-13 12:00:(	58.5	52.72	52.77
20-02-13 13:00:(	63.03	55.35	54.63
20-02-13 14:00:(	66.25	58.83	57.53
20-02-13 15:00:(	63.12	55.68	55.53
20-02-13 16:00:(	61.08	54	53.6
20-02-13 17:00:(	61.43	54.05	53.75
20-02-13 18:00:(	64.13	55.05	54.65
20-02-13 19:00:(	60.92	54.23	53.77
20-02-13 20:00:(	64.15	55.4	54.62
20-02-13 21:00:(	64.88	56.18	55.48
20-02-13 22:00:(	65.03	57.23	56.13
20-02-13 23:00:(	65.02	57.18	56.13
20-02-14 00:00:(	64.75	55.42	54.88
20-02-14 01:00:(	56.98	52.87	52.78
20-02-14 02:00:(	51.03	50.9	50.13
20-02-14 03:00:(	49.87	49.37	49.1
20-02-14 04:00:(	48.58	48.28	48.18
20-02-14 05:00:(	46.93	46.48	47.08
20-02-14 06:00:(	52.25	48.62	48.25
20-02-14 07:00:(	63.82	54.83	54.3
20-02-14 08:00:(	56.33	52.23	52.45
20-02-14 09:00:(	52.4	50.57	50.83
20-02-14 10:00:(	48.53	47.9	48.35
20-02-14 11:00:(	46.38	46.3	46.9
20-02-14 12:00:(	54.3	49.15	49.27
20-02-14 13:00:(	61.07	53.67	53.73
20-02-14 14:00:(	50.78	49.37	50.03
20-02-14 15:00:(	48.75	47.23	47.92
20-02-14 16:00:(	48.35	47.5	48.32
20-02-14 17:00:(	59.55	52.62	52.53
20-02-14 18:00:(	57.37	52.43	52.52
20-02-14 19:00:(	51.3	49.63	50.35
20-02-14 20:00:(	47.12	46.83	47.47

C.3 DADOS SOBRE A TEMPERATURA DO ÓLEO #11

Date Time	AP	WT11 Ambient	Temperearing	Hollow Shaft	Generat	Bearing HS	Generator En	PAP WT11	Gearbox oil	temperaios	PAP	WT11	Generator RPI
19-12-02 05:00:(		6.1		67.92		63.41			60.53				1464.38
19-12-02 06:00:(		6.2		68.66		64.53			60.96				1510.35
19-12-02 07:00:(		7.66		73.59		71.45			64.9				1676.39
19-12-02 08:00:(		7.69		74.27		71.99			65.37				1673.07
19-12-02 09:00:(		8.17		74.17		72.06			65.37				1674.84
19-12-02 10:00:(		8.47		72.83		70.29			64.55				1631.36
19-12-02 11:00:(		9.76		74.59		72.54			65.65				1681.59
19-12-02 12:00:(		8.95		75		73			66				1681.82
19-12-02 13:00:(		9.33		75		73.17			66				1684.44
19-12-02 14:00:(		9.17		74.57		72.57			66				1683.13
19-12-02 15:00:(		9.28		74.53		72.48			65.72				1681.39
19-12-02 16:00:(		9.5		75		73			66				1683.09
19-12-02 17:00:(		9.13		74.97		73.25			66				1679.01
19-12-02 18:00:(		8.42		73.78		71.75			65.42				1636.86
19-12-02 19:00:(		8.45		73.93		71.73			65.17				1671.59
19-12-02 20:00:(		8.05		74.98		73.1			66				1684.45
19-12-02 21:00:(		8.35		75		73.4			66.05				1679.91
19-12-02 22:00:(		7.18		73.8		71.93			65.55				1655.51
19-12-02 23:00:(		6.13		66.05		61.43			59.75				1271.65
19-12-03 00:00:(		7.03		69.23		65.38			61.97				1488.69
19-12-03 01:00:(		6.08		65.46		60.35			58.39				1324.55
19-12-03 02:00:(		7		69.97		65.82			62.06				1600.78
19-12-03 03:00:(		7.3		66.87		62.36			59.78				1354.45
19-12-03 04:00:(		8.68		64.95		59.5			58.12				1252.61
19-12-03 05:00:(		8.61		62.65		56.47			55.36				1071.9
19-12-03 06:00:(		7.68		54.86		51.56			52.84				358.68
19-12-03 07:00:(		7.61		54.1		51.11			51.45				612.72
19-12-03 08:00:(		7		53.63		50.47			51.74				290.18
19-12-03 09:00:(		7.67		47.18		46.97			48.61				31.01
19-12-03 10:00:(		8.9		43.84		44.66			46.69				0.27
19-12-03 11:00:(		7.88		51.31		47.89			48.53				689.15
19-12-03 12:00:(		7		61.63		53.88			53.79				1000.81

C.4 DADOS SOBRE A TEMPERATURA DO ÓLEO#18

Date Time	a PAP WT18 Ambient Temperature	ing Hollow Shaft Genering HS Generator	Gearbox oil\WP WT18 Rotoir	Produced-Pi		
19-06-06 00:00:00	6	64.13	60.82	56.53	12.45	404.23
19-06-06 01:00:00	6.35	64.72	62.25	57.2	13.51	513.6
19-06-06 02:00:00	6.43	66.28	65.5	59.22	14.68	651.93
19-06-06 03:00:00	6.37	63.7	59.55	55.52	11.44	306.87
19-06-06 04:00:00	7	62.52	56.85	54.02	10.44	203.19
19-06-06 05:00:00	7.22	62	55.12	52.85	10.02	109.46
19-06-06 06:00:00	7.12	60.45	54.4	52.53	7.61	59.64
19-06-06 07:00:00	8.35	50.25	48.93	49.63	1.16	0
19-06-06 08:00:00	8.15	58.62	52.82	51.4	9.56	82.77
19-06-06 09:00:00	8.5	62.1	56.43	53.5	10.96	281.95
19-06-06 10:00:00	9	65.27	63.2	57.55	13.58	681.48
19-06-06 11:00:00	9.63	63.45	59.37	55.18	11.57	405.72
19-06-06 12:00:00	10.9	67.2	66.45	59.47	15.35	1379.84
19-06-06 13:00:00	13.02	70.03	72.02	62.92	15.98	2454.37
19-06-06 14:00:00	13.03	70.15	72.93	63.92	16.04	2510.25
19-06-06 15:00:00	12.48	69.69	71.43	63.23	15.84	1915.67
19-06-06 16:00:00	12.07	70.07	72.6	63.52	16.03	2456.34
19-06-06 17:00:00	11.8	70.03	72.83	63.93	16.01	2392.92
19-06-06 18:00:00	10.82	68.12	68.62	61.65	14.92	1404.45
19-06-06 19:00:00	8.72	69.25	72.23	63.77	16.01	2303.38
19-06-06 20:00:00	8	70.03	72.77	64.03	16.04	2441.18
19-06-06 21:00:00	8	70.03	72.75	64.8	16.04	2387.5
19-06-06 22:00:00	8	70.03	72.73	64.07	16.01	2450.76
19-06-06 23:00:00	7.58	69.98	72.47	63.97	16.03	2398.23
19-06-07 00:00:00	7	69.98	72.4	64	16.01	2270.58
19-06-07 01:00:00	7	70	72.27	63.95	16.01	2300.37
19-06-07 02:00:00	7	69.98	72.3	63.92	16	2242.63
19-06-07 03:00:00	6.9	69.9	71.7	63.75	16	2001.99
19-06-07 04:00:00	6.17	69.75	70.63	63.15	15.93	1641.93
19-06-07 05:00:00	6.3	69.97	71.37	63.67	15.98	2035.73
19-06-07 06:00:00	6.4	69.82	70.78	63.53	15.95	1653.12
19-06-07 07:00:00	6.03	69.72	69.6	62.9	15.66	1272.62
19-06-07 08:00:00	6	65.72	63.75	58.65	13.22	585.99
19-06-07 09:00:00	6.23	63.47	59.22	55.33	11.74	391.87
19-06-07 10:00:00	7.35	62.85	58	54.75	10.72	251.74

C.5 DADOS SOBRE TEMPERATURA DO ÓLEO#13

Date Time	Pampilhosa PAP V	Pampilhosa PAP W	Pampilhosa PAP WT13 Gearbox	Pampilhosa PAP WT13 Generatc
2019-05-30 23:00:00	65.67	58.2	54.55	1236.48
2019-05-31 00:00:00	67.68	60.9	56.55	1308.31
2019-05-31 01:00:00	65.87	58.2	54.98	1141.39
2019-05-31 02:00:00	64.37	56.4	53.5	1111.79
2019-05-31 03:00:00	64.9	57.12	54.03	1215.04
2019-05-31 04:00:00	70.45	64.38	59.15	1538.44
2019-05-31 05:00:00	71.6	65.8	60.18	1614.09
2019-05-31 06:00:00	72.38	67.55	60.58	1678.9
2019-05-31 07:00:00	72.17	68.75	61.47	1678.85
2019-05-31 08:00:00	71.57	67.93	61.17	1591.48
2019-05-31 09:00:00	70.12	63.97	59.88	1450.6
2019-05-31 10:00:00	65.48	57.12	55.1	1073.73
2019-05-31 11:00:00	65.05	57.35	54.37	1202.53
2019-05-31 12:00:00	65.03	56.87	53.92	1106.97
2019-05-31 13:00:00	60.93	53.63	52.07	649.29
2019-05-31 14:00:00	51.33	49.92	49.88	165.52
2019-05-31 15:00:00	52.95	50.68	50.35	251.05
2019-05-31 16:00:00	50.15	49.37	49.75	137.5
2019-05-31 17:00:00	63.8	58.72	54.87	1329.76
2019-05-31 18:00:00	68.76	62.29	57.94	1350.79
2019-05-31 19:00:00	70.65	64.7	59.75	1515.55
2019-05-31 20:00:00	70.6	64.52	59.83	1499.79
2019-05-31 21:00:00	72.15	66.92	60.95	1649.36
2019-05-31 22:00:00	68.88	62.77	58.55	1337.95
2019-05-31 23:00:00	65.33	57.62	54.87	1098.41
2019-06-01 00:00:00	64.2	56.33	53.25	1089.77
2019-06-01 01:00:00	64.07	57.17	53.85	1189.39
2019-06-01 02:00:00	65.78	58.48	54.9	1196.31
2019-06-01 03:00:00	64	56	53.25	1053.33
2019-06-01 04:00:00	64	55.73	53.22	1050.73
2019-06-01 05:00:00	64	55.65	53.07	1051.79
2019-06-01 06:00:00	63.95	55.2	52.68	1007.96
2019-06-01 07:00:00	52.85	51	50.42	236.93
2019-06-01 08:00:00	61.89	55.14	52.56	1136.02
2019-06-01 09:00:00	67.88	61.05	56.73	1319.65
2019-06-01 10:00:00	64.82	56.37	53.77	1073.88
2019-06-01 11:00:00	64	54.97	52.83	1053.1
2019-06-01 12:00:00	60.68	53.62	52.04	776.91
2019-06-01 13:00:00	55.4	51.52	50.85	379.07
2019-06-01 14:00:00	60.25	54.5	52.33	972.29
2019-06-01 15:00:00	65.33	57.5	53.72	1187.47
2019-06-01 16:00:00	65.67	57.83	54.43	1165.68
2019-06-01 17:00:00	66.38	59.02	55.25	1271.81
2019-06-01 18:00:00	69.78	63.53	58.57	1439.13
2019-06-01 19:00:00	70.08	64	59.02	1497.12
2019-06-01 20:00:00	72.07	67.02	60.37	1651.94
2019-06-01 21:00:00	72	68.12	60	1678.37
2019-06-01 22:00:00	72.98	70.68	62.38	1679.1
2019-06-01 23:00:00	73.23	71.5	63.17	1679.44
2019-06-02 00:00:00	74	72.63	64.02	1679.67
2019-06-02 01:00:00	74	72.62	64.4	1679.15
2019-06-02 02:00:00	73.55	70.48	63.33	1679.18
2019-06-02 03:00:00	73	70.52	63	1679.79
2019-06-02 04:00:00	73	69.53	62.22	1679.21
2019-06-02 05:00:00	72.2	68.17	61.18	1679.29
2019-06-02 06:00:00	72.18	67.27	60.73	1647.23
2019-06-02 07:00:00	71.63	65.88	60.17	1616.28
2019-06-02 08:00:00	71.98	66.72	60.27	1641.96