



Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação Lato Sensu
Engenharia de Manutenção 4.0



RODRIGO KENICHI SATO SOARES

**CASOS PRÁTICOS: MONITORAMENTO *ONLINE* DE ÓLEO
ASSOCIADO A TÉCNICAS PREDITIVAS E INSPEÇÃO EM
REDUTORES DE RODAS DE CAÇAMBAS**

**CURITIBA
2025**

RODRIGO KENICHI SATO SOARES

**CASOS PRÁTICOS: MONITORAMENTO *ONLINE* DE ÓLEO
ASSOCIADO A TÉCNICAS PREDITIVAS E INSPEÇÃO EM
REDUTORES DE RODAS DE CAÇAMBAS**

Monografia apresentada para obtenção do grau
de Especialista em Engenharia da Manutenção.
Curso de Pós-graduação Lato Sensu, Setor de
Tecnologia, Departamento de Engenharia
Mecânica, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Pescador

**CURITIBA
2025**

Agradecimentos

Agradecimentos especiais a:

Marcus Vinicius (Engenheiro de Tecnologias, VITEK Consultoria), Adiel Andrade (Técnico de Preditiva Industrial, MRN), Sócrates Marcelo Viana (Técnico de Preditiva Industrial, MRN), Jadson Marinho (Técnico de Preditiva Industrial, Profissional Certificado ASNT SNT-TCA-1^a, US e PM Nível II, MRN), Cleber Correa (Técnico de Preditiva Industrial, Profissional Certificado ASNT SNT-TCA-1^a, US Nível II, MRN), Dorival Santos (Técnico de Preditiva Industrial, Profissional Certificado ASNT SNT-TCA-1^a, PM Nível II, MRN), Ubiracy Santos (Técnico Líder de Lubrificação Industrial, MRN), Hermilei Pimentel (Mecânico de Lubrificação Industrial, MRN) e Roberto Santos (Técnico em Mecânica, ex-MRN, atual GMining Ventures).

Menção honrosa a:

Marcio Galucio (Planejador de Manutenção de Equipamentos de Frota, MRN) e Leandro Santos (Inspetor de Manutenção de Equipamentos de Frota, MRN).

Resumo

O monitoramento *online* de óleo surge como uma ferramenta essencial, fornecendo dados em tempo real para manutenção proativa. Estudos de caso em uma recuperadora de minério destacam as estratégias de manutenção com o monitoramento *online* em redutores de rodas de caçamba, classificadas como ativos críticos na mineração. Os casos analisados abordam a degradação avançada de óleo e peças, com foco nos desafios da análise de vibração e inspeções sensitivas. Este trabalho apresenta como o monitoramento *online* e *offline* das condições do óleo, juntamente com a execução de rotinas de filtragem adequadas, podem melhorar o controle de qualidade do óleo e aprimorar as práticas de lubrificação. Além disso, a abordagem se concentra na excelência em lubrificação, na importância de um programa de lubrificação robusto e nas melhores práticas em filtragem de óleo. Insights sobre técnicas de análise, lubrificação e filtragem de óleo, que levam a melhores resultados de engenharia de manutenção e melhor desempenho de equipamentos, são detalhados para profissionais envolvidos na gestão de lubrificação e filtragem.

Palavras-chave: *Monitoramento Baseado em Condição; Preditiva; Análise de Óleo; Inspeção.*

Abstract

Online oil monitoring emerges as a key tool, providing real-time data for proactive maintenance. Cases study in an ore reclaimer underscores the implementation of this monitoring for a bucket wheel gearbox, classified as a critical asset within the mineral industry. These referred cases dive into advanced oil and parts degradation, focusing on challenges in vibration analysis and sensitive inspections. This paper presents how online and offline oil condition monitoring, along with proper filtering tasks, can improve oil quality control and enhance lubrication practices. Further, the approach focuses on lubrication excellence, the importance of a robust lubrication program, and best practices in oil filtration. Insights into oil analysis, lubrication, and filtration techniques that lead to better maintenance engineering outcomes and improved equipment performance are detailed for professionals involved in lubrication and filtration management.

Keywords: *Condition Based Monitoring; Predictive; Oil Analysis; Inspection.*

1 INTRODUÇÃO

Na mineração, onde a eficiência operacional é uma necessidade iminente e os custos de manutenção representam uma parcela significativa das despesas operacionais, a busca por métodos inovadores de gestão de ativos e manutenção tornou-se explícita. Consequentemente, o monitoramento preditivo *online* surge como estratégia de manutenção para otimizar o desempenho dos ativos, reduzir o tempo de inatividade e minimizar os custos de manutenção.

A gestão eficaz de ativos é fundamental para garantir a operação contínua e confiável das atividades de mineração. No entanto, com a crescente complexidade dos equipamentos e as crescentes demandas de produção, a abordagem tradicional de manutenção preventiva está sendo gradualmente substituída pela manutenção baseada na condição. Essa abordagem proativa permite uma alocação mais eficiente dos recursos de manutenção, priorizando as intervenções com base nas necessidades reais dos equipamentos, em vez de seguir um cronograma fixo.

Nesse cenário, o monitoramento *online* de óleo torna-se uma estratégia preponderante para alimentar sistemas de manutenção baseados em condições com dados em tempo real sobre o comportamento do equipamento. Ao monitorar continuamente a qualidade e as condições do óleo lubrificante, é possível identificar, com melhor previsibilidade, potenciais problemas de desgaste, contaminação ou falhas em componentes críticos de equipamentos rotativos, permitindo intervenções proativas antes que falhas funcionais venham a ocorrer e, assim, contribuindo para operação mais previsível, sustentável e competitiva.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Descrição dos Casos

A recuperadora de minério é um equipamento utilizado para o manuseio de materiais sólidos a granel na indústria mineral. O equipamento utilizado no monitoramento é definido como máquina de pátio, utilizado exclusivamente para a recuperação do minério de bauxita processado, para este caso. Localizada no pátio de matérias-primas, é responsável pelo transporte do minério das pilhas de estocagem para correias transportadoras à jusante.

Nas operações de mineração, as recuperadoras de minério, são equipamentos críticos de grande porte e automatizados, utilizadas para direcionar materiais a granel, como minério, carvão ou outras substâncias mineradas. Elas desempenham um papel crucial no armazenamento, recuperação e transferência eficientes desses materiais para os processos subsequentes. Elas recuperam os materiais das pilhas de estocagem e os transferem de volta para as correias transportadoras para posterior processamento ou transporte. As recuperadoras também podem ser usadas para misturar diferentes tipos de minério ou materiais para garantir qualidade e composição consistentes (mistura/homogeneização).



Figura 1. Recuperadora de Minério de Máquinas de Pátio.

2.2 Detalhamento e Teste de Equipamentos

A Recuperadora de Rodas de Caçamba (Redutor Ortogonal e Planetário Combinado) é um equipamento significantemente complexo, e que necessita de estratégias de manutenção abrangentes para o monitoramento das condições. Estes equipamentos são interdependentes e sua performance depende de variáveis operacionais, como o tipo de minério a ser recuperado, o tipo e a velocidade das operações de recuperação, as condições climáticas e os modos gerais de operação. Portanto, não é fácil construir uma lógica de decisão simples para melhor previsão de falhas.

O HSS (Eixo de Alta Velocidade) no lado do redutor ortogonal é uma das seções mais sensíveis e geralmente causa paradas mecânicas. O reservatório de óleo é compartilhado entre ambas as seções e a análise do óleo não pode levar à localização precisa dos danos, tanto na análise *offline* quanto *online*.

O uso de videoboroscópios durante as inspeções em campo, por outro lado, pode levar à melhor precisão na determinação e validação das condições dos componentes. Além disso, em relação à análise de vibração *offline* e *online*, e às inspeções *offline*, não é uma tarefa fácil determinar as condições físicas, seja em baixa velocidade ou na posição dinâmica de rolamentos e engrenagens, na seção planetária.

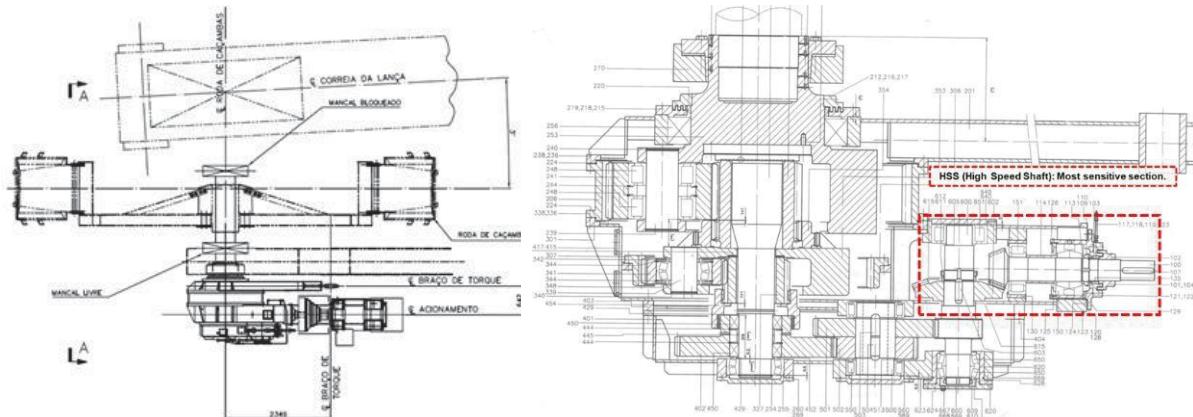


Figura 1. Redutor da Roda de Caçambas FLENDER SO 424/3E (Detalhamento e Vista de Seção).

As motivações que levaram à seleção do equipamento a ser monitorado como fase de testes (PoC, prova de conceitos) foram mostradas a seguir para o Caso nº 1: RRC-248-002 e Caso nº 2: RRC-220-001:

- ❖ Tempo de deslocamento curto para a equipe de manutenção e facilidade de deslocamento;
- ❖ Proximidade das Equipes de Manutenção Preditiva (GRA Preditiva) e de Inspeção (GRA Inspeção), Equipe de Lubrificação (GRMLub), Equipe de Execução de Manutenção Elétrica (GRMB, GRMH e GRMJ) e Mecânica (GRME e GRMI), Equipe de Armazém/Almoxarifado (GAL), Equipe de Engenharia de Manutenção (GRA) e Equipe de Automação Industrial (GRA Automação);
- ❖ Cobertura GSM uniforme para testes - dependendo da conexão GSM e da estabilidade da operadora de SIM na região a testar;
- ❖ Ausência de paradas mensais programadas para comissionamento.



Figura 2. Período de Teste do *Hardware* (autoria própria).

2.3 Gestão de Ativos

Segundo [7], a gestão de ativos é uma atividade empresarial focada em ativos tangíveis (equipamentos e sistemas). Ela compreende atividades e tomadas de decisão que abrangem as fases do ciclo de vida do investimento.



Figura 3. Ciclo de vida de ativos industriais (autoria própria).

De acordo com [11], a curva P-F é um gráfico utilizado para identificar a confiabilidade e o desempenho de ativos ao longo do tempo. Tem por finalidade traçar o intervalo entre a falha potencial (PF) e a falha funcional (FF) de um ativo, o que permite identificar quando intervenções de manutenção devem ser executadas para evitar falhas. A curva P-F foi ajustada com foco em técnicas e ações abrangentes de Predição e Inspeção, e suas posições em relação ao comportamento do equipamento.

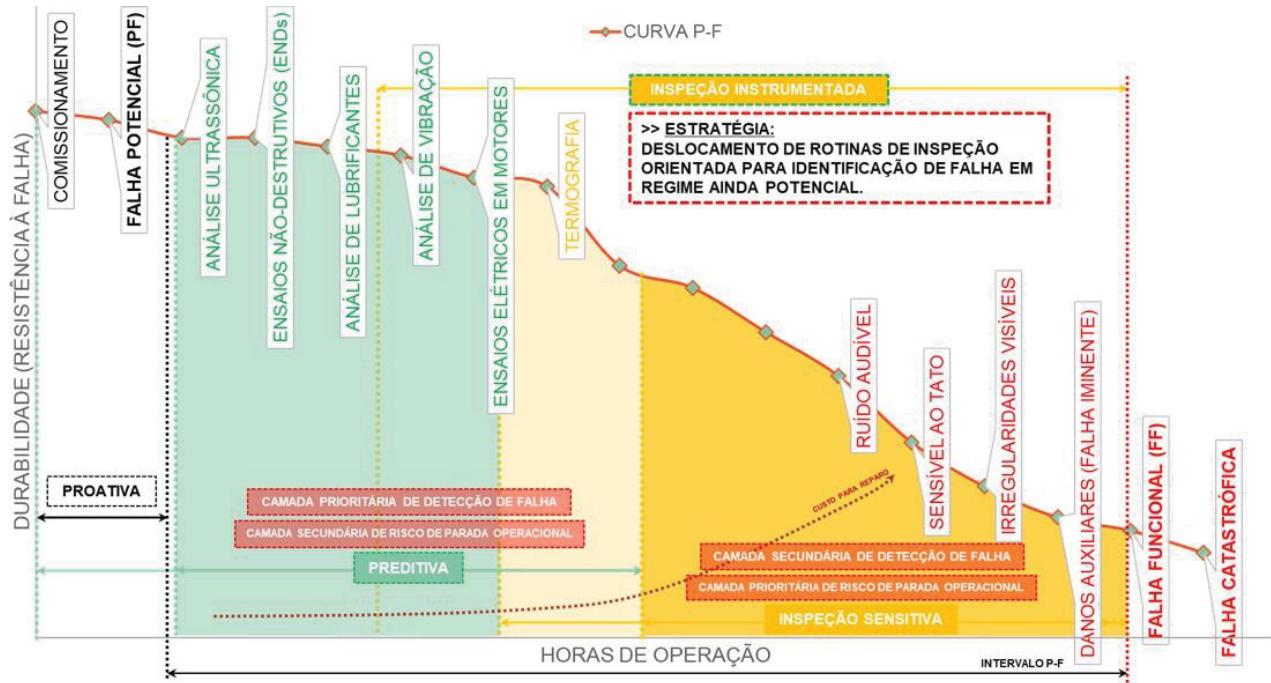


Figura 4. Curva P-F adaptada para ações e estratégias preditivas e de inspeção (autoria própria).

Dentro dos estágios do ciclo de vida do ativo [2] e [3], este artigo se concentrará nos estágios de melhoria e operação e manutenção, visando otimizar e estender o tempo de atividade útil ou restante do equipamento. O equipamento exibe algumas características operacionais que sugerem o uso das melhores práticas de manutenção para reduzir potenciais falhas catastróficas. A Recuperadora de Minérios geralmente apresenta algumas ocorrências de falha potencial (PF), mas pode apresentar alta severidade de danos (falha funcional (FF)), com ênfase no Redutor da Roda de Caçambas. É neste equipamento em que ocorrem desgastem nas engrenagens e rolamentos devido à degradação do óleo, o que será abordado neste artigo como premissa para monitoramento. Os motivos para implementar o monitoramento *online* das caixas de engrenagens da roda de caçamba são:

- ❖ Alto impacto na disponibilidade física para tempo de inatividade (falha funcional (FF)) no processamento da produção de minério;
- ❖ Altos custos de transporte de locais remotos para reparos externos e/ou *retrofits*;

- ❖ Altos custos de reparo da caixa de engrenagens, incluindo custos por hora de trabalho, priorização de desvios de mão-de-obra e problemas relacionados a retrabalho;
 - ❖ Dificuldade de inspecionar e prever falhas adequadamente, além de inspeções e ajustes internos no local;
 - ❖ Outros problemas relacionados à manutenção.

➤ Modos de falha de rolamentos (e também de outros componentes)

Os modos de análise de falhas baseados na padronização internacional ISO 15243:2017 (Rolamentos — Danos e falhas — Termos, características e causas) também são ajustados aos equipamentos de Acionamento de Rodas de Caçambas de Recuperadoras, geralmente seguindo o mecanismo de falha:

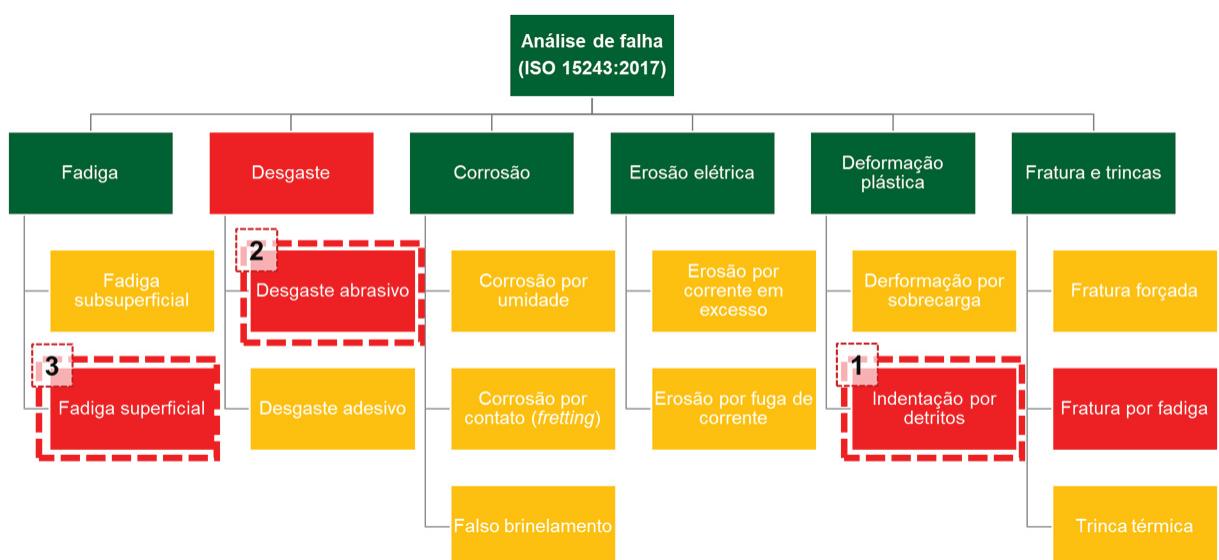


Figura 5. Modos de falha de acordo com ISO 15243:2017.

- 1.1.1. Modos de falha iniciados por indentação de detritos (*pittings*) devido à contaminação por partículas, como iniciação de fadiga superficial;
 - 1.1.2. Modos de falha causados por desgaste abrasivo (abrasão de três corpos) devido à degradação da cavidade da gaiola;
 - 1.1.3. Possível desalinhamento dos elementos rolantes, resultando em contato anormal entre os contatos de rolamento e deslizamento;
 - 1.1.4. Danos avançados e totais na gaiola do rolamento, consequente travamento do rolamento e tempo de inatividade do equipamento.

➤ Referências para Análise de Óleo

Metas claras não são definidas por normas, mas geralmente são definidas por fabricantes e documentações de consulta. Estabelecer níveis de limpeza é o primeiro passo para monitorar a contagem de partículas de óleo em ações de análise de óleo.

A tabela a seguir apresenta algumas das metas de nível de limpeza consideradas aceitáveis:

Equipament / Component	Cleanliness Level			Reference
	P < 140 bar	P < 210 bar	P > 210 bar	
Industrial	Lubricating Oil (arrival)	25/22/19		HY-PRO
	Bearing	-/15/12 (80 % of theoretical life of the bearing)		NTN
	Bearing	-/15/12		SKF
	Roller Bearing	16/14/12		VICKERS / MOBIL
	Ball Bearing	15/13/11		VICKERS / MOBIL
	Hydrodynamic Coupling	21/18/15		VOITH
	Gearbox	21/19/16 (safe side: 20/18/15)		NORIA
	Gearbox	25/22/15*		FALK
	Gearbox	17/14/11 (16/13/11 min)		SUMITOMO
	Gearbox	18/16/13		MOBIL
	Gearbox	17/15/13		VICKERS
	Gearbox	-20/15 (safe side: -19/16)		SIEMENS (FLENDER)
	Planetary Gearbox	-20/15		SIEMENS (FLENDER)
	Gearbox	18/16/14		DODGE

Figura 6. Metas de limpeza (referência): Análise de contagem de partículas de lubrificante (autoria própria).

Particle size	Particle size per milliliter (ml)		ISO Scale
	Over:	Up to:	
> 4 µm	5.000	10.000	20*
> 6 µm	1.300	2.500	18*
> 14 µm	160	320	15*

Tabela 1. Meta de nível de limpeza de óleo (limite de contaminação ISO) (autoria própria).

2.4 Objetivo

De acordo com a NBR 5462 [3], a Manutenção Preditiva e Inspeção Sensitiva ou Instrumentada (ou manutenção baseada na condição) é uma estratégia de manutenção que permite garantir a qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando supervisão centralizada ou meios de amostragem, a fim de minimizar a manutenção preventiva e reduzir as manutenções corretivas.

O principal objetivo do monitoramento de condição *online* é aumentar a maturidade da gestão de ativos para atender aos planos estratégicos da organização. Dentro da Engenharia de Manutenção, isso envolve a criação de um banco de dados robusto usado para ajustar e otimizar as estratégias de manutenção, identificando áreas de melhoria e ajustando as práticas de manutenção conforme necessário. É uma estratégia de manutenção orientada para a manutenção preditiva com foco na manutenção baseada na condição como a camada-chave para estender o tempo útil ou restante de atividade do equipamento.

1.5 Desenvolvimento

➤ Hardware

O dispositivo aplicado para monitoramento foi o OilWear da ATTEN[2], disponibilizado e disponibilizado pela VITEK Consultoria. Este dispositivo é um sensor *online* para identificação de partículas e bolhas maiores que 4 µm (mícron) presentes no fluido do equipamento, com capacidade de classificá-las em seis faixas de tamanho (ISO 4406 para três tamanhos e não padronizada para tamanhos maiores) [15], utilizando processamento de imagens, ao invés de imagens a laser. O dispositivo [23] utiliza um sensor CMOS para obter imagens digitais do óleo analisado. Este aparelho processa as imagens, gerando as seguintes informações:



Figura 7. ATTEN[2] Sensor de Análise OilWear 2.0 S120.

- ❖ Classificação de partículas por tamanho e análise por visão artificial;
- ❖ Contagem de bolhas e segregação por processamento de imagens;
- ❖ Aquisição de códigos de limpeza como ISO 4406, NAS 1638 e similares;
- ❖ Determinação da causa-raiz por formato (morfologia básica) e tamanho das partículas;
- ❖ Abordagem básica para degradação de óleo.

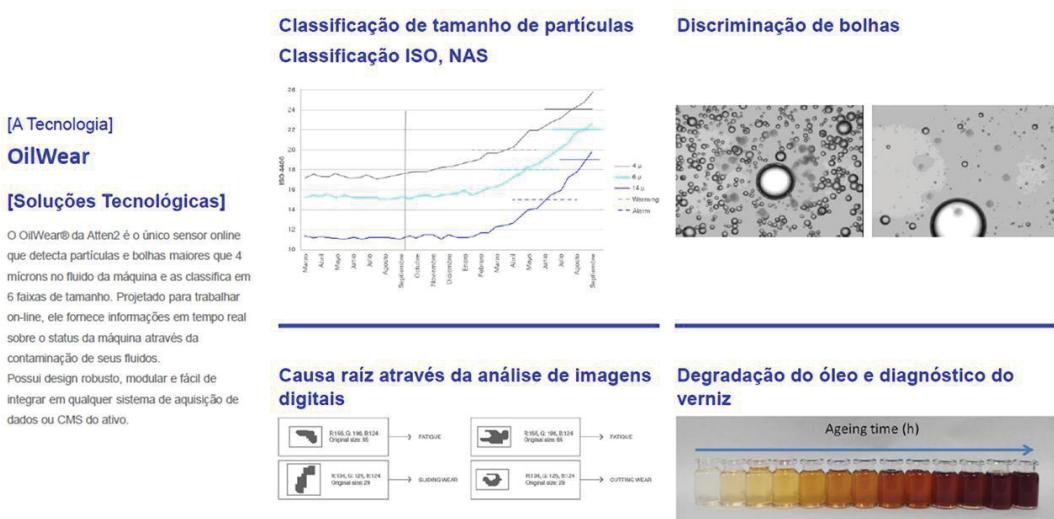


Figura 8. Classificação do tamanho de partículas, discriminação de bolhas e causa-raiz (morfologia de partículas) (análise preditiva de óleo) e testes visuais para degradação de óleo (análise de inspeção de óleo).

➤ Especificação Técnica Hidráulica e Mecânica

Pontos de atenção especiais são mencionados abaixo para vazão operacional, pressão e preparação necessária para a hidráulica. Os componentes hidráulicos foram preparados e as visitas aos equipamentos foram realizadas durante os períodos fora de produção.

Parameter	Value	General recommendation for OilWear 2.0
Mounting position	Vertical	ATTENTION POINT
Operating pressure	100 bar max.	
Fluid temperature	Up to 85 °C	Hydraulics
Working viscosity	Up to 1.280 cSt (ISO VG 1280)	
Flow rate	Up to 0.5 lpm (optimum rate to 0.2 lpm)	CRITICAL POINT
System size and weight	88.5 x 60 x 62 mm (0.32 kg) 3.1/2" x 2.1/4" x 2.1/4" (0.7 lb)	
Hydraulic connections	1/8" BSP (x2)	Electrical
Material	Aluminum, BK7 and FKM	
Protection class	IP65	Communication
Conformity certification	CE, UL	

Tabela 2. Recomendação geral e especificações técnicas: Instalação do OilWear 2.0 (autoria própria).

➤ Instalação Hidráulica

A preparação da ramificação (*bypass*) para a instalação hidráulica foi definida após a visita ao equipamento. A instalação é realizada na hidráulica do equipamento, no retorno do circuito de óleo, utilizando conexões para derivação por *bypass*. A caixa de engrenagens possui um circuito hidráulico simples, que utiliza uma bomba de lubrificação automática, filtros e quatro pontos de lubrificação direto em rolamentos. A instalação foi realizada à jusante da bomba e à montante do filtro de linha, e a conexão da mangueira foi refeita com um retorno para o tanque de óleo da caixa de engrenagens.

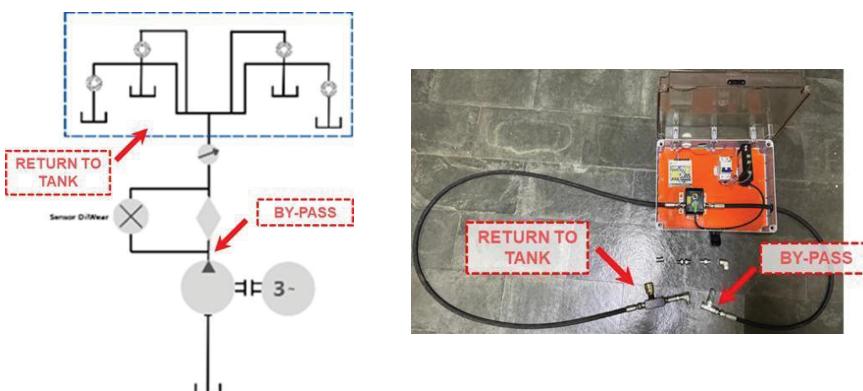


Figura 9. Desenho hidráulico simplificado e ponto de derivação de *bypass* do óleo da caixa de engrenagens para o *hardware* de monitoramento *online* de óleo à jusante da bomba e à montante dos filtros.

Em ambos os casos, a preparação da ramificação foi facilitada, pois o modelo do equipamento é o mesmo do fabricante. Pequenas alterações foram necessárias. Testes visuais também foram realizados antes e depois da intervenção. As modificações foram realizadas da seguinte forma:

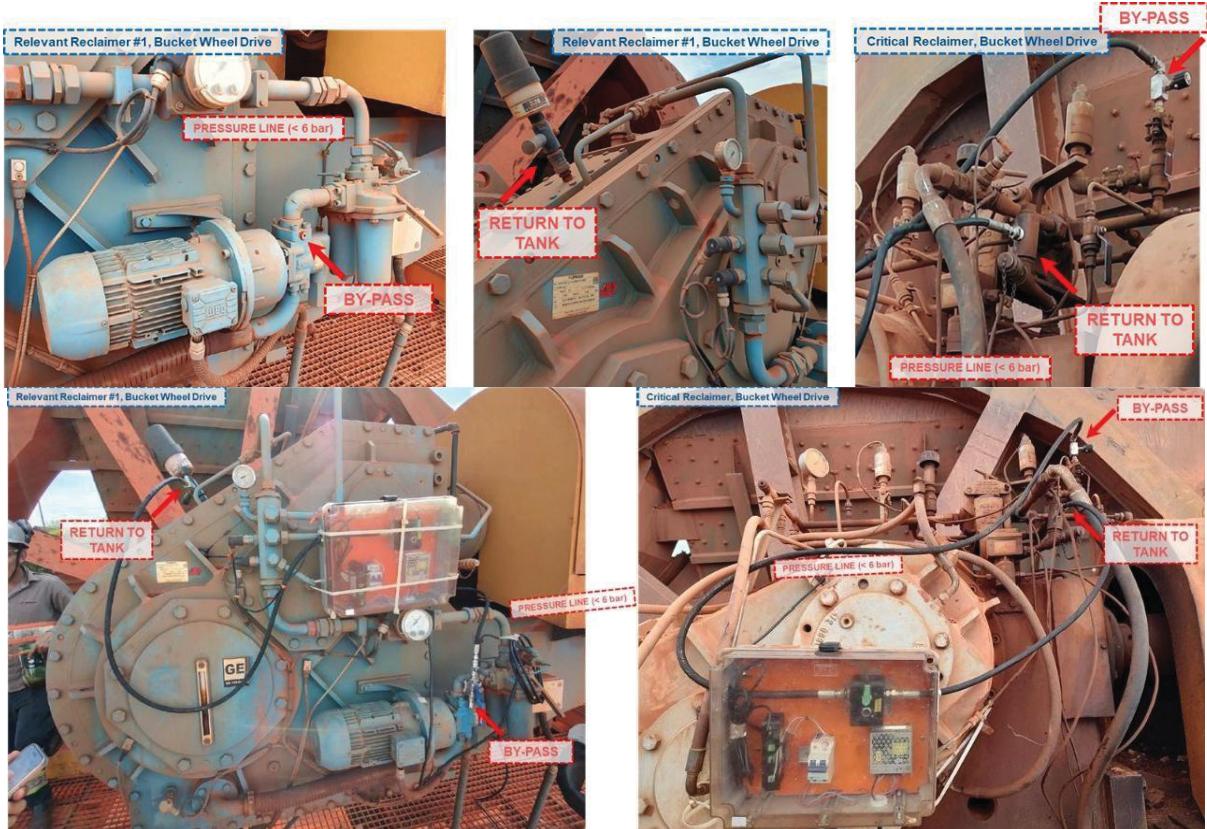


Figura 10. Instalação de ramificação hidráulica para *hardware* de óleo *online*.

➤ Especificação Técnica Elétrica e de Comunicação

Não há necessidade de atenção especial quanto à entrada elétrica. Para entradas digitais, também é necessário preparo e atenção à comunicação, sendo o

melhor método de comunicação para áreas remotas o Modbus RTU com um *gateway* IoT com comunicação direta com a plataforma de monitoramento (protocolo OPC).

Para fins de teste, foi necessário um ponto de energia elétrica próximo e cobertura de rede móvel 4G (comunicação GSM).

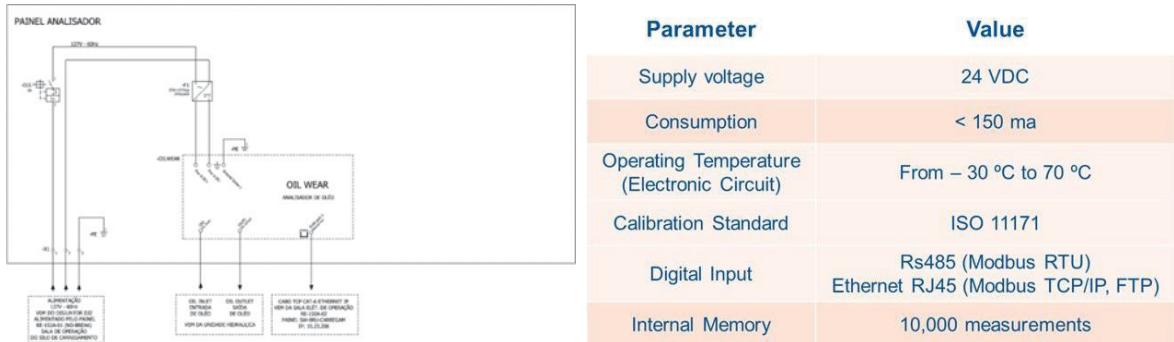


Figura e Tabela 11. Diagrama elétrico de alimentação do sensor e Especificação Técnica Elétrica e de Comunicação.

Para fins de monitoramento definitivo da condição, é conectado a uma conexão de rádio Ethernet 802.11ac sem fio com um *software* para manutenção prescritiva. A instalação elétrica consiste em uma caixa de junção elétrica externa para o sensor, fonte de alimentação, *gateway* e sistema de proteção elétrica.

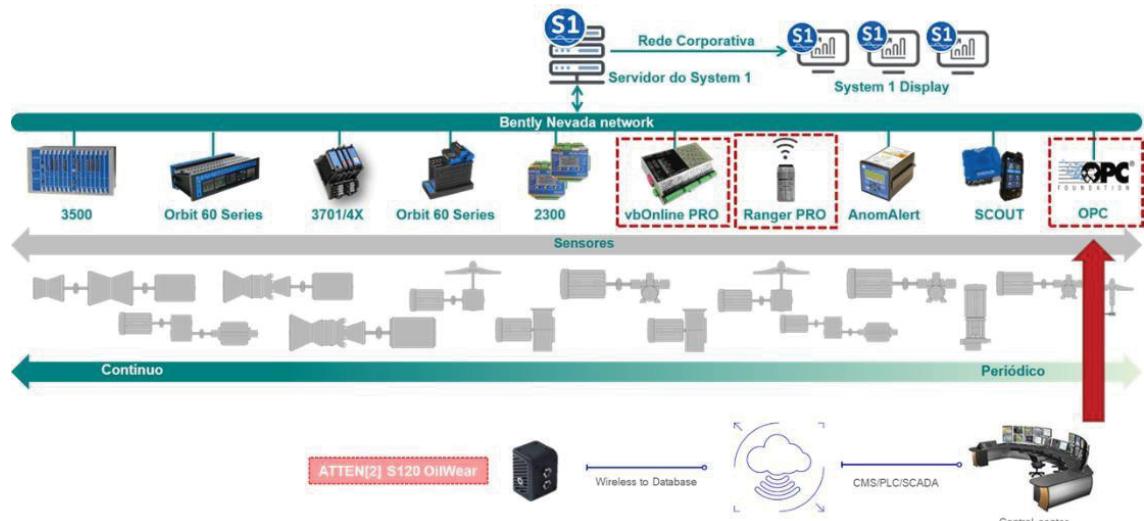


Figura 12. Sinóptico para monitoramento de condições *online*.

1.6 Operação e Resultados

- Caso n° 1: RRC-248-002, Acionamento da Roda de Caçambas (Redutor Planetário)

Após a instalação, o dispositivo foi configurado para comunicação e recuperação de informações imediatamente após a configuração e o comissionamento do equipamento. Os dados são acessados em um portal *online* que apresenta as informações descritas na especificação técnica. O primeiro processamento das informações gerou índices de contagem de partículas e o número da escala ISO. Em

seguida, foi possível acessar a contagem de partículas de 26/24/19 – sendo a meta de referência é 20/18/15.

Os dados de óleo adquiridos *online* foram correlacionados com uma amostragem e análise de óleo *offline* para fins de verificação. A contagem de partículas apresenta os seguintes níveis para o nível de contaminação de óleo ISO nas leituras iniciais de condição do óleo da caixa de engrenagens e na situação de pré-filtragem, em comparação com o nível de limpeza do óleo desejado.

Particle size	Particle size per milliliter (ml)		ISO Scale
	Over:	Up to:	
> 4 µm	320.000	640.000	26 (+ 98,4 %)*
> 6 µm	80.000	160.000	24 (+ 98,4 %)*
> 14 µm	2.500	5.000	19 (+ 93,6 %)*

Particle size	ISO Scale
> 4 µm	x 64 above: applicable oil report
> 6 µm	x 61 above: applicable oil report
> 14 µm	x 166 above: applicable oil report

Tabela 3. Caso n° 1: RRC-248-002, Condição da Qualidade do Óleo *Offline* Pré-Filtragem.

Analizando os dados obtidos, foi possível identificar uma degradação acentuada do óleo na caixa de engrenagens, onde partículas de 4 µm (mícron) estão 64x acima da meta, partículas de 6 µm estão 61x acima do necessário e partículas de 14 µm estão 166x acima da meta estabelecida. Este dado indica desgaste de componentes da caixa de engrenagens, com grandes chances para engrenagens e rolamentos, também relacionado à deficiência no plano preventivo de troca de óleo, o que pode levar à redução do tempo útil ou restante de atividade do equipamento. Essa situação indica a necessidade de ação por meio da aplicação de um laudo para óleo.



Figura 13. Unidade de filtragem de óleo *offline*.

Como primeiro passo na estratégia, para aprimorar a manutenção e a confiabilidade dos equipamentos, a filtragem de óleo foi programada e executada no óleo em operação. De acordo com o calendário de manutenção periódico, a filtragem de óleo foi programada pela equipe de Lubrificação Industrial, com monitoramento

pela equipe de Preditiva. Uma visão macro do cronograma foi definida e correlacionada aos eventos de manutenção, a fim de acompanhar e monitorar *online* a saúde do óleo e verificar os resultados logo após as intervenções programadas.

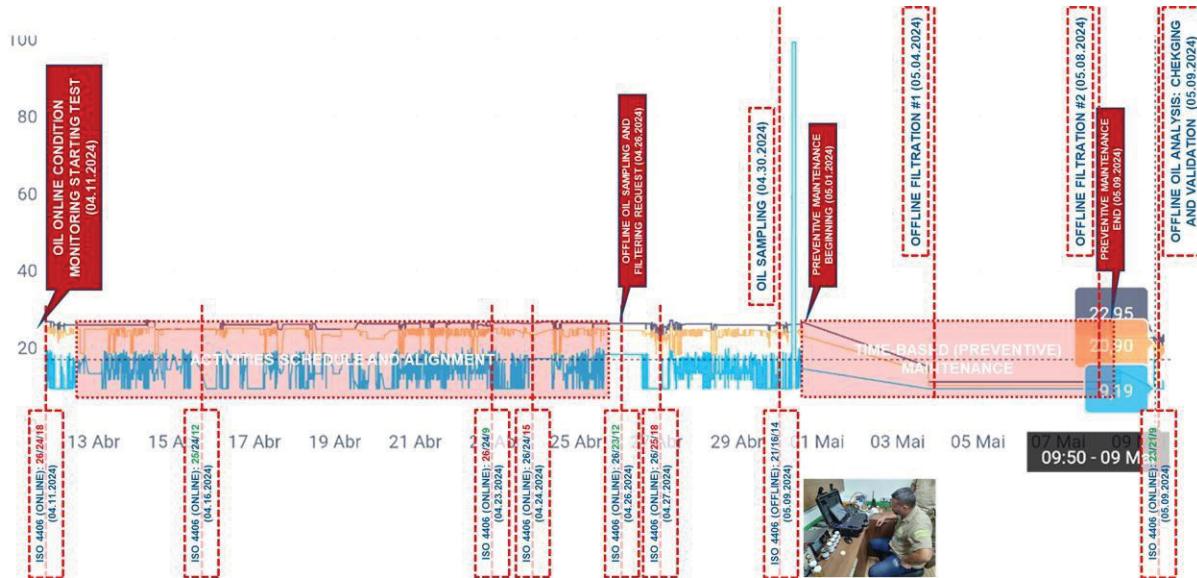


Figura 14. Caso n° 1: RRC-248-002, Visão Macro (até 09/05/2024).

Duas intervenções de filtragem de óleo foram programadas durante a manutenção preventiva para reduzir a contagem de partículas. Eram esperadas que as análises de óleo, tanto *online* como *offline*, apresentassem melhores condições de contaminação por partículas.

Após a filtragem de óleo, o equipamento retornou à operação e os níveis de partículas presentes foram novamente verificados. As amostras de óleo *offline* foram coletadas para análise, apresentando degradação significativa na coloração do óleo lubrificante por meio de testes visuais, mesmo após a filtragem. No monitoramento *online* de óleo, foram observadas clara queda sensível na contagem de partículas grandes tamanhos.

Contaminantes sólidos de menor tamanho, como 4 e 6 μm , permaneceram em níveis inaceitáveis e, portanto, mais intervenções de filtragem *offline* foram necessárias.

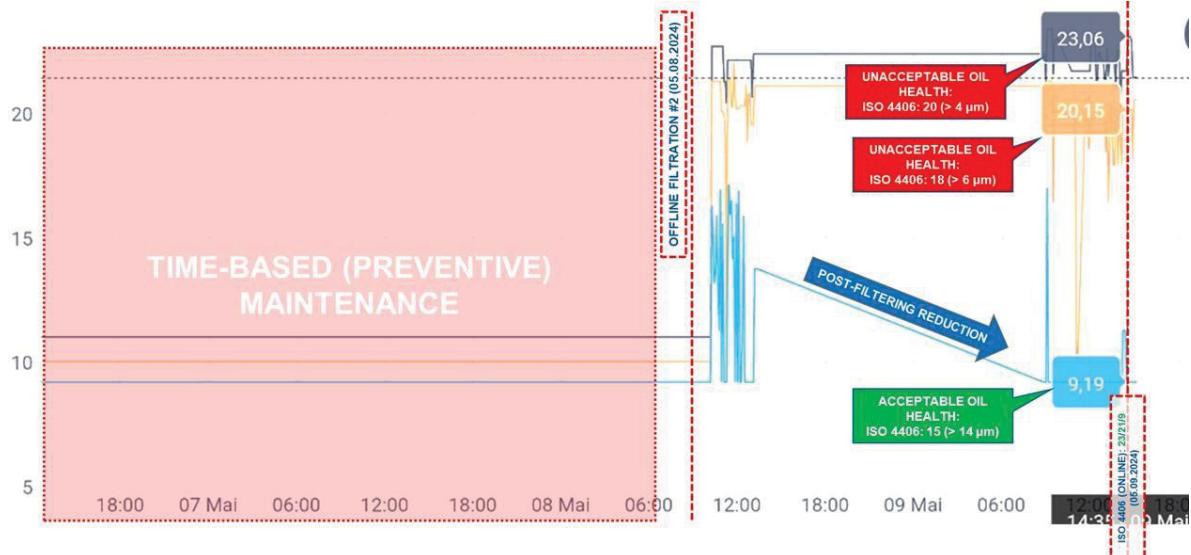


Figura 15. Caso n° 1: RRC-248-002, Visão Micro, Pós-Filtragem (até 09/05/2024).

Após uma nova rodada (terceira sessão de filtragem dupla de $7 \mu\text{m} @ \beta = 2.000$ de eficiência), durante um período de filtragem mais longo, foi observado que contaminantes sólidos de menor tamanho, como 4 e $6 \mu\text{m}$, reduzem no monitor de óleo para uma qualidade de óleo ideal e extremamente limpo para equipamentos de mineração: níveis de limpeza de $14/10/9$.

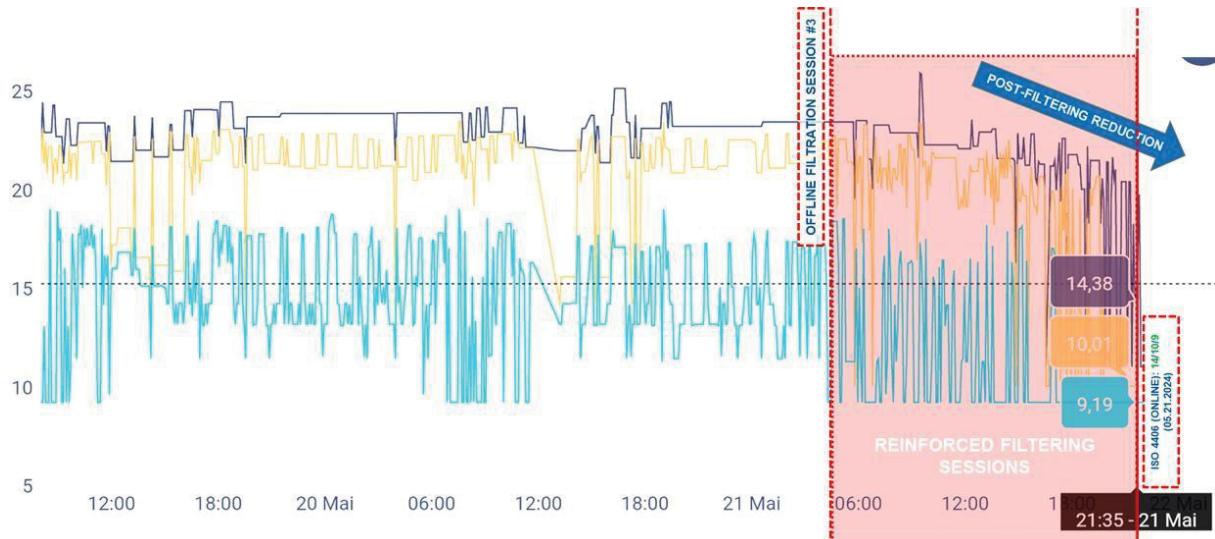


Figura 16. Caso n° 1: RRC-248-002, Visão Micro, Pós Sessão de Filtragem Reforçada n° 3 (até 21/05/2024).

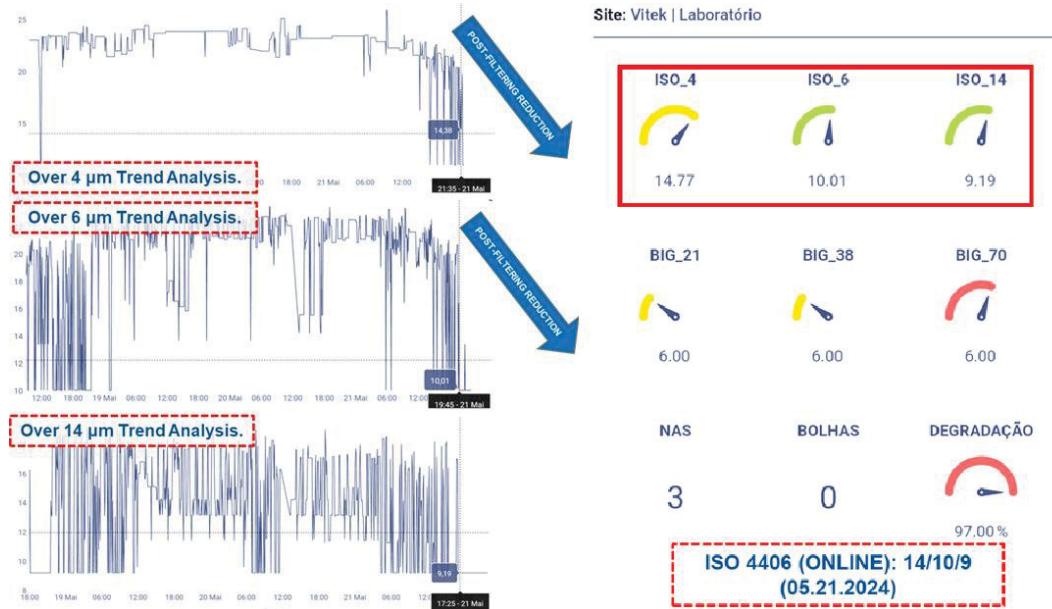


Figura 17. Caso n° 1: RRC-248-002, Visão Micro, Pós Sessão de Filtragem Reforçada n° 3 (até 21/05/2024).

No entanto, cinco dias após a remoção da unidade de filtragem *offline*, observou-se um novo aumento na contagem de detritos sólidos, possivelmente devido a desgaste interno e/ou contaminação externa. Uma nova (e quarta) sessão de filtragem foi necessária.

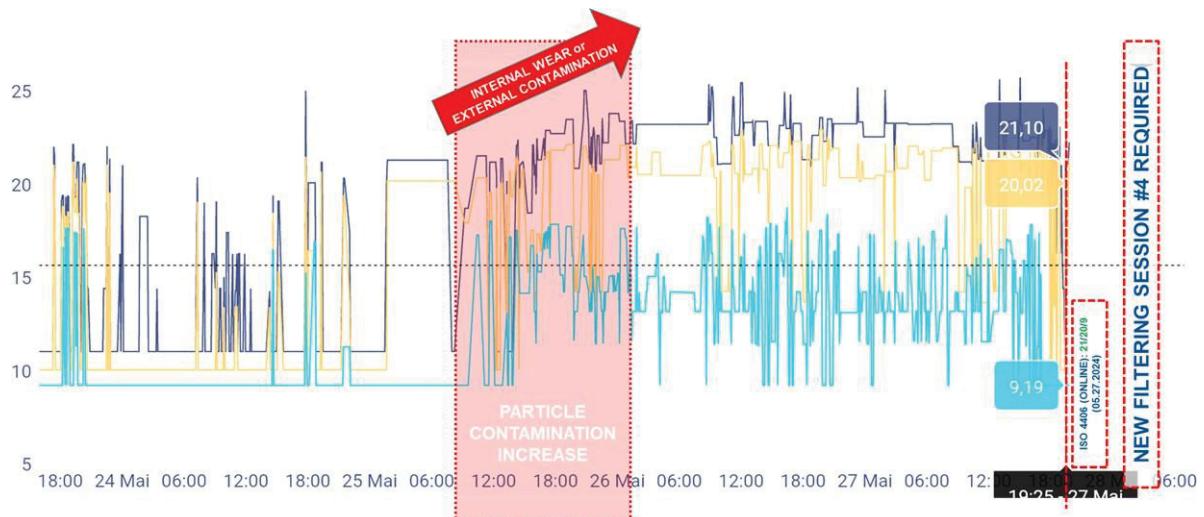


Figura 18. Caso n° 1: RRC-248-002, Visão Micro, Pós Sessão de Filtragem Reforçada n° 3 (até 27/05/2024).

A sessão final de filtragem foi realizada. O equipamento apresentou um resultado notável na qualidade do óleo em 18/15/9 na análise de valor geral de tendência. Além disso, do ponto de vista Preditivo, não haviam indícios de danos analisados por óleo e vibração. Do ponto de vista da Inspeção, também não, sem sinais relevantes de falha mecânica, como vazamento, aquecimento e vibração, e

ruídos anormais. O teste foi concluído (descomissionado e deslocado para o próximo equipamento crítico para monitoramento preditivo semelhante).

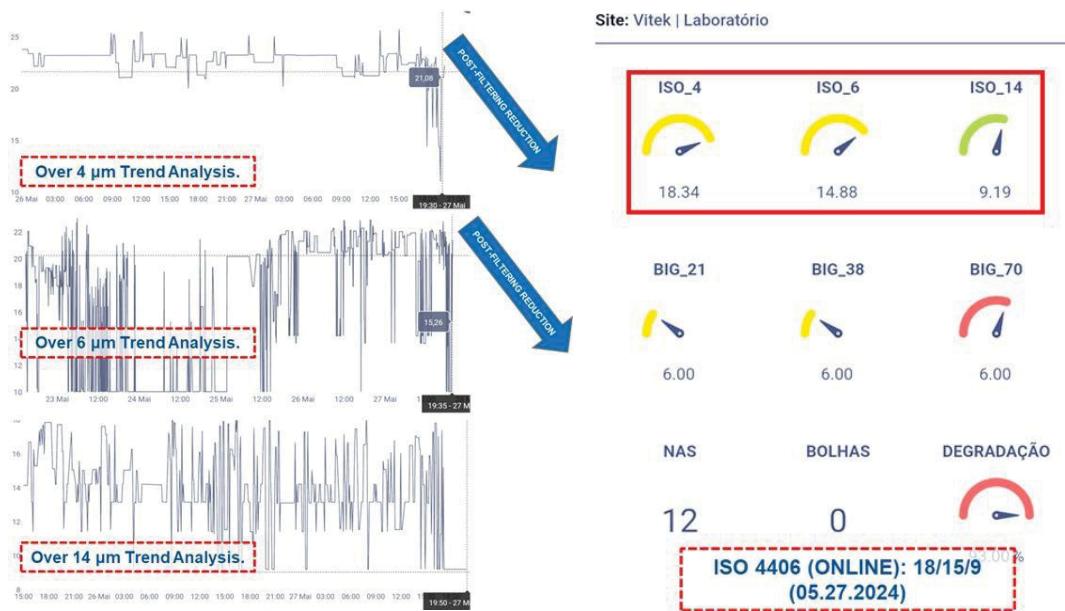


Figura 19. Caso n° 1: RRC-248-002, Pós Sessão de Filtragem Reforçada nº 4 (até 27/05/2024).

O nível de contaminação de óleo na norma ISO 4406, nas leituras finais de condição do óleo da caixa de engrenagens e a situação final em comparação com a meta de nível de limpeza do óleo, foram satisfatórios, conforme mostrado abaixo:

Particle size	Particle size per milliliter (ml)		ISO Scale	Particle size	ISO Scale
	Over:	Up to:			
> 4 μm	1.300	2.500	18 (- 96,9 %)	> 4 μm	Within the target
> 6 μm	160	320	15 (- 87,2 %)	> 6 μm	Within the target
> 14 μm	2,5	5	9 (- 98,4 %)	> 14 μm	Within the target

Tabela 4. Caso n° 1: RRC-248-002, Condição Final do Óleo.

➤ Caso n° 2: RRC-220-001, Acionamento da Roda de Caçambas (Redutor Planetário)

Em seguida, após as ações de desmontagem e descomissionamento hidráulico da RRC-248-002, o *hardware* de monitoramento *online* foi preparado para as ações de montagem, comissionamento e configuração hidráulica da RRC-220-001, datada de 07/04/2024. A Recuperadora de Minérios RRC-220-001 foi selecionada devido ao seu impacto na produção, em caso indisponibilidade física, e devido ao histórico preditivo e apontamentos de inspeção.

Alguns dos resultados obtidos foram:

- ❖ Últimos resultados de contagem de partículas *offline* até 07/12/2024, de acordo com a ISO 4406: 26/24/18 (ação necessária) – níveis iniciais de contagem de partículas de óleo semelhantes ao da RRC-248-002;
- ❖ Ações recomendadas: filtragem de partículas *offline*: programada para intervenção, troca do filtro de respiro dessecante (entrada de contaminantes no equipamento (permissão para contaminação externa) e verificação da apertos de conexões no *manifold* e da linha de pressão: vazamentos encontrados (permissão para contaminação externa)).

O nível de contaminação de óleo ISO 4406, nas leituras iniciais de condição do óleo da caixa de engrenagens e na situação de pré-filtragem em comparação com a meta de nível de limpeza do óleo.

Particle size	Particle size per milliliter (ml)		ISO Scale	Particle size	ISO Scale
	Over:	Up to:		> 4 µm	x 64 above: applicable oil report
> 4 µm	320.000	640.000	26 (+ 98,4 %)*	> 6 µm	x 61 above: applicable oil report
> 6 µm	80.000	160.000	24 (+ 98,4 %)*	> 14 µm	x 78 above: applicable oil report
> 14 µm	1.300	2.500	18 (+ 87,2 %)*		

Tabela 5. Caso n° 2: RRC-220-001, Condição da Qualidade do Óleo *Offline* Pré-Filtragem.

Observando as imagens a seguir, no lado esquerdo, o sistema de vedação da seção de alta velocidade da caixa de engrenagens ortogonal apresentava significante vazamento de óleo (inspeção visual em 14/03/2024), e no lado direito: sistema de vedação da seção de alta velocidade da caixa de engrenagens ortogonal ainda com vazamento excessivo de óleo (em comparação com a inspeção anterior), além de ruído anormal perceptível (inspeção visual e auditiva em 29/08/2024) - inspeção visual e inspeção interna eram necessárias.



Figura 20. Caso n° 2: RRC-220-001: Apontamentos de Inspeção Sensitiva *Offline*.

Observando o laudo de vibração no lado esquerdo, foi observado que, apesar de o laudo de vibração estar desatualizado (vencido e pendente), desde abril de 2021,

já diagnosticava desgaste da primeira engrenagem (GMF) do cubo de alta velocidade da caixa de engrenagens ortogonal, sendo necessária a verificação de componentes internos quanto a desgastes. No lado direito, partículas ferromagnéticas foram visíveis a olho nu na análise da amostra de óleo coletada.

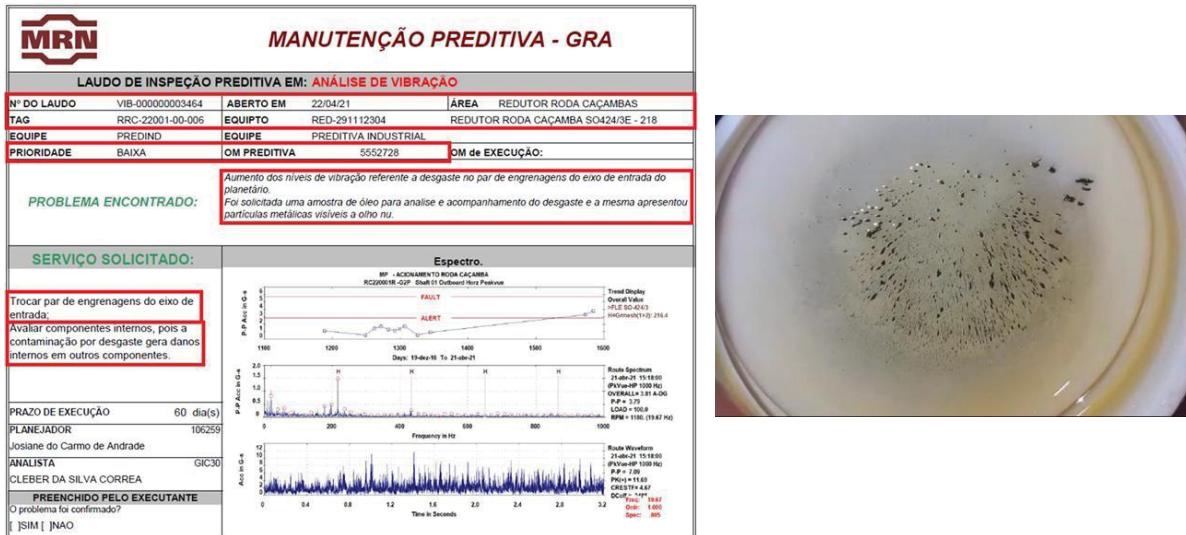


Figura 21. Caso n° 2: RRC-220-001: Laudo Preditivo e Apontamentos de Inspeção Sensitiva Offline.

Ao acompanhar as tendências *online* do óleo para contagem de partículas, e relacioná-las às ações de filtragem de óleo e correlacionar essas ações com outras técnicas preditivas e de inspeção, além do registro de erros do equipamento, foi observado que o comportamento do equipamento potencializou relevante possibilidade de desgaste interno. Esperava-se que a contagem de partículas decrescesse com as ações de filtragem, mas nenhum outro resultado além da estabilização ocorreu (comportamento suspeito). No total, foram aplicadas três sessões de filtragem, das quais a terceira filtragem *offline* de óleo levou cerca de três dias, sendo a sessão com maior duração.

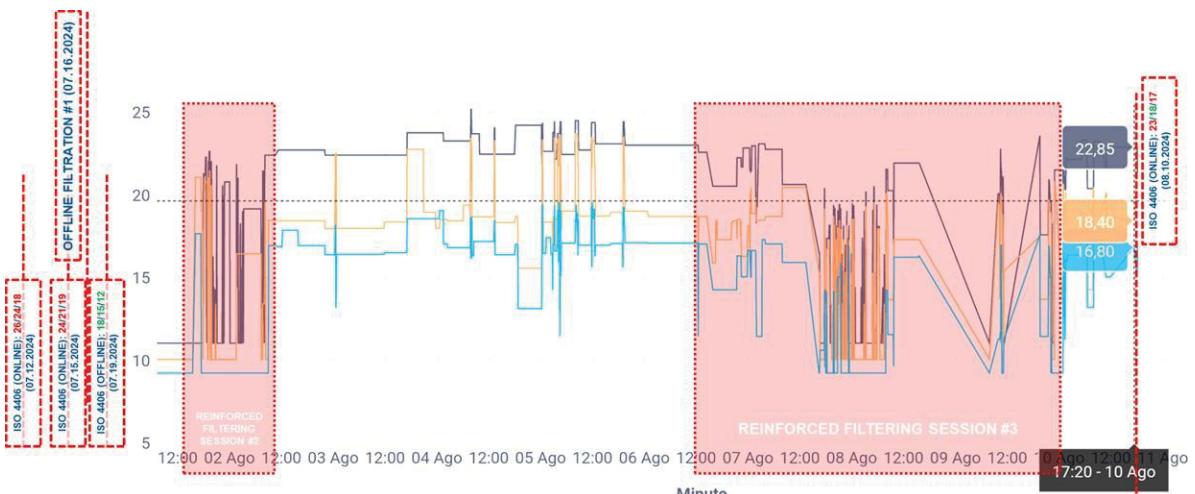


Figura 22. Caso n° 2: RRC-220-001: Visão Micro, Condição do Óleo (10/08/2024).

Nível de contaminação de óleo ISO 4406, no monitoramento das leituras de condição do óleo da caixa de engrenagens e situação de filtragem reforçada após a operação em comparação com a meta de nível de limpeza do óleo. A possibilidade de do equipamento sofrer manutenção corretiva por falha mecânica no eixo de alta foi previsto e relatado.

Particle size	Particle size per milliliter (ml)		ISO Scale	Particle size	ISO Scale
	Over:	Up to:			
> 4 µm	40.000	80.000	23 (+ 96,9 %)	> 4 µm	x 8 above: applicable oil report
> 6 µm	1.300	2.500	18 (+ 87,2 %)	> 6 µm	Marginal limit to apply oil report
> 14 µm	640	1.300	17 (+ 96,9 %)	> 14 µm	x 4 above: applicable oil report

Tabela 6. Caso n° 2: RRC-220-001, Condição Final do Óleo.

3 CONCLUSÃO

O monitoramento *online* de partículas de óleo é uma tecnologia notável e pode ser alinhada às estratégias de manutenção. Essa tecnologia já está no mercado há algum tempo, mas, de cinco anos para cá, tem se aproximado significativamente das necessidades adequadas para estratégias de manutenção: algumas limitações técnicas ainda estão presentes, como restrições aplicadas a óleos de motor (à combustão) usados (por exemplo, fuligem, líquido de arrefecimento, combustível usado, enxofre e verniz) e, em alguns casos, PAG (teor de glicol no óleo), mas tecnologias de processamento de imagem estão surgindo como substituição estratégica à tecnologia por contagem a laser.

Com o auxílio do monitoramento remoto otimizado das condições do óleo, foi possível identificar ações e resultados relevantes para cada caso, conforme mostrado nas conclusões detalhadas abaixo. É possível realizar ações e estratégias de lubrificação de óleo mais precisas, a fim de manter equipamentos críticos em condições confiáveis e possibilitar sobrevida para intervenções preventivas e/ou corretivas programadas, predizendo e garantindo a disponibilidade e o desempenho confiáveis dos equipamentos.

O teste para análise de óleo realizado e os resultados apresentaram a possibilidade de expansão do monitoramento *online* de óleo para equipamentos móveis de mineração (frota de lavra) e locomotivas, considerando a tecnologia atual. Portanto, análises completas e abrangentes de óleo *offline* em local (laboratório primarizado) e videoboroscópio são necessárias para validar adequadamente as ações e estratégias mostradas neste artigo, como técnicas associadas para uma melhor confiabilidade dos equipamentos na MRN.

➤ Conclusão do Caso nº 1

O monitoramento de condição de óleo *online* e *offline* para o Acionamento da Roda de Caçamba da RRC-248-002 pode expor a seguinte situação, com base na ISO 4406:2021:

- ❖ Condição de pré-filtragem: 26/24/19, óleo altamente contaminado por partículas;
- ❖ Ações de condição de pós-filtragem: 18/15/9, monitoramento da condição ideal do óleo associado à análise de vibração, inspeções sensitivas (visuais e auditivas) e instrumentadas;
- ❖ Comportamento instável admissível da condição do óleo da engrenagem.

O filtro industrial DONALDSON DBB8665 em linha apresenta eficiência de 7 μm @ $\beta = 2.000$ (processo de filtragem). Em um primeiro momento, foi observada filtragem significante e eficiente para partículas acima de 14 μm . Posteriormente, foi percebido que o referido tamanho de malha do filtro poderia ser aplicado para remover partículas menores, como de 4 e 6 μm , devido à restrição da malha e/ou saturação devido ao acúmulo de detritos.

Os resultados finais foram impressionantes: muito abaixo da meta da consultoria NORIA para caixas de engrenagens: 20/18/15. O equipamento performou de forma estável e sem nenhum anomalia e/ou irregularidades mecânicas até a conclusão deste artigo.

➤ **Conclusão do Caso nº 2**

O monitoramento de condição de óleo *online* e *offline* para o Acionamento da Roda de Caçamba da RRC-220-001 manteve-se estável mesmo com a aplicação de sessões de filtragem, com base na norma ISO 4406:2021:

- ❖ O comportamento do equipamento levanta suspeitas quanto ao desgaste interno e à degradação dos componentes internos;
- ❖ Em situações semelhantes, espera-se uma queda na contagem de partículas *online*, semelhante ao Caso nº 1;
- ❖ Comportamento instável e arriscado do óleo de engrenagem, quanto à sua saúde.

A inspeção sensitiva (visual e sonora) (vazamento e ruído no eixo de alta) associada às técnicas preditivas (análise de vibração e óleo) permite melhor compreensão dos riscos quanto a paradas mecânicas. O risco relacionado à relatada vibração em equipamentos operacionais é alto (mesmo que, na época da emissão do relatório de vibração, tenha sido classificado como baixo – 3 (três) anos antes, naquele momento, agravado).

O comportamento final e as conclusões foram preocupantes, e já haviam sido relatados no momento da análise. Paradas imprevistas (manutenção corretiva) devido à ocorrência mecânica de equipamentos na seção do eixo de alta (ortogonal) foram datadas de 19/09/2024.

REFERÊNCIAS

- [1] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). **NBR ISO 55001:2014 – Gestão de ativos - Visão geral, princípios e terminologia.** Rio de Janeiro: Copyright;
- [2] BSI – British Standards Institution. (2016). **PAS 55-1:2008 - Asset Management. Part 1: Specification for the optimized management of physical assets.** Copyright.
- [3] BSI – British Standards Institution. (2016). **PAS 55-1:2008 - Asset Management. Part 2: Guidelines for the application of PAS 55-1.** Copyright.
- [4] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1994). **NBR 5462:1994 – Confiabilidade e Mantenabilidade.** Rio de Janeiro: Copyright.
- [5] BSI – British Standards Institution. (2016). **ISO 14224:2016 – Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.** Copyright.
- [6] KARDEC, Alan, NASCIF, Júlio. **Manutenção Preditiva: Fator de Sucesso na Gestão Empresarial,** Qualitymark, 2013.
- [7] KARDEC, Alan, NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função estratégica.** 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2019.
- [8] NASCIF, Júlio, DORIGO, Luiz Carlos. **Manutenção: Orientada a Resultados.** 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- [9] TAVARES, Lourival. **Administração Moderna e Manutenção.** 1 edição. Rio de Janeiro: Novo Pólo. Qualitymark, 2000.
- [10] TAVARES, Lourival, CALIXTO, Marco, POYDO, Paulo Roberto. **Manutenção Centrada no Negócio.** 1 edição. Rio de Janeiro: Novo Pólo. Qualitymark, 2005.
- [11] MOUBRAY, John. **Reliability Centered Maintenance.** 2. ed. Industrial Press. Qualitymark, 1997.
- [12] SAE – British Standards Institution. **SAE JA1011 – Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes.** Copyright, 1999.
- [13] SAE – British Standards Institution. **SAE JA1012 – A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard.** Copyright, 2002.
- [14] GULATI, Ramesh. **Maintenance and Reliability Best Practices.** 3. ed. Industrial Press. Qualitymark, 2020.
- [15] ISO – International Organization for Standardization. **ISO 4406:2021: – Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles.** Copyright.
- [16] FITCH, James. **The Lubrication Field Test and Inspection Guide,** NORIA Corporation, 2000.
- [17] SCOTT, Robert; FITCH, Jim; LEUGNER, Lloyd. **The Practical Handbook of Machinery Lubrication,** NORIA Corporation, 4th Edition, 2012.
- [18] SOARES, Rodrigo Kenichi Sato; DE OLIVEIRA, Annelise Grottker. **Mining Planetary Gearboxes (Reclaimers): The Results of Online and Offline Condition Monitoring,** NORIA Reliable Plant 25th Edition, Reliable Plant 2025 Conference Proceedings, 2025.

- [19] SOARES, Rodrigo Kenichi Sato; DE OLIVEIRA, Annelise Grottker. **Internet das Coisas (IoT) Aplicada à Manutenção Baseada na Condição (CBM) em Áreas Remotas**, 38^a ABRAMAN (Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos), #0313, 2023.
- [20] SOARES, Rodrigo Kenichi Sato; CORREA, Cleber da Silva; DOS SANTOS, Dorival Gomes; MARINHO, Jadson Silva; VIANA, Socrates Marcelo de Araújo. **Visão Holística de Manutenção Industrial, Focada na Manutenção Preditiva**, 38^a ABRAMAN (Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos), #0344, 2023.
- [21] ISO – International Organization for Standardization. **ISO 15243:2017: – Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes**. Copyright.
- [22] Unboxing: Atten2 S120 Oil Wear 2.0 Online Particle Counter <<https://www.machinerylubrication.com/view/32076/unboxing-atten2-oil-wear-particle-counter>> Accessed by: 01.25.2024.
- [23] ATTEN[2] Reference Projects, VITEK Consultoria.
- [24] Extended [life-cycle] OilWear [SHAPE SERIES], Atten[2], ATTEN[2] Datasheet OWS120ENDS202410.
- [25] Extended [life-cycle] OilWear®, <<https://atten2.com/en/sensor/oilwear/>>, Atten[2].<<https://atten2.com/en/sensor/oilwear/>>. Accessed by: 05.10.2024.
- [26] S120 Digital Imaging Particle Counter, <<https://www.filtertechnik.co.uk/s120-digital-imaging-particle-counter>>, Filtertechnik, <https://atten2.com/en/sensor/oilwear/>. Accessed by: 06.10.2024.
- [27] OilWear 2.0 (S120-LCD) User Manual, Filtertechnik, V1.01, 2023.
- [28] OilCMS User Manual v4.0, ATTEN2.
- [29] OilCMS Pro On-Site Portable Series, VITEK Consultoria Datasheet, ATTEN[2] Datasheet PROCMSDS202212.