

MODELO REPLICÁVEL DE MANUTENÇÃO PREDITIVA BASEADO EM ANÁLISE DE FLUÍDOS PARA OPERAÇÕES DE APOIO MARÍTIMO OFFSHORE

REPLICABLE PREDICTIVE MAINTENANCE MODEL BASED ON FLUID
ANALYSIS FOR OFFSHORE MARITIME SUPPORT OPERATIONS

Engenharias • 28/08/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/787894557](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/787894557)

Alexsandro da Silva Carneiro Junior¹

Maria Iaponeide Fernandes Macêdo²

Silvana de Abreu Martins³

Marlene Jesus Soares Bezerra⁴

RESUMO

A manutenção preditiva em operações de apoio marítimo *offshore* exige não apenas técnicas diagnósticas confiáveis, mas também processos padronizados, rastreáveis e integrados à gestão dos ativos. Este artigo apresenta um estudo de caso aplicado sobre o desenvolvimento de um modelo processual replicável de manutenção preditiva em uma empresa brasileira de apoio marítimo offshore, tendo a análise de fluidos como técnica-base. O estudo foi conduzido por meio de pesquisa-ação entre abril de 2024 e fevereiro de 2026, com análise AS-IS/TO-BE, seis mapeamentos BPMN, observação participante e avaliação documental de procedimentos, laudos, registros operacionais e formulários internos. O diagnóstico inicial indicou ausência de responsabilidades formalizadas, baixa rastreabilidade, dependência de laudos laboratoriais externos e inexistência de validação técnica interna. Como resultado, foi proposto um modelo estruturado em quatro raias de responsabilidade-Embarcação, Planejamento, Manutenção Preditiva e Laboratório-integrado ao sistema TM Master, com validação técnica dos laudos, tratamento formal de anomalias, contraprova e verificação de eficácia. A estrutura foi posteriormente replicada para análise de vibração, termografia infravermelha e medição de isolamento elétrico. Os resultados indicam que oito elementos organizacionais permaneceram invariantes entre as técnicas, enquanto as adaptações se concentraram no conteúdo técnico-operacional de cada método. Embora o estudo não quantifique impactos sobre custo, disponibilidade ou redução de falhas, o modelo contribui para a governança da manutenção preditiva offshore e estabelece base processual para futura avaliação quantitativa de desempenho.

Palavras-chave: manutenção preditiva offshore; análise de fluidos; gestão de ativos; BPMN.

ABSTRACT

Predictive maintenance in offshore maritime support operations requires not only reliable diagnostic techniques but also standardized, traceable and asset-management-integrated processes. This paper presents an applied case study on the development of a replicable predictive maintenance process model in a Brazilian offshore maritime support company, using fluid analysis as the base technique. The study was conducted through an action-research approach between April 2024 and February 2026, supported by AS-IS/TO-BE analysis, six BPMN mappings, participant observation, and documentary analysis of procedures, laboratory reports, operational records and internal validation forms. The initial diagnosis revealed the absence of formalized responsibilities, low traceability, dependence on external laboratory reports and lack of internal technical validation. As a result, a redesigned model was structured into four responsibility swimlanes-Vessel, Planning, Predictive Maintenance and Laboratory-integrated with the TM Master maintenance management system, including technical validation of reports, formal anomaly treatment, confirmatory sampling and efficacy verification. The structure was subsequently replicated for vibration analysis, infrared thermography and electrical insulation measurement. The findings indicate that eight organizational elements remained invariant across the techniques, while adaptations were concentrated in the technical-operational content of each method. Although the study does not quantify impacts on cost, availability or failure reduction, the model contributes to the governance of offshore predictive maintenance and establishes a process foundation for future quantitative performance assessment.

Keywords: offshore predictive maintenance; fluid analysis; asset management; BPMN.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de ativos é um fator crítico para operações de apoio marítimo *offshore*, nas quais embarcações, sistemas de propulsão, geração de energia, equipamentos hidráulicos e sistemas elétricos operam sob condições ambientais severas e restrições logísticas significativas. Nesse contexto, falhas funcionais podem comprometer a continuidade operacional, aumentar custos, reduzir a segurança e afetar compromissos contratuais. A manutenção preditiva, fundamentada na avaliação da condição real dos equipamentos, tornou-se uma estratégia relevante para antecipar desvios e apoiar decisões de intervenção antes da falha funcional (KARDEC; NASCIF, 2013; MOBLEY, 2002; ISO 55000: 2024).

Entretanto, a adoção de técnicas preditivas não garante, por si só, melhoria na gestão da manutenção. Em ambientes *offshore*, a distância entre bordo e terra, a rotatividade das equipes embarcadas, a diversidade de equipamentos, a dependência de laboratórios externos e a necessidade de rastrear amostras, laudos e decisões tornam a governança do processo tão importante quanto a tecnologia diagnóstica utilizada. Sem fluxo padronizado, responsabilidades claras e integração ao sistema de manutenção, resultados preditivos podem permanecer como documentos arquivados, sem transformação efetiva em ações controladas (KALAFATELIS ET AL., 2025; SHA ET AL., 2025).

A análise de fluidos é uma das técnicas mais abrangentes nesse contexto, pois permite avaliar óleos lubrificantes, óleos hidráulicos, combustíveis e líquidos de arrefecimento, fornecendo evidências sobre degradação do fluido, contaminação e desgaste de componentes. Por envolver coleta, identificação, transporte, análise

laboratorial, interpretação técnica, comunicação, ação corretiva e verificação de eficácia, essa técnica apresenta complexidade processual elevada e pode servir como base para estruturar programas preditivos integrados (ASTM INTERNATIONAL, 2023; INTERNATIONAL COUNCIL FOR MACHINERY LUBRICATION, 2019; VANI; SHARMA; SATYAKAM, 2021).

O problema que motivou este estudo foi identificado em uma empresa brasileira de apoio marítimo *offshore*, na qual o processo anterior de análise de fluidos apresentava baixa formalização, dependência de um único responsável, ausência de rastreabilidade adequada, pouca integração ao sistema de gestão da manutenção e inexistência de um mecanismo interno documentado de validação técnica dos laudos. A partir desse diagnóstico, foi desenvolvido um modelo *TO-BE* baseado em BPMN, com quatro raias de responsabilidade, integração ao *TM Master*, validação técnica interna, contraprova e verificação de eficácia.

A lacuna abordada pelo artigo reside no fato de que a literatura de manutenção preditiva discute amplamente técnicas como análise de fluidos, vibração, termografia e monitoramento elétrico, mas ainda há espaço para estudos que expliquem como estruturar processualmente essas técnicas em operações *offshore*, garantindo rastreabilidade, padronização, replicabilidade e governança.

Essa lacuna é coerente com revisões recentes que destacam a necessidade de integrar técnicas diagnósticas, critérios de seleção de métodos, digitalização e processos organizacionais de decisão (BENHANIFIA *ET AL.*, 2025; GARCIA *ET AL.*, 2025; TIDDENS; BRAAKSMA; TINGA, 2023). Dessa forma, o objetivo deste artigo é apresentar um modelo processual replicável de manutenção

preditiva *offshore*, desenvolvido a partir da análise de fluidos e adaptado a outras técnicas preditivas utilizadas na frota.

A contribuição original do estudo está na separação entre estrutura de processo e conteúdo técnico. O modelo demonstra que diferentes técnicas preditivas podem compartilhar uma mesma arquitetura organizacional-com responsáveis, registros, análise técnica, tratamento de anomalias, ação corretiva e verificação de eficácia-ainda que cada uma mantenha requisitos técnicos específicos.

2. METODOLOGIA

2.1. Manutenção Preditiva e Manutenção Baseada em Condição em Operações Offshore

A manutenção preditiva está associada à capacidade de acompanhar a condição dos ativos e identificar sinais de degradação antes da ocorrência de falhas funcionais. Essa lógica se aproxima da manutenção baseada em condição (Condition-Based Maintenance-CBM), na qual decisões de intervenção são orientadas por dados obtidos por monitoramento periódico ou contínuo (17359:2018; MOBLEY, 2002). Em ambientes *offshore*, a CBM é particularmente relevante porque a indisponibilidade de equipamentos críticos pode gerar impactos operacionais ampliados pela distância de recursos de apoio, pelas janelas logísticas restritas e pela exigência de continuidade das operações (KALAFATELIS ET AL., 2025).

O conceito de intervalo P-F auxilia a compreender a contribuição das técnicas preditivas. A falha potencial corresponde ao ponto em que a degradação se torna detectável, enquanto a falha funcional representa a perda da função requerida. Técnicas distintas atuam

em momentos diferentes intervalose a análise de fluidos pode detectar alterações químicas e presença de contaminantes em fases iniciais; a vibração identifica alterações dinâmicas em equipamentos rotativos; a termografia evidencia anomalias térmicas; e a medição de isolamento elétrico permite avaliar a degradação dielétrica de motores, cabos e equipamentos elétricos (ISO 20958:2018; TIDDENS; BRAAKSMA; TINGA, 2023).

A literatura de confiabilidade e gestão de ativos mostra que a efetividade da manutenção preditiva não depende apenas da aquisição de sensores, contratação de laboratório ou emissão de relatórios. Ela depende de processos que transformem dados em decisões e de sistemas de gestão capazes de converter informação técnica em valor para os ativos (ISO 55001:2024; BENHANIFIA *ET AL.*, 2025). Assim, a manutenção preditiva *offshore* deve ser compreendida como um sistema sociotécnico: envolve tecnologia diagnóstica, pessoas qualificadas, regras de decisão, histórico de ativos, integração entre áreas e capacidade de retroalimentação.

2.2. Análise de Fluidos Como Técnica-Base do Modelo Preditivo

A análise de fluidos avalia a condição de óleos lubrificantes, óleos hidráulicos, combustíveis e líquidos de arrefecimento em serviço, permitindo inferir o estado interno de sistemas mecânicos e hidráulicos sem desmontagem. Parâmetros como viscosidade, índice de viscosidade, espectrometria por ICP, teor de água, TAN, TBN, contagem de partículas e FT-IR fornecem informações complementares sobre degradação, contaminação, oxidação, perda de aditivação e desgaste anormal (ASTM INTERNATIONAL, 2023; VANI; SHARMA; SATYAKAM, 2021).

A interpretação técnica desses parâmetros não deve se limitar à comparação com limites absolutos. Em programas preditivos maduros, a análise por tendência é essencial, pois a evolução longitudinal de um parâmetro pode revelar degradações antes que um valor ultrapasse limites críticos, especialmente quando associada a boas práticas de lubrificação e gestão de ativos lubrificados (ASTM INTERNATIONAL, 2023; INTERNATIONAL COUNCIL FOR MACHINERY LUBRICATION, 2019). Em operações *offshore*, essa lógica é reforçada pela diversidade de regimes de carga, rotas, equipamentos e condições ambientais às quais as embarcações estão submetidas.

A cadeia de custódia é outro aspecto crítico. A confiabilidade do laudo depende da representatividade da amostra, do ponto de coleta, da identificação correta, do acondicionamento, do transporte e da associação do resultado ao ativo correto. Procedimentos de amostragem manual de petróleo e derivados, como os descritos pela ASTM D4057, reforçam a importância da padronização da coleta e da identificação da amostra (ASTM INTERNATIONAL, 2022). Falhas nesse fluxo podem gerar diagnósticos equivocados e comprometer decisões de manutenção. Por isso, a análise de fluidos oferece uma base adequada para o desenvolvimento de um modelo processual, pois exige coordenação entre bordo, planejamento, laboratório e manutenção preditiva.

2.3. Técnicas Complementares de Manutenção Preditiva

A análise de vibração é amplamente utilizada em equipamentos rotativos, como motores, geradores, redutores, bombas, rolamentos e acoplamentos. Alterações em deslocamento, velocidade e aceleração podem indicar desbalanceamento, desalinhamento,

folgas, desgaste em rolamentos e defeitos em engrenagens (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004; TIBONI *ET AL.*, 2022). A avaliação de severidade vibratória em máquinas industriais também pode ser apoiada por critérios normativos, como a ISO 20816-3:2022) Em equipamentos críticos, sistemas de monitoramento *online* permitem maior frequência de observação, mas os alertas ainda exigem validação técnica antes de se converterem em ações de manutenção.

A termografia infravermelha, por sua vez, permite identificar anomalias térmicas em sistemas elétricos e mecânicos sem contato físico. Conexões frouxas, sobrecargas, deficiência de lubrificação, atrito excessivo e problemas em trocadores de calor podem manifestar padrões térmicos anormais, desde que a inspeção siga critérios de emissividade, distância, condição operacional e interpretação comparativa (BAGAVATHIAPPAN *ET AL.*, 2013; ISO 18434-1:2008). Já a medição de isolamento elétrico, conhecida como megagem, avalia a integridade dielétrica de motores, cabos e componentes elétricos, sendo relevante em ambientes *offshore* sujeitos a umidade, névoa salina, vibração e variações térmicas (IEEE, 2013; GARCIA *ET AL.*, 2025).

Essas técnicas são complementares e não substitutivas. Cada uma observa manifestações diferentes da degradação. Por isso, a contribuição de um programa preditivo integrado depende da capacidade de organizar informações heterogêneas em um fluxo comum de registro, análise, tomada de decisão e verificação de eficácia. A seleção de técnicas de manutenção preditiva deve considerar criticidade, mecanismo de falha, disponibilidade de dados e maturidade organizacional (TIDDENS; BRAAKSMA; TINGA,

2023). Essa integração é precisamente o ponto em que a gestão por processos se torna relevante para a manutenção.

2.4. BPM, BPMN e Gestão por Processos na Manutenção

O Business Process Management (BPM) oferece princípios para modelar, analisar, redesenhar, monitorar e melhorar processos organizacionais. Ao deslocar o foco de departamentos isolados para fluxos ponta a ponta, o BPM permite identificar lacunas de responsabilidade, perdas de informação, atrasos e pontos de controle insuficientes (AALST, 2013; DUMAS *ET AL.*, 2018; REIJERS, 2021). Em manutenção preditiva, essa abordagem é especialmente útil porque o resultado técnico depende da articulação entre diferentes atores e registros.

A notação BPMN permite representar processos de forma visual, com eventos, atividades, decisões, fluxos e raias de responsabilidade. A análise AS-IS descreve a condição atual do processo, enquanto o modelo TO-BE representa o fluxo REDESENHADO (OBJECT MANAGEMENT GROUP, 2011; ABPMP, 2019). No caso da manutenção preditiva *offshore*, essa modelagem facilita a comunicação entre bordo, planejamento, manutenção preditiva e laboratório, além de permitir que o processo deixe de depender exclusivamente de conhecimento individual.

Padronização e rastreabilidade são componentes centrais dessa abordagem. A padronização define como a atividade deve ser executada; a rastreabilidade permite reconstruir o caminho da amostra, do laudo, da decisão e da ação corretiva. Ambas são necessárias para consolidar histórico técnico, acompanhar indicadores, treinar equipes, auditar decisões e criar base para

digitalização futura, dashboards e algoritmos de apoio à decisão (ABPMP, 2019; ROSEMAN; VOM BROCKE, 2015).

2.5. Estudo de Caso

A pesquisa foi conduzida como estudo de caso aplicado, com abordagem qualitativa, descritiva, analítica e propositiva. O método adotado aproxima-se da pesquisa-ação, pois o pesquisador participou do processo de diagnóstico, redesenho, formalização e acompanhamento da solução implantada (THIOLLENT, 2011; TRIPP, 2005). O enquadramento como estudo de caso é adequado porque o fenômeno foi analisado em profundidade em seu contexto real de aplicação (YIN, 2015). O período analisado compreendeu a evolução do processo entre abril de 2024 e fevereiro de 2026, considerando também a condição inicial observada em 2023.

O contexto empírico foi uma empresa brasileira de apoio marítimo *offshore*, cuja frota utiliza diferentes sistemas monitoráveis por técnicas preditivas, incluindo motores de propulsão, geradores, sistemas hidráulicos, equipamentos rotativos, painéis elétricos, cabos e motores elétricos. Por razões de confidencialidade, informações sensíveis da empresa, dos ativos e da frota não são detalhadas. A análise concentra-se na arquitetura processual desenvolvida e em sua lógica de replicação.

As fontes de evidência incluíram procedimentos internos, laudos de análise de fluidos, registros de manutenção, formulários internos de validação técnica, fluxos BPMN, registros do sistema TM Master, observação participante e reuniões técnicas. O uso de múltiplas fontes é compatível com a lógica de triangulação em estudos de caso e pesquisa-ação (THIOLLENT, 2011; YIN, 2015). O processo foi

analisado inicialmente em sua condição AS-IS, caracterizada por baixa formalização e dependência de laudos externos sem validação interna estruturada. Em seguida, o fluxo foi redesenhado progressivamente até a configuração TO-BE.

O desenvolvimento do modelo ocorreu em etapas: diagnóstico do processo anterior; identificação de falhas de rastreabilidade e responsabilidades; redesenho progressivo por seis mapeamentos BPMN; estruturação de quatro raias de responsabilidade; criação de formulário de validação técnica; integração com o TM Master; definição de tratamento de anomalias; introdução de contraprova e verificação de eficácia; e replicação do modelo para análise de vibração, termografia infravermelha e medição de isolamento elétrico.

A análise comparativa considerou atores envolvidos, entradas e saídas do processo, pontos de controle, registros formais, critérios técnicos, fluxo de tratamento de anomalias, necessidade de contraprova, integração com o sistema de manutenção e verificação de eficácia. O objetivo foi distinguir os elementos invariantes da arquitetura organizacional daqueles que variam conforme o conteúdo técnico de cada técnica preditiva.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Diagnóstico do Processo AS-IS

O diagnóstico do processo anterior evidenciou um fluxo de análise de fluidos pouco formalizado. A atividade era baseada predominantemente na solicitação de coleta, recebimento de laudos laboratoriais e arquivamento de documentos, com forte dependência de um responsável principal. Essa configuração

dificultava a rastreabilidade das amostras, a distribuição de responsabilidades, a análise crítica dos resultados e a transformação do laudo em ação de manutenção rastreável.

As principais fragilidades identificadas foram: ausência de responsabilidades formalizadas; ausência de validação técnica interna dos laudos; baixa integração com o sistema de gestão da manutenção; dificuldade de acompanhar a eficácia das ações recomendadas; risco de análise isolada de laudos; e limitação na preservação do histórico técnico por equipamento e ponto de coleta. Em ambiente *offshore*, essas fragilidades são relevantes porque a decisão de manutenção depende da conexão entre bordo, planejamento, laboratório e especialistas em manutenção preditiva.

3.2. Desenvolvimento do Modelo TO-BE

O modelo redesenhado foi estruturado em quatro raias de responsabilidade: Embarcação, Planejamento, Manutenção Preditiva e Laboratório. A raia da Embarcação contempla atividades de coleta, identificação e envio de amostras ou informações de campo. A área de Planejamento atua como elo de programação, controle e articulação operacional. A Manutenção Preditiva assume a coordenação técnica do fluxo, a validação dos laudos e o encaminhamento das anomalias. O Laboratório executa as análises e emite os resultados técnicos. A organização do processo por raias e pontos de decisão é coerente com a lógica de BPMN e de gestão por processos, (OBJECT MANAGEMENT GROUP, 2011; DUMAS *ET AL.*, 2018).

A integração com o TM Master tornou-se um elemento central de rastreabilidade. Ao vincular laudos, pareceres, anomalias, ações

corretivas e contraprovas ao sistema de manutenção, o processo passou a criar histórico consultável e auditável. O formulário interno de validação técnica, também introduziu uma camada de análise que não existia no fluxo anterior, permitindo considerar histórico do ativo, tendência das últimas coletas, criticidade, condição operacional e reincidência da anomalia antes da definição do encaminhamento. Essa lógica é compatível com princípios de gestão de ativos e de programas estruturados de lubrificação e monitoramento (ISO 55001:2024; INTERNATIONAL COUNCIL FOR MACHINERY LUBRICATION, 2019).

O fluxo TO-BE também incorporou decisão formal sobre a existência de anomalia, abertura de ação de manutenção quando aplicável, execução de intervenção, contraprova e verificação de eficácia. Assim, o modelo deixou de tratar o laudo como fim do processo e passou a tratá-lo como entrada para um ciclo de decisão, ação e retroalimentação. O Quadro 1 sintetiza os principais componentes do modelo TO-BE e suas funções no processo redesenhado.

Quadro 1. Componentes do modelo TO-BE e funções no processo redesenhado.

Componente do modelo	Função no processo redesenhado
Quatro raias de responsabilidade	Distribuir claramente as atividades entre Embarcação, Planejamento, Manutenção Preditiva e Laboratório.
Validação técnica interna	Interpretar laudos à luz do histórico, criticidade, tendência, reincidência e contexto operacional.
TM Master	Registrar anomalias, ações e acompanhamento, criando histórico rastreável.

Contraprova	Confirmar a eficácia da intervenção ou a persistência do desvio quando aplicável.
Verificação de eficácia	Fechar o ciclo de manutenção preditiva e retroalimentar o processo.
BPMN	Formalizar o fluxo, as responsabilidades, os pontos de decisão e a comunicação entre áreas.

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3. Replicação para Outras Técnicas Preditivas

Após a consolidação do processo de análise de fluidos, a lógica do modelo foi aplicada à análise de vibração, à termografia infravermelha e à medição de isolamento elétrico. Em cada caso, os elementos técnicos específicos foram ajustados, mas a estrutura organizacional permaneceu preservada. Na análise de vibração, por exemplo, o conteúdo técnico envolve grandezas vibratórias, severidade, espectros, tendências e, em alguns ativos, monitoramento *online* (ISO, 2022; SCHEFFER; GIRDHAR, 2004; TIBONI *ET AL.*, 2022). Na termografia, a análise se concentra em padrões térmicos e classificação de anomalias (BAGAVATHIAPPAN *ET AL.*, 2013; ISO, 2008). Na megagem, os parâmetros envolvem resistência de isolamento, índice de polarização e índice de absorção dielétrica (IEEE, 2013).

A replicação demonstrou que a diversidade técnica não impede a padronização processual. O que se manteve constante foi a lógica de execução, registro, análise técnica, tratamento de anomalia, ação corretiva e verificação de eficácia. Essa separação entre arquitetura invariante e conteúdo técnico variável é a principal evidência da replicabilidade do modelo. O Quadro 2 sistematiza os elementos

invariantes do modelo e as principais variações técnicas esperadas entre os métodos preditivos analisados.

Quadro 2. Elementos invariantes do modelo replicável e variações técnicas esperadas.

Elemento	Condição no modelo replicável	Variação técnica esperada
Técnica preditiva	Presente em todos os procedimentos.	Fluidos, vibração, termografia ou megagem.
Agente executor	Há sempre um responsável pela coleta, medição ou inspeção.	Bordo, laboratório, analista, plataforma online ou inspetor especializado.
Periodicidade	O processo depende de agenda ou condição de monitoramento.	Intervalos variam conforme criticidade, técnica e ativo.
Registro formal	Todos os resultados devem gerar registro rastreável.	Laudo laboratorial, relatório, termograma, medição elétrica ou alerta online.
Análise técnica	Há validação por profissional responsável.	Critérios variam conforme norma, histórico e método.
Tratamento de anomalias	Anomalias seguem fluxo formal de decisão.	Grau de urgência e tipo de intervenção variam.
Ação corretiva	Ação vinculada ao sistema de manutenção.	Pode envolver limpeza, troca, ajuste, reparo, reinspeção ou planejamento de docagem.
Verificação de eficácia	O ciclo é concluído com nova evidência técnica.	Contraprova, nova coleta, nova medição ou confirmação operacional.

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.4. Indicadores de Acompanhamento do Processo

O artigo menciona dois indicadores especialmente relevantes para o acompanhamento do processo: *aging* e quebra de ciclo. O *aging* corresponde ao tempo decorrido entre a emissão do laudo pelo laboratório e a emissão do parecer técnico pela manutenção preditiva. A quebra de ciclo corresponde à não realização de coletas ou inspeções dentro da periodicidade prevista.

Esses indicadores são úteis porque medem a fluidez e a disciplina do processo, em consonância com a lógica de monitoramento de processos defendida pelo BPM (ABPMP, 2019; REIJERS, 2021), porém, o estudo não apresenta valores consolidados antes/depois que permitam afirmar redução estatística de falhas, custos ou indisponibilidade. O Quadro 3 organiza os indicadores de acompanhamento já mencionados e aqueles recomendados para mensuração futura.

Quadro 3. Indicadores de acompanhamento do processo e oportunidades de mensuração futura.

Indicador	Definição operacional	Uso no artigo
Aging do laudo	Tempo entre emissão do laudo e parecer técnico interno.	Indicador de resposta técnica e governança do processo.
Quebra de ciclo	Coleta ou inspeção não realizada dentro da periodicidade prevista.	Indicador de aderência ao plano preditivo.
Contraprovas realizadas	Número ou percentual de anomalias com nova coleta/medição após intervenção.	Indicador futuro de fechamento do ciclo.

Reincidência de anomalias	Retorno do mesmo desvio após ação corretiva.	Indicador futuro de eficácia das ações.
Tempo até abertura de ação	Tempo entre identificação da anomalia e abertura de ação no sistema.	Indicador futuro de tempo de resposta.
Disponibilidade , custo e falhas	Métricas operacionais de desempenho da frota.	Não medidos no estudo; recomendados para pesquisas futuras.

Fonte: Elaborado pelos autores.

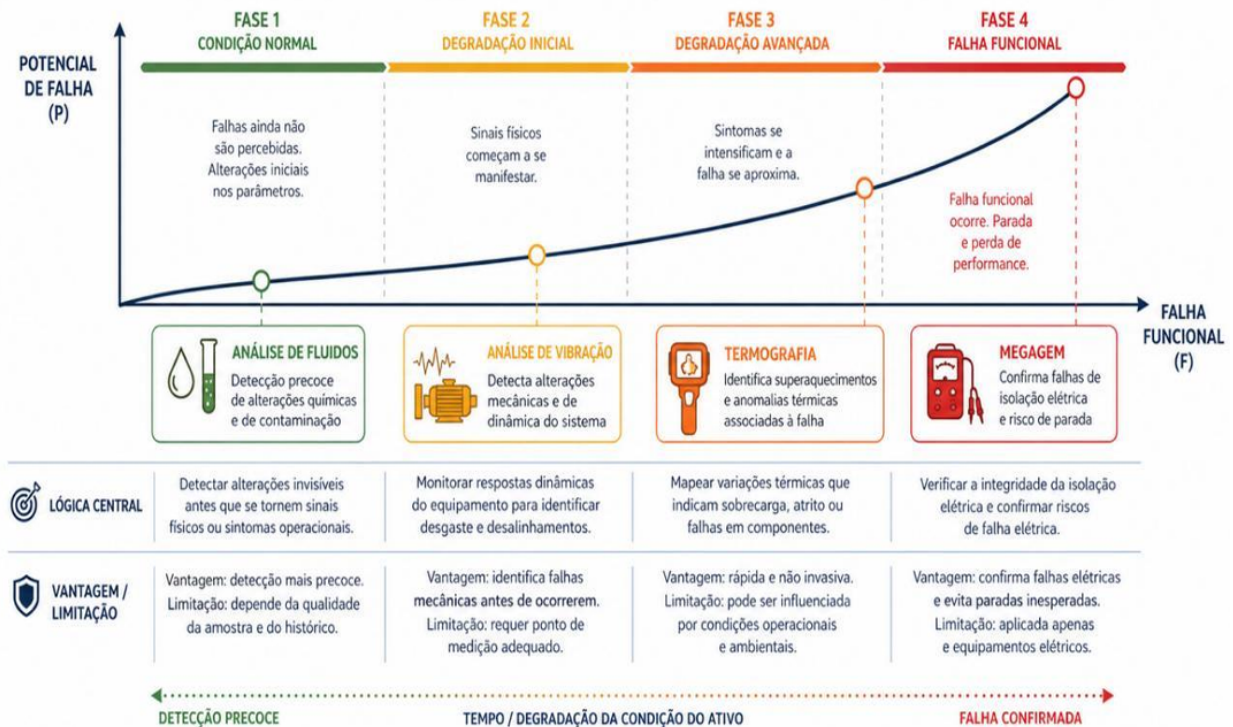
3.5. Desenvolvimento do Modelo Processual Replicável

Nesta subseção, apresentam-se as figuras que demonstram o desenvolvimento do modelo processual replicável. A Figura 1 sintetiza o posicionamento das técnicas preditivas ao longo da curva P-F, permitindo visualizar a complementaridade entre análise de fluidos, vibração, termografia e megagem.

Figura 1. Posicionamento das técnicas preditivas ao longo da curva P-F.

CURVA P-F (POTENCIAL DE FALHA × FALHA FUNCIONAL)

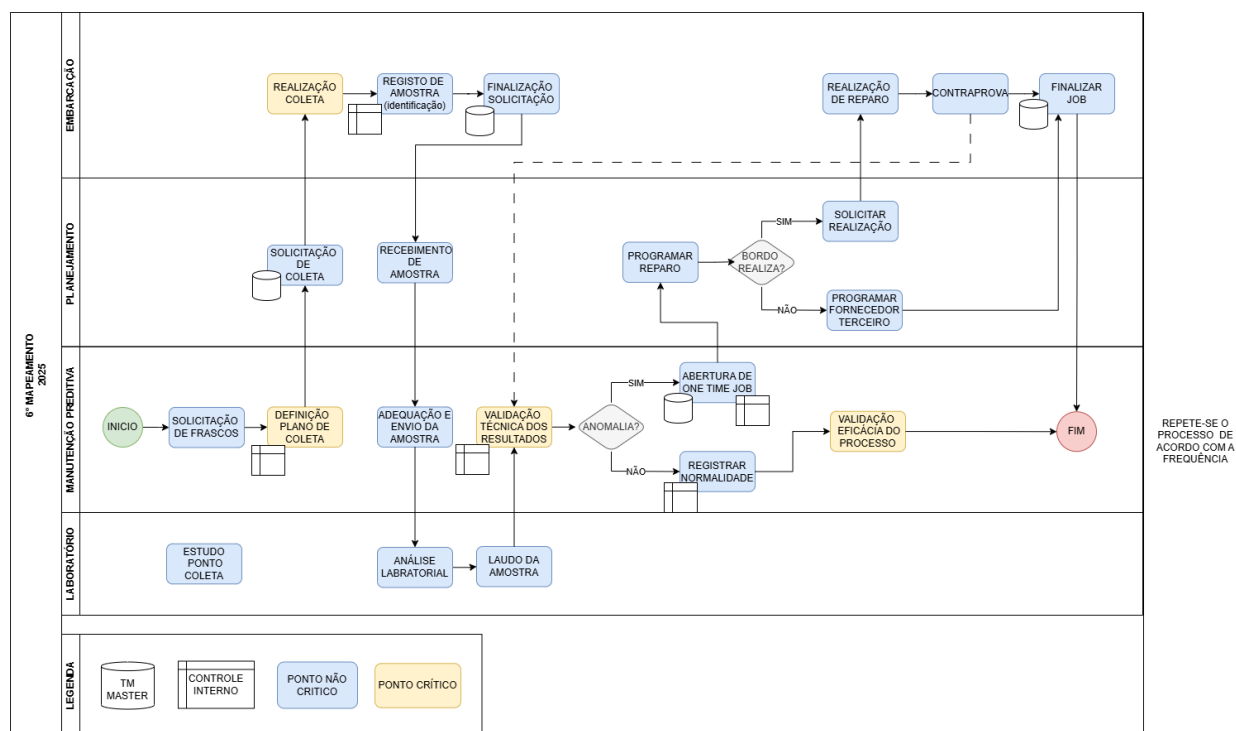
Posicionamento das técnicas de manutenção ao longo da degradação da condição do ativo



Fonte: Adaptado de ISO 17359: 2018

A Figura 2 apresenta o fluxo TO-BE consolidado do processo de análise de fluidos, evidenciando as quatro raias de responsabilidade, os pontos de decisão e a integração com o sistema de manutenção.

Figura 2. Fluxo TO-BE consolidado do processo de análise de fluidos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 3 ilustra o formulário interno de validação técnica, utilizado para transformar o laudo laboratorial em parecer técnico contextualizado e rastreável.

Figura 3. Formulário interno de validação técnica dos laudos de manutenção preditiva.

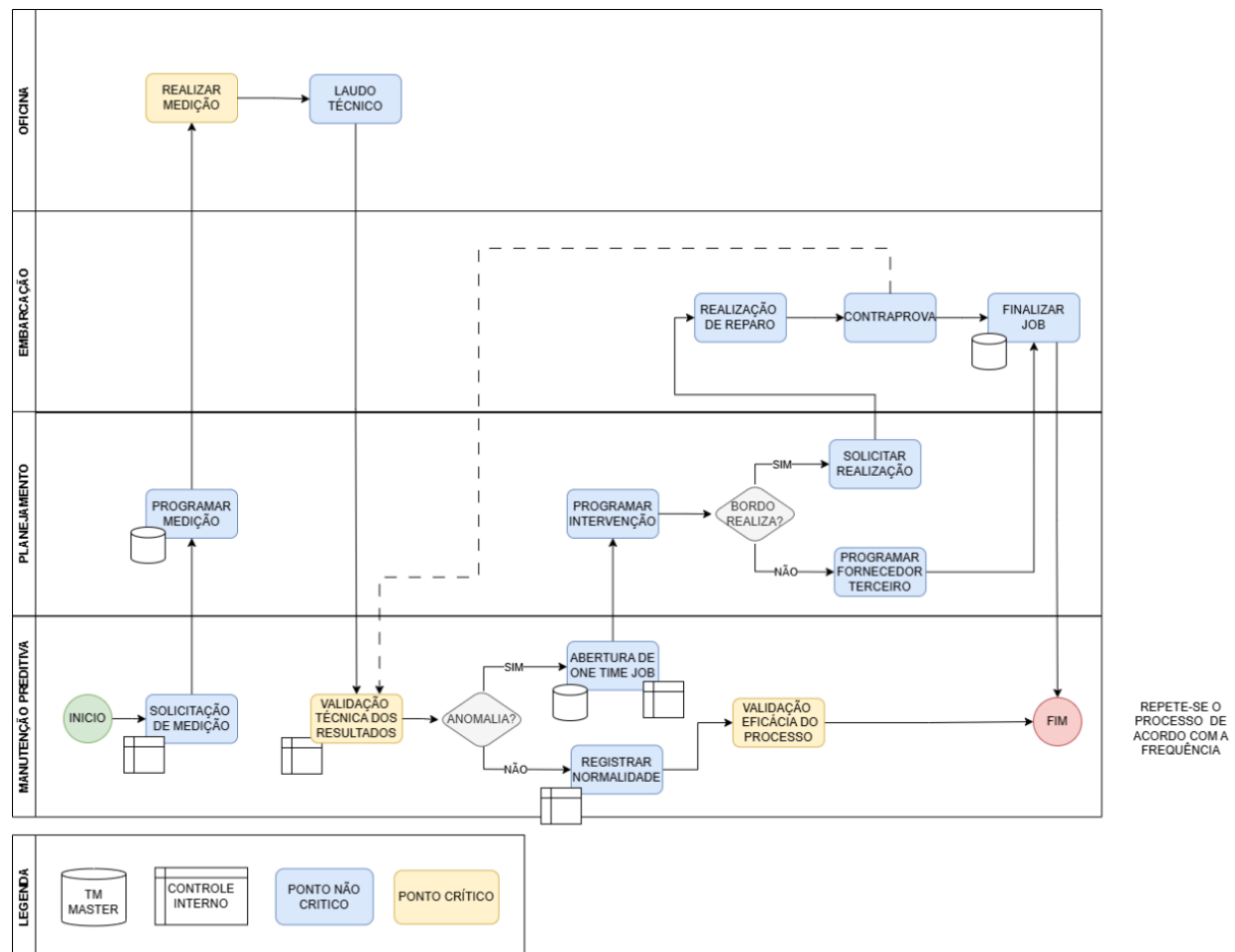
FORMULÁRIO DE VALIDAÇÃO DE RESULTADO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA										
 VERSÃO	04	 2025-03-19	 Preenchido por: Alexandro Junior - Manutenção							
 EMBARCAÇÃO			 DATA DO PREENCHIMENTO							
 EQUIPAMENTO			 RESPONSÁVEL PELO PREENCHIMENTO							
 SFI			 LABORATÓRIO EXECUTANTE							
 MARCA			 LUBRIFICANTE							
 MODELO			 HORÍMETRO							
INFORMAÇÕES DA COLETA			RESULTADOS ENCONTRADOS							
 RESPONSÁVEL			 NORMAL							
 COLEITA REALIZADA DE ACORDO COM BOAS PRÁTICAS			 ATENÇÃO							
 DATA DA COLETA			 ALERTA							
ANÁLISE DOS PARÂMETROS										
Análise de Óleo	Méd:			Méd:			Méd:			
	SIM	NÃO	VALOR INFORMADO	SIM	NÃO	VALOR INFORMADO	SIM	NÃO	VALOR INFORMADO	
 A viscosidade do lubrificante está de acordo com a especificação do equipamento?			Viscosidade (mm²/s)			Viscosidade (mm²/s)			Viscosidade (mm²/s)	
 O valor da viscosidade está estável e dentro do esperado nas últimas coletas?										
 A quantidade dos elementos de desgaste está controlada e com aumento significativo? (Analisar gráfico e tabela)			N/A			N/A			N/A	
 O valor de Ferro está dentro dos limites aceitáveis para o equipamento?			Fe (Ferro) (ppm)			Fe (Ferro) (ppm)			Fe (Ferro) (ppm)	
 Os níveis de desgaste por Ferro apresentam tendências estável em relação às coletas anteriores?										
 O valor de Cobre está dentro dos limites aceitáveis para o equipamento?			Cu (Cobre) (ppm)			Cu (Cobre) (ppm)			Cu (Cobre) (ppm)	
 Os níveis de desgaste por Cobre apresentam tendências estável em relação às coletas anteriores?										
 A contagem de partículas está dentro dos níveis aceitáveis e com aumento significativo? (ISO Index)										
 Os valores dos elementos contaminantes estão dentro dos limites esperados para o equipamento?			Na (Sódio) (ppm)			Na (Sódio) (ppm)			Na (Sódio) (ppm)	
 Os elementos contaminantes apresentam tendência estável em relação às coletas anteriores?										
 Os níveis de oxidação estão dentro dos parâmetros recomendados e permanecem estáveis em relação às coletas anteriores?			Oxidação Direta Atom			Oxidação Direta Atom			Oxidação Direta Atom	
 O óleo analisado atende à classe ISO 4406 apropriada para o equipamento e está conforme o manual do fabricante?			N/A			N/A			N/A	
LEGENDA	 NORMAL			 ATENÇÃO			 ALERTA			 NÃO APLICADO
ANÁLISE DE RECORRÊNCIA							SIM	NÃO		
As falhas encontradas são recorrentes nas coletas anteriores?							N/A	N/A		
Caso sim, foi realizada alguma intervenção?							N/A	N/A		
A nova ação indicada, será diferente da anterior?							N/A	N/A		
Número da ação corretiva							N/A			
LAUDO TÉCNICO										
ANÁLISE DE ÓLEO INDICA FALHA NO EQUIPAMENTO? ☐ SIM ☐ NÃO					ANÁLISE DE VIBRAÇÃO INDICA FALHA NO EQUIPAMENTO? ☐ SIM ☐ NÃO					
CONSIDERAÇÕES FINAIS:										
ANALISTA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA			COORDENADOR DE MANUTENÇÃO			GERENTE DE MANUTENÇÃO				
ALEXSANDRO JUNIOR			-			-				

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 4 exemplifica a replicação da arquitetura processual para a análise de vibração, preservando a lógica de programação, validação,

tratamento de anomalias e contraprova.

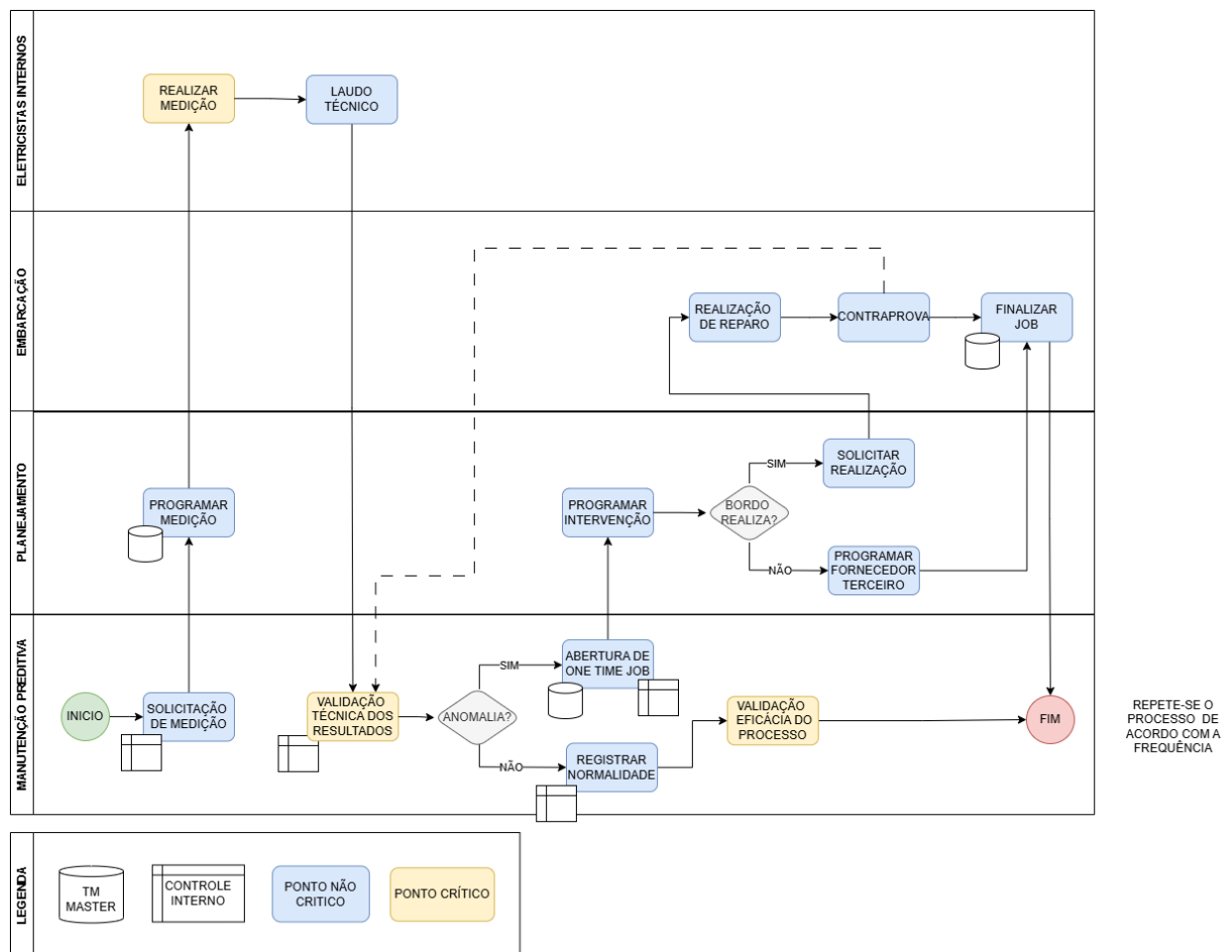
Figura 4. Exemplo de replicação do modelo para o processo de análise de vibração.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 5 apresenta a replicação do modelo para termografia infravermelha e medição de isolamento elétrico, destacando a adaptação do fluxo a técnicas de inspeção e medição distintas.

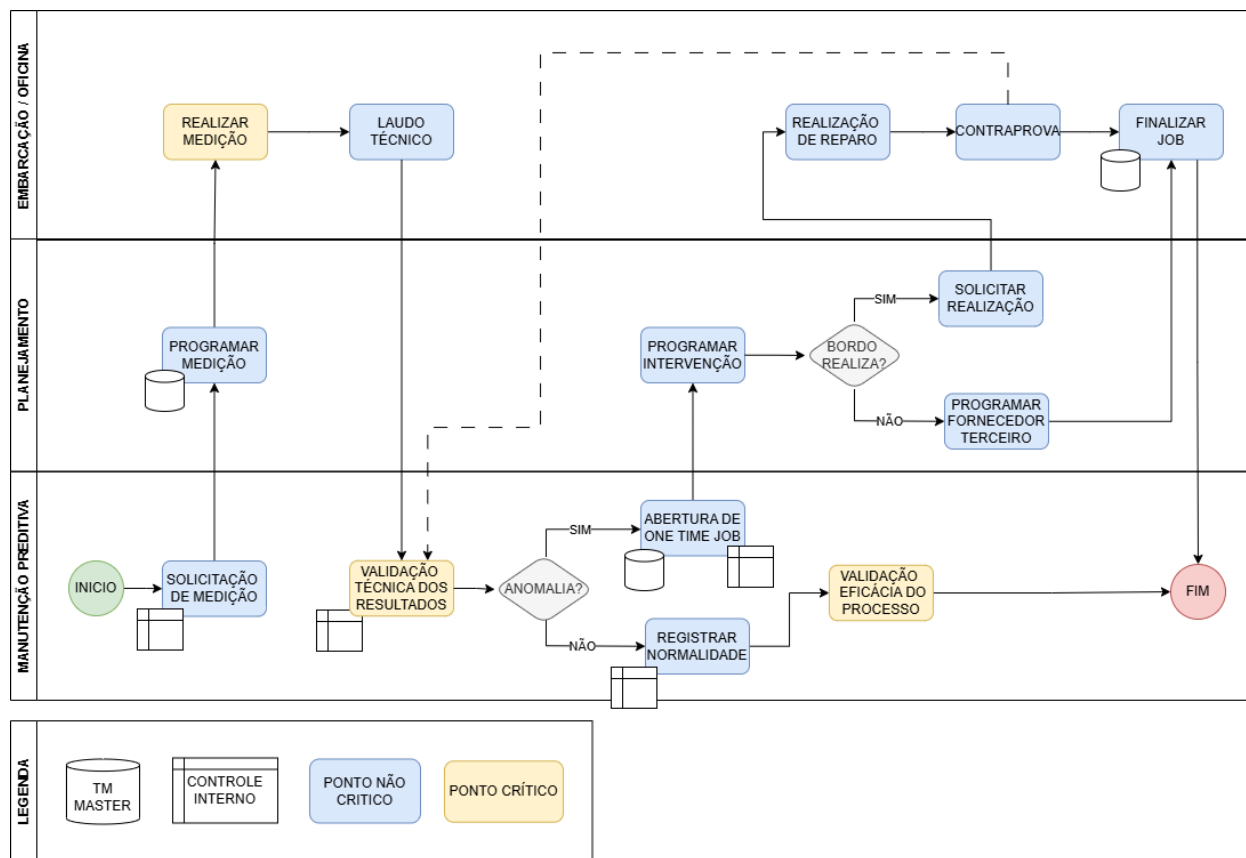
Figura 5. Replicação do modelo para termografia infravermelha e medição de isolamento elétrico.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 6 consolida a arquitetura genérica do modelo replicável, separando os elementos organizacionais invariantes dos conteúdos técnicos específicos de cada técnica preditiva.

Figura 6. Arquitetura genérica do modelo replicável de processo preditivo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A originalidade do modelo está na articulação entre técnica preditiva, governança, rastreabilidade, validação técnica, integração ao sistema de manutenção e replicação entre métodos distintos de monitoramento.

A contribuição central deste estudo consiste na proposição de uma arquitetura processual replicável para manutenção preditiva em operações *offshore*. Diferentemente de abordagens centradas exclusivamente na aplicação técnica da análise de fluidos, o modelo desenvolvido organiza o processo preditivo como um fluxo gerencial estruturado, com definição de responsabilidades, rastreabilidade, validação técnica interna, tratamento formal de anomalias e verificação de eficácia por contraprova. Essa contribuição dialoga com a literatura de BPM e gestão de processos, que enfatiza a coordenação ponta a ponta, a modelagem, a governança e a melhoria contínua dos fluxos organizacionais (AALST, 2013; DUMAS ET AL., 2018; ROSEMAN; VOM BROCKE, 2015).

A análise de fluidos serviu como técnica-base porque possui uma cadeia processual ampla: planejamento, coleta, identificação, envio, análise laboratorial, interpretação, comunicação, ação e verificação. Ao formalizar essa cadeia, o modelo criou um núcleo organizacional que pôde ser adaptado a outras técnicas. A replicabilidade observada não decorre da semelhança entre os métodos diagnósticos, mas da estabilidade da lógica organizacional que os articula.

3.6. Validação Técnica Interna do Modelo

A validação técnica interna representa um dos elementos mais relevantes do modelo. O laboratório fornece resultados e recomendações, mas a empresa precisa interpretar essas informações a partir do histórico do ativo, da criticidade, da tendência de coletas anteriores, das condições operacionais e das ações já realizadas. Essa camada analítica reduz a dependência passiva de laudos externos e transforma o resultado laboratorial em decisão de manutenção contextualizada.

A integração com o TM Master fortalece a rastreabilidade e permite que o processo deixe de depender de arquivos isolados ou conhecimento individual. Ao registrar anomalias e ações no sistema, o modelo cria histórico que pode ser auditado, consultado e utilizado para análise de tendência. Essa característica é fundamental para futura evolução em direção a *dashboards*, análise de dados, seleção estruturada de métodos preditivos e apoio à decisão por algoritmos (BENHANIFIA ET AL., 2025; GARCIA ET AL., 2025; SHA ET AL., 2025; TIDDENS; BRAAKSMA; TINGA, 2023).

A discussão também evidencia uma limitação importante: o estudo não quantificou estatisticamente seus efeitos sobre disponibilidade, custo, falhas ou paradas não planejadas. Portanto, não se deve afirmar que o modelo reduziu falhas ou custos. O resultado comprovado é processual: o modelo estruturou responsabilidades, controles, validação técnica e replicabilidade. Seus impactos quantitativos devem ser tratados como hipótese de trabalho e avaliados em pesquisas futuras.

3.7. Implicações Práticas do Modelo para a Manutenção e Gestão de Ativos em Operações Offshore

O modelo apresenta implicações práticas relevantes para empresas de apoio marítimo *offshore*. Ao organizar a comunicação entre bordo e terra, reduz-se a dependência de informalidade e aumenta-se a rastreabilidade das decisões. Ao padronizar responsabilidades, o processo torna-se menos vulnerável à rotatividade das equipes e à concentração de conhecimento em um único profissional. Ao vincular anomalias ao sistema de manutenção, aumenta-se a capacidade de acompanhamento e fechamento das ações, aspecto coerente com princípios de gestão de ativos e manutenção marítima baseada em dados (ISO, 2024; KALAFATELIS *ET AL.*, 2025).

Outra implicação é a possibilidade de expansão para diferentes embarcações e técnicas. Frotas compostas por PSV, AHTS, OSV e embarcações especializadas podem adaptar a arquitetura a seus sistemas críticos, desde que preservem o núcleo do modelo: coleta ou medição confiável, registro formal, validação técnica, tratamento da anomalia, ação corretiva e verificação de eficácia.

O modelo também contribui para uma base de maturidade em gestão de ativos. Processos padronizados e rastreáveis são pré-requisitos para indicadores confiáveis. Assim, ainda que a pesquisa não tenha medido ganhos de disponibilidade ou custo, ela estrutura o ambiente necessário para que esses ganhos possam ser avaliados posteriormente com dados mais consistentes (ISO, 2024; REIJERS, 2021).

4. CONCLUSÕES

O estudo abordou o desenvolvimento de um modelo processual replicável de manutenção preditiva em uma empresa de apoio marítimo *offshore*. Com esse objetivo, apresentou inicialmente o mapeamento do processo anterior de análise de fluidos, caracterizado por baixa formalização, dependência de conhecimento individual, ausência de responsabilidades claramente distribuídas, pouca integração ao sistema de manutenção e inexistência de validação técnica interna dos laudos.

O modelo TO-BE foi estruturado em quatro raias de responsabilidade-Embarcação, Planejamento, Manutenção Preditiva e Laboratório-e incorporou integração com o TM Master, formulário de validação técnica, tratamento formal de anomalias, contraprova e verificação de eficácia. Esses elementos permitiram transformar a análise de fluidos de uma rotina baseada em laudos isolados em um processo de manutenção preditiva rastreável e gerenciável.

A replicação do modelo para análise de vibração, termografia infravermelha e medição de isolamento elétrico demonstrou que a arquitetura organizacional permaneceu estável, enquanto as adaptações ocorreram principalmente no conteúdo técnico-

operacional de cada técnica. Essa distinção entre estrutura invariante e conteúdo variável constitui a principal contribuição científica e aplicada do estudo.

A contribuição do estudo não depende da generalização estatística dos resultados, mas da generalização analítica do modelo processual proposto, cuja lógica pode ser adaptada a outros contextos de manutenção preditiva que demandem padronização, rastreabilidade e governança.

Conclui-se que o modelo contribui para a governança da manutenção preditiva *offshore*, para a gestão de ativos marítimos e para a confiabilidade operacional em sentido processual. Seus impactos quantitativos sobre falhas, disponibilidade, custos e reincidência ainda não foram medidos e devem ser investigados em estudos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro concedido, à Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelos Projetos (7360/2025-2026; 8014/2025-2026; 8141/2025-2026 e ID25-FMTXNC/2026-2027) e ao Laboratório de Processos Industriais e Nanotecnologia (LPIN/UERJ) pela infraestrutura e suporte disponibilizados para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALST, W. M. P. van der. Business process management: a comprehensive survey. ISRN Software Engineering, v. 2013, article ID

507984, p. 1-37, 2013. DOI: 10.1155/2013/507984.

ABPMP. BPM CBOK: guia para o gerenciamento de processos de negócio. Versão 4.0. Brasil: ABPMP, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4057-22: Standard Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products. West Conshohocken: ASTM, 2022. Disponível em: <https://www.astm.org/d4057-22.html>. Acesso em: 31 mai. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E2412-23: Standard practice for condition monitoring of in-service lubricants by trend analysis using Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry. West Conshohocken: ASTM International, 2023.

BAGAVATHIAPPAN, S.; LAHIRI, B. B.; SARAVANAN, T.; PHILIP, J.; JAYAKUMAR, T. Infrared thermography for condition monitoring: a review. Infrared Physics & Technology, v. 60, p. 35-55, 2013. DOI: 10.1016/j.infrared.2013.03.006.

BENHANIFIA, A.; BEN CHEIKH, Z.; OLIVEIRA, P. M.; VALENTE, A.; LIMA, J. Systematic review of predictive maintenance practices in the manufacturing sector. Intelligent Systems with Applications, v. 26, article 200501, 2025. DOI: 10.1016/j.iswa.2025.200501.

DUMAS, M.; LA ROSA, M.; MENDLING, J.; REIJERS, H. A. Fundamentals of business process management. 2. ed. Berlin: Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-56509-4.

GARCIA, J.; RIOS-COLQUE, L.; PEÑA, A.; ROJAS, L. Condition monitoring and predictive maintenance in industrial equipment: an NLP-assisted review of signal processing, hybrid models, and

implementation challenges. Applied Sciences, v. 15, n. 10, article 5465, 2025. DOI: 10.3390/app15105465.

IEEE. IEEE Std 43-2013: IEEE recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery. New York: IEEE, 2013.

INTERNATIONAL COUNCIL FOR MACHINERY LUBRICATION. ICML 55.1: Requirements for the optimized lubrication of mechanical physical assets. Tulsa: ICML, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 17359: Condition monitoring and diagnostics of machines: general guidelines. Geneva: ISO, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 18434-1: Condition monitoring and diagnostics of machines: thermography: part 1: general procedures. Geneva: ISO, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 20816-3: Mechanical vibration: measurement and evaluation of machine vibration: part 3: industrial machinery. Geneva: ISO, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 55000: Asset management: vocabulary, overview and principles. Geneva: ISO, 2024.

KALAFATELIS, A. S.; NOMIKOS, N.; GIANNOPOULOS, A.; ALEXANDRIDIS, G.; KARDITSA, A.; TRAKADAS, P. Towards predictive maintenance in the maritime industry: a component-based overview. Journal of Marine Science and Engineering, v. 13, n. 3, article 425, 2025. DOI: 10.3390/jmse13030425.

KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção: função estratégica. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.

MOBLEY, R. K. An introduction to predictive maintenance. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

OBJECT MANAGEMENT GROUP. Business Process Model and Notation (BPMN): version 2.0. Needham: OMG, 2011.

REIJERS, H. A. Business process management: the evolution of a discipline. Computers in Industry, v. 126, article 103404, 2021. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103404.

ROSEMANN, M.; VOM BROCKE, J. The six core elements of business process management. *In*: VOM BROCKE, J.; ROSEMANN, M. (ed.). Handbook on business process management 1. 2. ed. Berlin: Springer, 2015. p. 105-122. DOI: 10.1007/978-3-642-45100-3_5.

SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Oxford: Newnes, 2004.

SHA, J.; LENG, J.; MAO, H.; PEI, J.; DIAO, K. Research progress in predictive maintenance of offshore platform structures based on digital twin technology. Journal of Marine Science and Application, v. 24, n. 5, p. 877-899, 2025. DOI: 10.1007/s11804-025-00649-w.

THIOLLENT, M. Metodologia da pesquisa-ação. 18. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

TIBONI, M.; REMINO, C.; BUSSOLA, R.; AMICI, C. A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery. Applied Sciences, v. 12, n. 3, article 972, 2022. DOI: 10.3390/app12030972.

TIDDENS, W.; BRAAKSMA, J.; TINGA, T. Decision framework for predictive maintenance method selection. Applied Sciences, v. 13, n. 3, 2023. DOI: 10.3390/app13032021.

TRIPP, D. Pesquisa-ação: uma introdução metodológica. Educação e Pesquisa, v. 31, n. 3, p. 443-466, 2005. DOI: 10.1590/S1517-97022005000300009.

VANI, G. D.; SHARMA, P.; SATYAKAM, R. The importance of lubricant and fluid analysis in predictive maintenance. International Journal of Engineering Research & Technology, v. 10, n. 8, 2021.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 201

¹ Graduando em Engenharia de Produção pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro -UERJ. Laboratório de Processos Industriais e Nanotecnologia - LPIN. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8176-7826>.

² Doutora em Físico Química de Materiais Nanoestruturados pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP-SP. Docente da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Laboratório de Processos Industriais e Nanotecnologia - LPIN. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7928-8040>.

³ Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ. Docente da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Laboratório de Processos Industriais e

Nanotecnologia - LPIN. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3974-5283>.

⁴ Doutora em Sistemas de Gestão, Produção, Qualidade e Desenvolvimento Sustentável pela Universidade Federal Fluminense-UFF. Docente da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0775-4633>.