



CONDITION-BASED MAINTENANCE EM ELETROBOMBAS SUBMERSÍVEIS DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ESGOTO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

GEORGE PESSÔA GÓES - georgepessoagoes@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE - UFF

IARA TAMMELA - iaratammela@id.uff.br
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE - UFF

RODOLFO CARDOSO - rodolfo_cardoso@id.uff.br
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE - UFF

ANDRÉ LUIS POLICANI DE FREITAS - policani@uenf.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF

ÁREA: 01.ENG. DE OPERAÇÕES E PROCESSOS DA PRODUÇÃO
SUBÁREA: 1.3 - GESTÃO DA MANUTENÇÃO

RESUMO: O OBJETIVO DESSE ARTIGO FOI REALIZAR UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA PARA INVESTIGAR A APLICABILIDADE DA CONDITION-BASED MAINTENANCE EM ELETROBOMBAS SUBMERSÍVEIS DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ESGOTO. ASSIM SENDO, FOI REALIZADA UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA CONDUZIDA EM SETE ETAPAS: 1) FORMULAÇÃO DO PROBLEMA; 2) BUSCA NA LITERATURA; 3) COLETA DE INFORMAÇÕES; 4) ANÁLISE DA QUALIDADE DOS ESTUDOS; 5) SÍNTESE DOS ESTUDOS; 6) INTERPRETAÇÃO DOS DADOS; 7) APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS. A BUSCA FOI REALIZADA NAS PRINCIPAIS BASES DE DADOS ACADÊMICAS, INCLUINDO SCOPUS, WEB OF SCIENCE, SCIENCE DIRECT, SCIELO, ALÉM DOS ANAIS DOS CONGRESSOS DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA. A REVISÃO IDENTIFICOU DIVERSOS MÉTODOS PARA A APLICABILIDADE DA MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÕES, DESTACANDO-SE O MODELO DE GUILLÉN E COLABORADORES. ESTE MÉTODO SE MOSTROU APLICÁVEL SEM A NECESSIDADE DE SOFTWARES AVANÇADOS OU DADOS SENSÍVEIS, ALÉM DE APRESENTAR BOM DESEMPENHO EM CENÁRIOS COM RECURSOS RESTRITOS, ATENDENDO BEM ÀS NECESSIDADES OPERACIONAIS E TÉCNICAS DAS EQUIPES DE MANUTENÇÃO NO ÂMBITO DAS ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ESGOTO, SENDO O MAIS ADEQUADO PARA O CONTEXTO ESTUDADO, DEVIDO SUA SIMPLICIDADE E APLICABILIDADE PRÁTICA.

PALAVRAS-CHAVES: MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÕES; MANUTENÇÃO BASEADA EM MONITORAMENTO; ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ESGOTO; BOMBAS ELÉTRICAS SUBMERSÍVEIS; REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.

1. INTRODUÇÃO

O acesso ao saneamento básico, que inclui abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem de águas pluviais e manejo de resíduos sólidos, é essencial para a qualidade de vida humana. A sua indisponibilidade está diretamente associada ao aumento de problemas de saúde pública, além de contribuir para a degradação ambiental (NARCIZO et al., 2019). Entre as medidas de saneamento, o tratamento do esgoto sanitário — caracterizado como os resíduos provenientes do uso doméstico da água (ABNT, 1999) — desempenha um papel crucial na preservação do meio ambiente e na redução de morbimortalidade populacional (COSTA, 2018).

Reconhecendo a importância do saneamento básico, a Organização das Nações Unidas (ONU), por meio da Resolução 64/292 de 2010, estabeleceu o acesso à água potável e ao saneamento como direitos humanos fundamentais. Ainda assim, em 2020, mais de 3,6 bilhões de pessoas no mundo careciam de gerenciamento seguro de saneamento, sendo 1,7 bilhão sem qualquer tipo de serviço (WHO; UNICEF, 2021). No Brasil, a situação é igualmente preocupante: cerca de 57% da população não possui tratamento de esgoto, resultando em impactos negativos para os recursos hídricos e a saúde pública (BRASIL, 2017).

O novo Marco do Saneamento Básico (Lei 14.026/2020) propõe metas desafiadoras, incluindo alcançar 90% de cobertura de coleta e tratamento de esgoto até 2033 (BRASIL, 2020). Apesar disso, a implementação dessas metas enfrenta barreiras significativas, como discrepâncias regionais, limitações financeiras e infraestrutura insuficiente. Nesse contexto, Estações Elevatórias de Esgoto (EEE) desempenham um papel essencial na ampliação do saneamento, mas sua operação eficiente requer estratégias de manutenção mais sofisticadas, eficazes e econômicas.

As EEE desempenham um papel crucial no transporte de esgoto, transferindo-o do nível do poço de sucção das eletrobombas submersíveis para o nível de descarga na saída do recalque, ajustando-se às variações de vazão afluente. Cada EEE é equipada com uma ou mais eletrobombas submersíveis, responsáveis pelo bombeamento dos efluentes sanitários. Essas eletrobombas são controladas por sistemas elétricos e de automação, que permitem selecionar, de forma local ou remota, qual equipamento será acionado para integrar o processo de envio do esgoto sanitário (ABNT, 2020).

O modelo predominante de manutenção adotado em muitos sistemas de EEE é a preventiva. Apesar de ser amplamente utilizada, essa abordagem limitada gera desperdícios de recursos, como substituições desnecessárias de componentes em bom estado, além de custos

elevados devido à frequência excessiva de intervenções (KARDEC, 2019). Em um município do interior do Estado do Rio de Janeiro, por exemplo, manutenções preventivas são realizadas em intervalos de 12 a 48 horas nas EEE, independente da real necessidade, o que pode indicar práticas ineficientes e onerosas.

A ausência de estratégias preditivas efetivas perpetua um modelo de manutenção inadequado, que compromete a eficiência operacional e os resultados financeiros das concessionárias. Portanto, o excesso de preventivas não corresponde ao sucesso da manutenção e, geralmente, está diretamente atrelado à falta de conhecimento do sistema a ser mantido, sendo também mais onerosa (KARDEC, 2019). Essa estratégia é incapaz de atender adequadamente à demanda crescente por serviços de saneamento básico, especialmente em um cenário de expansão de infraestrutura.

A *Condition-Based Maintenance* (CBM), ou Manutenção Baseada em Condições, surge como uma solução promissora para otimizar a manutenção de equipamentos em EEE. Essa abordagem utiliza monitoramento em tempo real e análise de dados para identificar condições anômalas, permitindo intervenções direcionadas e oportunas (NIU, YANG, PECHT, 2010; MEN et al., 2022). Ao reduzir a frequência de manutenções desnecessárias, a CBM pode contribuir para a sustentabilidade financeira das concessionárias, garantindo maior disponibilidade dos sistemas e diminuindo o *downtime* dos equipamentos (LABRISK et al., 2019).

No entanto, apesar do potencial da CBM, o estado atual do conhecimento sobre sua aplicação específica em eletrobombas submersíveis de EEE ainda é fragmentado e pulverizado. Estudos anteriores indicam benefícios gerais da CBM, mas há lacunas em relação à sua implementação prática nesse contexto particular. Assim sendo, cabe uma pergunta: Como ampliar o conhecimento da aplicação do CBM em eletrobombas submersíveis de EEE? Dirimindo essa lacuna de conhecimento, é possível levantar uma proposta de implementação da CBM para o monitoramento de eletrobombas submersíveis de EEE a partir da literatura científica?

Dessa forma, este estudo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura para investigar a aplicabilidade da *Condition-Based Maintenance* em eletrobombas submersíveis de estações elevatórias de esgoto.

A realização de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é essencial para consolidar e organizar o conhecimento nessa temática (COOPER, 2017). Além de servir como base teórica, a RSL oferece suporte para decisões na pesquisa e na prática profissional auxiliando no desenvolvimento de estratégias inovadoras e mais alinhadas às necessidades

reais do setor. A identificação de lacunas permite direcionar esforços de pesquisa para áreas de maior impacto prático, contribuindo para avanços significativos em eficiência operacional e sustentabilidade no setor de saneamento básico.

2. MÉTODO

A RSL é uma abordagem rigorosa e estruturada que visa reunir e analisar de forma sistemática o conhecimento científico disponível sobre um determinado tema, com o objetivo de identificar padrões, lacunas e avanços nas práticas e teorias existentes (COOPER, 2017). A revisão sistemática é especialmente adequada para fornecer uma visão ampla e crítica do estado da arte, permitindo não apenas a análise dos estudos já realizados, mas também a identificação de lacunas que possam direcionar novas pesquisas (TORRACO, 2005).

Para tal, foram seguidas as sete etapas do método, a saber: 1) formulação do problema; 2) busca na literatura; 3) coleta de informações; 4) análise da qualidade dos estudos; 5) síntese dos estudos; 6) interpretação dos dados; 7) apresentação dos resultados. Cada etapa apresenta tarefas específicas com suas particularidades que precisam ser rigorosamente seguidas (COOPER, 2017), conforme Quadro 1.

QUADRO 1 - Etapas e passos do Método para Revisão Sistemática da Literatura.

ETAPAS		PASSOS		
		A	B	C
1ª	FORMULAR O PROBLEMA	Definir o problema	Estabelecer as variáveis	Determinar as relações de interesse
2ª	BUSCAR NA LITERATURA	Determinar as palavras-chave	Estabelecer as bases e fontes de pesquisa	
3ª	COLETAR INFORMAÇÕES	Selecionar os estudos	Extrair as informações relevantes	Criar codificação
4ª	ANALISAR A QUALIDADE DOS ESTUDOS	Estabelecer critérios de inclusão e exclusão	Buscar possíveis vieses	Avaliar a qualidade dos estudos
5ª	SINTETIZAR OS ESTUDOS	Coordenar e combinar os resultados da pesquisa	Utilizar métodos qualitativos ou quantitativos na síntese	Analisar possíveis discrepâncias nos resultados
6ª	INTERPRETAR OS DADOS	Interpretar de forma generalizada os dados extraídos		
7ª	APRESENTAR OS RESULTADOS	Apresentar os resultados		

Fonte: COOPER (2017).

A primeira etapa consistiu na formulação clara e precisa do problema de pesquisa. O foco central foi revelar a estratégia necessária para a implementação da CBM no monitoramento do funcionamento de eletrobombas submersíveis de EEE. As questões-chaves que orientaram a pesquisa: Como ampliar o conhecimento da aplicação do CBM em eletrobombas submersíveis de EEE? É possível levantar uma proposta de implementação da CBM no monitoramento de eletrobombas submersíveis de EEE a partir da literatura científica?

As variáveis de interesse foram: manutenibilidade; confiabilidade; disponibilidade; CBM; eletrobombas submersíveis. Buscou-se explorar as interações entre esses tópicos, as relações mútuas entre essas variáveis e a CBM, bem como a aplicabilidade da CBM nas eletrobombas submersíveis de EEE.

Na segunda etapa, foi realizada a busca sistemática na literatura científica, utilizando palavras-chave específicas que englobam tanto a CBM quanto as características do sistema de bombeamento de esgoto. Assim, os descritores utilizados em diferentes combinações em duplas com o operador booleano AND foram: “Condition Based Maintenance” e sua variação “Condition-Based Maintenance”; “Monitoring Based Maintenance” e sua variação “Monitoring-Based Maintenance”; “Sewage Lifting Station”; “Submersible Electric Pumps”; “Sewage Pumping Station”. A pesquisa foi realizada nas principais bases de dados acadêmicas, incluindo Scopus, Web of Science, Science Direct e SciElo, além dos Anais dos Congressos da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária (ABES). A pesquisa foi desenvolvida entre setembro e outubro de 2023.

A terceira etapa envolveu a seleção dos estudos relevantes, onde os títulos e resumos dos artigos encontrados foram analisados criteriosamente. Para garantir a organização e a rastreabilidade das informações, cada estudo foi codificado com um identificador alfanumérico e os dados mais relevantes foram extraídos e sistematizados em uma planilha no Excel (autoria, ano, país, objetivos, resultados e conclusões). Esse processo de extração de dados objetivou facilitar a recuperação das informações e garantir que os resultados fossem consistentes com as questões de pesquisa.

Na quarta etapa, foi realizada a análise crítica da qualidade dos estudos selecionados. Os materiais identificados foram separados por meio de análise de seu conteúdo e aderência ao tema central, diante dos seguintes critérios de inclusão: artigos relacionados à aplicabilidade da CBM, preferencialmente aplicada em eletrobombas submersíveis, estações elevatórias de esgoto e estações de bombeamento de esgoto e nos idiomas português, inglês e

espanhol. Como critério de exclusão tem-se cartas, editoriais e estudos não relacionados ao escopo da pesquisa. Não houve recorte temporal.

A qualidade e a aderência dos estudos foram avaliadas quanto à pertinência e à coerência interna do material analisado, verificando sua proximidade com o tema central da pesquisa. Contudo, diante da escassez de artigos específicos sobre esse tema, houve a necessidade de incluir estudos que, direta ou indiretamente, colaboraram para o embasamento teórico da solução, mesmo sem explorar especificamente a CBM em eletrobombas submersíveis.

Na quinta etapa, os materiais encontrados foram analisados para que pudessem ser categorizados e ordenados conforme critérios específicos. O objetivo dessa análise foi descrever e resumir todo o material revelado, buscando uma interpretação válida e coerente, ao mesmo tempo que se procurou identificar padrões sistemáticos nos dados, evitando ruídos que pudessem comprometer a confiabilidade da revisão.

Na sexta etapa, os dados coletados foram interpretados de forma mais profunda, permitindo a identificação de conclusões sólidas e baseadas nas evidências da literatura. A interpretação dos dados permitiu avaliar quais conclusões poderiam ser extraídas com base nas evidências coletadas, considerando as variáveis de interesse e as especificidades do contexto das EEE.

A sétima e última etapa consistiu na apresentação dos resultados e conclusões. A síntese dos achados foi organizada e apresentada de forma clara nesse artigo, com o objetivo de fornecer uma visão detalhada sobre as estratégias de manutenção baseada em condição para eletrobombas submersíveis de estações elevatórias de esgoto. As conclusões foram baseadas nas evidências encontradas, e a pesquisa propôs direções futuras para a implementação e melhoria contínua da CBM nesse contexto específico. Para guiar essa revisão, os parâmetros utilizados são apresentados no protocolo para condução da revisão sistemática, conforme detalhado no Quadro 2.

QUADRO 2 – Protocolo para condução da revisão sistemática.

ELEMENTO	DECISÕES
Tema central	Manutenção baseada em condição em eletrobombas submersíveis de estações elevatórias de esgoto;
Problema de pesquisa	1) Como desenvolver uma proposta de implementação da <i>Condition-Based Maintenance</i> no monitoramento de eletrobombas submersíveis de estações elevatórias de esgoto?

Variáveis de interesse	Mantenabilidade; confiabilidade; disponibilidade; CBM; eletrobombas submersíveis.
Palavras-chaves	“Condition Based Maintenance” e sua variação “Condition-Based Maintenance”; “Monitoring Based Maintenance” e sua variação “Monitoring-Based Maintenance”; “Sewage Lifting Station”; “Submersible Electric Pumps”; “Sewage Pumping Station”.
Bases de dados e fontes de dados	Scopus, Web of Science, Science Direct e SciElo e Anais dos Congressos da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária (ABES)
Crítérios de busca	Crítérios de inclusão: artigos relacionados à aplicabilidade da CBM, preferencialmente aplicada em eletrobombas submersíveis, estações elevatórias de esgoto e estações de bombeamento de esgoto e nos idiomas português, inglês e espanhol. Crítérios de exclusão: cartas, editoriais e estudos não relacionados ao escopo da pesquisa.
Recorte Temporal	Sem recorte temporal
Idiomas	Português, inglês e espanhol

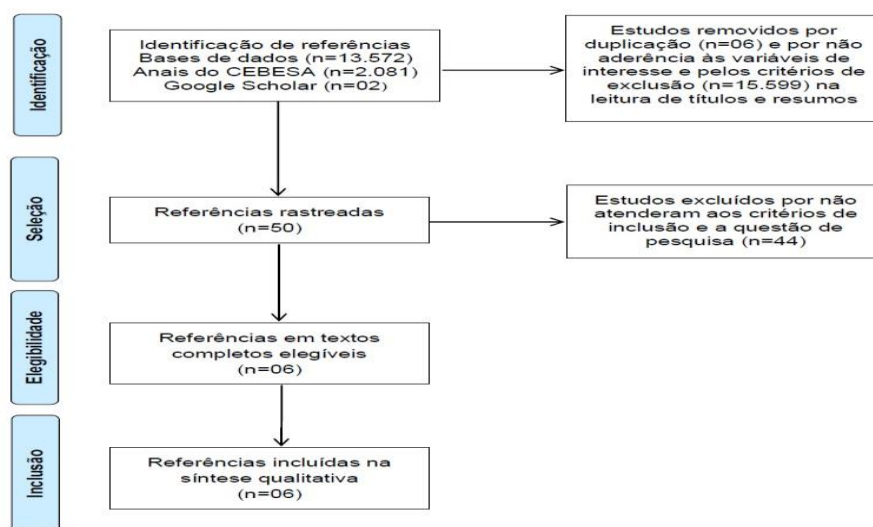
Fonte: Os Autores.

3. RESULTADOS

Após uma leitura flutuante dos títulos e resumos, foram identificados 13.572 documentos nas bases de dados Scopus, Web of Science, Science Direct e SciElo, além de 2.081 documentos dos Anais da CEBESA e dois do Google Scholar. Após a exclusão de seis duplicatas, 50 artigos foram selecionados preliminarmente para uma revisão mais detalhada. Este processo inicial de triagem teve como objetivo identificar materiais potencialmente relacionados às variáveis de interesse do estudo (mantenabilidade, confiabilidade, disponibilidade, CBM ou eletrobombas submersíveis), e aplicar os critérios de exclusão, como cartas, editoriais e estudos fora do escopo da pesquisa.

Em seguida, uma leitura criteriosa, completa e aprofundada dos 50 artigos foi realizada, resultando na exclusão de 44 que, após avaliação minuciosa, não atenderam aos critérios específicos de inclusão estabelecidos pela pesquisa, nem à questão central do estudo. Assim, seis artigos foram considerados adequados para uma análise completa. Após a leitura integral desses artigos, todos os seis foram mantidos e incluídos na síntese descritiva final. O processo completo de busca, triagem e seleção dos materiais utilizados nesta pesquisa está detalhadamente representado no fluxograma da Figura 1.

FIGURA 1 - Fluxograma de seleção dos artigos.



Fonte: Os Autores.

O Quadro 3 apresenta a lista de documentos incluídos na síntese teórica da RSL, com as variáveis: código, autoria; ano de publicação; país; objetivos. Os principais resultados e conclusões são apresentados na síntese descritiva a seguir.

QUADRO 3 – Caracterização dos artigos selecionados para análise.

Código	Título	Autores	Ano	País	Objetivo
A1	A model for financial viability of implementation of condition based maintenance for induction motors	Agam Gugaliya, VNA Naikan	2019	Índia	Desenvolver um modelo de custo pela viabilidade financeira da implantação do CBM para motores de indução
A2	Implementing condition-based maintenance using modeling and simulation: a case study of a permanent magnet synchronous motor	Jabid Quiroga Mendez e Silvia Oviedo Castillo	2011	Colômbia	Apresentar uma arquitetura CBM em uma aplicação elétrica, ilustrada com um estudo de caso em um motor síncrono de ímã permanente
A3	Automatic fault diagnostic system for induction motors under transient regime optimized with expert systems	Jordi Burriel-València et al.	2018	Espanha	Apresentar um sistema automático para geração de diagnósticos especializados na detecção de falhas quando a máquina trabalha em regime transitório

A4	A framework for effective management of condition based maintenance programs in the context of industrial development of E-Maintenance strategies	Antonio J. Guillén et al.	2016	Espanha	Fornecer uma representação abrangente dos principais componentes para uma solução genérica de CBM e apresentar um estudo de caso alicerçados numa estrutura correspondente.
A5	Condition-based maintenance implementation: a literature review	Humberto Nuno Teixeira et al.	2020	Portugal	Apresentar uma revisão da literatura sobre abordagens capazes de apoiar a implementação do CBM
A6	A review of condition-based maintenance decision-making	Rosmaini Ahmad e Shahrul Kamaruddin	2012	Malásia	Explora os métodos de tomada de decisão da abordagem CBM

Fonte: Os Autores.

O artigo de Gugaliya e Naikan (2019) discute a importância da implementação da CBM em motores de indução, uma prática essencial para otimizar o desempenho de máquinas e equipamentos industriais. Tradicionalmente, a manutenção preventiva tem sido adotada, porém, essa abordagem não considera as condições reais dos motores, podendo levar à substituição prematura de peças e falhas inesperadas. O avanço da tecnologia permite a adoção da CBM, que utiliza sensores para monitorar o desempenho dos motores em tempo real, proporcionando intervenções apenas quando necessário. No entanto, a implementação de CBM exige um alto investimento em tecnologia e treinamento, o que pode gerar resistência nas indústrias. O artigo propõe um modelo financeiro para avaliar a viabilidade dessa implementação, considerando tanto os custos quanto os benefícios esperados, como a redução de falhas e a maximização da vida útil dos motores.

Mendez e Castillo (2011) exploram a aplicação da CBM em motores síncronos de ímã permanente, utilizando modelagem e simulação para identificar falhas precocemente. O foco está na importância de detectar falhas sem gerar alarmes falsos, utilizando um sistema de monitoramento que capte sinais do motor e os analise em tempo real. Eles apresentam um sistema modular composto por sensores, processamento de dados e diagnóstico, e demonstram a eficácia desse sistema no diagnóstico de falhas, como o curto-circuito no enrolamento do estator, que pode ser detectado antes que cause danos graves. O estudo evidencia a viabilidade da CBM, apontando melhorias significativas na eficiência e sustentabilidade dos processos produtivos.

O artigo de Burriel-Valência et al. (2018) propõe um sistema de diagnóstico automático de falhas para motores de indução operando em regimes transitórios, com ênfase

na detecção de falhas em tempo real. A análise de assinatura de corrente da máquina (MCSA) é utilizada para detectar falhas sem a necessidade de interromper a operação do motor. No entanto, a MCSA enfrenta desafios devido à complexidade dos dados e à necessidade de profissionais qualificados para a interpretação. Para superar essa dificuldade, os autores propõem a utilização de sistemas especialistas automáticos, capazes de otimizar o diagnóstico de falhas e reduzir a dependência de técnicos altamente treinados. Esse sistema visa a melhoria da eficiência e a redução de custos de produção, o que também é relevante para o contexto das eletrobombas submersíveis.

Guillén et al. (2016) abordam a implementação eficaz da CBM, destacando os passos necessários para sua adoção, como a precisão na alocação de instrumentos de monitoramento e a definição de um modelo de degradação simples e eficiente. O artigo propõe um framework composto por blocos técnicos, cada um com um foco específico, para implementar a CBM de forma estruturada e eficaz. Essa abordagem é útil para a implementação de CBM em eletrobombas submersíveis, pois apresenta uma estrutura clara e bem definida que facilita a aplicação da técnica em sistemas complexos, como o monitoramento de falhas por obstrução em eletrobombas submersíveis nas EEE

Teixeira, Lopes e Braga (2020) realizam uma revisão da literatura sobre a implementação da CBM, destacando a importância de garantir a eficácia ao adotar a técnica. Eles enfatizam três pontos cruciais para a implementação da CBM: aquisição de dados, processamento de dados e tomada de decisão sobre a manutenção. Para a aplicação da CBM em eletrobombas submersíveis, o artigo sugere o monitoramento de variáveis relacionadas ao entupimento, um modo de falha recorrente. O estudo aponta que a implementação da CBM deve ser conduzida de maneira sistemática, considerando a experiência dos técnicos e os métodos de monitoramento mais adequados.

Ahmad e Kamaruddin (2012) exploram a tomada de decisão na CBM, apresentando dois métodos: o Método Baseado na Evolução da Condição Atual (CCEB) e o Método Baseado na Previsão da Condição Futura (FCPB). O CCEB avalia as condições atuais do ativo e toma decisões de manutenção baseadas em limites predefinidos, enquanto o FCPB antecipa as condições futuras do equipamento para programar manutenções adequadas. Ambos os métodos são essenciais para otimizar a manutenção de ativos, reduzindo custos operacionais e melhorando o desempenho. O artigo destaca a relevância desses métodos para a manutenção de eletrobombas submersíveis, permitindo uma programação de manutenção mais eficiente e evitando falhas inesperadas.

Os métodos de modelagem propostos por Ahmad e Kamaruddin (2012), como o Modelo de Risco Proporcional (PHM) e o Modelo Oculto de Markov (HMM), são técnicas avançadas de análise de dados que ajudam a prever a deterioração dos equipamentos. O PHM utiliza dados de falhas e condições para avaliar o risco de falha de um ativo, enquanto o HMM modela sequências de eventos para prever falhas. Essas técnicas são particularmente úteis para prever falhas em equipamentos complexos, como motores e eletrobombas, e são compatíveis com a CBM, pois fornecem informações sobre o estado futuro do equipamento, permitindo que a manutenção seja programada de maneira proativa.

A aplicação da CBM em sistemas industriais exige uma abordagem metódica e a consideração de diversos fatores, como o tipo de equipamento, o modo de falha predominante e as tecnologias de monitoramento disponíveis. A implementação eficaz da CBM pode levar a uma redução significativa nos custos de manutenção e aumento da disponibilidade dos equipamentos, como demonstrado nos estudos de Gugaliya e Naikan (2019) e outros autores. No entanto, o sucesso dessa implementação depende de uma avaliação cuidadosa dos custos e benefícios, além de uma adaptação das metodologias de monitoramento às características específicas de cada sistema.

Em síntese, a implementação da CBM oferece uma abordagem mais inteligente e econômica para a manutenção de ativos industriais, incluindo motores de indução e eletrobombas submersíveis. Os modelos e sistemas propostos pelos autores, como os de Gugaliya e Naikan (2019), Mendez e Castillo (2011), Burriel-Valência et al. (2018), Guillén et al. (2016), Teixeira et al. (2020) e Ahmad e Kamaruddin (2012), fornecem uma base sólida para a adoção dessa estratégia, permitindo às empresas melhorar a eficiência de suas operações e reduzir custos. A aplicação bem-sucedida da CBM em sistemas como as eletrobombas submersíveis nas EEE pode resultar em uma gestão mais eficaz das operações de saneamento e outros processos industriais críticos.

Embora diferentes métodos apresentem vantagens, como a simplicidade na implementação e a aplicabilidade em contextos variados, o método de Guillén et al. (2016) foi escolhido como referência para uma futura aplicação de CBM em eletrobombas submersíveis nas EEE devido à sua adequação específica às necessidades do estudo. O modelo de Guillén se destaca pela sua estrutura clara, que facilita a implementação eficiente da CBM, focando na alocação adequada de instrumentos de monitoramento e na definição de um modelo de degradação adaptável a diferentes cenários. Sua flexibilidade, aliada à ausência de requisitos complexos, torna a aplicação do método mais acessível e eficaz, especialmente em contextos com recursos limitados, como o de EEE.

Para facilitar a compreensão das semelhanças e diferenças entre os métodos apresentados nos artigos revisados, e para destacar suas vantagens e desvantagens em relação ao método de Guillén et al. (2016), foi elaborado um quadro comparativo (Quadro 4). Este quadro visa sintetizar os pontos principais dos estudos selecionados, proporcionando uma análise crítica das abordagens propostas pelos autores, o que facilita a escolha do método mais adequado para o monitoramento das eletrobombas submersíveis das EEE, considerando os objetivos e restrições do projeto.

QUADRO 4 – Comparação das vantagens e desvantagens dos métodos CBM.

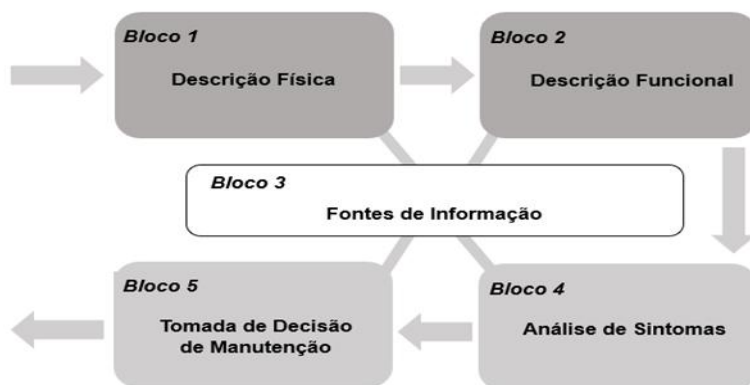
Código	Título	Vantagens	Desvantagens	Comparação com Guillén et al. (2016)
A1	A model for financial viability of implementation of condition based maintenance for induction motors	- Abordagem inovadora que combina eficiência técnica e viabilidade financeira. - Fórmulas simples e acessíveis para técnicos de manutenção. - Fórmulas simples e acessíveis para técnicos de manutenção.	- Dados necessários para as fórmulas são desconhecidos pelo corpo técnico e supervisão, inviabilizando a implementação. - Possível manipulação dos dados para mascarar realidades desconfortáveis. - Informações sensíveis, como custos, podem não ser reveladas por gerentes e diretores. - Exclusivo para motores de indução.	- Guillén et al. não requer dados iniciais, permitindo implementação baseada na experiência técnica. - Método genérico e aplicável a diversos ativos, incluindo eletrobombas submersíveis de esgoto.
A2	Implementing condition-based maintenance using modeling and simulation: a case study of a permanent magnet synchronous motor	- Alta confiabilidade na detecção de falhas (>95%). - Modelo preciso e robusto para antecipar falhas específicas no estator.	- Requer o uso de software especializado (Matlab/Simulink) e pessoal treinado. - Complexidade na replicação da rede neural. - Exclusivo para motores síncronos de ímã permanente.	- Guillén et al. oferece uma solução genérica sem necessidade de software especializado ou treinamento. - Pode ser aplicado a qualquer ativo, incluindo eletrobombas submersíveis.
A3	Automatic fault diagnostic system for induction motors under transient regime optimized with expert systems	- Diagnóstico automático de falhas em regime transitório. - Totalmente automatizado e autônomo, sem necessidade de intervenção do usuário.	- Necessidade de um sistema neural otimizado e pessoal qualificado. - Treinamento complexo e específico para alta eficácia. - Exclusivo para motores de indução	- Guillén et al. não requer sistemas neurais ou pessoal altamente treinado. - Pode ser implementado com técnicos de manutenção e não exige sistemas de alta complexidade.

A5	Condition-based maintenance implementation: a literature review	- Revisão abrangente das abordagens de CBM. - Identificação de tarefas relevantes para implementação (seleção de componentes, modos de falha, etc.).	- Não fornece um passo a passo claro para implementação do CBM. - Foco mais na compreensão dos conceitos do que em aplicação prática.	- Guillén et al. apresenta um passo a passo detalhado e de fácil aplicação. - Método genérico que pode ser aplicado em qualquer setor, com envolvimento do corpo técnico da empresa.
A6	A review of condition-based maintenance decision-making	- Exploração de métodos de decisão CBM baseados em evolução da condição atual e previsão da condição futura. - Permite um planejamento de manutenção mais eficaz.	- Requer técnicas avançadas (Redes Neurais, Modelos de Séries Temporais, Análises de Regressão). - Necessidade de pessoal técnico altamente capacitado e sistemas especializados. - Ausência de um passo a passo aplicável a ativos.	- Guillén et al. não exige técnicas matemáticas complexas ou pessoal especializado. - Método genérico, aplicável sem investimentos significativos em equipamentos ou treinamento.

Fonte: Os Autores.

A seleção do método de Guillén et al. (2016) na RSL demonstrou ser a abordagem mais adequada para o monitoramento das EEE. Sua simplicidade e aplicabilidade prática, especialmente em contextos com recursos limitados, foram determinantes para essa escolha. Esse método se revelou relevante ao apresentar uma abordagem genérica, adequando-se, assim, às eletrobombas submersíveis das EEE. Ele é composto por cinco blocos com limites bem definidos, por meio das funções distintas de cada bloco, conforme apresentado pelos autores (Figura 2).

FIGURA 2 – Método de Guillén et al. (2016)



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Guillén, et al. (2016).

O Bloco 1, "Descrição Física", detalha a estrutura do sistema em seus níveis hierárquicos (sistema, unidade de equipamento e subunidade passível de manutenção). O Bloco 2, "Descrição Funcional", define as funções do sistema, falhas funcionais e modos de falha, sendo este último central no gerenciamento da manutenção e nas soluções de CBM. O Bloco 3, "Fontes de Informação", aborda a gestão de sensores, técnicas de medição e variáveis monitoradas, essenciais para a observação do desempenho do sistema. O Bloco 4, "Análise dos Sintomas", relaciona os sintomas detectados, seus descritores e as regras de interpretação para transformar os dados em informações úteis. Por fim, o Bloco 5, "Tomada de Decisão de Manutenção", integra as etapas de detecção, diagnóstico, prognóstico e decisões operacionais, com tarefas documentadas para intervenções eficazes (GUILLÉN et al., 2016).

Essa estrutura organizada garante um acompanhamento preciso e eficiente do sistema, promovendo ações de manutenção bem fundamentadas. Assim, Guillén et al. (2016) oferecem uma abordagem que possibilita intervenções planejadas com base na condição real do ativo, tornando o CBM uma solução prática para aumentar a confiabilidade e a eficiência operacional das eletrobombas submersíveis em EEE.

Ao contrário de outros métodos que exigem softwares avançados ou o manejo de dados sensíveis, a abordagem de Guillén também se destacou pela eficácia sem a necessidade de recursos complexos, facilitando uma implementação mais direta e alinhada ao conhecimento técnico disponível nas equipes de manutenção.

A flexibilidade do método e a ausência de requisitos sofisticados o tornaram ideal para o contexto das eletrobombas submersíveis de EEE, oferecendo uma solução acessível e de fácil aplicação prática. Dessa forma, a metodologia de Guillén et al. mostrou-se a mais adequada para as necessidades do projeto, permitindo um monitoramento eficiente das eletrobombas submersíveis das EEE e aproveitando ao máximo os recursos disponíveis.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do estudo evidenciaram diferentes abordagens para o monitoramento das eletrobombas submersíveis de EEE, destacando suas vantagens e limitações. Entre os métodos avaliados, o de Guillén et al. (2016) se mostrou o mais apropriado para o contexto em questão, devido à sua simplicidade e aplicabilidade prática. Ao contrário de outras abordagens que requerem software avançado ou dados sensíveis, o método de Guillén pode ser

implementado de forma eficaz com os recursos e o conhecimento técnico disponíveis pela equipe de manutenção.

A escolha do método de Guillén foi fundamentada na sua flexibilidade e na ausência de requisitos complexos, tornando-o a opção mais adequada para a realidade do projeto. A análise dos estudos revisados reforçou que esse método atende de maneira mais eficiente às necessidades do monitoramento das eletrobombas submersíveis das EEE, oferecendo uma solução prática e acessível para a gestão e manutenção desses sistemas em contextos com recursos limitados.

Para pesquisas futuras é sugerido a aplicação do método numa EEE equipada com uma ou mais eletrobombas submersíveis, responsáveis pelo bombeamento dos efluentes sanitários, de forma a verificar a aplicabilidade do método proposto e sua viabilidade.

REFERÊNCIAS

AHMAD, R.; KAMARUDDIN, S. **A review of condition-based maintenance decision-making**. European J. Industrial Engineering, Vol. 6, No. 5, 2012.

AHMAD, R; KAMARUDDIN, S. **An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application**. Computers & Industrial Engineering Vol 63 pp 135-149. 2012 – 8

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8160: Sistemas prediais de esgoto sanitário - Projeto e execução. Rio de Janeiro: ABNT, 1999, 74 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12208: Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de esgoto — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020, 42 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas / Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. 2017.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 135, 16 jul. de 2020.

COOPER, Harris M. **Research synthesis and meta-analysis**. Vol. 2. Sage, 2017.

COSTA, H, P. **Educação ambiental e sua relação com o saneamento básico e a saúde pública no município de Porto Nacional – Tocantins**. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais – Universidade Brasil – Campus de São Paulo. São Paulo, 2018.

GUGALIYA, A; NAIKAN, V. N. A. **A model for financial viability of implementation of condition based maintenance for induction motors**. Journal of Quality in Maintenance Engineering Vol. 26 No. 2, pp. 213-230 DOI 10.1108/JQME-08-2017-0053. 2020

GUILLÉN, A. J. et al. **A framework for effective management of condition based maintenance programs in the context of industrial development of E-Maintenance strategies.** Computers in Industry, v. 82, p.170-185, 2016.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção. Função Estratégica.** 4ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2019.

MEN, T et al. **Health assessment of high-speed train wheels based on group-profile data.** RELIABILITY ENGINEERING AND SYSTEM SAFETY. 2022

MÉNDEZ, J, Q; CASTILLO, S, O. **Implementing condition-based maintenance using modeling and simulation: a case study of a permanent magnet synchronous motor.** INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL 31, No. 2, pp 18-28. 2011

NARCIZO, R. B., et al. **Prova de Conceito e Análise de Desempenho em Protótipo de Sistema para o Tratamento Natural de Efluentes Domésticos.** GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, v. 14, n.3, p. 59 - 72, 2019.

Niu, G. et al. **Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance.** Vol. 95, No. 7, pp. 786–96. doi: 10.1016/j.ress.2010.02.016. 2010

RICHARD J. TORRACO, R, J. (2005) **Writing Integrative Literature Reviews: Guidelines and Examples.** Vol 4, No 356-367). DOI: 10.1177/1534484305278283

UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY (UNGA). Resolução nº 64/292, de 28 de julho de 2010. The human right to water and sanitation. Geneva: UNGA; 2010.

Valencia, J. B. et al. **Automatic Fault Diagnostic System for Induction Motors under Transient Regime Optimized with Expert Systems.** doi:10.3390/electronics8010006. 2019

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) AND THE UNITED NATIONS CHILDREN’S FUND (UNICEF) **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: five years into the SDGs.** 2021