

Integrando conceitos de manutenibilidade e regras de interpretação na CBM: revisão sistemática da literatura

Integrating maintainability concepts and interpretation rules into CBM: a systematic literature review

DOI:10.34117/bjdv8n4-006

Recebimento dos originais: 21/02/2022

Aceitação para publicação: 31/03/2022

Raquel Maia Forte Marinho

M.Sc.

Instituição: Universidade Federal Fluminense (UFF)

Endereço: Rua Recife s/n, Rio das Ostras, Rio de Janeiro, Brasil, CEP: 28895-532

E-mail: raquelmaiaforte@gmail.com

Rodolfo Cardoso

D.Sc.

Instituição: Universidade Federal Fluminense (UFF)

Endereço: Rua Recife s/n, Rio das Ostras, Rio de Janeiro, Brasil, CEP: 28895-532

E-mail: rodolfo_cardoso@id.uff.br

Iara Tammela

D.Sc.

Instituição: Universidade Federal Fluminense (UFF)

Endereço: Rua Recife s/n, Rio das Ostras, Rio de Janeiro, Brasil, CEP: 28895-532

E-mail: iaratammela@id.uff.br

Danilo Colombo

M.Sc.

Instituição: CENPES – PETROBRAS

Endereço: Av. Horácio Macedo 950, Rio de Janeiro, Brasil, CEP: 21941-915

E-mail: colombo.danilo@petrobras.com.br

Fernanda Eirado Souza

M.Sc.

Instituição: Universidade Federal Fluminense (UFF)

Endereço: Rua Recife s/n, Rio das Ostras, Rio de Janeiro, Brasil, CEP: 28895-532

E-mail: fernanda.eirado@gmail.com

RESUMO

A Condition-Based Maintenance (CBM) é uma estratégia de manutenção voltada para o estabelecimento de programas de monitoramento de condição. O monitoramento das variáveis de estado do sistema e o conhecimento das assinaturas de comportamento padrão e de falhas do equipamento, são aspectos fundamentais na aplicação da CBM. A capacidade de interpretação dessas informações é o ponto chave e possibilita a tomada de decisão de forma mais assertiva, visando atuação dentro das estratégias de manutenibilidade de forma a harmonizar os desempenhos desejados de confiabilidade e disponibilidade dos sistemas. Nesse sentido, este artigo tem como objetivo analisar a

literatura sobre o conceito de manutenibilidade e suas principais abordagens, bem como sobre métodos para a definição de regras de interpretação para auxílio à tomada de decisão com base na condição de operação. Para isso, foi utilizada a metodologia revisão sistemática da literatura (RSL), operacionalizada pelo método proposto por Morandi e Camargo (2015). Como resultado, foram identificados os principais constructos relacionados às regras de interpretação, tomada de decisão e manutenibilidade dentro da abordagem CBM, visando auxiliar as empresas e a área de manutenção a melhorar seus processos internos para construção das regras para executar a CBM.

Palavras-chave: manutenibilidade, manutenção baseada em condição, tomada de decisão, regras de interpretação.

ABSTRACT

Condition-Based Maintenance (CBM) is a maintenance strategy aimed at establishing condition monitoring programs. The monitoring of system state variables and the knowledge of standard behavior and equipment failure signatures are fundamental aspects in the application of CBM. The ability to interpret this information is the key point and enables more assertive decision making, aiming to act within the maintainability strategies in order to harmonize the desired performances of reliability and availability of the systems. In this sense, this paper aims to analyze the literature on the concept of maintainability and its main approaches, as well as on methods for the definition of interpretation rules to aid decision making based on the operating condition. To this end, the systematic literature review (RSL) methodology was used, operationalized by the method proposed by Morandi and Camargo (2015). As a result, the main constructs related to interpretation rules, decision making and maintainability within the CBM approach were identified, aiming to help companies and the maintenance area to improve their internal processes for building the rules to perform CBM.

Keywords: maintainability, condition-based maintenance, decision making, interpretation rules.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a ISO 13372 (2004, p.1), a Manutenção Baseada em Condição (CBM) é definida como “manutenção realizada como é governada pelos programas de monitoramento da condição”. O monitoramento da condição permite distinguir comportamentos anômalos, comparando dados coletados do estado atual com parâmetros de linha de base ou limites operacionais, gerando indicadores de estado que possibilitam a detecção e comunicação através de alertas e alarmes de eventos anormais na máquina ou sistema (ISO 13374-2, 2007).

Os parâmetros de linha de base de uma máquina, também denominados de “assinatura do equipamento”, são estabelecidos a partir de um conjunto predeterminado de condições de funcionamento ou, para os transitórios, uma condição predeterminada de partida e parada. Desta forma, é definida a configuração padrão de uma máquina

específica e as medições subsequentes comparadas com os valores de referência a fim de detectar mudanças e tendências, possibilitando identificar o desenvolvimento de falhas (ISO 17359, 2002).

O conhecimento dos modos de falha e mecanismos de falha associados à degradação do equipamento, mostram-se essenciais para uma escolha assertiva dos parâmetros precursores a serem monitorados para posterior avaliação de falhas iminentes (MATHEW; ALAM; PECHT, 2012). Pereira (2019, p.14) ressalta que “as indicações teóricas utilizam o FMMEA para priorização dos mecanismos ligados a um modo de falha, para assim escolher os parâmetros adequados para monitoramento e aplicar a manutenção baseada em condição”. Portanto, assim como há uma assinatura relacionada às condições normais de operação do equipamento, existem diferentes assinaturas de falha associadas aos mecanismos de falha priorizados que possibilitam realizar prognósticos com precisão (MATHEW; ALAM; PECHT, 2012).

Para a obtenção de análises efetivas de manutenibilidade e confiabilidade, devem ser considerados todos os desafios técnicos e fatores que influenciam desde os mecanismos de falha, até os processos de manutenção em si e atividades de suporte (BARABADI; MARKESSET, 2011). O registro apropriado das ações de manutenção auxilia na tomada de decisões estratégicas de gerenciamento de manutenibilidade de ativos, resultando na implementação ideal de recursos para manter os equipamentos em condições e reduzir manutenções não planejadas (DURGA PRASAD; RADHAKRISHNA, 2019). A manutenção adequada mantém o equipamento em boas condições de uso e garante confiabilidade, disponibilidade, eficiência, bem como vida útil para todo o sistema (KUMAR *et al.*, 2013).

Assim, o desenvolvimento de uma arquitetura de manutenção inteligente e cooperativa, a qual envolve o compartilhamento e troca de dados, informações, conhecimento e inteligência entre os atores envolvidos durante todo o ciclo de vida do produto, traduz-se em uma nova potencialidade de valor de manutenção (VOISIN *et al.*, 2010).

A *Condition-Based Maintenance* (CBM) e o *Prognostic and Health Management* (PHM) surgem como abordagens que podem favorecer a integração das informações de manutenibilidade, confiabilidade e disponibilidade e, com isso, oportunizar resultados favoráveis para uma gestão sistêmica baseada em decisões por meio do monitoramento das condições de operação, condições de contorno e experiência acumulada (TELFORD; MAZHAR; HOWARD, 2011).

Com base nos estudos prévios de Revisões da Literatura realizadas por Martins *et al.* (2018), com foco em monitoramento de condição e CBM, e Rodrigues *et al.* (2020), voltado para a abordagem PHM, e estudos de Martins (2019), Pereira (2019), Tammela *et al.* (2020¹), Tammela *et al.* (2020²) e Colombo *et al.* (2021), surge-se a necessidade de aprofundar as discussões quanto à construção das regras de interpretação voltadas para implementação das abordagens de CBM e PHM, que possibilite a tomada de decisão de forma mais assertiva, visando atuação dentro das estratégias de manutenibilidade e harmonização com os desempenhos desejados de confiabilidade e disponibilidade dos sistemas. Assim, o objetivo desse artigo é realizar, a partir dos estudos prévios, revisões sistemáticas da literatura (RSL) sobre o conceito de manutenibilidade e suas principais abordagens, e métodos capazes de orientar o estabelecimento de regras de interpretação para tomada de decisão. Com base nisso, o artigo propõe uma breve análise dos referenciais teóricos identificados, estabelecendo os principais constructos e correlações. Como pesquisa futura, esses constructos poderão ser apresentados em forma de modelo conceitual.

2 METODOLOGIA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é considerada um estudo secundário com a finalidade de mapear, buscar e realizar avaliações críticas, de modo a consolidar e agregar os resultados de estudos primários relevantes acerca da temática, e identificar lacunas, resultando em novos conhecimentos (Morandi; Camargo, 2015). Cooper (2016) complementa que além do rigor e transparência suportados por esta abordagem, o principal resultado esperado está relacionado com os resultados cumulativos das pesquisas que abrange. Para condução das revisões, foi seguido o método e orientações de pesquisa propostos por Morandi e Camargo (2015). Esse método compreende 7 (sete) etapas sequenciais: (1) definição da questão e do *framework* conceitual; (2) escolha da equipe de trabalho; (3) estratégia de busca; (4) busca, elegibilidade e codificação; (5) avaliação da qualidade; (6) síntese dos resultados; e (7) apresentação do estudo.

2.2 DETALHES DO MÉTODO APLICADO

O primeiro passo compreende a definição do tema central da revisão. A partir dos estudos prévios de outros autores, identificou-se a oportunidade de aprofundar as discussões a respeito de manutenibilidade e sua influência no cenário de construção de

regras de interpretação para tomada de decisão. Para nortear a definição das questões de revisão, foi elaborado um *framework* conceitual, partindo da oportunidade identificada.

Assim, este artigo busca explorar a seguinte questão: Quais constructos norteiam a construção de regras de interpretação para trens de falha de um equipamento, com foco na tomada de decisão sobre ações de manutenibilidade, tendo como fundamento a CBM?

Foram realizadas revisões configurativas, nas quais o tema é explorado de forma mais abrangente através de questões abertas, e o conhecimento é construído pela exploração e interpretação dos estudos, gerando um arcabouço teórico coerente (método indutivo) (Morandi; Camargo, 2015).

Foram conduzidas duas RSL: a primeira buscando identificar documentos que abordassem a respeito da manutenibilidade e suas abordagens; e a segunda, explorando a busca de documentos que contivessem métodos de suporte à tomada de decisão voltados para o estabelecimento de regras de interpretação. Em ambas, a estratégia de busca envolveu a definição das palavras-chave, sendo utilizada a bases de dados *Scopus*, por ser considerada uma das maiores bases de resumos e citações de literatura científica revisada por pares. Conforme proposto por Morandi e Camargo (2015), foi adotado o processo de busca, elegibilidade e codificação.

Para a primeira RSL, inicialmente, na base *Scopus*, utilizou-se as palavras-chave: ("*maintainability*" OR "*maintenance*"), resultando em uma amostra de 7.582 publicações correspondentes a diversas áreas temáticas. Em uma análise prévia, identificou-se a necessidade de refinar os termos de busca, a fim de se obter um conjunto de dados mais direcionados para responder à questão da pesquisa. A partir do refinamento das palavras-chave, foram encontradas 384 publicações, com um crescimento no tema a partir de 2008.

A segunda busca teve como foco o conceito de regras de interpretação no contexto de auxílio à tomada de decisão para ações de manutenibilidade. Foram utilizadas palavras-chave relacionadas à CBM e seu contexto, e regras de interpretação, resultando em apenas 3 publicações. Desta forma, a busca foi ampliada incorporando termos relacionados aos métodos de apoio à decisão, contemplando suas variações, combinações e sinônimos. Esta busca resultou em um conjunto de 321 documentos, com destaque para o crescimento do tema a partir de 2004, atingindo o ápice em 2007. Deste modo, foram aplicados filtros restringindo para a área de conhecimento da engenharia, a partir de 2007, resultando em 188 documentos.

Posteriormente, a partir do universo de estudos, foram aplicados critérios de inclusão e exclusão. As Tabelas 1 e 2 sintetizam essas etapas.

Tabela 1. Documentos selecionados na RSL 1 - Manutenibilidade

Parâmetros de seleção	Descrição	Nº de documentos
Universo de estudo: aplicação de filtros para busca inicial	Áreas de conhecimento: sem aplicação de filtro Ano: sem aplicação de filtro Idioma: inglês e espanhol	384
Critério de exclusão: Contagem de citação	Exclui da revisão documentos com número de citações menor ou igual a 10 citações	54
Critério de inclusão 1: Alinhamento com os conceitos	Avalia se o documento aborda como tema central os conceitos Manutenibilidade, Atributos de Manutenibilidade e Avaliação de Manutenibilidade voltados para equipamentos a partir da leitura dos títulos e resumos	28
Critérios de inclusão 2: Alinhamento ao tema:	Avalia se o documento aborda como tema central os conceitos Manutenibilidade, Atributos de Manutenibilidade e Avaliação de Manutenibilidade voltados para equipamentos a partir da leitura dos textos completos	23

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2. Documentos selecionados na RSL 2 - Regras de interpretação

Parâmetros de seleção	Descrição	Nº de documentos
Universo de estudo: aplicação de filtros para busca inicial	Áreas de conhecimento: engenharia Ano: a partir de 2007 Idioma: inglês	188
Critério de exclusão: Contagem de citação	Exclui da revisão documentos com número de citações menor ou igual a 10 citações	35
Critério de inclusão 1: Alinhamento com os conceitos	Avalia se o documento aborda como tema central os conceitos Regras de Interpretação, Métodos de tomada de decisão ou abordagens relacionadas a partir da leitura dos títulos e resumos	29
Critérios de inclusão 2: Alinhamento ao tema:	Avalia se o documento aborda como tema central regras de interpretação no contexto de monitoramento de parâmetros para a tomada de decisão a partir da leitura dos textos completos	20

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após a adoção de critérios de inclusão e exclusão, foram obtidos 23 documentos da primeira busca e 20 documentos da segunda busca para sustentar o conteúdo abordado neste artigo. Além dos 43 documentos provenientes da RSL, foram incorporados estudos primários importantes que integram a “*grey literature*”, isto é, documentos não controlados por editores comerciais (Morandi; Camargo, 2015). Neste artigo, serão considerados as normas nacionais e internacionais que tratam de monitoramento de condição e manutenibilidade.

Através dos estudos primários, utilizaram-se os procedimentos de *backward*, em que foram consultadas referências de estudos selecionados e, de *forward*, onde foram buscados novos artigos que citam um documento selecionado. As principais referências acrescentadas foram de Martins *et al.* (2018), Guillén *et al.* (2016), Sarazin *et al.* (2020),

Luo *et al.* (2017) e Blanchard *et al.* (1995). As etapas de síntese dos resultados e avaliação do estudo serão apresentadas nos tópicos 3 e 4.

3 SÍNTESE DA LITERATURA

3.1 O CONCEITO DE MANTENABILIDADE

Para Blanchard *et al.* (1995, p. 20): “disponibilidade é a função do tempo de operação (confiabilidade) e tempo de inatividade (mantenabilidade)”. A manutenibilidade se refere a “capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos” (NBR 5462, 1994, p.3). É considerada uma característica inerente de projeto de um sistema, em que seus requisitos devem ser integrados com outros atributos, como: confiabilidade, fatores humanos, qualidade e requisitos de suporte (Blanchard *et al.*, 1995).

Assim sendo, a manutenibilidade pode ser entendida como uma relevante característica inerente do projeto de um produto, principalmente pela influência direta na gestão de manutenção e na escolha do programa de manutenção mais adequado durante sua fase de operação em campo. Dentre suas principais características, tem-se a capacidade de tornar a manutenção conveniente, rápida e econômica, aumentando a eficiência, diminuindo grande parte dos custos do ciclo de vida e elevando a segurança e disponibilidade do produto (Luo *et al.*, 2017; Blanchard; Blyler, 2016).

3.2 ATRIBUTOS DE MANTENABILIDADE

De acordo com Blanchard e Blyler (2016), a manutenibilidade pode ser mensurada a partir da combinação de tempos de manutenção, horas de mão-de-obra, fatores de frequência de manutenção, custo de manutenção e fatores de suporte logístico relacionados, não existindo uma medida única que aborde todos os problemas. Portanto, esses fatores devem ser abordados coletivamente conforme a aplicação, e considerados em conjunto com as medidas de confiabilidade. Ainda segundo os autores, o aspecto de “tempo” é a medida de manutenibilidade mais utilizada.

Wani e Gandhi (1999) e De Leon *et al.* (2012) consideram que os atributos de manutenibilidade de sistemas mecânicos são desdobrados em três classes: Projeto, Pessoal e Suporte Logístico. Tjiparuro e Thompson (2004) atribuíram quatro áreas fundamentais de influência, compreendendo além dos fatores pessoais, suporte logístico e fatores de

projeto, os fatores de contexto de operação. Em resumo, a complexidade estrutural do equipamento e a disponibilidade de recursos (pessoal de manutenção e variáveis de suporte) estão diretamente associados à manutenibilidade (atributos de manutenibilidade e suas inter-relações) do sistema e norteiam a política de manutenção a ser adotada durante o seu uso operacional (Wani; Gandhi, 1999).

3.3 MANTENABILIDADE ASSOCIADA A ABORDAGENS DE TOMADA DE DECISÃO

Para atingir a manutenibilidade e a confiabilidade é importante agir em três dimensões: de projeto, de fabricação e de uso em campo (Smith, 2017). Durante a fase operacional, a análise de manutenibilidade é considerada fundamental para avaliar e prever quantitativamente o desempenho e eficácia do sistema de manutenção, de modo a retroalimentar a fase de projeto e promover melhorias no projeto existente (HUSSIN *et al.*, 2013).

Existem três principais parâmetros de manutenibilidade: tempo médio de reparo, tempo mediano de reparo e o tempo máximo de reparo. O tempo médio de reparo (MTTR), média ponderada dos tempos de reparo que considera a taxa de falhas, é o mais utilizado (Blanchard; Blyler, 2016).

Conforme MIL-HDB-472 (1966, p. 2), “todos os métodos de previsão de manutenibilidade são dependentes de pelo menos dois parâmetros básicos: (a) Taxas de falha de componentes no nível de montagem específico de interesse. (b) Tempo de reparo necessário no nível de manutenção envolvido”. Assim, a manutenibilidade “deve ser considerada como um índice-chave para melhorar o desempenho dos sistemas de gerenciamento de produção e operação” (Tsarouhas, 2014, p.1).

3.4 CONCEITOS E ABORDAGENS ASSOCIADAS AO SUPORTE À DECISÃO

Para Li *et al.* (2009, p. 7048), a abordagem de suporte à decisão auxilia no processo de seleção, dado que “diferentes ferramentas de diagnóstico e prognóstico fornecem maneiras diferentes de estimar e exibir informações de integridade do equipamento”. Na perspectiva de melhoria no gerenciamento de manutenção, os sistemas de detecção, diagnóstico e prognóstico requerem a integração de três capacidades: modelagem de propagação de danos e baseada na física, mecanismos não invasivos adequados para avaliação da saúde e um mecanismo de fusão de informações no nível de sistema (Tu *et al.*, 2007).

Os algoritmos operam comparando continuamente os descritores (parâmetros e variáveis) recém-extraídos, também denominados de condições da máquina, com seus valores de linha de base correspondentes, a fim de tomar decisões com base em sua evolução. Os descritores, a partir da aplicação de limites, modelos e regras, possibilitam quantificar a relação entre os valores atuais e sua linha de base (Galar *et al.*, 2012).

Os modelos de acúmulo de danos da vida residual da máquina (física da falha) pressupõem o conhecimento de um "limite de dano", análogo ao estabelecimento de limites de "alarme". As práticas da indústria para monitoramento de condição de máquinas mostram que a experiência do usuário ou julgamento de engenharia tem suportado a definição dos níveis de 'alarme' ou 'falha' para cada tecnologia de monitoramento de condição com foco em questões de diagnóstico e previsão da vida útil restante (Galar *et al.*, 2012).

Dentre as abordagens associadas às saídas de monitoramento e tomada de decisão encontradas na literatura, destaca-se no Quadro 1 as que contribuíram fortemente para identificação dos principais constructos.

Quadro 1. Abordagens associadas às saídas de monitoramento e tomada de decisão

Autor	Contribuição
Voisin <i>et al.</i> (2010)	Utilizaram uma abordagem de processo para formalizar um processo de prognóstico genérico no âmbito de um sistema integrado de manutenção proativa, o qual permite explicitar os dados trocados entre o prognóstico e seu ambiente.
Galar <i>et al.</i> (2012)	Apresentam uma metodologia de integração para as diversas fontes de dados, como <i>Computer Maintenance Management Systems</i> (CMMS), sistemas de monitoramento de condição (CM) e <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> (SCADA), com o objetivo de vincular ao prognóstico de manutenção e tomada de decisão ideal.
Bousdekis <i>et al.</i> (2015)	Descreveram sistematicamente as características dos métodos de suporte à decisão baseado em prognóstico para a CBM, definindo categorias genéricas e identificando combinações, de modo a cobrir os requisitos de prognóstico e tomada de decisão das aplicações de CBM.
Guillén <i>et al.</i> (2016)	Estruturam um <i>framework</i> subdivido em 5 blocos: descrição física; descrição funcional; fontes de informações e recursos; análise dos sintomas; tomada de decisão de manutenção.
Martins (2019)	Propõe um artefato em blocos para o gerenciamento da manutenção por monitoramento de condição em tempo real, de modo a possibilitar a implantação dos conceitos de CBM.
Durga Prasad e Radhakrishna (2019)	Propõem um sistema abrangente, integrado e expansível de CMMS com um sistema de suporte a decisões (DSS) incorporado e possibilidade de adotar sistemas especialistas baseados em regras para manutenção, eventos e equipamentos.
Sarazin <i>et al.</i> (2020)	Definem os elementos relevantes para formulação de regras de interpretação: as variáveis de monitoramento; os descritores; os sintomas; as regras de interpretação e; os elementos de saídas (detecção, diagnóstico e prognóstico).

Fonte: Elaborado pelos autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da literatura oportunizou a identificação de elementos-chave que compõem as regras de interpretação, bem como fatores que influenciam na seleção, construção e interpretação desses – considerados como *inputs*. Esses elementos e *inputs* podem ser entendidos como constructos da linha teórica estudada e são explicitados nos Quadros 2 e 3.

Quadro 2. Elementos das regras de interpretação encontrados na literatura

Elementos-chave	Autores
1. Descritores	Strachan <i>et al.</i> (2008); Sarazin <i>et al.</i> (2020), Guillén <i>et al.</i> (2016), ISO 13374-2 (2007), Galar <i>et al.</i> (2012), Rasovska, Chebel-Morello e Zerhouni (2008).
1.1. Variáveis	Voisin <i>et al.</i> (2010), Guillén <i>et al.</i> (2016), Sarazin <i>et al.</i> (2020), ISO 13380 (2002).
1.2. Parâmetros	Schmidt, Wang e Galar (2017), Voisin <i>et al.</i> (2010), ISO 13380 (2002).
1.3. Dados de condições de operação	Voisin <i>et al.</i> (2010).
1.4. Especificações de fabricantes e normativos	ISO 17359 (2002).
1.5. Limites operacionais	Sarazin <i>et al.</i> (2020), ISO 13374-2 (2007), ISO 17359 (2002).
2. Indicadores De Condição	ISO 13374-2 (2007), Lee <i>et al.</i> (2009), Das <i>et al.</i> (2011), Jin <i>et al.</i> (2015), He e Bechhoefer (2008), ADS-79D-HDBK (2013), Saxena <i>et al.</i> (2010).
3. Regras de interpretação	Strachan <i>et al.</i> (2008), Strachan <i>et al.</i> (2007), Guillén <i>et al.</i> (2016), Sarazin <i>et al.</i> (2020), ISO 13374-2 (2007), Rasovska, Chebel-Morello e Zerhouni (2008), ADS-79D-HDBK (2013).
3.1. Detecção	Guillén <i>et al.</i> (2016), Wang (2011), Galar <i>et al.</i> (2012), Voisin <i>et al.</i> (2010), ISO 13374-2 (2007), Rasovska, Chebel-Morello e Zerhouni (2008).
3.2. Diagnóstico	Guillén <i>et al.</i> (2016), Li, Ambani e Ni (2009), Galar <i>et al.</i> (2012), Voisin <i>et al.</i> (2010), Zhou, Yan e Xin (2017), Strachan <i>et al.</i> (2008), Rasovska, Chebel-Morello e Zerhouni (2008).
3.3. Prognóstico	Guillén <i>et al.</i> (2016), Li <i>et al.</i> (2009), Galar <i>et al.</i> (2012), Voisin <i>et al.</i> (2010), Bousdekis <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quadro 3. Inputs dos elementos das regras de interpretação encontrados na literatura

Inputs	Autores
Fatores que influenciam na seleção do descritor	
Trem de Falha	Rasovska, Chebel-Morello e Zerhouni (2008), Martins (2019).
Saída desejada	Bousdekis <i>et al.</i> (2015).
Sintoma	Todd <i>et al.</i> (2007), Strachan <i>et al.</i> (2008), Rasovska, Chebel-Morello e Zerhouni (2008), Guillén <i>et al.</i> (2016), ISO 13372 (2004), ISO 17359 (2002), ISO 13380 (2002).
Fatores que influenciam na construção do descritor	
Técnicas de Medição	Guillén <i>et al.</i> (2016), ISO 13374-2 (2007), ISO 17359 (2002).
Processamento de sinais (sensores)	Schmidt, Wang e Galar (2017), ISO 13374-2 (2007), Voisin <i>et al.</i> (2010), Bousdekis <i>et al.</i> (2018).
Sistemas CMMS, SCADA	Campos, Jantunen e Prakash (2009), Voisin <i>et al.</i> (2010), Galar <i>et al.</i> (2012), Schmidt, Wang e Galar (2017), Durga Prasad e Radhakrishna (2019).
Fatores que influenciam na determinação da assinatura padrão e dos limites do descritor	

<i>Inputs</i>	<i>Autores</i>
Função	Rasovska, Chebel-Morello e Zerhouni (2008).
Estágio de ciclo de vida	Durga Prasad e Radhakrishna (2019).
Condições ambientais	Voisin <i>et al.</i> (2010), Schmidt, Wang e Galar (2017).
Condições operacionais	Voisin <i>et al.</i> (2010), Rasovska, Chebel-Morello e Zerhouni (2008), Schmidt, Wang e Galar (2017), ISO 17359 (2002)
Condições de manutenção	Voisin <i>et al.</i> (2010), Schmidt, Wang e Galar (2017).
Atributos de projeto	Blanchard, Verma e Peterson (1995), Wani e Gandhi (1999), Tjiparuro e Thompson (2004).
Fatores que influenciam no entendimento do comportamento das falhas vs indicadores	
Modelo de física da falha / Modelo de degradação	Tu <i>et al.</i> (2007), Galar <i>et al.</i> (2012), Das <i>et al.</i> (2011), Rodrigues <i>et al.</i> (2014), Voisin <i>et al.</i> (2010), Zhou, Yan e Xin (2017), Henríquez <i>et al.</i> (2014), Bousdekis <i>et al.</i> (2015), ADS-79D-HDBK (2013).
Dados históricos de manutenção e operação	Voisin <i>et al.</i> (2010).
Fatores que influenciam na ativação das condições das regras de interpretação	
Monitoramento em tempo real	Muller, Marquez e Lung (2008), Li, Ambani e Ni (2009), Trappey, Trappey e Ni (2013), ISO 13372 (2004).
Métodos de decisão	Muller, Marquez e Lung (2008), Li, Ambani e Ni (2009), Lee <i>et al.</i> (2009), Haddad, Sandborn e Pecht (2012), Strachan <i>et al.</i> (2007), Guillén <i>et al.</i> (2016), Sarazin <i>et al.</i> (2020), Voisin <i>et al.</i> (2010), Bousdekis <i>et al.</i> (2015), Bousdekis <i>et al.</i> (2018).
Fatores influenciam nas decisões de ações de mantabilidade	
Estratégia de manutenção	Wu <i>et al.</i> (2010), Wani e Gandhi (1999).
Custo da ação x custo evento indesejado	Voisin <i>et al.</i> (2010), Bousdekis <i>et al.</i> (2015), Bousdekis <i>et al.</i> (2018), ISO 13372 (2004).
Nível de manutenção	Tarelko (1995), De Leon <i>et al.</i> (2012), Blanchard, Verma e Peterson (1995), NBR 5462 (1994).
MTTR/MTBF	Blanchard, Verma e Peterson (1995), Wani e Gandhi (1999), Wu <i>et al.</i> (2010), De Leon <i>et al.</i> (2012), Luo <i>et al.</i> (2017), Tjiparuro e Thompson (2004), Blanchard e Blyler (2016), Smith (2017), Tsarouhas (2012).
Suporte Logístico	Blanchard, Verma e Peterson (1995), Barabadi e Markeset (2011), Wani e Gandhi (1999), Wu <i>et al.</i> (2010), De Leon <i>et al.</i> (2012), Luo <i>et al.</i> (2017).
Indisponibilidade	NBR 5462 (1994).
Segurança operacional	Voisin <i>et al.</i> (2010), Bousdekis <i>et al.</i> (2015).

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em linhas gerais, os constructos estão inter-relacionados, isto é, há uma correlação entre as variáveis e parâmetros associados aos trens de falha e sintomas que permite constituir assinaturas que representem condições normais de operação e seus limites operacionais. A partir do monitoramento das condições em tempo real e registro adequado, são definidas regras de interpretação que, ao serem inseridas em um sistema, informam as condições do equipamento e podem ser associadas a alertas de falhas. Tais regras auxiliam a tomada de decisão de forma mais assertiva para ações de mantabilidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou a análise da literatura sustentada por duas revisões sistemáticas da literatura. Os resultados evidenciam um conjunto de atributos da manutenibilidade associados a características de projeto, suporte logístico, de pessoal e contexto operacional que podem influenciar tanto na facilidade de aquisição de dados de monitoramento, quanto nos próprios indicadores de manutenibilidade (MTTR, MTBF, etc.). Os tempos de manutenção, frequência de manutenção, custo e fatores de suporte relacionados podem impactar diretamente na tomada de decisão estratégica de manutenibilidade.

No que tange os métodos de auxílio à decisão, diferentes ferramentas de diagnóstico e prognóstico podem ser utilizadas conforme dados de entrada disponíveis e necessidade de informação de saída. Os dados de entrada estão condicionados à existência de mecanismos de monitoramento e sistemas de suporte à manutenção e operação. O comportamento desses dados requer um entendimento da estrutura física do equipamento, suas funcionalidades e características, bem como dos contextos de operação e manutenção. Tais informações possibilitam o entendimento da física de falha e tradução em indicadores de condição, que irão alimentar métodos de decisão para detecção, diagnóstico e prognóstico.

O artigo elucida a interação da manutenibilidade no contexto de regras de interpretação e auxílio no suporte à decisão no ambiente de monitoramento. Em termos práticos, fornece os principais constructos pertinentes desde o processo de construção de regras de interpretação até a tomada de decisão para ações de manutenibilidade em empresas. A fim de orientar a definição dessas regras de interpretação, uma oportunidade de pesquisa futura consiste em relacionar os constructos em um modelo conceitual e testá-lo em um ambiente real. Para isso, sugere-se a utilização do conhecimento de especialistas e de dados reais para identificar as correlações existentes entre variáveis e falhas e, com isso, definir regras mais aderentes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. 1994.

BARABADI, A.; MARKESET, T. **Reliability and maintainability performance under Arctic conditions**. International Journal of System Assurance Engineering and Management, v. 2, n. 3, p. 205-217, 2011.

BLANCHARD, B. S.; VERMA, D. C.; PETERSON, E. L. **Maintainability: a key to effective serviceability and maintenance management**. John Wiley & Sons, 1995.

BLANCHARD B. S.; BLYLER J. E. **System Engineering Management**. John Wiley & Sons, Inc. 2016.

BOUSDEKIS, A. *et al.* **Review, analysis and synthesis of prognostic-based decision support methods for condition based maintenance**. Journal of Intelligent Manufacturing, v. 29, n. 6, p. 1303-1316, 2015.

COLOMBO, D. *et al.* **Análise do impacto da frequência de testes na disponibilidade do BOP utilizando um modelo markoviano multifásico**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 11, 2021.

COOPER, H. **Research Synthesis and Meta-Analysis: A Step-by-Step Approach**. 5. Ed. Sage Publications, Inc., 2016.

DE LEON, P. M. *et al.* **A practical method for the maintainability assessment in industrial devices using indicators and specific attributes**. Reliability Engineering & System Safety, v. 100, p. 84-92, 2012.

DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-HDBK-472**: Maintainability prediction. 1966.

DURGA PRASAD, N.V.P.R.; RADHAKRISHNA, C. **Decision Support System and Integrated Asset Optimization (DSS & IAO)**. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), v.9 Issue-1, p. 2249 – 8958, 2019.

GALAR, D. *et al.* **Integration of disparate data sources to perform maintenance prognosis and optimal decision making**. Insight-non-destructive testing and condition monitoring, v. 54, n. 8, p. 440-445, 2012.

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.

HUSSIN, H. *et al.* **Maintainability analysis of an offshore gas compression train system, a case study**. International Journal of Quality & Reliability Management, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13374-2**: Preview Condition monitoring and diagnostics of machines -- Data processing, communication and presentation -- Part 2: Data processing. 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13372:** Condition monitoring and diagnostics of machines — Vocabulary. 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17359:** Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines. 2002.

KUMAR, U. *et al.* **Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review.** Journal of Quality in Maintenance Engineering, v. 19, n. 3, p. 233-277, 2013.

LI, L.; AMBANI, S.; NI, J. **Plant-level maintenance decision support system for throughput improvement.** International Journal of Production Research, v. 47, n. 24, p. 7047-7061, 2009.

LUO, X. *et al.* **A method for the maintainability assessment at design stage based on maintainability attributes.** In: 2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). IEEE, 2017. p. 187-192.

MARTINS, F. B. *et al.* **Applying CBM and PHM concepts with reliability approach for Blowout Preventer (BOP): a literature review.** Brazilian Journal of Operations & Production Management, v. 15, n. 1, p. 78-95, 2018.

MARTINS, F. B. **Proposição de artefato para implantação da manutenção por monitoramento de condições (CBM) para o blowout preventer (BOP).** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas Computacionais) – Universidade Federal Fluminense, Instituto de Ciência e Tecnologia, Rio das Ostras, 2019.

MATHEW, S.; ALAM, M.; PECHT, M. **Identification of failure mechanisms to enhance prognostic outcomes.** Journal of Failure Analysis and Prevention, v. 12, n. 1, p. 66-73, 2012.

MORANDI, M. I. W. M.; CAMARGO, L. F. R. Revisão sistemática da literatura. In: **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia.** Porto Alegre: Bookman, 2015. p. 141–175.

PEREIRA, L. C. **Análise de modos de falhas, mecanismos e efeitos (FMMEA): uma Revisão Sistemática de Literatura.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal Fluminense, Instituto de Ciência e Tecnologia, Rio das Ostras, 2019.

RODRIGUES, T. A.; SILVA, L. A. S.; TAMMELA, I.; CARDOSO, R. **PHM Applicability to BOP System Maintainability and Operations Management: A Systematic Literature Review.** 26th IJCIEOM - International Joint Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2020.

SARAZIN, A. *et al.* **Towards Model Transformation from a CBM Model to CEP Rules to Support Predictive Maintenance.** In: MODELSWARS 2020-The 8th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development. SciTePress, 2020. p. 205-215.

SMITH, D. J. **Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers.** Butterworth-Heinemann, 2017.

TAMMELA¹, I., CARDOSO, C., AMARAL, M. C., MACHADO, F. S., CHAVES, L. A. O., RODRIGUES, T. A., MARINHO, R. M. F., PINTO, I. S., MARTINS, F. B., COLOMBO, D. **Análise dos Modos, Mecanismos e Causas de Falha para Componentes e Partes do Blowout Preventer.** Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2020, p. 1-13.

TAMMELA², I., CARDOSO, C., SILVA, G. V., DA SILVA, L. A. S., MEZA, E. B. M., NARCIZO, R. B., DE AGUIAR, G. J. M., DOS SANTOS, E. I., COLOMBO, D. **Construção de Dicionário de Variáveis de Monitoramento do Sistema BOP para Auxiliar Implantação de CBM.** Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2020, p. 1-13.

TELFORD, S.; MAZHAR, M. I.; HOWARD, I. **Condition based maintenance (CBM) in the oil and gas industry: An overview of methods and techniques.** In: Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Kuala Lumpur, Malaysia. 2011.

TJIPARURO, Z.; THOMPSON, G. **Review of maintainability design principles and their application to conceptual design.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, v. 218, n. 2, p. 103-113, 2004.

TSAROUHAS, P. H. **Maintainability analysis in the yogurt industry.** International Journal of System Assurance Engineering and Management, v. 6, n. 2, p. 119-128, 2014.

TU, F. *et al.* **PHM integration with maintenance and inventory management systems.** In: 2007 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2007. p. 1-12.

VOISIN, A. *et al.* **Generic prognosis model for proactive maintenance decision support: application to pre-industrial e-maintenance test bed.** Journal of Intelligent Manufacturing, v. 21, n. 2, p. 177-193, 2010.

WANI, M. F.; GANDHI, O. P. **Development of maintainability index for mechanical systems.** Reliability Engineering & System Safety, v. 65, n. 3, p. 259-270, 1999.