

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CURITIBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA E DE MATERIAIS**

DAVID LIRA NUÑEZ

**MODELAGEM DO PROGNÓSTICO E GESTÃO DA
SAÚDE DE MÁQUINAS MECÂNICAS NO CONTEXTO
DE SISTEMAS CIBERFÍSICOS NA MANUFATURA**

**CURITIBA
2017**

DAVID LIRA NUÑEZ

**MODELAGEM DO PROGNÓSTICO E GESTÃO DA
SAÚDE DE MÁQUINAS MECÂNICAS NO CONTEXTO
DE SISTEMAS CIBERFÍSICOS NA MANUFATURA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Engenharia Mecânica” - Área de Concentração: Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Milton Borsato

CURITIBA
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

N972m
2017 Lira Nuñez, David
Modelagem do prognóstico e gestão da saúde de máquinas mecânicas no contexto de sistemas ciberfísicos na manufatura / David Lira Nuñez -- 2017.
171 f. : il. ; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.

Texto em português, com resumo em inglês.

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2017.

Bibliografia: f. 116-138.

1. Ciberespaço. 2. Equipamentos industriais. 3. Comunicação máquina a máquina. 4. Internet das coisas. 5. Manutenção produtiva total. 6. Sistemas embarcados (Computadores). 7. Engenharia mecânica – Teses. I. Borsato, Milton, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD: Ed. 22 – 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária: Anna T. R. Caruso CRB9/935

TERMO DE APROVAÇÃO DE TESE Nº 11

A Tese de Doutorado intitulada: **Modelagem do Prognóstico e Gestão da Saúde de Máquinas Mecânicas no contexto de Sistemas Ciberfísicos na Manufatura**, defendida em sessão pública pelo Candidato **David Lira Nuñez**, no dia 14 de setembro de 2017, foi julgada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração: Engenharia de Manufatura, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Milton Borsato- Presidente - UTFPR

Prof^ª. Dr^ª. Carla Cristin Amodio Estorílio - UTFPR

Prof. Neri Volpato, PhD. - UTFPR

Prof. Dr. Fernando Deschamps - PUC - PR

Prof^ª. Dr^ª. Andreia Malucelli - PUC - PR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, ____ de _____ de 20 ____.

Carimbo e assinatura do Coordenador do Programa

A minha esposa Aliandra, meu pai Efrain e meus filhos Augusto e Carolina, que sempre foram meu motivo de superação constante.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, a Deus, por ter proporcionado condições, a mim e a minha família, durante o período em que estive dedicado aos estudos.

À minha esposa Aliandra e aos meus filhos Augusto e Carolina, pela compreensão durante minhas ausências, paciência nos momentos difíceis e infinito amor, sem os quais eu jamais teria conseguido chegar a esta etapa.

Ao Professor Milton Borsato, por sua valiosa orientação e pelo constante estímulo transmitido no compartilhamento do seu conhecimento durante todo o trabalho.

E, finalmente, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM), pelo acolhimento e impagável oportunidade.

RESUMO

LIRA, David N. **Modelagem do Prognóstico e Gestão da Saúde de Máquinas Mecânicas no contexto de Sistemas Ciberfísicos na Manufatura.** 2017. 171 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Materiais (PPGEM), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Os recentes avanços na manufatura inteligente abrem oportunidades na área do suporte industrial, especificamente na manutenção e gestão de ativos físicos. Essa tendência permite que os dados coletados das máquinas, quando estão em pleno funcionamento, possam interagir com computadores, (ciberspaço), através de uma rede de comunicação formando assim o conceito de Sistemas Ciberfísicos (CPS – do inglês *Cyber-Physical Systems*). Além disso, os rápidos avanços da tecnologia de informação e comunicação proporcionam ferramentas para que essa interação possa analisar os dados, de forma cada vez mais rápida, autônoma, ubíqua e em tempo real, oferecendo informações que auxiliam aos humanos na tomada de decisões mais eficazes. Nesse contexto, o Prognóstico e Gestão da Saúde de máquinas (PHM – do inglês *Prognostics Health and Management*) é indicado como uma aplicação promissora da manufatura inteligente dentro do contexto de CPS. Atualmente as propostas de PHM encontradas na literatura científica são aplicadas a casos específicos e sem uma padronização da sua implementação, impedindo que tais abordagens possam ser replicadas em diferentes cenários da manufatura. Assim, o presente trabalho propõe a construção de um modelo ontológico para auxiliar na implementação do PHM em diversos cenários de manufatura, a ser aproveitada futuramente por ferramentas de softwares com foco em manufatura inteligente, padronizando seus conceitos, termos, e a forma de coleta e tratamento de dados. A abordagem metodológica DSR (do inglês *Design Science Research*) é usada para guiar o desenvolvimento da pesquisa. A construção deste modelo ontológico, que integra tanto os dados coletados quanto as informações necessárias para a tomada de decisões, possibilita o controle da estimativa de uma falha antes dela ocorrer de uma forma mais autônoma. Os principais resultados do modelo ontológico construído são: uma ontologia flexível capaz de ser usada em vários tipos de máquinas mecânicas de diversos tipos de manufatura; a possibilidade de armazenar o conhecimento contido em normas internacionais, históricos de atividades das máquinas, e arquiteturas consolidadas no contexto do PHM, permitindo a constante atualização de dados dependendo de particularidades que cada processo produtivo pode conter, e finalmente, usando a linguagem SPARQL entrega-se informações que podem ser usadas para tomada de decisões em intervenções oportunas de manutenção nos equipamentos de uma indústria real. O modelo é demonstrado considerando o caso de uma bomba centrífuga que comprovou sua fidelidade, integridade, nível de detalhe, robustez e consistência, fornecendo informações anteriormente alimentadas por dados reais obtidos em empresas próximas.

Palavras-chave: Sistemas Ciberfísicos. Prognóstico e Gestão da Saúde. Análise de Dependabilidade. Engenharia de Ontologia.

ABSTRACT

LIRA, David N. **Prognostics and Health Management Modelling of Mechanical Machines in the Context of Cyber-Physical Systems in Manufacturing**. 2017. 171 f. Thesis (Doctor in Engineering) – Graduate School of Mechanical and Materials Engineering, Federal University of Technology - Paraná. Curitiba, 2017.

Recent advances in smart manufacturing open up opportunities in industrial support, specifically in maintenance and physical asset management. This trend allows data collected from machines, when are in full operation, to interact with cyberspace computers through a communication network, thus forming the concept of cyber-physical systems (CPS). Besides, rapid advances in information and communications technologies provide tools for analysing data, in an increasingly rapid, autonomously, ubiquitous and in real time way, providing information that assists humans in making better decisions. In this sense, Prognostics and Health Management (PHM) of machines, is indicated as a promising application of Smart Manufacturing in the CPS context. Currently the PHM proposals found in the scientific literature are applied to specific cases and without a standardization of their implementation, preventing such approaches from being replicated in different manufacturing scenarios. Thus, the present work proposes the construction of an ontological model to assist in the implementation of the PHM in several manufacturing scenarios, to be harnessed in the future by software tools focused on intelligent manufacturing, standardizing their concepts, terms, and the form of data collection and processing. The DSR (Design Science Research) methodological approach is used to guide the development of the research. The construction of this ontological model, which integrates both the collected data and the necessary information for the decision making, allows the control of the estimate of a failure before it occurs in a more autonomous way. The main results of the ontological model are: a flexible ontology capable of being used on several types of mechanical machines of various types of manufacturing; the possibility of storing the knowledge contained in international standards, machine history of activities, and consolidated architectures in the context of the PHM, allows the constant updating of data depending on particularities that each productive process can contain, and finally, using the SPARQL language, it is given information that can be used for decision-making in timely maintenance interventions in the equipment of a real industry. The model is demonstrated considering the case of a centrifugal pump that proved its fidelity, integrity, level of detail, robustness and consistency, providing information previously fed by real data obtained in nearby companies.

Keywords: Cyber-Physical Systems. Prognostics Health Management. Dependability analysis; Ontology Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da Revolução Industrial.....	2
Figura 2 - Taxonomia dos Sistemas Ciberfísicos.....	3
Figura 3 - Aplicações do PHM segundo arquitetura 5Cs.....	14
Figura 4 - Árvore representativa das possíveis avarias num elemento físico.....	18
Figura 5 - Propagação do erro.....	21
Figura 6 - Taxonomia do Prognóstico e Gestão da Saúde no contexto de CPS.....	33
Figura 7 - Degradação de um elemento mecânico de manufatura.....	35
Figura 8 - Típico desenvolvimento de uma falha em componentes mecânicos rotativos.....	45
Figura 9 - Tipos de ontologias aplicadas no PHM de máquina mecânicas.....	49
Figura 10 - Procedimento de modelagem de ontologia Uschold e King.....	51
Figura 11 - Procedimento de concepção e avaliação de ontologia Grüninger e Fox.....	52
Figura 12 - Processo de desenvolvimento e ciclo de vida de METHONTOLOGY.....	52
Figura 13 - Etapas sugeridas de acordo com o procedimento de desenvolvimento 101.....	53
Figura 14 - Etapas do Método de Pesquisa DSR.....	56
Figura 15 - Hierarquia de classes de nível 1, 2 e 3.....	73
Figura 16 - Hierarquia de classes de nível 4 e 5 para a classe Component.....	75
Figura 17 - Hierarquia de classes de nível 4 e 5 para a classe Machine.....	75
Figura 18 - Hierarquia de classes de nível 4 e 5 para a classe <i>Machine</i>	76
Figura 19 - Hierarquia das classes no modelo OntoProg.....	76
Figura 20 - Reagra transitiva SWRL.....	79
Figura 21 - Instâncias da subclasse Monitoramento de Condições.....	81
Figura 22 - Aserções alimentadas de regras transitivas elaboradas em swrlb.....	84
Figura 23 - Prefixo utfpr para conectar consultas SPARQL com OntoProg.....	85
Figura 24 - Grafo RDF das características do componente.....	85
Figura 25 - Grafo RDF das características FMSA do componente.....	87
Figura 26 - Grafo RDF das características de sintoma contidas no componente.....	89
Figura 27 - Grafo RDF das propriedades de dados da classe Causa Potencial de falha.....	95
Figura 28 - Ativando o reasoner Pellet para verificar inconsistência no modelo OntoProg.....	98
Figura 29 - Resultado da verificação de consistência.....	98
Figura A 1 - Fluxograma para análise de sintomas e modos de falha num componente.....	127
Figura A 2 - Detalhamento do equipamento para demonstração do artefato.....	128
Figura A 3 - Delimitação de fronteiras num equipamento bomba hidráulica.....	129
Figura A 4 - Estratificação dos componentes de uma máquina.....	130
Figura A 5 - Segunda fase da FMSA de componentes.....	131
Figura A 6 - Primeira fase da FMSA dos componentes mecânicos.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre a norma ISO e a arquitetura 5Cs para o tratamento de dados. .	15
Tabela 2 - Principais modos de falha e causa de um componente mecânico	20
Tabela 3 - Escala para avaliação dos efeitos dos modos de falha	42
Tabela 4 - Escala para detectar sintomas de um modo de falha	42
Tabela 5 - Escala para critério de detecção	42
Tabela 6 - Escala para avaliar o potencial de prognosticar um modo de falha	43
Tabela 7 - Propriedades de objeto no modelo OntoProg.....	77
Tabela 8 - Propriedade de dados no modelo OntoProg	77
Tabela 9 - Classes usadas para criar regras SWRL	79
Tabela 10 - Propriedade da OntoProg com regras SWRL.....	79
Tabela 11 - Instancias do modelo OntoProg	81
Tabela 12 - FMSA parcial para modelagem e demonstração do PHM	83
Tabela 13 - Resultado de consulta para identificar as características do componente	86
Tabela 14 - Resultado de consulta para identificar a FMSA do componente	88
Tabela 15 - Resultado de consulta para identificar sintomas para o diagnóstico do componente.....	90
Tabela 16 - Resultado de consulta para identificar técnicas de medição do componente.....	91
Tabela 17 - Resultado de consulta para identificar a melhor forma de monitorar o componente.....	93
Tabela 18 - Resultado de consulta para coleta correta de dados do componente.....	93
Tabela 19 - Resultado da consulta para a saber a saúde do componente	94
Tabela 20 - Resultado da consulta para a saber a causa da falha funcional	96
Tabela A 1 - Características e funções requeridas dos componentes selecionados.....	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI	Inteligência Artificial (do inglês - Artificial Intelligence)
ANSI	Instituto Nacional Americano de Normas (do inglês - <i>American National Standards Institute</i>)
API	Interface de Programação de Aplicação (do inglês - <i>Application Programming Interface</i>)
CBM	Manutenção baseada na condição (do inglês - <i>Condition-based Maintenance</i>)
CIM	Manufatura Integrada por Computador (do inglês- <i>Computer-Integrated Manufacturing</i>)
CLP	Controlador Lógico Programável
CM	Monitoramento da Condição (do inglês - <i>Condition Monitoring</i>)
CMfg	Manufatura em nuvem (do inglês - <i>Cloud Manufacturing</i>)
CPS	Sistemas Cyberfísicos (do inglês - <i>Cyber-Physical Systems</i>)
CRM	Gestão de Relacionamento com o Cliente (do inglês - <i>Customer Relationship Management</i>)
DFMEA	Análise de Modo de Falhas e Efeitos em Projetos (do inglês - <i>Design Failure Mode and Effect Analysis</i>)
DGN	Diagnosticabilidade
DIN	Instituto Alemão de Normas (do alemão - <i>Deutsches Institut für Normung</i>)
DET	Detectabilidade
DSR	Método de Pesquisa da Ciência de Concepção (do inglês - <i>Design Science Research</i>)
EAI	Integração de Aplicativos Corporativos (do inglês - <i>Enterprise Application Integration</i>)
EAM	Gestão de Ativos Empresariais (do inglês - <i>Enterprise Asset Management</i>)
ERP	Planejamento de Recursos Empresariais (do inglês - <i>Enterprise Resource Planning</i>)
ES	Sistemas Embarcados (do inglês - <i>Embedded Systems</i>)
ETA	Análise de Árvore de Eventos (do inglês - <i>Event Tree Analysis</i>)
ETTF	Estimativa de Tempo para Falha (do inglês <i>Estimated Time To Failure</i>)
EUA	Estados Unidos de América
FMEA	Análise de Modo de Falhas e Efeitos (do inglês - <i>Failure Mode and Effect Analysis</i>)
FMECA	Análise Crítica do modo de falha e efeito (do inglês - <i>Failure Mode, Effects and Criticality Analysis</i>)
FMSA	Análise de Sintomas e Modos de Falha (do inglês - <i>Failure Mode Symptoms Analysis</i>)
FTA	Análise de Árvore de Falhas (do inglês - <i>Failure Tree Analysis</i>)
HAZOP	Análise de Perigo e Operabilidade (do inglês - <i>Hazard and Operability Analysis</i>)
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto (do inglês - <i>Hypertext Transfer Protocol</i>)
IEC	Comissão Eletrônica Internacional (do inglês - <i>International Electrotechnical Commission</i>)
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (do inglês - <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)

IETF	Força Tarefa de Engenharia de Internet (do inglês - <i>Internet Engineering Task Force</i>)
ID	Identificação
IF	Fator de Impacto (do inglês - <i>Impact Factor</i>)
IoT	Internet das coisas (do inglês - <i>Internet of Things</i>)
IRI	Identificador de recurso internacional (do inglês - <i>International Resource Identifier</i>)
ISA	Sociedade Internacional de Automação (do inglês - <i>International Society of Automation</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (do inglês - <i>International Organization for Standardization</i>)
I4.0	Indústria 4.0 (do inglês - <i>Industry 4.0</i>)
JIT	Justo a Tempo (do inglês - <i>Just In Time</i>)
KF	Filtragem de Kalman (do inglês - <i>Kalman filter</i>)
KTH	Instituto Real de Tecnologia (do sueco - <i>Kungliga Tekniska Högskolan</i>)
LAMIS	Laboratório de Manufatura Inteligente e Sustentável
LOD	Dados Abertos Ligados entre si (do inglês - <i>Linked Open Data</i>)
LR	Regressão Lógica (do inglês - <i>Logical Regression</i>)
MAC	Controle de Acesso ao Meio (do inglês - <i>Media Access Control</i>)
M2M	Comunicação entre Máquinas (do inglês - <i>Machine-to-Machine</i>)
MES	Sistema de Execução da Manufatura (do inglês - <i>Manufacturing Execution Systems</i>)
MIL-STD	Normas Militares (do inglês - <i>Military Standard</i>)
MPN	Número de Prioridade de Monitoramento (do inglês - <i>Monitoring Priority Number</i>)
MTTF	Tempo Médio para Falha (do inglês - <i>Mean Time-to-Failure</i>)
NBR	Norma Brasileira
NIST	Instituto Americano de Normas e Tecnologia (do inglês - <i>National Institute of Standards and Technology</i>)
NFS	Fundação Nacional de Ciências (do inglês - <i>National Science Foundation</i>)
OEE	Eficiência Global dos Equipamentos (do inglês - <i>Overall Equipment Effectiveness</i>)
OntoProg	Ontologia de Prognóstico de falhas em componentes mecânicos
OPC UA	Plataformas de Comunicação Abertas de Arquitetura Unificada (do inglês - <i>Open Platform Communications Unified Architecture</i>)
OSA	Arquitetura de Sistemas abertos (do inglês - <i>Open System Architecture</i>)
OWL	Linguagem de Ontologia na Web (do inglês - <i>Web Ontology Language</i>)
PdM	Manutenção Preditiva (do inglês - <i>Predictive maintenance</i>)
PFMEA	Análise de Modo de Falhas e Efeitos em Processos (do inglês - <i>Process Failure Mode and Effect Analysis</i>)
PGN	Capacidade de Prognosticar
PHM	Prognóstico e Gestão da Saúde (do inglês - <i>Prognostics and Health Management</i>)
PLM	Gestão do Ciclo de vida do Produto (do inglês - <i>Product lifecycle management</i>)
PM	Manutenção Preventiva (do inglês - <i>Preventive maintenance</i>)
PN	Redes de Petri (do inglês - <i>Petri Net</i>)
RBD	Diagrama de Blocos de Confiabilidade (do inglês - <i>Reliability Block Diagrams</i>)

RCM	Manutenção Centrada na Confiabilidade (do inglês - <i>Reliability-centered Maintenance</i>)
RDF	Estrutura de Descrição de Recursos (do inglês - <i>Resource Description Framework</i>)
RF	Floresta Randômica (do inglês - <i>Random Forest</i>)
RFID	Identificação por Rádio Frequência (do inglês - <i>Radio-Frequency IDentification</i>)
RM	Manutenção Corretiva (do inglês - <i>Reactive maintenance</i>)
r.m.s.	Raiz do valor quadrático médio (do inglês - <i>root mean square</i>)
RPN	Número de Prioridade de Risco (do inglês - <i>Risk Priority Number</i>)
RUL	Vida útil remanescente (do inglês - <i>Remaining Useful Life</i>)
SAE	Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (do inglês - <i>Society of Automotive Engineers</i>)
SCADA	Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (do inglês - <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>)
SCM	Gestão da Cadeia de Suprimentos (do inglês - <i>Supply Chain Management</i>)
SE	Sistemas Especialistas
SEV	Severidade
SJR	Classificação de Periódicos Científicos (do inglês - <i>Scientific Journal Rankings</i>)
SNIP	Fonte Normalizada de Impacto por Artigo (do inglês - <i>Source Normalized Impact per Paper</i>)
SOA	Arquitetura Orientada a Serviços (do inglês - <i>Service Oriented Architecture</i>)
SPARQL	Linguagem de Consulta Seântica de banco de dados em RDF (acrônimo do inglês - <i>SPARQL Protocol and RDF Query Language</i>)
SVM	Máquina de Vetores de Suporte (do inglês - <i>Support Vector Machine</i>)
SWRL	Linguagem de Regras da Web Semântica (do inglês - <i>Semantic Web Rule Language</i>)
TC	Comitê Técnico (do inglês - <i>Technical Committee</i>)
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
TPM	Manutenção Produtiva Total (do inglês - <i>Total Productive Maintenance</i>)
TQM	Manutenção da Qualidade Total (do inglês - <i>Total Quality Maintenance</i>)
TSCH	Salto de canal com Slot de Tempo (do inglês - <i>Time Slotted Channel Hopping</i>)
UE	União Europeia
UTFPR	Universidade Tecnologia Federal do Paraná
W3C	do ingles - World Wide Web Consortium
WoS	do inglês - Web of Science
WWW	Rede Mundial de Computadores (do inglês - <i>World Wide Web</i>)
XML	Linguagem de Marcação Extensível (do inglês - <i>eXtensible Markup Language</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA.....	9
1.2	OBJETIVOS	10
1.2.1	Objetivo Geral	10
1.2.2	Objetivos Específicos	10
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	DADOS NOS SISTEMAS DE MANUFATURA.....	12
2.2	AMEAÇAS NOS SISTEMAS DE MANUFATURA	17
2.2.1	Avaria	17
2.2.2	Falha	19
2.2.3	Erro.....	21
2.3	GESTÃO DA SAÚDE EM SISTEMAS DE MANUFATURA	21
2.3.1	Manutenção Produtiva Total	24
2.3.2	Manutenção Centrada na Confiabilidade	25
2.3.3	Manutenção baseada na Condição	26
2.4	PROGNÓSTICO E GESTÃO DA SAÚDE	30
2.4.1	Degradação nos elementos da Manufatura.....	34
2.4.2	Técnicas de Análise de Dependabilidade.....	36
2.4.3	Técnicas para o monitoramento de condições dos elementos da manufatura.....	43
2.5	ONTOLOGIA.....	47
2.5.1	Engenharia de ontologia.....	50
3	ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	56
3.1	IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE DE PESQUISA E MOTIVAÇÃO.....	57
3.2	DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DA SOLUÇÃO	59
3.3	CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO	60
3.3.1	Determinação do Escopo.....	60
3.3.2	Consideração de reuso.....	61
3.3.3	Enumeração de termos	62
3.3.4	Definição de Classes e Hierarquias	62
3.3.5	Definição de propriedades e restrições.....	63
3.3.6	Criação de instâncias.....	64
3.4	DEMONSTRAÇÃO	65
3.5	AVALIAÇÃO E COMUNICAÇÃO	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	DESENVOLVIMENTO DO MODELO	68
4.1.1	Determinação do Escopo.....	68
4.1.2	Consideração de Reuso	70
4.1.3	Enumeração de Termos	71
4.1.4	Definição de Classes e Hierarquia.....	72
4.1.5	Definição de Propriedades e Restrições	77
4.1.6	Criação de Instâncias.....	80
4.2	DEMONSTRAÇÃO DO MODELO	82
4.3	AVALIAÇÃO E COMUNICAÇÃO DO MODELO	96
5	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	102
	APÊNDICES.....	125

APÊNDICE A - Representação Gráfica do Modelo Ontoprog.....	126
APÊNDICE B - Procedimento para Iniciar a FMSA.....	127
APÊNDICE C - Consultas SPARQL no modelo OntoProg	133

1 INTRODUÇÃO

A manufatura industrial tem passado por muitas mudanças tecnológicas ao longo dos anos para adaptar-se às demandas de cada revolução industrial. A primeira revolução industrial começou na Inglaterra no final do século XVIII, com a mecanização da indústria têxtil, graças à inserção do poder do vapor e à substituição da madeira pelo carvão como combustível. A segunda revolução industrial, em princípios do século XX, decorreu do uso da energia elétrica, quando Henry Ford inseriu o conceito de linha de produção em massa. A terceira revolução industrial começou no início de 1970 graças ao uso da eletrônica e à Tecnologia da Informação (TI) conseguindo a automatização dos processos de manufatura.

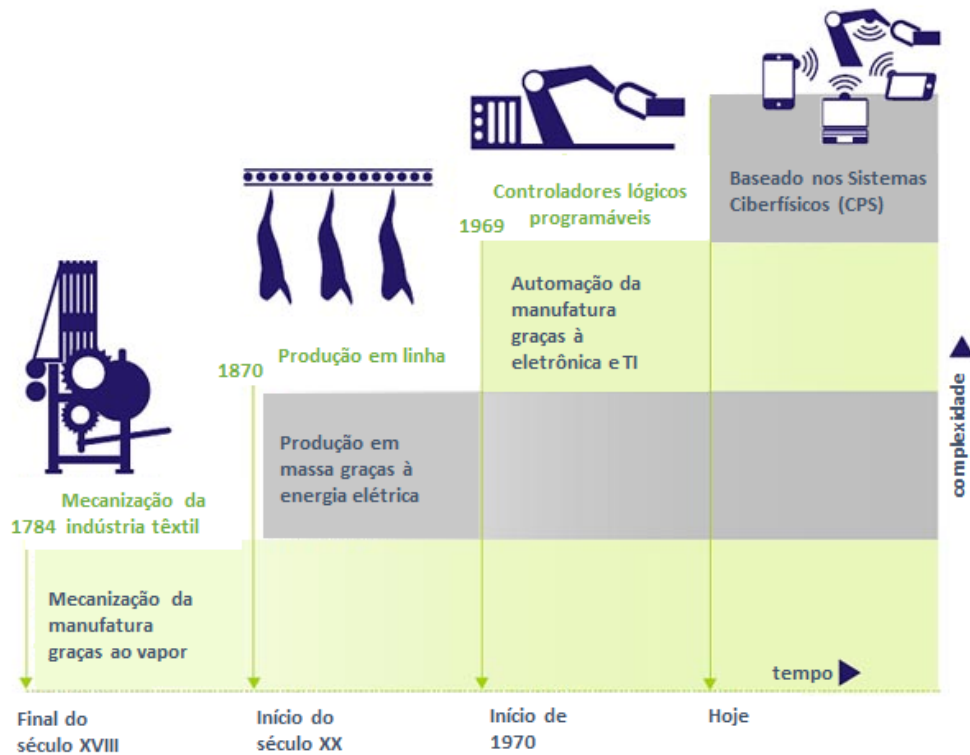
Na atualidade vivemos uma era caracterizada pela digitalização da manufatura, onde os dados desempenham um papel importante na tomada de decisões tanto no projeto como na fabricação de produtos cada vez mais integrados (IVEZIC; KULVATUNYOU; SRINIVASAN, 2014). Isto é possível graças a aplicações como a interação entre máquinas (M2M - do inglês *Machine-to-Machine*) usando: Sistemas Embarcados (ES - do inglês *Embedded Systems*), sensores, dispositivos móveis e tecnologia RFID (do inglês *Radio-Frequency IDentification*) conectados a uma rede, promovendo assim o tráfego e armazenamento de informações alimentadas por uma grande quantidade de dados (*Big Data*) (PISCHING et al., 2015). A Figura 1 apresenta tal evolução da indústria em sucessivas fases.

A Internet sem dúvida faz parte desta nova era ao oferecer a expansão de diversos serviços que usam o espaço cibernético como ferramenta de trabalho, permitindo ações colaborativas a qualquer hora, seja dentro ou fora de processos fabris, possibilitando uma comunicação ubíqua. Assim, vários dispositivos físicos do chão de fábrica, sistemas empresariais de manufatura, entre outros, são integrados para monitorar e controlar os elementos de uma manufatura (equipamentos, máquinas e componentes), de forma inteligente e conectada, criando a Internet das Coisas na Indústria (IoT - do inglês *Internet of Things*) (WANG; TÖRNGREN; ONORI, 2015).

Somado a isso, uma nova oportunidade que a Internet oferece é o armazenamento, compartilhamento e disponibilidade de informações, por meio da computação em nuvem, que cria novas oportunidades no auxílio do tráfego e interação de dados na manufatura (LEE; BAGHERI, 2015). Na indústria, este fenômeno está sendo chamado de manufatura em nuvem (CMfg - do inglês *Cloud Manufacturing*) (CAO et al., 2015), apontada como uma tendência

recente, com características sob demanda, orientada a serviços, centrada no cliente, dinamicamente escalável e reconfigurável, e com colaboração distribuída (WANG et al., 2015).

Figura 1 - Evolução da Revolução Industrial



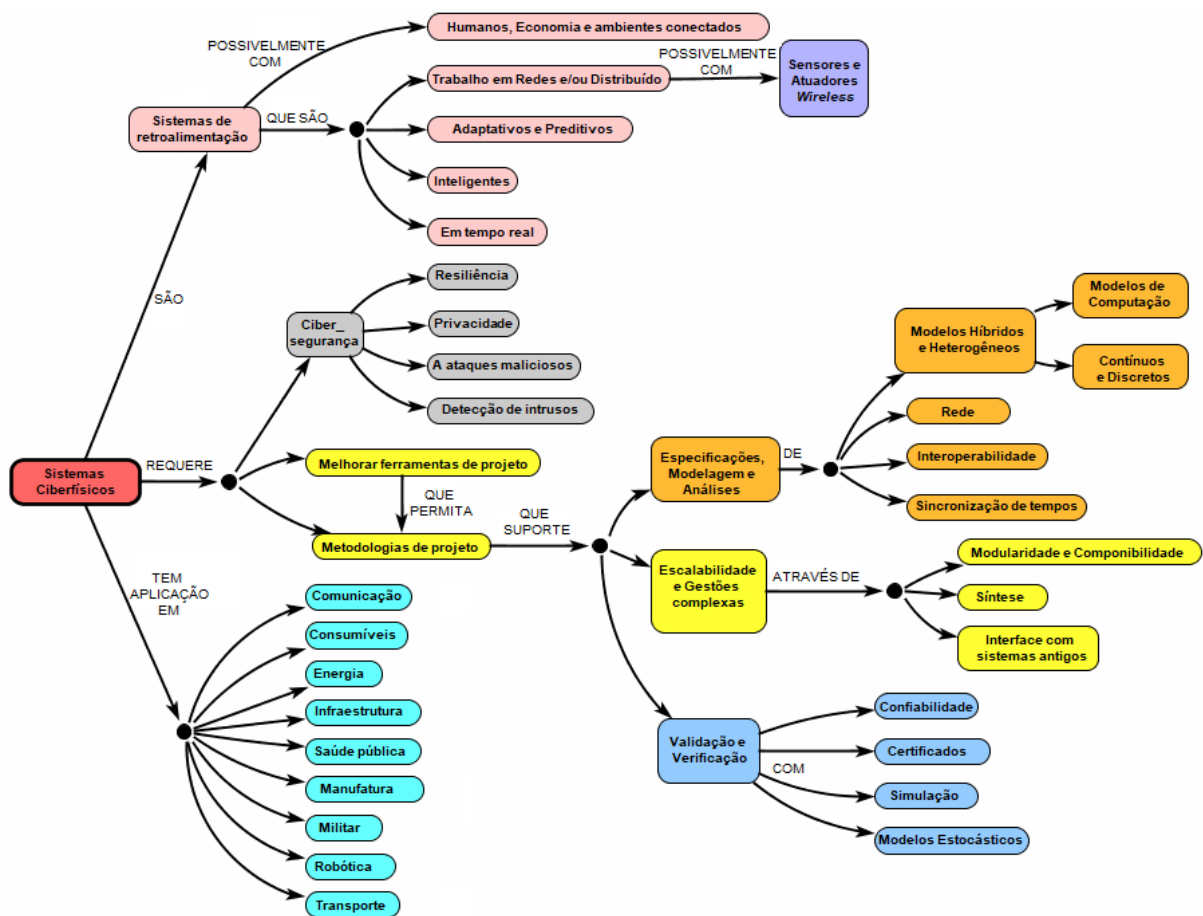
Fonte: Adaptado de Deutsches Forschungszentrum Für Künstliche Intelligenz (2017)

Todas essas novas demandas estão reunidas dentro do conceito de Sistemas Ciberfísicos (CPS - do inglês *Cyber-Physical Systems*), concebido em 2006 pela pesquisadora Helen Gill, do *National Science Foundation* (NFS), dos Estados Unidos de América (EUA), definido como a integração da computação, redes e processos físicos para melhorar o uso dos recursos de diferentes processos (WANG; TÖRNGREN; ONORI, 2015). Os CPS podem ter várias aplicações dentro das áreas de comunicação, transporte, energia, infraestrutura, saúde, segurança pública, civil, militar, robótica, e atendimento a desastres, dentre outras. Na área de manufatura CPS dão origem à denominada Manufatura Inteligente (chamada no inglês de *Smart Factory* ou *Smart Manufacturing*), melhorando a performance dos processos de operação com monitoramento e controle, mas além disso, desenvolvendo e implementando técnicas de medição, raciocínio e planejamento que incentivam a criação de sistemas colaborativos e cognitivos que têm como finalidade integrar cada vez mais o ser humano ao ambiente computacional (ciberespaço), ao contrário da abordagem de Manufatura Integrada ao Computador (CIM - do inglês *Computer-Integrated Manufacturing*), que auxilia os processos

de manufatura usando a computação, mas, apenas com a integração do controle e monitoramento de processos predefinidos (GORECKY et al., 2014).

Nesse sentido, o foco dos CPS é ir além do monitoramento e controle de vários dispositivos, máquinas e equipamentos de um processo de manufatura, por meio do uso da Internet, permitindo a comunicação de variáveis dinâmicas oriundas dos elementos físicos para com o sistema computacional e vice-versa, entregando assim informações atualizadas (PISCHING et al., 2015). Os CPS traduzem a tendência de ter informações e serviços em todo lugar e em tempo real, sempre e quando haja na indústria acesso a uma rede de Internet segura, estável e protegida (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). Assim, com o intuito de delimitar o termo CPS, e identificar claramente suas oportunidades junto à IoT, em 2012, integrantes das Universidades de Virginia, Stellenbosch e Berkeley, do Instituto Real de Tecnologia (KTH), e do NIST, criaram a taxonomia dos CPS, apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Taxonomia dos Sistemas Ciberfísicos



Fonte: Adaptado do mapa conceitual de CPS (2012)

Na Alemanha, as indústrias vêm acompanhando a tendência dos CPS e consideram que já está-se entrando numa quarta revolução industrial, denominada de *Industry 4.0* (I4.0) (GORECKY et al., 2014; IVEZIC; KULVATUNYOU; SRINIVASAN, 2014; JAZDI, 2014; PISCHING et al., 2015). O termo I4.0 foi usado pela primeira vez em 2011, na tradicional feira de inovação e tecnologia de *Hanover* (JAZDI, 2014), e em 2013, na mesma feira, foram apresentadas formalmente pelo governo alemão, por meio de um relatório, as principais características da I4.0 e uma proposta com recomendações para sua implementação como estratégia para a União Europeia (UE) (PISCHING et al., 2015). Graças a esse tipo de iniciativas, em 2014, a UE criou um programa chamado de *Horizon2020*, para a pesquisa e inovação de infraestruturas digitais e tecnologias emergentes que podem ter aplicação na Manufatura Inteligente.

As principais pesquisas aplicadas ao conceito de CPS estão relacionadas ao fornecimento de serviços, denominadas de abordagens da Arquitetura Orientada a Serviços (SOA - do inglês *Service Oriented Architecture*), alavancando novas oportunidades de suporte na Manufatura Inteligente (DI ORIO; CÂNDIDO; BARATA, 2015). Não obstante, a nova tendência na manufatura demanda, além de aplicações inteligentes, a criação de protocolos e arquiteturas de comunicação que permitam a correta coleta de dados para sua gestão em sistemas, subsistemas e suas interações complexas. Assim, segundo Gao et al. (2015), uma abordagem que faz possível isto é o Prognóstico e Gestão da Saúde, (PHM - do inglês *Prognostics and Health Management*), que vem alavancando as aplicações inteligentes na manufatura para aprimorar a integração homem-máquina, por meio de métodos específicos que ajudem a compreender e tratar o comportamento das máquinas (NIU; LAU; PECHT, 2010; LEE et al., 2014; BOUZIDI et al., 2016; LADJ; VARNIER; TAYEB, 2016; LIU et al., 2016; LEE; JIN; BAGHERI, 2017; SHI; LEE; CUI, 2017; TONG et al., 2017; WU et al., 2017b; WU et al., 2017a). Embora o termo prognóstico venha da Medicina, a Manutenção e Gestão de ativos físicos inseriu-o na área da Engenharia Mecânica, e mais especificamente na Engenharia de Manufatura (LEE et al., 2014).

Dentro do contexto do PHM, Crespo Márquez et al. (2014) destacam pesquisas como o *Watchdog Agent*, *Telma Platform* e *Proteus*, que processam dados através de algoritmos vindos de modos de falha, históricos de intervenções de manutenção, recomendações do fabricante (projeto) e, fundamentalmente, de sinais emitidos em tempo real, provenientes de sensores instalados nas máquinas, para permitir a estimativa da vida útil remanescente (RUL - do inglês *Remaining Useful Life*) (QU et al., 2016). Mas estas aplicações são pontuais para

determinados casos e não apresentam abordagens mais amplas que possam ser revertidas em qualquer tipo de manufatura.

Outro destaque do PHM são os benefícios que traz à manufatura no aumento da confiabilidade e disponibilidade operacional, que se reflete significativamente na sobrevivência e competitividade de uma empresa. Isso porque à medida que o tempo de operação aumenta, a confiabilidade e disponibilidade tendem a diminuir. Logo, assegurar operações eficientes durante o processo de manufatura torna-se uma tarefa crítica e relevante (FRITZSCHE; GUPTA; LASCH, 2014).

Tradicionalmente, a manutenção preventiva sistemática baseada no tempo realiza intervenções periódicas nos equipamentos com intervalos predefinidos, independente das suas condições ou necessidades atualizadas de operação, não sendo eficazes na redução de falhas, por não proporcionarem dados atualizados sobre a RUL, além de gerarem custos elevados para a organização (JARDINE; LIN; BANJEVIC, 2006).

Ao contrário de abordagens baseadas em períodos predefinidos, PHM promove intervenções oportunas de manutenção baseada na condição (CBM - do inglês *Condition-based Maintenance*). Assim, os dados recebidos geram informações de medições dos estados de funcionamento atualizados das máquinas sem interromper as operações normais dos processos de uma manufatura (NI; GU; JIN, 2015).

Nesse contexto, a melhor forma de coletar dados de condição de funcionamento de uma máquina é nos componentes mecânicos rotativos, usando técnicas preditivas como: Análise de Vibrações, Análise de Óleo, Termografia, Ultrassom, e Inspeção Sensitiva (ISO 17359, 2011). Dentre essas técnicas, a Análise de Vibrações destaca-se entre as outras por conseguir antecipar a identificação de uma falha funcional com antecedência de 1 a 9 meses, já a Análise de Óleo antecipa a falha entre 1 a 6 meses, Termografia entre 3 a 12 semanas, Ultrassom entre 5 a 8 semanas, e Inspeção Sensitiva entre 1 a 4 semanas. Embora a Análise de Vibração destaca-se comparada com outras técnicas de monitoramento, dependendo do tipo de componente a ser monitorado, devem ser aplicadas combinações de duas ou mais técnicas preditivas para garantir uma coleta correta de dados e conseqüentemente um bom monitoramento (DE SIQUEIRA, 2009; HASHEMIAN; BEAN, 2011; SHIN; JUN, 2015).

Na literatura científica, para o PHM encontram-se pesquisas sobre técnicas de diagnóstico que vêm sendo desenvolvidas há algum tempo com resultados expressivos: Jedrzejewski (1985) aborda a seleção de métodos de diagnóstico para validar o uso do PHM em máquinas-ferramentas. Specht, Weiss e Spur (1992) apresentam modelos de aprendizagem

para realizar tarefas de diagnóstico de falhas. Ryu e Park (1998) abordam mecanismos de diagnóstico baseados em análises estatísticas. Altug, Mo-Yuen e Trussell (1999) abordam aplicações de Redes Neurais e lógica Fuzzy para detecção e diagnóstico de falhas em elementos mecânicos. Chen, He e Yang (2012) apresentam o uso do diagnóstico para detectar avarias em tempo real em rolamentos. Kim e Seong (2007) discutem os efeitos dos tipos de informação que colaboram com o diagnóstico. Portinale (1997) modela o raciocínio e representação do conhecimento do diagnóstico através de redes de Petri.

Quando usadas técnicas de diagnóstico, os motivos de falha podem ser detalhados através do uso de métodos de análise de dependabilidade, como a Análise dos Efeitos e Criticidade dos Modos de Falha (FMECA - do inglês *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), apontada pela pesquisa científica como a forma mais organizada para captura do conhecimento envolvido nos processos industriais (VOGL; WEISS; DONMEZ, 2014b). Logo, esses modos de falha podem ser representados e avaliados formalmente para aplicações de inteligência artificial (AI - do inglês *artificial intelligence*), especificamente como Sistemas Especialistas, que podem ser desenvolvidos por um modelo ontológico que imita a capacidade de tomada de decisão de um especialista humano (KARRAY; CHEBEL-MORELLO; ZERHOUNI, 2013; 2014).

Por outro lado, pesquisas sobre prognóstico têm crescido baseadas na CBM. Jardine et al (2006), resumem as tecnologias para o diagnóstico e prognóstico com base no uso da CBM. Peng et al. (2010) e Dawn et al. (2013) revisam técnicas típicas de prognóstico e apresentam uma análise de pontos fortes e fracos. Si et al. (2011) discutem abordagens estatísticas para o prognóstico. Sikorska et al. (2011) comparam diferentes opções de modelagem para a estimativa de RUL, a partir da perspectiva de aplicações industriais e empresariais. Baraldi (2013) pesquisa as capacidades da abordagem de prognóstico para lidar com várias fontes de incertezas na previsão da RUL. Heng et al. (2009) discutem os potenciais benefícios, desafios e oportunidades associados com o prognóstico em máquinas rotativas. Wang et al. (2015) apresentam o novo paradigma do prognóstico aplicado na manufatura em nuvem. Lee et al. (2014) propõem uma metodologia para identificar o tipo de técnica de prognóstico a ser usada em máquinas rotativas. Moghadda e Zuo (2014) apresentam uma estrutura que integra diagnóstico e prognóstico aplicando processos de deterioração multiestados.

Dessa forma, pode-se afirmar que o prognóstico de falhas é uma demanda mais recente que não exclui e sim precisa do diagnóstico de falhas junto a abordagens de CBM para aumentar o monitoramento, controle e tratamento de máquinas nos processos de manufatura, desde que

haja uma coleta correta de dados. Assim, tanto o diagnóstico como o prognóstico de falhas podem ser modelados por meio de ontologia para representar um sistema especialista que ofereça resultados cada vez mais eficazes na indústria, atendendo assim ao contexto de Manufatura Inteligente.

Na atualidade, os processos de manufatura são caracterizados por novas tecnologias que promovem maior fluxo de dados e informações. Essas tecnologias, no entanto, precisam auxiliar na tomada de decisões de forma mais rápida e eficaz sem interromper os processos em andamento, adaptando-se a novas situações usando dados em tempo real para tomada de decisão autônomas, além de prever e prevenir falhas de forma proativa. Para suportar esta tendência, a manufatura precisa atender requisitos rigorosos que padronizam, por meio de normas, os processos na manufatura, garantindo assim um bom desempenho às organizações usando modelos ontológicos que podem representar formalmente os processos da manufatura sem interromper seu funcionamento, relacionando seus conceitos e criando conexão entre suas definições, além de realizar a hierarquia das suas etapas e conseqüentemente permitindo uma captura e análise de dados atuais e novos para entrega de informações que alavanquem a tomada de decisões dos processos na manufatura (JUNG et al., 2015).

Algumas abordagens de sistemas especialista para representar o PHM são encontradas em Medina-Oliva et al. (2014), que apresentam o diagnóstico preditivo baseado em uma abordagem de ontologia. Sanislav, Mois e Miclea (2016) apresentam uma ontologia de dependabilidade no contexto de CPS. Silva e Pereira (2014) desenvolvem uma ontologia para o suprimento de peças sobressalentes na manutenção dentro do contexto de CPS. Zhou, Yu e Zhang (2015), propõem uma ontologia para o diagnóstico de falhas em turbinas eólicas baseada em FMECA. Zhou, Yan e Xin (2017) pesquisam métodos para a modelagem do conhecimento no diagnóstico de falhas de máquinas-ferramentas baseadas em ontologias. Assim, pode-se afirmar que a ontologia pode ser usada para representar formalmente o conhecimento dos modos de falha em máquinas mecânicas, para gerar soluções de raciocínio e/ou inferências na manufatura que alavanquem a CBM no contexto de Manufatura Inteligente (PISTOFIDIS et al., 2016).

Para oferecer uma proposta a ser aplicada em qualquer tipo de manufatura, é recomendado que a padronização dos termos e conceitos do PHM, para a coleta e tratamento de dados, adote normas internacionais tais como, *International Organization for Standardization* (ISO) e *International Electrotechnical Commission* (IEC), que concentram o conhecimento de vários especialistas ao longo dos tempos (ISO 17359, 2011). Além disso, a

representação formal que integra dados quantitativos e/ou qualitativos, e ofereça uma terminologia padrão, que não só alavanca a gestão de dados, mas também permita decisões cada vez mais precisas e rápidas, é possível através de modelos baseados em ontologia (NUÑEZ; BORSATO, 2017). Estes modelos devem representar o domínio do PHM baseado em fenômenos físicos, oriundo do histórico de variáveis numéricas, para garantir o funcionamento correto dos sistemas de manufatura (YIN et al., 2015).

Na manufatura, pesquisas no PHM têm obtido bons resultados quando se abordam as máquinas rotativas, tais como, ventiladores, bombas, motores elétricos, compressores, turbinas, geradores elétricos, motores de combustão e caixa de engrenagens, e mais especificamente em seus componentes rotativos, tais como, mancais de rolamentos, mancais deslizantes, eixos, engrenagens, rotores, impulsores, polias, selos mecânicos, acoplamentos e lubrificantes. Algumas aplicações mais destacadas são citadas por Lee et al. (2014).

Assim, o presente trabalho visa a padronização dos conceitos envolvidos no PHM, formalizando a captura do conhecimento, vindo de profissionais envolvidos numa determinada máquina, além do detalhamento da coleta e gestão de dados, alimentada pelo estado de funcionamento das máquinas. O conhecimento é extraído usando técnicas de análise de dependabilidade focadas no diagnóstico de modos de falhas, junto ao monitoramento de condições usando técnicas preditivas de análise de vibrações. Assim, o trabalho desenvolve a modelagem formal do domínio de PHM, usando ontologia, capaz de fornecer condições de saúde dos componentes de uma máquina, que futuramente poderão ser aproveitados por softwares para aplicações oportunas na manutenção dentro do contexto de CPS.

Frente ao exposto, considera-se que o PHM alavanca a Manufatura Inteligente e, para tal, precisa de padrões e procedimentos que auxiliem no seu entendimento e implementação, integrando-os assim às novas aplicações motivadas pelo potencial da IoT (ZHANG; CHENG; BOUTABA, 2010; WU et al., 2013; STANKOVIC, 2014). Assim, para efeito desse trabalho, elegemos como problemática central (ou oportunidade de pesquisa), seis questões a serem respondidas:

- Quais são os termos e conceitos adotados em normas que abordam a implementação do PHM?
- Como implantar parâmetros de monitoramento de condições em modelos ontológicos?

- Como usar as técnicas de análise de dependabilidade para a captura de conhecimento do diagnóstico e prognóstico de falhas em componentes mecânicos?
- Como construir formalmente o modelo ontológico do PHM?
- É possível modelar o PHM de uma forma suficientemente abrangente e genérica para aplicações em diversas máquinas mecânicas?
- Como avaliar a aplicabilidade do modelo criado para o PHM?

1.1 JUSTIFICATIVA

A gestão dos elementos de uma manufatura, desde sua origem até a atualidade, tem passado por grandes mudanças, devido ao grande desenvolvimento tecnológico ocorrido em termos de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) que demanda um planejamento e controle na manufatura cada vez mais eficiente, remoto e em tempo real. Também, pode-se mencionar que estes elementos devem atender exigências que se expressam na necessidade de serviços ubíquos, rápidos, com maiores especificações sejam únicas e/ou novas dentro de aplicações no contexto de CPS.

Assim, considerando o PHM como uma abordagem capaz de satisfazer tal demanda, no estado da arte levantado nos principais periódicos, eventos e publicações da área de engenharia de manufatura e mecânica, percebe-se a carência de técnicas que permitam uma abordagem completa do prognóstico e gestão da saúde em máquinas mecânicas da manufatura. Fora disto, independentemente de técnicas adotadas, um dos maiores desafios indicados pela literatura científica está na generalização que o PHM pode oferecer para a manufatura, visto que a grande maioria de pesquisas são desenvolvidas para um tipo específico de máquina ou componente sob certas condições de operação. Embora, algumas pesquisas usem algoritmos estatísticos, os mesmos, não são capazes de lidar com incertezas geradas por erros na alimentação e/ou coleta de dados, que constituem a principal fonte de processamento. Assim, o mundo acadêmico indica que propostas abrangentes que auxiliem na operacionalização do PHM devem continuar sendo desenvolvidas, através de procedimentos que possam, no futuro, formalizar a sua representação e uso em qualquer tipo de situação e processos de uma manufatura dentro do contexto de CPS (IEEE PHM, 2017; IMS, 2017; NIST, 2017; PHM-SOCIETY, 2017).

Além disso, sob o pressuposto de que os elementos de uma manufatura sempre apresentam ocorrências de falhas, é fundamental o desenvolvimento de novas formas de conhecer seu detalhamento e comportamento, para o adequado tratamento após coleta de dados durante seu funcionamento no chão de fábrica. Desta forma, a construção de um modelo ontológico que integre tanto os dados coletados quanto as informações necessárias para a tomada de decisões possibilita o controle da estimativa de uma falha antes dela ocorrer de uma forma mais autônoma (inteligente).

Também, a justificativa deste trabalho está na ausência da padronização da coleta e tratamento desses dados que são usados para o monitoramento e diagnóstico de elementos mecânicos que possibilitem aplicações genéricas na implementação do PHM na manufatura. Assim, a oferta de uma ontologia oferece a oportunidade de formalizar e integrar tais ambientes. Não obstante, embora no início da representação do PHM possa se contar com várias informações de especialistas contidas em normas, somente através da modelagem do PHM numa ontologia pode ser refinado, compartilhado e aprovado o conhecimento para futuras aplicações reais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é propor um modelo ontológico que oriente a implementação do Prognóstico e Gestão da Saúde em máquinas mecânicas num ambiente de manufatura, dentro do contexto de Manufatura Inteligente.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos direcionam o presente trabalho a alcançar o objetivo geral:

- Identificar as normas que padronizem aos conceitos de prognóstico e gestão da saúde;

- Identificar uma arquitetura aceita pelo mundo científico para representação do PHM na manufatura por meio de um modelo ontológico;
- Propor um modelo ontológico do PHM, de modo que possa ser utilizado em diversas máquinas mecânicas de uma manufatura; e
- Demonstrar a aplicabilidade do modelo proposto, avaliando-o com dados reais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em 6 capítulos. No capítulo 1, encontra-se a introdução que aborda o estado da arte dos temas de interesse no desenvolvimento da tese, começando com uma descrição dos aspectos mais relevantes dos sistemas de manufatura, suas áreas de suporte e principais avanços e tendências, além da identificação de oportunidade da presente pesquisa. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para entender a proposta de solução do problema (oportunidade de pesquisa), começando pela definição dos principais sistemas de manufatura, suas principais formas de gestão da saúde, seguido dos principais conceitos relacionados ao monitoramento de condições, diagnóstico de prognóstico. Finalmente, nesse capítulo é apresentada a engenharia de ontologia como forma de modelar o domínio do PHM.

No capítulo 3 são introduzidos os aspectos metodológicos, assim como detalhamento das características da presente pesquisa. No capítulo 4 são apresentados os resultados da construção do modelo do PHM denominado de OntoProg. Finalizando, no capítulo 5 são realizadas as considerações finais do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O principal intuito deste capítulo é subsidiar o entendimento do objetivo da pesquisa, dessa forma, ele foi dividido em cinco subseções. A subseção 2.1 traz uma síntese do referencial teórico sobre sistema de manufatura e as formas de comunicação existentes. A subseção 2.2 traz principais ameaças que os sistemas de manufatura enfrentam. Na subseção 2.3 são apresentadas as características da manutenção como gestão da saúde de um sistema de manufatura, suas principais abordagens e estratégias. Posteriormente, na subseção 2.4 são resumidas as abordagens mais relevantes do prognóstico e gestão da saúde na manufatura. Por sua vez, na subseção 2.5 são apresentadas as definições, abordagens e conceitos envolvidos na modelagem de sistemas usando ontologia.

2.1 DADOS NOS SISTEMAS DE MANUFATURA

De acordo com Alfieri et al. (2013), sistema é um conjunto de elementos que interagem para atingir objetivos específicos, e suas relações entre si que determinam seu funcionamento. Além disso, considera-se que um sistema possui partes físicas e lógicas que desenvolvem e realizam determinadas operações sob demanda.

A origem da palavra manufatura, vem do latim (*manus + factus*), que significa “feito à mão”, mas com o decorrer dos anos, este termo foi sendo adotado para qualquer tipo de processo intensivo em mão-de-obra para a produção de produtos (COELHO; OLIVEIRA; GUERRINI, 2005).

A união de sistema com manufatura é, para Benkamoun et al. (2014), o processo que integra métodos, técnicas e práticas para a transformação de matérias-primas em produtos acabados ou materiais processados, dentro do ciclo de vida de um produto, através de software, e ativos físicos (equipamentos, máquinas, componentes e dispositivos) interconectados a um meio de transporte e/ou manuseio com ou sem a intervenção da mão humana, mas que precisa de controle de qualidade, manutenção, programação, planejamento, produção e controle de estoque (AZAB; NADERI, 2015).

Samy, Algeddawy e Elmaraghy (2015) consideram o sistema de manufatura como um conjunto de atividades e operações necessárias na produção de produtos que dependem de: insumos, processo de transformação e produtos fabricados, que têm seus processos afetados em função da complexidade dos seus ativos físicos e operações de produção demandando sistemas

de monitoramento e controle cada vez mais interconectados e seguros. Esta complexidade se deve em grande parte à variedade de funções dos elementos de um sistema de manufatura e à gama de possibilidades de layouts (ELMARAGHY, H. et al., 2014).

Em toda organização, a manufatura representa a maior parte do seu capital e, estando saudável, pode enfrentar a concorrência do mercado mantendo um desempenho competitivo que proporciona versatilidade operacional que pode atender as demandas cada vez mais exigentes do cliente (LIRA et al., 2008).

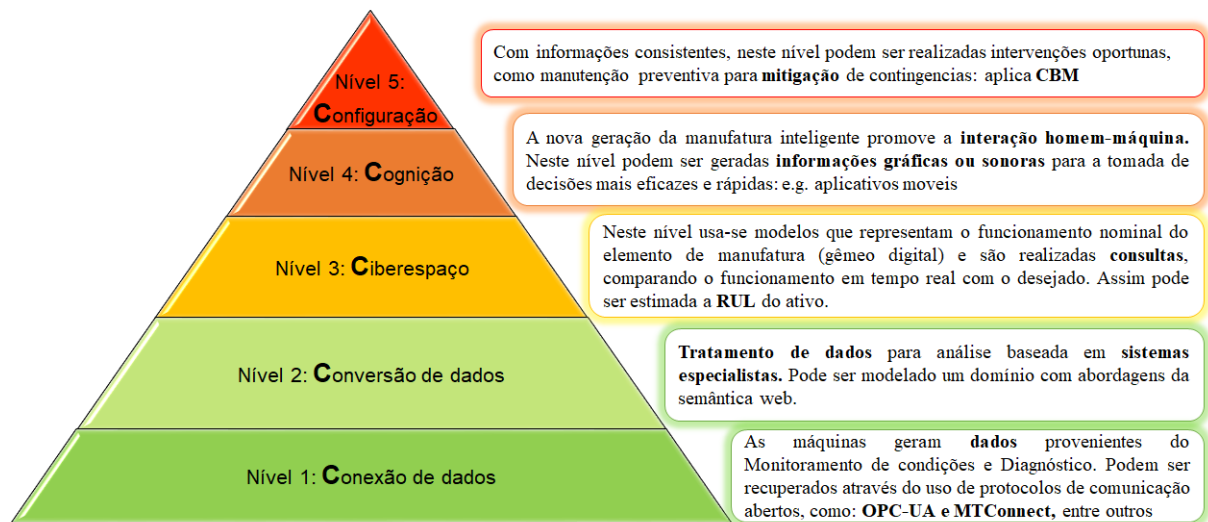
Nesse contexto, nos diversos sistemas de manufatura, seus dados devem ser extraídos para análise do funcionamento correto dos seus ativos físicos. Esses dados trafegam no chão de fábrica em sensores, dispositivos móveis, atuadores, Controlador Lógico Programável (CLP) e no controle supervisão de aquisição de dados (SCADA - do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*), até se comunicarem com o Sistema de Execução da Manufatura (MES - do inglês *Manufacturing Execution Systems*). Por sua vez, esses dados são processados e passam informações desde o MES até os programas empresariais de planejamento da manufatura, tais como, Gestão da Cadeia de suprimentos (SCM - do inglês *Supply Chain Management*), Gestão do Relacionamento como Cliente (CRM - do inglês *Customer Relationship Management*), Gestão do Ciclo de vida do Produto (PLM - do inglês *Product Lifecycle Management*) e Planejamento de Recursos Empresariais (ERP - do inglês *Enterprise Resource Planning*) (IVEZIC; KULVATUNYOU; SRINIVASAN, 2014; LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

Os dados também precisam trafegar para conseguir a comunicação entre máquinas - M2M, por meio de protocolos de comunicação para uma interoperabilidade de funções entre seus CLP. Para tal, o OPC (Comunicação em Plataforma Aberta - do inglês *Open Platform Communications*), mantido pela fundação OPC (2015), apresenta sua nova ferramenta denominada OPC de arquitetura unificada (UA - do inglês *Unified Architecture*) que é um protocolo que permite a comunicação segura entre máquinas. OPC UA se destaca por suportar protocolos padrão da Internet (OKSANEN; PIIRAINEN; SEILONEN, 2015).

Além disso, no trabalho de Esmaeilian et al. (2016), em que realizam uma revisão da evolução e o futuro dos sistemas de manufatura, desde 1999 até a atualidade, sobre novos paradigmas oriundos da análise de dados no CPS, apontam a proposta abordada por Lee, Bagheri e Kao (2015) como a arquitetura para orientar o tratamento de dados do PHM numa Manufatura Inteligente, entre o nível inferior (sensores, atuadores e sistemas embarcados) e o MES de gestão de ativos físicos da manufatura (EAM - do inglês *Enterprise Asset Management*). Sendo detalhado em 5 níveis: Conexão, Conversão, Ciberespaço, Cognição e

Configuração, denominados de arquitetura 5Cs. Assim, para futuras aplicações do PHM na manufatura no contexto de CPS pode ser seguida a arquitetura ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Aplicações do PHM segundo arquitetura 5Cs



Fonte: Adaptado de Lee, Bagheri e Kao (2015)

A arquitetura 5Cs pode ser comparada com a norma internacional de comunicação e processamento de dados ISO 13374-1 (2003) que apresenta blocos de processamento para tratar os dados do prognóstico de máquinas (VOGL; WEISS; DONMEZ, 2014b), apresentada na Tabela 1.

A norma ISO-13374-1 pode ser implementada seguindo Sistemas de Arquitetura Aberta (OSA - do inglês *Open System Architecture*) usando o protocolo OSA-CBM 3.3.1 (2010), auxiliando na integração de diversos softwares e hardwares para coleta de dados permitindo a padronização das interfaces de entrada e saída, promovendo a colaboração no desenvolvimento de novos aplicativos.

Por sua vez, os dados para a gestão dos processos numa manufatura, podem ser guiados com a norma ISO 15704 (2000) revisada em 2010, que apresenta os requisitos para arquiteturas e metodologias de referência empresarial que organizam as fases do ciclo de vida de um projeto empresarial desde sua identificação, concepção, requerimentos, criação, implementação, operação e desativação ou obsolescência, considerando as pessoas, processos e equipamentos envolvidos na execução, gestão e controle da empresa. Já para aplicações específicas do ciclo de vida do equipamento da manufatura, os dados podem ser seguidos pela norma ISO 55000 (2014) que descreve a visão geral da gestão de ativos físicos.

Por outro lado, a norma IEC-62264 (2013) auxilia os dados no detalhamento da gestão de operações de manufatura e suas atividades que permitem a integração entre operações de

manufatura com sistemas de controle. Esta norma foi desenvolvida baseada na norma ANSI/ISA-95 (2010). Somado a isto, a Integração de Aplicativos Empresariais (EAI - do inglês *Enterprise Application Integration*), pode ser auxiliada com o protocolo OSA-EAI V3.2.3A (2014) que fornece um padrão de troca de dados para facilitar o compartilhamento do registro de um elemento de manufatura, suas condições, manutenção e confiabilidade entre os sistemas de uma empresa.

Tabela 1 - Comparação entre a norma ISO e a arquitetura 5Cs para o tratamento de dados.

Níveis dos 5Cs	Descrição	Blocos da ISO	Descrição
1C Conexão	Aquisição de dados precisos e confiáveis de máquinas e seus componentes.	Aquisição de Dados	Converte uma saída do transdutor a um parâmetro digital que representa uma grandeza física.
2C Conversão	Após receber os dados, estes devem ser processados com métodos orientados por dados específicos, para criarem um gráfico comportamental do estado de funcionamento da máquina, i.e., RUL.	Manipulação de dados	Realiza análise de sinais, calcula descritores significativos e deriva leitura dos sensores virtuais a partir de medições em bruto.
3C Cibernética	Nesse nível é feita a comparações entre dados obtidos em tempo real, e modelos que representam um sistema nominal ou correto, sem falhas funcionais.	Detecção de Estado	Facilita a criação e manutenção da linha base de comportamento, procura por anomalias sempre que novos dados são adquiridos, e determina em qual zona anormal, se for o caso, os dados pertencem (por exemplo, "alerta" ou "alarme").
		Avaliação da saúde	Realiza o diagnóstico de eventuais falhas e levantamento da taxa de saúde atual do componente, considerando todas as informações de estado.
4C Cognição	Apresenta de forma gráfica, (indicadores, diagramas, etc.), resultados dos dados processados do ciberespaço, oferecendo informações do estado atual de componente em relação à sua RUL estimada	Avaliação prognóstica	Determina estados de saúde futuros e modos de falha com base na avaliação de saúde atual do equipamento.
5C Configuração	Nível que alimenta a CBM, para planejamento e programação de ações de mitigação de falhas ou determinar a parada emergencial do sistema.	Geração de consultas	Fornecer informações úteis sobre a manutenção necessária para otimizar a vida útil do equipamento.

Fonte: Adaptado de ISO 13374-1:2003 e Lee, Bagheri e Kao (2015)

Por outro lado, dentro do contexto de CPS, a coleta desses dados vindos de dispositivos sem fio (sensores, dispositivos moveis, etiquetas RFID, entre outros) pode ser realizada usando a junção dos protocolos do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE - do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) alavancados pela força tarefa de engenharia

da Internet (IETF do inglês *Internet Engineering Task Force*) para a confiabilidade dos dados e futuras aplicações no PHM. Assim, os dispositivos poderão ser padronizados com protocolos, tais como o IETF 6TSCH e encapsulados nos seus quadros ou pacotes físicos associados (MAC - do inglês *Media Access Control*), padronizados pela IEEE 802.15.4e (PALATTELLA et al., 2013; FERNANDES; BRANDÃO, 2016; VERMA et al., 2016).

Além disso, durante os últimos anos, as tecnologias semânticas emergiram progressivamente como uma resposta aos desafios de uma nova geração de sistemas que tratam os dados desde uma nova perspectiva extremamente exigente em termos de comunicação de dados. À medida que mais e mais sistemas estão atualmente usando ou referindo tecnologias semânticas, a terceira versão desafiadora da semântica web (ou Web 3.0) está tomando forma progressivamente. Embora a tecnologia tenha progredido para abraçar uma semântica significativa, agora as tecnologias semânticas devem evoluir cada vez mais e ter que lidar exaustivamente com conjuntos maiores de requisitos de vários domínios (PILEGGI, 2015).

Assim, a Web 3.0 é o conceito da próxima evolução da web (*World Wide Web*) no contexto de como vincular, integrar e analisar dados de várias fontes para obter novos fluxos de informações. Portando, a Web 3.0 visa ligar diversos dispositivos para gerar novas abordagens de conexão à Internet, alavancando a comunicação M2M (PATTNAYAK; PATTNAIK, 2016).

Os dados na Web, que trafegam pela Internet, podem ser filtrados de forma adequada graças à web semântica que atribui semântica aos dados para serem entendidos pelas máquinas, por meio de diferentes formas que representam a informação para seu correto processamento, sendo que o formato mais comum é RDF (do inglês *Resource Description Framework*), extraíndo informação com a linguagem de consulta semântica SPARQL (acrônimo em inglês *SPARQL Protocol and RDF Query Language*) criados na linguagem OWL 2 (do inglês *Web Ontology Language*) que representa formalmente conceitos, suas relações e regras semânticas que podem ser aplicadas num determinado domínio de conhecimento (AL-BUKHITAN; HELMY; AL-MULHEM, 2014).

Finalmente, embora existam vários protocolos e plataformas de comunicação para o monitoramento e controle dos dados de ativos físicos, existem também ameaças nos sistemas de manufatura que devem ser analisadas para encontrar falhas potenciais e assim evitar paradas desnecessárias no funcionamento dos sistemas de manufatura, assunto a ser abordado no próximo tópico.

2.2 AMEAÇAS NOS SISTEMAS DE MANUFATURA

No processo de estudo das falhas em um sistema de manufatura, existem ameaças que podem influenciar o bom funcionamento do seu ciclo de vida seja na fase de concepção (desenvolvimento do projeto) ou na fase de funcionamento (operação). Essas ameaças são denominadas como: Erros, Falha e Avarias (ELGHAZEL et al., 2015).

2.2.1 Avaria

Segundo a norma IEC 60050-192 (2015), avaria é o estado de incapacidade de executar uma função requerida, devido a um estado interno. A avaria de um elemento é resultado de uma falha, seja do próprio elemento, ou da deficiência (desvio) de numa fase anterior ao ciclo de vida, tais como: especificação, concepção manufatura (fabricação) ou manutenção.

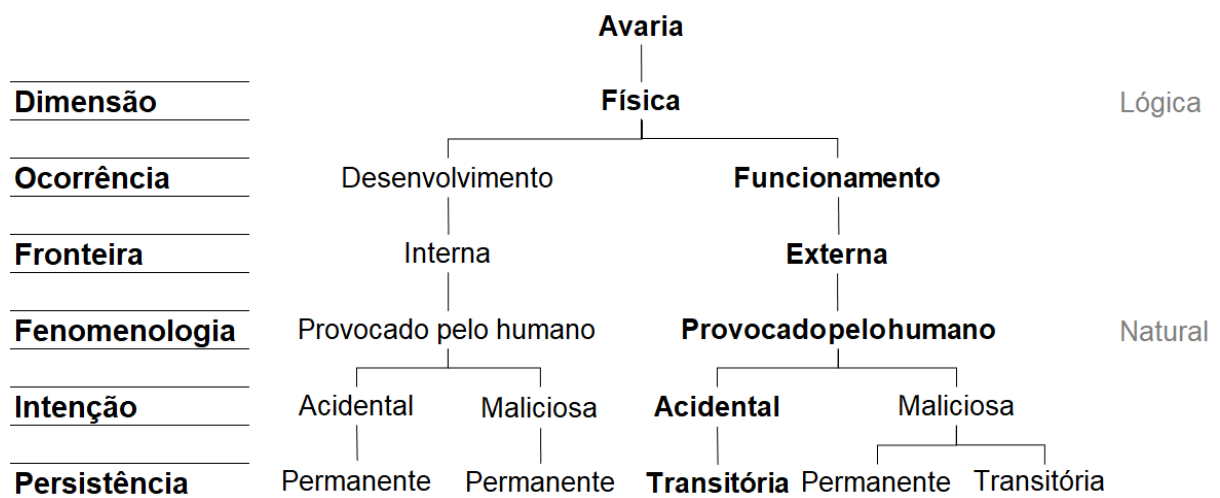
Avaria é o estado de anomalia encontrada em um componente, quando é inspecionado. Todas as avarias que podem afetar um sistema durante a sua vida são classificadas de acordo com seis pontos de vista que, por sua vez, são subdivididos em classes de avarias (ELGHAZEL et al., 2015):

- Avaria de dimensão (campo de atuação): avarias físicas, que têm origem ou afeta a um determinado elemento; e avarias lógicas, quando afetam o processamento de dados.
- Avaria de ocorrência (quando acontece?): avarias de desenvolvimento, ocorrem durante a concepção do elemento e/ou na elaboração de procedimentos de operação ou manutenção; e avaria de funcionamento, ocorre durante a operação do sistema.
- Avaria de fronteiras: avarias internas, quando têm origem dentro dos limites do sistema, e avarias externas, quando têm origem fora dos limites do sistema.
- Avaria de fenomenologia: avarias naturais, quando causadas sem a participação do ser humano; e avarias provocadas que é o resultado de uma ação humana.
- Avaria de intenção: avarias acidentais, introduzido pelo humano de maneira fortuita; e avarias maliciosas deliberadas, resultado de uma decisão humana com intenções de alterar o funcionamento correto do sistema.

- Avaria de persistência: avarias permanentes, quando se assume que a mesma permanece durante o funcionamento do sistema; e avarias transitórias, quando é delimitada por um determinado tempo.

Assim, considerando a classificação feita por ELGHAZEL et al. (2015) e AVIŽIENIS et al. (2004), podem ser encontradas as seguintes combinações de avaria para um elemento físico, apresentadas na Figura 4.

Figura 4 - Árvore representativa das possíveis avarias num elemento físico



Fonte: Adaptado de Avižienis et al (2004) e Elghazel et al. (2015)

Na fase de desenvolvimento podem ser introduzidas algumas avarias, tais como, avaria de projeto, avaria na seleção de material, avaria de fabricação, avarias de montagem e/ou instalação. Já na fase de funcionamento (operação), que é entendida como a interação do sistema com o meio de produção para realizar um determinado produto, podem existir avarias de operação ou de manutenção (AFFONSO, 2005).

Por exemplo, na Figura 4 pode-se observar que, por um lado, as avarias encontradas num componente físico, tal como um eixo, podem ser incorporadas durante a sua fase de fabricação, afetando as suas propriedades de tenacidade interna. Essa avaria pode ser provocada pela intervenção humana podendo ter sido acidental ou maliciosa, deixando avarias permanentes quando entra em operação. Por outro lado, as avarias desse eixo podem ser introduzidas durante a sua fase de funcionamento, provocadas pelo humano com ações externas à máquina, podendo ser acidentais ou maliciosas. Quando acidentais, são transitivas, ou seja, podem ser controladas e/ou mitigadas, mas, quando maliciosas, além de transitivas, podem ser permanentes, sendo que esta última impede uma recuperabilidade do sistema.

O presente trabalho aborda avarias: físicas, de funcionamento, externas, provocadas pelo humano, acidentais e transitivas.

2.2.2 Falha

Segundo a norma IEC 60050-192 (2015), falha é a perda da capacidade de um elemento em executar uma função requerida. Uma falha de um elemento é um evento que resulta em uma avaria do elemento.

Falha é o evento decorrido desde um estado aceitável até um estado anormal. Há diferentes formas em que as falhas podem manifestar-se, caracterizadas por detalhar o motivo pela qual uma função não pode ser executada conforme requerido, gerando a seguinte classificação de falhas para análise (ELGHAZEL et al., 2015):

- Falha de forma (modo de falha ou motivo da falha): falha de conteúdo, quando o funcionamento do sistema é diferente da sua especificação; e falha no tempo, quando o tempo ou duração do funcionamento de um sistema é diferente do especificado.
- Falha de efeito (ou de consequência): falhas menores, quando as consequências prejudiciais de uma falha têm um custo similar aos de um sistema funcionando corretamente; e falhas catastróficas, quando a consequência de uma falha tem um custo de grandeza superior aos benefícios de possuir um sistema funcionando corretamente.
- Falha de consistência da causa: falha consistente, quando a causa da falha é percebida por todos os usuários do sistema; e falha inconsistente, quando alguns usuários do sistema percebem a causa da falha no sistema (alguns usuários podem considerar que o sistema funciona corretamente).
- Falha de controle (ou detectável): falha controlável, quando a mudança de um evento em que há a presença de uma falha pode ser identificada; e falha não controlável, quando as falhas não podem ser detectadas (ISO 13381-1, 2015).

Além disso, segundo a norma SAE J1739 (2009), os principais efeitos de falhas potencial encontradas nos sistemas de manufatura são: barulho, operação comprometida, vazamento externo, máquina inoperável, temperatura elevada e alto custo de reparo.

No presente trabalho, focam-se as falhas de forma dando prioridade às falhas catastróficas que não são consistentes, precisando, para tal de técnicas e procedimentos de monitoramento, mas que, por sua vez possam ser detectáveis.

Nesse sentido, e visto que a proposta deste trabalho é a implementação genérica do PHM em máquinas mecânicas, os modos de falha e suas principais causas relacionadas a elementos mecânicos são apresentadas na Tabela 2, que podem ser usadas em qualquer componente mecânico rotativo de máquinas e/ou equipamentos mecânicos (AFFONSO, 2005; DE SIQUEIRA, 2009; GEITNER; BLOCH, 2016).

Tabela 2 - Principais modos de falha e causa de um componente mecânico

Modo de Falha		Causa da Falha
Fratura	Frágil	Material com baixa tenacidade
	Fadiga	Propagação de trincas por elevada tensão cíclica (acima de 10^3 ciclos)
	Fadiga	Falta de acabamento superficial
	Fadiga	Desgaste por pequenas vibrações acompanhadas de corrosão (ou <i>fretting</i>)
	Fadiga	Componente mal dimensionado (e.g., eixo com diâmetro menor)
	Térmica	Baixa temperatura em elastômeros (aumento de rigidez)
	Dúctil	Trincas em pontos de concentração (cantos vivos)
Deformação	Dúctil	Tensão acima do limite de escoamento, passando do ponto de ruptura
	Elástica induzida por força e/ou temperatura	Tensão acima do limite de escoamento, antes do ponto de ruptura
		Tração acima do limite projetado
		Compressão acima do limite projetado
		Torção ou cisalhamento acima do limite projetado
		Altas temperaturas em elastômeros (aumenta flexibilidade)
		Inchaço de elastômeros por absorção de fluidos
Desgaste	Corrosão	Presença de fluido corrosivo
	Corrosão	Aumento de corrosão por temperatura elevada
	Abrasão	Presença de material mais duro numa superfície
	Abrasão	Superfície com baixa dureza
	Adesivo	Falta de lubrificante
	Adesivo	Incorreto acabamento superficial
	Adesivo	Micro adesões entre superfícies
	Cavitação	Formação de bolhas de vapor no líquido (i.e., $NPSH_d < NPSH_r$)
	Fretting	Micro movimentos por vibração de elementos próximos
	Fretting	Fadiga superficial
	Fretting	Ajuste e tolerância incorreta
Incrustação	Processo	Depósito de material usado no processo
	Ambiente	Depósito de material proveniente do meio ambiente

Fonte: Adaptado de Affonso (2005)

2.2.3 Erro

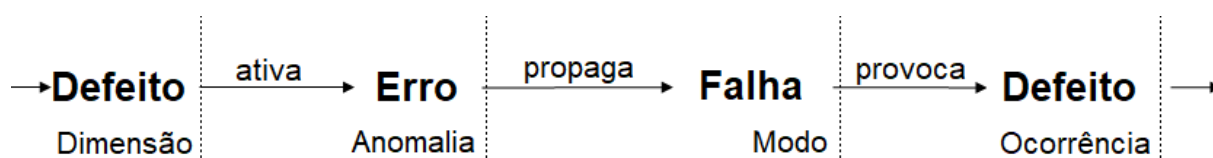
Segundo a norma IEC 60050-192 (2015), erro é a discrepância entre um valor ou uma condição observada ou medida, e o verdadeiro valor ou condição especificado ou teoricamente correto.

Um erro é ativado quando um parâmetro coletado não corresponde com seu parâmetro nominal de funcionamento. Conseqüentemente, um erro é detectado se a sua presença é indicada por uma mensagem de alerta ou alarme. Erros que estão presentes, mas que não podem ser detectados, são erros latentes (IEC 60050-192, 2015).

Assim, os critérios para ativar um alerta ou alarme devem ser definidos para indicar a ocorrência de uma falha num estado inicial e/o controlável, isto é, quando uma falha é maior ou igual a uma falha potencial e menor ou igual a uma falha funcional. Critérios de alerta ou alarme podem resultar do processamento de várias medições ou ser definidos sobre sinais dinâmicos (ISO 17359, 2011).

A Figura 5 ilustra a sequência das ameaças da dependabilidade em um determinado sistema de manufatura, onde uma avaria de dimensão, que possui monitoramento, pode manifestar-se através de um alarme, ativado pela detecção de um erro que, por sua vez, se propaga num modo de falha, podendo causar uma avaria de ocorrência.

Figura 5 - Propagação do erro



Fonte: Adaptado de Avizienis et al. (2004)

Finalmente, as diversas formas de ameaças presentes num sistema de manufatura podem ser mitigadas com estratégias de manutenção por meio da gestão de saúde dos seus ativos físicos.

2.3 GESTÃO DA SAÚDE EM SISTEMAS DE MANUFATURA

A entrega de um produto com qualidade e confiabilidade são fatores importantes para o sucesso num sistema de manufatura (IUNG et al., 2009). Qualidade, planejamento de produção e gestão da saúde são áreas fundamentais que avaliam o estado de funcionamento de

uma manufatura para alcançar esses objetivos. Assim, no campo de gestão da saúde devem ser procuradas novas políticas que melhorem a eficiência dos ativos físicos propensos à degradação ao longo do tempo (CHEN, 2013; LÓPEZ-CAMPOS; CRESPO MÁRQUEZ; GÓMEZ FERNÁNDEZ, 2013).

A gestão da saúde dos ativos físicos tem um papel importante graças a procedimentos de manutenção que maximizam o seu tempo de vida útil, reparando e, se possível, antecipando-se à ocorrência de falhas. Para seu efetivo funcionamento, a manutenção deve começar junto com a fase de concepção de uma instalação industrial. É nesta fase que é possível garantir o funcionamento correto, capacidade de operação e duração da sua vida útil dos equipamentos. Baseados na norma DIN EN 13306:2010, Blaise, Levrat e Iuang (2014) definem a manutenção como a combinação de atividades técnicas e de gestão, dentro de um sistema de manufatura, destinadas a manter ou retornar o estado de funcionamento de um elemento de manufatura para a realização de funções requeridas.

Para Fiorentino et al. (2014), a disponibilidade, a qualidade e eficiência dos elementos de uma manufatura têm um papel determinante na competitividade da empresa. Isto significa que a área da gestão da saúde desempenha um papel muito importante e fundamental ao qual é necessário cada vez mais atenção. Quando se comprova o impacto da manutenção nos custos do sistema de manufatura, na qualidade do produto, na flexibilidade e rapidez de resposta e na diminuição de prazos de entrega, compreende-se quanto é importante implementar uma política de gestão da saúde. Assim, um dos principais objetivos da manutenção passa por maximizar a confiabilidade dos ativos, reduzindo as paradas de produção devido a anomalias, bem como assegurar os níveis de qualidade do trabalho prestado pelos mesmos.

Para Ni, Gu e Jin (2015), a manutenção numa empresa desempenha um papel importante nos sistemas de manufatura modernos. Atividades de manutenção adequadas podem reduzir paradas de produção não programadas e melhorar a produtividade. Segundo Ong e Zhu (2013), a manutenção restaura e melhora o desempenho da manufatura tornando-se uma parte importante do ciclo de vida do produto. Terkaj, Tolio e Urgo (2015) apontam a digitalização dos processos como uma nova atividade na manutenção para servir como apoio no planejamento de atividade dos sistemas produtivos. Essa digitalização pode ser realizada com a integração de ferramentas que modelem o estado de funcionamento de um equipamento para monitorar sua saúde (HEDLIND; KJELLBERG, 2015).

Segundo Carnero (2014), estes sistemas de manufatura modernos possuem cada vez mais elementos complexos, requerendo de uma manutenção mais especializada que acompanhe os avanços tecnológicos para acompanhar a tendência dos novos sistemas de manufatura.

Assim, pode-se afirmar que a manutenção como área de apoio é importante na estratégia das empresas, e com o intuito de levantar o valor que representa para uma organização, destaca-se, por exemplo, que na UE o custo de manutenção está entre 4 a 8% do valor total de vendas (MACCHI et al., 2014). Já Muthu et al. (2000) consideram que a manutenção representa entre 15 e 70 % do custo total de produção. Yan, Lu e Ching (2005) realizaram pesquisas de campo nos EUA e constataram que o custo de manutenção nos sistemas de manufatura representa 15% dos custos totais de produção.

A manutenção, segundo Coria et al. (2015), é caracterizada em três grupos: (1) manutenção corretiva (RM - do inglês *Reactive Maintenance*), que é o reparo após uma falha; (2) manutenção preventiva (PM - do inglês *Preventive Maintenance*), baseada na substituição, revisão ou remanufatura de componentes e/ou peças em intervalos de tempo definidos ou adaptados; e (3) CBM, antigamente definida como manutenção preditiva (PdM - do inglês *Predictive Maintenance*) (ISO 13372, 2012), considerada atualmente como a evolução da manutenção que consiste em programar a PM até que seja detectada uma falha funcional, através de programas de monitoramento de condições de saúde dos elementos da manufatura.

Em geral, a manutenção envolve a execução de ações de rotina de RM e PM para obter alta disponibilidade nos sistemas industriais (MONTGOMERY; BANJEVIC; JARDINE, 2012). As intervenções em RM são realizadas somente quando o componente apresenta uma falha total. A PM pode ser dividida em duas abordagens principais, manutenção baseada no tempo e CBM. Na manutenção baseada no tempo, as intervenções são realizadas de acordo com intervalos periódicos, independentemente do estado de saúde dos ativos físicos e, assim, a vida útil dos componentes não é prevista (SOH; RADZI; HARON, 2012). A CBM utiliza dados em tempo real coletados da máquina para avaliar o planejamento e programação da sua manutenção antes da falha funcional dos seus componentes ocorrer (PENG; DONG; ZUO, 2010).

Apesar da manutenção ser o suporte estratégico das empresas, ainda há um número considerável de organizações que não contam com abordagens de manutenção e por sua vez tendências que acompanhem a nova era da manufatura. De acordo com Franser (2014), existem mais de 30 modelos de manutenção, alguns destes são: CBM, manutenção centrada na confiabilidade (RCM - do inglês *Reliability-Centered Maintenance*), manutenção produtiva total (TPM - do inglês *Total Productive Maintenance*), manutenção da qualidade total (TQM -

do inglês *Total Quality Maintenance*), manutenção baseada na idade, manutenção baseada na disponibilidade, e-Manutenção (ou manutenção digital), manutenção com base no tempo e planejamento de manutenção baseada em valores.

Fraser (2014) realizou o estado da arte da manutenção desde 1995 e concluiu que os modelos mais relevantes são TPM, RCM e CBM, mas considera que são necessárias abordagens que integrem a manutenção às informações e dados da organização oferecendo assim melhor controle na qualidade, planejamento e saúde das operações de produção. Nesse sentido, a seguir são descritas de forma sucinta, as principais características dessas três principais estratégias.

2.3.1 Manutenção Produtiva Total

Criada no Japão em 1970, caracterizada por aumentar a eficácia e a rentabilidade das empresas japonesas. TPM hoje é implementada por várias organizações ao redor do mundo, devido aos benefícios que podem ser alcançados como a redução de 50 % na taxa de degradação no trabalho de equipamentos, redução de 70 % na perda de produção, redução de 50-90% na instalação, e uma redução de 60% nos custos de manutenção (CHAN et al., 2005). Nakajima (1988) descreve TPM como "manutenção produtiva exercida por todos os funcionários através de atividades em pequenos grupos, usando ferramentas da qualidade total", considerando-a como a estratégia de manutenção nos sistemas de manufatura que aumentariam os processos de robotização e automação. TPM organiza todos os integrantes de um sistema de manufatura, desde a parte superior da hierarquia de uma empresa até o trabalhador de chão de fábrica, e é considerada uma estratégia que engloba toda a empresa para garantir altas produtividades.

Um dos objetivos principais do TPM é aumentar a Eficiência Global dos Equipamentos (OEE - do inglês *Overall Equipment Effectiveness*), que consiste no acompanhamento para eliminar seis perdas que podem gerar os ativos dentro de um processo de produção. OEE mede estas perdas através de três grupos: (1) disponibilidade da máquina, composta por (i) avarias ou falhas nas máquinas e (ii) reparos e configurações programadas; (2) performance, constituída por (a) velocidade de operação reduzida e (b) pequenas paradas por ajustes; (3) qualidade, que possui (i) rejeito de produtos e (ii) refugos de partida (JEONG; PHILLIPS, 2001).

TPM é um sistema importante e popular na manutenção, que está estreitamente interligada com as estratégias de melhoria e redução de custos de um negócio, tais como

manufatura enxuta (denominada em inglês de *Lean Manufacturing*), TQM, *Just In Time* (JIT) e zero avarias (AHUJA; KHAMBA, 2008). Além disso, Chan et al (2005) descrevem TPM como a ciência médica das máquinas, amplamente utilizada na manufatura e reconhecida como uma estratégia para melhorar o desempenho produtivo de uma fábrica (AHUJA; KHAMBA, 2007).

2.3.2 Manutenção Centrada na Confiabilidade

Estratégia desenvolvida pela indústria da aviação comercial dos EUA, nos anos 70, em cooperação com o governo federal, fabricantes de aeronaves e linhas aéreas (DE SIQUEIRA, 2009). RCM é um procedimento que determina os requisitos de manutenção de qualquer ativo do processo fabril assegurando-se que siga realizando sua função requerida ou determinada (ISMAIL MOSTAFA, 2004). Segundo Hansson et al. (2003), o modelo TPM não é adequado para sistemas de manufatura que possuem ativos complexos, em comparação ao RCM que possui uma maior capacidade de lidar com estes tipos de sistemas. RCM concentra seu trabalho em componentes de máquinas, onde a confiabilidade é crítica (GARG; DESHMUKH, 2006).

Além disso, RCM procura a redução de custos na manufatura devido a programações de manutenção desnecessárias realizadas pela PM. RCM concentra-se na análise de modos de falha específicos susceptíveis de ocorrer em diversos componentes de uma máquina. Por esta razão, RCM começa pela definição das funções e os padrões de desempenho de cada equipamento no seu contexto operacional. RCM também coloca grande ênfase na necessidade de quantificar os padrões de produção, qualidade do produto, serviço ao cliente, meio ambiente, custos operacionais e segurança (RAUSAND, 1998).

Embora RCM tenha surgido nas companhias aéreas comerciais do EUA, sua aplicação é feita com resultados de sucesso em vários outros setores como usinas nucleares, geração de energia elétrica, marinha, militar e vários outros sistemas de manufatura (BACKLUND; AKERSTEN, 2003).

Para Al-Najjar (1996), RCM se concentra em melhorar os sistemas de manufaturas já existentes, ao invés do desenvolvimento de futuras fábricas desde o seu início. Não obstante, Sherwin (2000) afirma que um problema que RCM apresenta é a falta de ferramentas para integrar dados oriundos do estado de saúde das máquinas.

2.3.3 Manutenção baseada na Condição

De acordo com Khac Tuan et al. (2014), a CBM usa técnicas preditivas como meio de detecção e monitoramento de condições dos parâmetros de funcionamento de um determinado equipamento, realizando a interpretação, e relatando suas deteriorações e recomendações vitais antes de uma falha funcional (iminente), ou seja, determina o estado de saúde do equipamento. Wang, Ling e Chu; Wu (2007) consideram que as técnicas mais usadas para esta detecção são: monitoramento de vibração, análise de óleo, termográfica, inspeção visual e testes de ultrassom, tornando possível a tomada de decisões em eventuais intervenções de reparo. Bloch (2012) destaca que 99% de todas as avarias de uma máquina são precedidas por certos sinais, condições ou indicações de que uma falha irá ocorrer. Muitas vezes, tais dados estão presentes semanas ou até meses antes de acontecer um erro de funcionamento.

CBM realiza intervenções de manutenção com base no monitoramento de condições (CM - do inglês *Condition Monitoring*) vindas dos estados de funcionamentos ou saúde dos equipamentos (JAFARI; MAKIS, 2015). Para Mobley (2002), CBM tem os seguintes objetivos:

- Determinar se existe uma anomalia no equipamento, qual é a sua gravidade, e quanto tempo poderá executar uma função antes de entrar em falha funcional e/ou total; e
- Detectar e identificar componentes específicos (por exemplo, conjuntos de engrenagens, eixos, mancais, correntes, acoplamentos, correias de transmissão, entre outros), que são propensos à degradação, ou seja, encontrar modos de falha, e a determinação da causa raiz do problema.

Mobley (2002) classifica as técnicas de CM para CBM de acordo com o tipo de sintomas a detectar, podendo ser em função de:

- Fatores dinâmicos, como os níveis de vibração, temperatura e ruído;
- Partículas liberadas no meio ambiente;
- Produtos químicos lançados no meio ambiente;
- Fatores físicos, como fraturas (trinca, rachadura ou quebra), desgaste (corrosão), deformação e incrustação; e
- Fatores elétricos, tais como resistência, condutividade, resistência dielétrica, etc.

Fraser (2014) apresenta uma relação de vantagens relacionadas ao uso de CBM e, por sua vez, fornece as razões pelas quais este método particular provou ser tão atraente:

- Métodos usando a CBM e seus resultados podem ser introduzidos rapidamente;

- CBM pode ser usado para complementar outros métodos existentes, como TPM ou RCM;
- CBM pode ser introduzido gradualmente e pode ser verificada sua eficácia antes de eliminar outros métodos existentes num sistema de manufatura;
- CBM é fácil de ser implementado a diferentes tipos de manufatura;
- CBM é particularmente relevante quando aplicado a equipamento de produção crítica;
- CBM encontra o ponto de equilíbrio entre uma manufatura com excesso ou baixa manutenção dos seus equipamentos;
- CBM potencializa as técnicas preditivas de detecção de falhas, feitas nas inspeções dos técnicos mantenedores introduzindo métodos adicionais de interpretação;
- CBM é essencialmente necessária para equipamentos que possuem ES.
- CBM é indicado como estratégia no contexto de CPS, onde situações de funcionamento podem ser interpretadas de forma autônoma e atribuídos recursos necessários conforme demanda do equipamento.

Além disso, CBM consiste em três passos fundamentais (AZADEH et al., 2015):

- i. Aquisição e coleta de dados através do CM ou rotas de inspeção;
- ii. Estabelecimento de parâmetros de decisão por meio de técnicas de processamento de dados, métodos estatísticos e/ou AI; e
- iii. Tomada de decisão para manutenção preventiva do equipamento.

Na literatura científica, são encontradas algumas aplicações da CBM. Richard et al. (2000) discutem como CBM tem sido amplamente aceita na prática e está em uso em vários segmentos dos sistemas de manufatura. Gao et al. (2015) apresentam a CBM como uma estratégia de manutenção que realiza intervenções de manutenção programadas sem interromper as operações normais de operação, além disso, consideram que a CBM alavanca os avanços do monitoramento de condições auxiliando para serem consideradas como uma ciência. Derigent et al. (2009) e Rausch e Haitao (2010) apontam a CBM como sinônimo da manutenção preditiva que emerge para apoiar os sistemas dinâmicos e complexos da manufatura, antecipando-se às falhas, em contraste com as tradicionais técnicas corretivas e preventivas baseadas no tempo. Öhman, Finne e Holmström (2015) consideram que a programação de manutenção preventiva é em função da CBM para prever a deterioração do

equipamento. Fritzsche, Gurta e Lasch (2014) classificam a CBM como uma estratégia para o PHM na manufatura, apresentando processos dinâmicos que podem mudar constantemente as decisões de planejamento de manutenção, tendo, assim, intervenções preventivas oportunas ao invés de corretivas. Para Azadeh et al. (2015), a CBM usa as informações disponíveis do CM de um equipamento para revelar o estado de saúde e prever a sua RUL, considerando que o diagnóstico e prognóstico estão inseridos na CBM. Shariee, Finkelstein e Bérenguer (2015) aplicam as oportunidades da CBM nas pás de turbinas eólicas em alto mar, avaliando sua degradação pelas intempéries do meio ambiente. Do et al. (2015) ressaltam a importância de uma análise dos dados recolhido por meio de prognósticos estatísticos para evitar manutenções proativas que geram custos desnecessários além de criar precedentes errados de aplicação da CBM. Bittencourt e Axelsson (2014) apontam que, nos cenários atuais da manufatura que possuem linhas com vários e variedades de robôs, a CBM é uma estratégia adequada para o prognóstico de desgaste dos seus componentes. Dong e Peng (2011) destacam a importância do diagnóstico e monitoramento, considerando-os como pré-requisitos no sucesso da implementação da CBM num sistema de manufatura.

Para Malinowski, Chebel-Morello e Zerhouni (2015), a CBM é um requisito básico do prognóstico dos sistemas onde a segurança, confiabilidade e disponibilidade são consideradas fatores primordiais para os processos fabris. Esses autores, ainda, consideram o prognóstico com um dos atuais desafios científicos para a implementação de estratégias de manutenção de equipamentos, destacando a importância na previsão da RUL que vem sendo pesquisada na indústria aeroespacial, eletrônica, nuclear, entre outras.

Para Elghazel et al. (2015), num sistema de manufatura, a manutenção cumpre um papel importante relacionado à prevenção ou reparo de falhas. Ao longo dos anos, têm evoluído várias estratégias de manutenção, chegando até a CBM fruto da demanda de confiabilidade nas indústrias, que é compreendida pelo PHM como ferramenta para desenvolver a RUL dos equipamentos.

Cui, Shi e Wang (2015) pesquisam os sistemas de manutenção para compreender melhor suas interações internas e externas de desempenho, considerando que a CBM está ganhando uma atenção crescente devido ao potencial que oferece na programação eficaz de manutenções. CBM, como já descrito, baseia-se no CM, dos estados do sistema, para evitar a ocorrência de falhas e para determinar as estratégias de manutenção, onde os sinais são monitorados continuamente utilizando certos tipos de sensor ou outras informações apropriadas. Assim, as atividades de manutenção (reparos ou substituições) são realizadas

apenas quando necessárias, ou pouco antes de uma falha funcional ocorrer. PHM é definido pelos autores como uma abordagem que permite a detecção precoce e previsão de uma falha funcional. Este trabalho, destaca que o conceito PHM deriva da estratégia da CBM, onde o estado de saúde pode ainda ser previsto, e ações de manutenção ideais podem ser organizadas para a prevenção de colapso do sistema, reduzindo assim os custos de manufatura e aumentando a disponibilidade operacional das máquinas. A aplicação do PHM é direcionado à programação de manutenção e tomada de decisão, baseados na estimativa da RUL, ao combinar informações de falha e acompanhando as tendências de degradação do sistema.

Portanto, as principais estratégias de gestão de manutenção encontradas na literatura são TPM, CBM e RCM. Em alguns casos, essas três podem ser integradas umas com as outras, i.e., RCM e CBM podem ser utilizadas dentro de TPM, e CBM dentro TPM e/ou RCM. TPM é muitas vezes entendida como uma abordagem de gestão global com uma filosofia própria, com práticas de implementação, ferramentas e técnicas que podem ser aplicadas em toda a organização. RCM e CBM são mais específicas para equipamentos e seus componentes que fazem parte dos sistemas de manufatura (FRASER, 2014).

Independente da estratégia a ser usada, a gestão e manutenção de ativos é uma tarefa complexa, e normalmente as intervenções dos técnicos de manutenção são baseadas na experiência e conhecimento adquiridos ao longo de muitos anos. Quanto mais conhecimento eles têm, mais benefícios eles fazem para o bom funcionamento de um sistema de manufatura. O conhecimento na manutenção é dividido em implícito e explícito. O conhecimento implícito vem da experiência e capacitação pessoal. O conhecimento explícito é formalizado e codificado em linguagem natural que pode ser capturado por meio de modelos, protocolos, procedimentos e normas. Na atualidade a grande quantidade de conhecimento está armazenada em bases de dados que dependem de boas soluções, tais como modelos ontológicos, que são, em muitos aspectos, representações do comportamento de especialistas humanos. Por meio da ontologia pode ser realizada uma especificação precisa de algumas áreas, permitindo o compartilhamento de informações entre o usuário e o sistema de software dentro de uma manufatura para tomar decisões no serviço de assistência ao monitoramento e controle da saúde das máquinas (PANTELEEV et al., 2015).

Assim, considera-se que a revisão da literatura científica indica que a CBM é apontada como a estratégia que mais se adapta à tendência dos CPS, por ser flexível e usar tecnologias atuais para alavancar novas abordagens na manutenção, como o PHM nas intervenções oportunas, mais precisas e em tempo real que preveem e evitam falhas funcionais.

2.4 PROGNÓSTICO E GESTÃO DA SAÚDE

Para Gao et al. (2015), o prognóstico determina a progressão esperada da degradação do componente de uma determinada máquina, ou seja, define os estados até antes da falha funcional ocorrer, associando-os na previsão da RUL.

No geral, dependendo dos tipos de dados necessários para caracterizar os elementos de uma manufatura e estimar a RUL, as técnicas para o prognóstico podem ser classificadas em métodos (RAGAB et al., 2014; ELGHAZEL et al., 2015; GAO et al., 2015; KANDUKURI et al., 2016): i) baseados em fenômenos físicos, que proporcionam o comportamento de um componente mecânico para descrever os seus modos de falhas (HENG et al., 2009), e.g. o conhecimento das propriedades do material usado num determinado componente mecânico durante seu funcionamento nominal, bem como sob condições de falha; ii) orientados por dados: que usam dados extraídos exclusivamente de variáveis e estabelecem uma relação entre comportamentos nominais e estado atuais do funcionamento das máquinas. Esse último método pode ser subdividido em técnicas baseadas na AI e técnicas estatísticas. As técnicas de AI geram modelos usando, por exemplo, Redes Neurais, Bayesianas, Ontologia, entre outras, podendo ser considerados como Sistemas Especialistas (SE – conhecido em inglês como *Expert Systems*) (SCHOLZ-REITER; KÜCK; LAPPE, 2014). Já as técnicas estatísticas processam os dados com: Árvore de classificações, Floresta Randômica (RF - do inglês *Random forest*), Regressão Lógica (LR do inglês *Logical regression*), Máquina de Vetores de Suporte (SVM - do inglês *Support vector machine*) (ISO 13381-1, 2015), distribuição *Weibull* (LU; TAO; FAN, 2014). Além de usar a distribuição *Gamma* como uma organização prévia dos dados a serem analisados (ALI; PIEVATOLO, 2016).

No trabalho de Ompusunggu, Papy e Vandenplas (2015), detalha-se uma abordagem para estimar a RUL de embreagens de fricção usadas em veículos equipados com transmissão automática. Com o uso de um algoritmo de prognósticos amplia-se a capacidade do monitoramento de condição. O algoritmo apresentado é orientado por dados para a construção de um modelo com técnica de filtragem de Kalman (KF - do inglês *Kalman Filter*) onde um modelo de degradação proposto é baseado em dados medidos sob o esquema da inferência Bayesiana (que descreve as incertezas de forma probabilística). Nesse trabalho foram adquiridos dados históricos de outros dispositivos similares para serem processados com o algoritmo de prognóstico. Também se usou dados de testes sob condições operacionais controladas, como temperatura, pressão, velocidade de rotação e torque. No final, os autores

destacam a importância de se aplicar estes algoritmos em condições reais e mais genéricas para obter resultados mais robustos e aplicáveis a outros tipos de mecanismos.

Fritzsche, Gupta e Lasch (2014) apresentam o prognóstico como uma nova tentativa de pesquisa para prever, de forma proativa, uma possível falha. Destacam que o PHM vem sendo considerado pelo mundo científico como uma abordagem que melhora a disponibilidade operacional dos equipamentos, e fornece informação para prever a RUL dos seus componentes, assim, diminuindo significativamente a taxa de falhas. O principal aporte que os autores destacam do PHM é na reposição de custos de produção devido à combinação de dados provenientes de sensores e históricos de parâmetros operacionais para melhorar a saúde do sistema, fornecendo avisos antecipados para tomada de decisões e redução progressivamente a PM sistemática.

Cui, Shi e Wang (2015) consideram que a representação e avaliação dos sistemas de manutenção é uma boa abordagem para adquirir informação. Trabalhos têm sido feitos em um nível estratégico, operacional e tático usando diferentes metodologias e ferramentas de modelagem e simulação de DES, fornecendo uma abordagem prática para a análise das características de apoio ao PHM que foi implementado usando um método híbrido, ou seja, baseado em modelo físico e orientado por dados. As abordagens baseadas em modelos físicos detalham as características do comportamento de um determinado elemento, modelando suas falhas físicas, enquanto que as orientadas por dados retratam características vindas de dados de monitorização para estimar a RUL através da modelagem da degradação do elemento.

Chen, Zhu e Lee (2013) consideram que o PHM nos sistemas de manufatura demanda a problemática da coleta de dados, já que não existe uma definição clara sobre a qualidade de dados, nem abordagens para quantificar se os dados adquiridos são adequados para modelagem de atividades de prognóstico, tais como, predição, diagnóstico e detecção de falhas. Especificamente quando se abordam métodos orientados por dados para a modelagem do diagnóstico das falhas, precisa-se de uma grande quantidade de dados históricos de estados de funcionamento das máquinas, provenientes de sensores e inspeções humanas que são analisadas por abordagens orientadas por dados para identificar causas de falhas e prever seu comportamento futuro. No entanto, estes dados frequentemente são imprecisos, incompletos ou redundantes.

Assim, pode-se referir ao PHM como a gestão da coleta de dados para prever e evitar falhas funcionais, vindas do CM através de técnicas preditivas especificadas para o uso em determinadas máquinas. Para a elaboração do prognóstico, depende-se essencialmente do

diagnóstico de falhas que vincula parâmetros de sintomas de modos de falhas potenciais e cria uma estimativa da RUL das máquinas (UMEDA et al., 2012). Nesse sentido, é necessário usar técnicas de análise de dependabilidade, visto que a dependabilidade, de uma forma geral, envolve a identificação da confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade dos sistemas mecânicos (VOGL; WEISS; DONMEZ, 2014a). Assim, após a identificação da saúde de uma máquina, dados coletados podem ser processados com modelos de Sistemas Especialistas para estimar o tempo de falha (ETTF - do inglês *Estimated Time To Failure*), que é a previsão de um período desde a medição de um ponto atual de operação até um ponto no tempo em que a máquina pode entrar numa condição de falha funcional (ISO 13381-1, 2015).

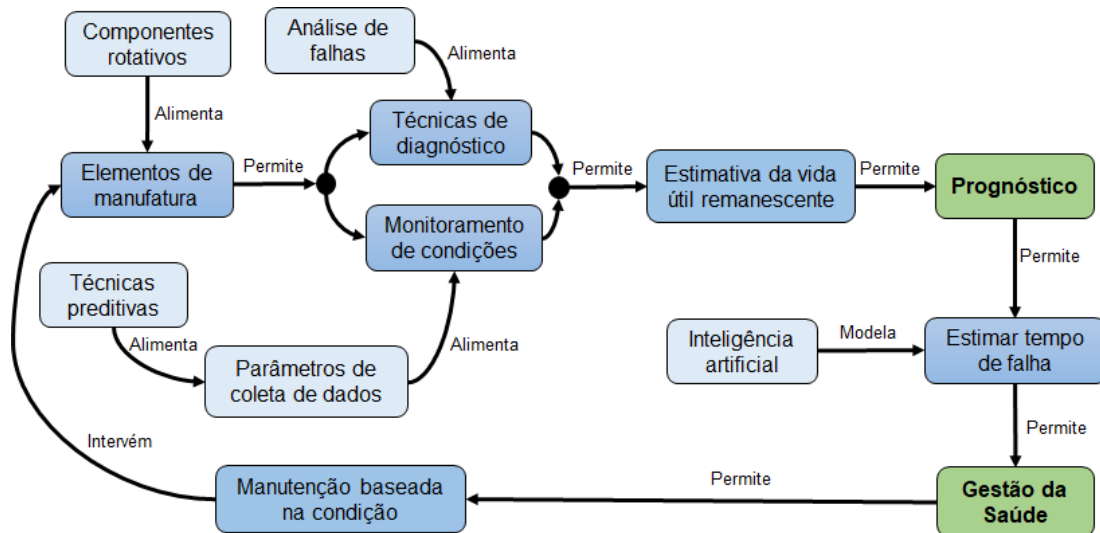
Elghazel et al. (2015) definem o diagnóstico como a técnica que descreve o acontecimento de um estado após uma falha ocorrer. O processo de diagnóstico começa com a detecção da falha que denuncia a anomalia no componente. Feito isto, entra o processo de isolamento da falha que compreende em entender e identificar a causa fonte (raiz) da avaria. Assim, após identificado o diagnóstico, é possível quantificar uma falha real, que pode ser aproveitada para o prognóstico.

A parte da gestão da saúde no PHM refere-se à tomada de decisão para intervenções oportunas de reparo ou ajustes provenientes da estimativa da RUL dos componentes analisados (GAO et al., 2015). Assim, a saúde de uma máquina no monitoramento e análise da grande quantidade de dados que possui, quando se encontra em pleno estado de funcionamento num determinado processo de fabricação, pode ser modelada para auxiliar nas intervenções oportunas de manutenção (LEE et al., 2014; QU et al., 2016).

Na Figura 6, ilustra-se a taxonomia do ciclo do PHM que pode ser aplicada a uma Manufatura Inteligente, onde primeiramente precisa-se de um elemento de manufatura, e.g. um componente mecânico, que permite a aplicação de técnicas de diagnóstico, i.e. análise de falhas, além do monitoramento das suas condições que são definidas por determinados parâmetros para a coleta correta de dados específicos para determinada técnica preditiva, e.g. análise de vibrações. Em seguida, a integração de dados da análise de falhas e das técnicas preditivas do determinado componente mecânico permite a elaboração da estimativa da sua vida útil remanescente, i.e. o intervalo entre uma falha potencial e funcional, dessa forma consegue-se elaborar a base do prognóstico de falhas. A seguir, tendo o comportamento do prognóstico até uma falha funcional, podem ser usadas técnicas, e.g. Sistemas Especialistas para modelar e estimar uma falha durante um determinado tempo de funcionamento do componente. Após identificada uma falha, é possível realizar a gestão da saúde da máquina, e caso seu estado de

saúde reflita uma falha funcional, será solicitada a programação da CBM. Finalmente, quando concluída a intervenção de manutenção, novos dados obtidos em tal intervenção são acrescentados ou atualizados na análise de falha e nos parâmetros das técnicas preditivas para continuar com o ciclo do PHM.

Figura 6 - Taxonomia do Prognóstico e Gestão da Saúde no contexto de CPS



Fonte: Adaptado de Nuñez e Borsato (2017)

Desta forma, o prognóstico considera eventos passados e atuais do equipamento, além de condições operacionais para estimar a RUL, detectando a deterioração dos seus componentes. A saúde do equipamento pode ser gerida para tomada de decisão que servem para (ELGHAZEL et al., 2015):

- Especialistas, que dependem de informações precisas para elaborarem pareceres que resultem em boas soluções;
- Eliminações, que consiste em excluir soluções não realistas, sobrando apenas uma;
- Modelos analíticos, que fornecem uma hierarquia de ações com objetivos, alternativas e futuras decisões;
- Simulações, com ferramentas gráficas para visualizar o comportamento de um equipamento em diferentes condições, oferecendo clareza e a possibilidade de alterar critérios.

Para o desenvolvimento formal do PHM, seus termos e conceitos devem ser padronizados. Segundo ISO 17359 (2011) e Vogl, Weiss e Donmez (2014b), as principais normas relacionadas ao ambiente PHM são:

- Para a análise de falhas: IEC 60300-1, IEC 60300-3-1 e SAE J1739;
- Para a representação do diagnóstico: ISO 13379-1;
- Para a representação do prognóstico: ISO 13381-1;
- Para o monitoramento de parâmetros: ISO 17359;
- Para aplicação de técnicas de monitoramento: ISO 13373-1, ISO 10816-1, ISO 14830-1, ISO 18434-1, ISO 4406, ISO 22096 e ISO 29821-1;
- Para o tratamento de dados coletados: ISO 13374-1;
- Para a padronização de termos e conceitos: ISO 13372 e IEC 60050-192.

Alguns termos usados numa estrutura formal de PHM e definidos por norma para a Gestão de ativos físicos são, (IEC 60050-192, 2015):

- **Manutenção:** combinação de todas as ações técnicas e de gerenciamento destinadas a manter em funcionamento um elemento de manufatura ou restaurá-lo para um estado em que ele possa realizar operações conforme necessário.
- **Manutenção corretiva:** manutenção realizada após detecção de uma falha que precisa de restauração.
- **Manutenção preventiva:** manutenção periódica realizada para mitigar a degradação e reduzir a probabilidade de falha.
- **Manutenção baseada na condição:** manutenção preventiva com base na avaliação das condições físicas do elemento da manufatura.

2.4.1 Degradação nos elementos da Manufatura

Segundo a norma IEC 60050-192 (2015), degradação é o estado com capacidade reduzida que apresenta um equipamento para executar uma função requerida, mas com desempenho aceitável. Esse estado geralmente é o resultado de uma avaria em um nível inferior, i.e., componente mecânico.

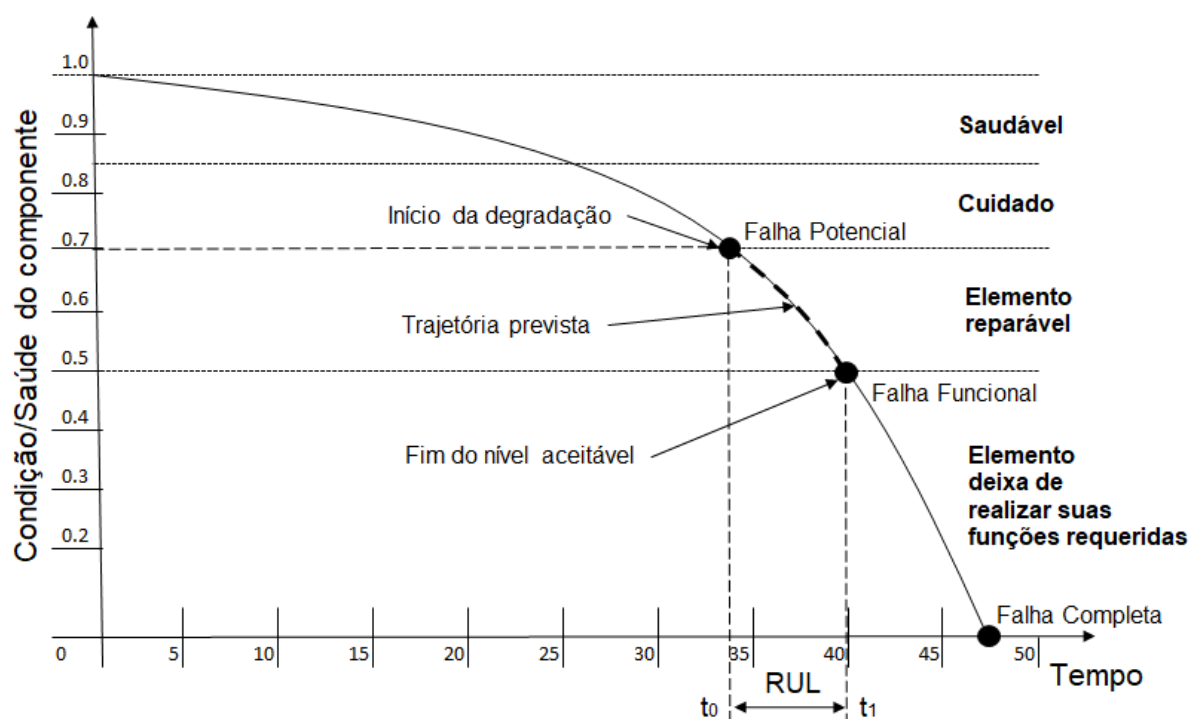
Neste trabalho, PHM apresenta-se como uma mudança de paradigma na CBM, prevendo de forma confiável os tempos de falhas do sistema para permitir a recuperabilidade eficiente do sistema, através da análise de componentes críticos (TEDESCHI et al., 2015).

No PHM, a estimativa da RUL de um elemento pode ser determinada pela análise do histórico de modos de falhas existentes ou potenciais, determinando o intervalo no tempo entre a presença de uma falha potencial e o início de uma falha funcional, podendo ser entendido,

também, como a duração de uma falha incipiente antes de entrar no fim da vida útil do elemento (ELMARAGHY, Hoda et al., 2014).

Componentes rotativos, quando não monitorados levam a uma falha inesperada para um evento catastrófico. Como é inevitável, na degradação dos seus componentes, o prognóstico faz-se necessário para determinar a RUL dos itens mais críticos antes que a saúde de um componente caia do ponto de uma falha funcional até chegar numa falha completa (IEC 60050-192, 2015). O comportamento da RUL de um componente mecânico é representado na Figura 7 que auxilia no entendimento da relação que há entre uma falha potencial, funcional e completa ou total.

Figura 7 - Degradação de um elemento mecânico de manufatura



Fonte: Adaptado de Elmaraghy et al. (2014)

Além disso, para melhor compreensão da Figura 7, são definidos seus principais termos, definidos por normas internacionais e artigos da área de manufatura:

- Saúde/condição do componente: medida de monitoramento de estado para aquisição e processamento de informações e/ou dados que fornece um meio de determinar a manutenção do equipamento, máquina ou componente (ISO 13379-1, 2012).
- Falha potencial: o ponto no tempo em que a indicação de uma deterioração do componente pode começar a ser detectada (VAN HORENBEEK et al., 2013).

- Falha funcional: o ponto no tempo em que o componente sofre uma falha crítica. Um componente pode realizar sua tarefa regular até este ponto (VAN HORENBEEK et al., 2013).
- Falha completa: falha caracterizada pela perda de todas as funções necessárias. Entendido na RUL de um componente como o evento final após a progressão de uma falha funcional (IEC 60050-192, 2015).

2.4.2 Técnicas de Análise de Dependabilidade

Dependabilidade estuda os elementos de uma manufatura, desde seu sistema, subsistema até chegar nos seus componentes, através de técnicas que analisem suas falhas potenciais (VOGL; WEISS; DONMEZ, 2014b).

Dependabilidade para a norma IEC, é a capacidade de um elemento, em como e quando executar uma função requerida. Dependabilidade inclui a disponibilidade, confiabilidade, recuperabilidade, manutenibilidade e desempenho do suporte à manutenção. Os principais termos utilizados na dependabilidade são (IEC 60050-192, 2015):

- Elemento: objetos a ser considerado. Pode ser uma parte individual, componente, dispositivo, unidade de funcionamento, equipamento, máquina, subsistema ou sistema de uma manufatura.
- Disponibilidade: capacidade de um elemento estar em um estado de executar uma função requerida. Disponibilidade depende das características combinadas de confiabilidade, recuperabilidade e manutenibilidade do elemento, e o desempenho do suporte à manutenção.
- Confiabilidade: capacidade de um elemento executar uma função requerida, sem falhas, durante um dado intervalo de tempo, sob determinadas condições.
- Recuperabilidade: capacidade de um elemento em recuperar-se de uma falha, sem manutenção corretiva. A recuperação pode ou não precisar de ações externas.
- Manutenibilidade: capacidade de um elemento ser mantido ou restaurado para um estado que possa executar uma função requerida, sob determinadas condições de manutenção e operação.
- Desempenho do suporte à manutenção: eficácia de uma organização em relação ao suporte oferecido para a gestão da saúde de elementos da manufatura.

Segundo Bukowski (2016), para cobrir aspectos relacionados com a engenharia de confiabilidade na área da eletrotécnica, em 1965, foi criado o Comitê Técnico 56 (TC 56) denominado de “Confiabilidade e Manutenibilidade”. Posteriormente, em 1989, mudou para “Dependabilidade” e, em 1990, após consultas com a ISO 9000 a abrangência do TC 56 foi estendida para aplicações genéricas de dependabilidade em todas as áreas de desenvolvimento tecnológico. No prognóstico de falhas busca-se a análise de comportamentos das falhas para garantir a dependabilidade do sistema (AVIŽIENIS et al., 2004).

Assim, no âmbito do PHM, a dependabilidade orienta na escolha de sistemas, subsistemas ou componentes que devem ser monitorados, através da análise de suas possíveis falhas, com o objetivo de garantir uma elevada eficácia aos processos produtivos (COLLEDANI et al., 2014; BUKOWSKI, 2016), para posteriormente realizar a ETTF, dos equipamentos dentro dos seus parâmetros de projeto (ISO 13381-1, 2015).

Conforme a norma IEC-60300-3-1 (2003), as principais técnicas para análise de falhas são: Análise de Árvore de falhas (FTA - do inglês *Failure Tree Analysis*), FMECA, Análise de Árvore de Eventos (ETA - do inglês *Event Tree Analysis*), Análise de Efeitos e Modo de Falhas (FMEA – do inglês *Failure Mode and Effects Analysis*), análise de Markov, Redes de Petri (PN - do inglês Petri Net), Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD - do inglês *Reliability Block Diagrams*), Análise de Perigo e Operabilidade (HAZOP - do inglês *Hazard and Operability Analysis*). Tais abordagens são usadas para o prognóstico, verificação e melhoria dos atributos da dependabilidade (SANISLAV; MOIS; MICLEA, 2016).

Em Brinzei e Mazouni (2016), as técnicas de análise de falhas são classificadas em abordagens *top-down* e *bottom-up*. Onde as abordagens *top-down* são usadas para identificar operações não desejadas nos sistemas, começando pelo nível mais alto de interesse e prosseguindo sucessivamente para níveis mais baixos. Esta abordagem comumente usa: FTA, análise de Markov, PN e RBD. Por outro lado, as abordagens *bottom-up* são consideradas para identificar modos de falha em níveis baixos, como componentes específicos de uma máquina, sendo depois usados para determinar o efeito correspondente no desempenho de um sistema de manufatura (VOGL; WEISS; DONMEZ, 2014a). As abordagens desse grupo são: FMEA/FMECA e HAZOP, sendo que a última é orientada pela norma IEC 61882:2001, considerada por Guo e Kang (2015) como uma técnica direcionada para avaliações de segurança em indústrias químicas.

As técnicas de análise de falha também podem ser divididas segundo seu objetivo quantitativo e/ou qualitativo. Sendo que o principal objetivo da análise qualitativa consiste na

identificação de modos de falhas em elementos mecânicos, suas consequências no sistema como um todo, as causas da falha, e a determinação de estratégias de reparo/recuperação. Nesse sentido, FMEA é a técnica qualitativa que se destaca (SANISLAV; MICLEA, 2015).

A análise com objetivo quantitativo visa definir dados numéricos que podem ser usados como parâmetros de entrada para modelos de diagnóstico e monitoramento de condições. Entre as técnicas quantitativas, destacam-se a FMECA, análise de Markov, FTA, PN e RBD, auxiliando na extração da relação causa-efeito. Essas técnicas podem ser classificadas em dedutivas e indutivas. É dedutiva quando começam a análise nos efeitos conhecidos para depois encontrar suas causas desconhecidas, aqui destaca-se a técnica FTA. Já as técnicas indutivas começam analisando as causas conhecidas e prognosticam possíveis efeitos, destacando-se as técnicas FMEA e/ou FMECA (SANISLAV; MICLEA, 2015).

No PHM precisa-se de técnicas que analisem os sistemas, proporcionando uma detecção precoce e o isolamento de falhas potenciais, através de técnicas de monitoramento nos seus componentes, podendo assim, estimar a progressão de uma falha (LEE et al., 2014). Desta forma, considera-se FMECA como a melhor técnica de análise de falhas, sendo qualitativa por identificar os possíveis modos de falha em componentes extraídos do conhecimento de especialistas, e quantitativa por priorizar sua severidade, detectabilidade e diagnóstico. Indutiva porque visa prognosticar possíveis efeitos de falhas vindas de causas já identificadas, e finalmente, por ser uma abordagem do tipo *bottom-up* que analisa as falhas do nível inferior de um sistema de manufatura (componentes mecânicos).

Segundo Cooper (2015), as principais aplicações da FMEA podem ser num elemento ou num processo da manufatura. Quando requerida a análise em um elemento, usa-se a DFMEA (do inglês *Design Failure Mode and Effect Analysis*) e, quando requerido para processos a PFMEA (do inglês *Process Failure Mode and Effect Analysis*). A FMEA junto à Análise de Criticidade é denominada de FMECA, sendo que na atualidade tanto FMEA como FMECA podem ser consideradas sinônimos, desde que identifiquem os modos de falha, seus efeitos, causa, formas de controle e análise da criticidade em relação a sua severidade, detecção, entre outros critérios de classificação (EBRAHIMIPOUR; REZAIE; SHOKRAVI, 2010).

A FMECA é uma técnica poderosa usada por engenheiros e analistas de confiabilidade para identificar funções e componentes cuja falha irá levar a resultados indesejáveis, tais como perda de produção, danos ou até mesmo acidentes. A FMECA foi proposta pela primeira vez pela NASA, em 1963, para atender a requisitos de confiabilidade óbvios. Desde então, tem sido amplamente utilizada como uma técnica poderosa para análise de confiabilidade de sistemas

industriais, aeroespaciais, nucleares, automotivas, de turbinas eólicas, entre outros. O principal objetivo da FMECA é descobrir e priorizar as falhas potenciais, através do cálculo do Número de Prioridade de Risco (RPN - do inglês *Risk Priority Number*), que representam um efeito negativo sobre o sistema e seu funcionamento adequado. Os resultados auxiliam na identificação dos modos de falha, suas causas e efeitos sobre o processo produtivo. Essa técnica pode ser implementada durante as fases de desenvolvimento ou na fase de funcionamento (EBRAHIMIPOUR; REZAIE; SHOKRAVI, 2010).

Para a padronização o uso da FMEA/FMECA, foram criadas normas, tais como: MIL-STD-1629A:1980 emitida pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, mas cancelada em 1998 e substituída pela SAE ARP5580:2001, que estabelece requisitos e procedimentos para a execução de uma FMECA sistemática para cada falha funcional ou elemento físico relacionado ao bom funcionamento do sistema, auxiliando nas intervenções de manutenção, através do planejamento e análise funcional elaborado pelos possíveis modos de falha e seus efeitos. Para os critérios de classificação através do RPN, usa-se a norma SAE J1739:2009, que possui termos, requisitos e tabelas de classificação. Além disso, a norma IEC 60812:2006 fornece as etapas para a elaboração da FMEA/FMECA numa manufatura (VOGL; WEISS; DONMEZ, 2014a). Finalmente, para análise dos modos de falha e identificação de sintomas e técnicas de monitoramento adequados, a norma ISO 13379-1:2012 adapta FMECA em Análise de Sintomas e Modos de Falha (FMSA - do inglês *Failure Mode Symptoms Analysis*).

Além disso, a norma ISO 17359 (2011), que orienta o monitoramento e diagnóstico em máquinas, recomenda o uso de técnicas de análise de modos de falha derivadas da FMECA, para verificar se as atividades desenvolvidas estão de acordo com o estabelecido, servindo posteriormente num prognóstico efetivo (VOGL; WEISS; DONMEZ, 2014a). Portanto, neste trabalho a análise de falhas de componentes mecânicos é realizada adaptando a FMECA para identificar sintomas e técnicas de monitoramento conforme proposto na norma ISO 13379-1 (2012), denominada de FMSA. Essa técnica de análise contém todas as informações sobre falhas em componentes mecânicos, que podem ser usadas como uma fonte de conhecimento para o diagnóstico e posterior prognóstico (SNOOKE; PRICE, 2012; DU; WANG; ZHANG, 2013; YUAN; JIANG; LIU, 2013; MEDINA-OLIVA et al., 2014; ZHOU; YU; ZHANG, 2015; GUILLÉN et al., 2016).

Assim, para o desenvolvimento da FMSA, devem reunir-se conhecimentos técnicos, tais como normas, manuais e histórico de dados. Paralelamente devem ser consultados artigos científicos e/ou experiências de especialistas para levantar informações referentes a resultados

na aplicação da técnica, novos avanços e limitações. Nesse contexto, esse conhecimento pode ser transferido formalmente para modelos de Sistemas Especialistas por meio de ontologia (SAALMANN et al., 2016). Aplicação da FMSA para CBM no contexto de manufatura inteligente é apresentado em Guillén et al. (2016).

Segundo Du; Wang; Zhang (2013), FMSA é essencialmente uma modificação de um processo FMECA com foco nos sintomas produzidos por cada modo de falha identificado e a seleção subsequente da mais apropriada estratégia e técnica de detecção e monitoramento. Assim, os principais termos utilizados na FMSA são:

- Sistema: conjunto de subsistemas inter-relacionados que satisfazem coletivamente um requisito. Neste trabalho, o sistema é entendido como um conjunto de máquinas ou equipamento (IEC-60812, 2006).
- Equipamento: grupo de máquinas, incluindo todos os componentes de controle de máquina ou processo, e.g. um motor elétrico mais uma bomba centrífuga (ISO 13372, 2012).
- Subsistema: parte de um sistema, que é em si, um sistema. Um subsistema está normalmente em um nível inferior ao sistema ao qual faz parte (ISO 17359, 2011).
- Máquina: subsistema mecânico projetado expressamente para executar uma tarefa específica, como a formação de material ou a transferência e transformação de movimento, força ou energia (ISO 13372, 2012).
- Componente: parte individual ou elemento substituível de um subsistema (IEC-60812, 2006).
- Elemento reparável: que pode, sob determinadas condições, após uma falha, voltar a um estado no qual pode executar uma função requerida (IEC 60050-192, 2015).
- Função requerida: Função considerada necessária para cumprir uma determinada exigência (IEC 60050-192, 2015).
- Modo de falha: ou motivo da falha. Maneira em que a falha ocorre, um modo de falha pode ser definido pela função requerida perdida ou outro estado de transição que ocorreu (IEC 60050-192, 2015).
- Efeito da falha: consequência de uma falha, dentro ou fora dos limites do elemento em falha (IEC 60050-192, 2015).
- Severidade: ou gravidade, é a extensão da perda, dano ou prejuízo causado por uma falha ou avaria (ISO 13372, 2012).

- Causa da falha: conjunto de circunstâncias que levam a uma falha (IEC 60050-192, 2015).
- Falha parcial: falha caracterizada pela perda de algumas, mas não todas, as funções requeridas, podendo levar a um estado de degradação (IEC 60050-192, 2015).
- Sintoma: percepção, feita por meio de observações e medições humanas, que pode indicar a presença de uma ou mais falhas (ISO 13372, 2012).
- Parâmetro: variável que representa alguma característica significativa de um sistema mensurável (ISO 13372, 2012).
- Técnicas de medição: quando um parâmetro mensurável que precisa de uma ou mais técnicas de medição. Seus parâmetros medidos podem ser medidas simples de valores globais ou valores em média ao longo do tempo (ISO 17359, 2011).
- Prognóstico: análise dos sintomas das avarias, para prever condições futuras da vida útil remanescente de um elemento, dentro dos seus parâmetros de projeto (ISO 13372, 2012).
- Diagnóstico: Exame de sintomas para determinar a natureza da avaria ou falha (ISO 13372, 2012).
- Anomalia: irregularidade ou desvio de uma condição padrão, em um elemento (ISO 13372, 2012).
- Alerta: é a primeira zona de uma anomalia e deve ser identificada com um indicativo amarelo, exigindo maior conhecimento (ISO 13372, 2012).
- Alarme: é uma zona de anomalia mais grave do que um alerta e deve ser identificado com um indicativo vermelho, exigindo ações preventivas ou corretivas (ISO 13372, 2012).

Segundo a norma ISO 13379-1 (2012), o critério de classificação para obter a técnica de monitoramento mais adequada é através do grau de detecção, severidade, diagnóstico e prognóstico, de cada modo de falha de um determinado componente mecânico, resultando no Número de Prioridade de Monitoramento (MPN - do inglês *Monitoring Priority Number*).

MPN pode ser obtido de: Tabela 3 que apresenta uma sugestão de critérios para classificar a severidade (SEV) ou gravidade do efeito de um modo de falha em relação à função requerida e seu grau de relevância em relação ao correto funcionamento de um determinado processo produtivo. A Tabela 4 classifica a precisão dos sintomas na elaboração de um diagnóstico (DGN) mais preciso para identificar o modo de falha mais relevante. A Tabela 5

classifica o grau de monitoramento e controle de uma causa de um modo de falha, ou seja, identifica a sua detectabilidade (DET). Finalmente na Tabela 6, apresenta-se a escala dos critérios de probabilidade para prever a RUL, denominada de grau de prognóstico (PGN). Isto ocorre avaliando a qualidade dos parâmetros disponíveis para interpretar as informações provenientes das técnicas usadas no monitoramento de condições.

Tabela 3 - Escala para avaliação dos efeitos dos modos de falha

Severidade	Critério: Gravidade do efeito na operação do elemento	Escala
Muito alta (Catastrófico)	Qualquer evento que possa potencialmente causar a perda da função primária do elemento, resultando em danos significativos para a operação do elemento ou seu ambiente, e/ou causar a perda de vida ou integridade física	4
Alta (Crítico)	Qualquer evento que possa potencialmente causar a perda da função primária do elemento, resultando em danos significativos para o referido elemento ou seu ambiente e perigo insignificante para a vida ou integridade física	3
Moderada (Marginal)	Qualquer evento que possa causar a perda da função de desempenho do elemento sem danos consideráveis a qualquer outro elemento ou à integridade física	2
Baixa (Insignificante)	Qualquer evento que possa causar a perda da função de desempenho do elemento, resultando em danos insignificantes para qualquer outro elemento ou seu ambiente e sem danos à vida ou à integridade física	1

Fonte: Norma ISO 13379-1 (2012)

Tabela 4 - Escala para detectar sintomas de um modo de falha

Diagnóstico	Critério: Identifica sintomas de modos de falha	Escala
Muito alto	É praticamente certo de que o diagnóstico do modo de falha será preciso	5
Alto	Existe uma grande probabilidade de que o diagnóstico de modo de falha será preciso	4
Moderado	Existe uma probabilidade moderada de que o diagnóstico do modo de falha seja preciso	3
Baixo	Existe uma baixa probabilidade de que o diagnóstico do modo de falha seja preciso	2
Remoto	Existe uma probabilidade remota de que o diagnóstico do modo de falha seja preciso	1

Fonte: Norma ISO 13379-1 (2012)

Tabela 5 - Escala para critério de detecção

Deteção	Critério: Probabilidade de detectar o sintoma do modo de falha	Escala
Muito alta	É praticamente certo que o modo de falha será detectado	5
Alta	Existe uma grande probabilidade de que o modo de falha seja detectado	4
Moderada	Existe uma probabilidade moderada de que o modo de falha seja detectado	3
Baixa	Existe uma baixa probabilidade de que o modo de falha seja detectado	2
Remota	Existe uma probabilidade remota de que o modo de falha seja detectado	1

Fonte: Norma ISO 13379-1 (2012)

Tabela 6 - Escala para avaliar o potencial de prognosticar um modo de falha

Prognóstico	Critério: Estimar a vida útil remanescente do elemento	Escala
Muito alto	É praticamente certo de que o prognóstico no modo de falha será preciso	5
Alto	Existe uma grande probabilidade de que o prognóstico no modo de falha seja preciso	4
Moderado	Existe uma probabilidade moderada de que o prognóstico no modo de falha seja preciso	3
Baixo	Existe uma baixa probabilidade de que o prognóstico no modo de falha seja preciso	2
Remoto	Existe uma probabilidade remota de que o prognóstico no modo de falha seja preciso	1

Fonte: Norma ISO 13379-1 (2012)

MPN é a multiplicação dos quatro rankings, e um valor elevado indica que a técnica designada é a mais adequada ao modo de falha associado. No entanto, para Chanamool e Naenna (2016), a implementação de técnicas de análise de modo de falhas apresenta um problema de eficácia quando usado o MPN para priorizar os modos de falhas. Além disso, Liu, Liu e Liu (2013), na revisão feita em uma série de artigos acadêmicos publicados entre 1992 e 2012, detectaram que, dependendo da combinação dos valores de SEV e DET, nem sempre se obtém uma classificação que priorize o modo de falha mais importante. Nesse sentido, a norma IEC 60812:2006 recomenda que a priorização dos modos de falha seja em função da SEV com classificação mais alta, tal como 4, i.e., a tomada de decisão deve ser guiada pela magnitude da severidade ao invés de apenas o MPN.

2.4.3 Técnicas para o monitoramento de condições dos elementos da manufatura

Segundo a norma ISO 17359 (2011), revisada em 2016, e o levantamento realizado pelo NIST (VOGL; WEISS; DONMEZ, 2014a), as principais técnicas de medição para identificar o comportamento do funcionamento em elementos mecânicos, especificamente em componentes mecânicos são:

- Análise de vibrações, guiada pela norma ISO 13373-1 (2002), revisada em 2012. Segundo García Márquez et al. (2012), é a técnica que continua sendo a mais empregada em equipamentos mecânicos rotativos. Precisando de diferentes sensores para diferentes frequências, tais como transdutores de posição usados para a faixa de baixa frequência que processam deslocamentos, transdutores de velocidade na área de frequência média também apropriados para identificar deslocamento, e principalmente os acelerômetros que cobrem faixas baixas e altas

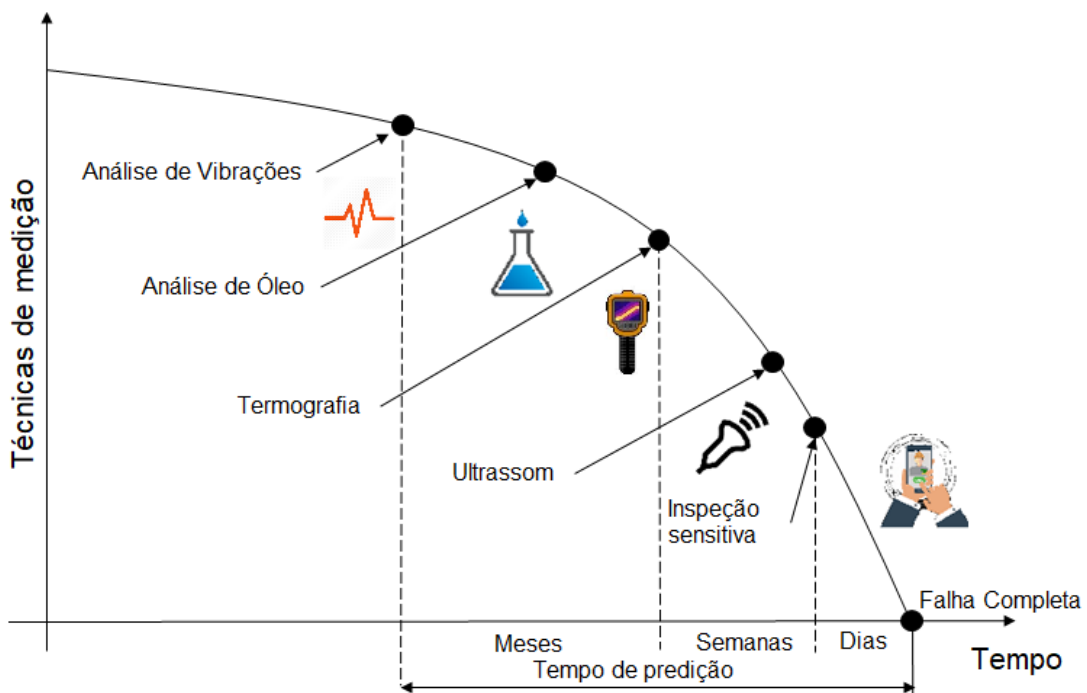
de frequência ideais para processar parâmetros de aceleração, velocidade e deslocamento. Quanto às aplicações, é apropriado para monitorar caixas de engrenagens, mancais, rotores, entre outros componentes rotativos. Para a medições de vibração, recomenda-se usar a magnitude velocidade em mm/s com valores em raiz quadrática média (r.m.s. - inglês *root mean square*), deslocamento r.m.s. em μm , e aceleração em m/s^2 . A avaliação das medições de vibrações segundo tipo de equipamento é especificada na norma ISO 20816-1 (2016). Além disso, o vocabulário de termos e conceitos relacionados a essa técnica de medição pode ser encontrado na norma ISO 2041 (2009) revisada em 2014. Além disso, tal técnica é apropriada para modelagem de sistemas especialistas em componentes mecânicos rotativos (LIANG; FAGHIDI, 2014; MCKEE et al., 2015).

- Análise de óleo, definido pela norma ISO 14830-1 (2000) como monitoramento baseado na tribologia, ou seja, no estudo de fenômenos de lubrificação, atrito e desgaste entre elementos mecânicos. Essa técnica normalmente é executada fora da linha de produção retirando amostras, principalmente porque sensores on-line apresentam níveis aceitáveis de análise apenas para examinar a temperatura do óleo, contaminação e umidade. Com o uso dessa técnica, pouca ou nenhuma vibração pode ser evidenciada enquanto as falhas estão se desenvolvendo, mas a análise do óleo pode fornecer avisos antecipados da contaminação do óleo por resíduos ou alteração nas propriedades dos componentes através da caracterização das partículas encontradas no fluido, dando uma indicação de desgaste excessivo, por exemplo nas pistas de um mancal de rolamentos (HAMMAMI et al., 2017). Para complementar essa técnica, a norma ISO 4406 (1999) pode ser usada para conferir o nível de contaminação do óleo analisado.
- Termografia, orientada pela norma ISO 18434-1 (2008), revisada em 2016. A termografia é frequentemente usada para monitorar componentes eletrônicos e elétricos, e muitas vezes envolve a interpretação visual de pontos quentes que surgem devido a um aquecimento excessivo. Em equipamentos mecânicos, sua aplicação mais conhecida é na identificação de aquecimento de componentes rotativos de difícil acesso, devido à falta de lubrificante. Essa técnica está recentemente apresentando bons resultados para o CM online (GARCÍA MÁRQUEZ et al., 2012).

- Ultrassom, definida pela norma ISO 29821-1 (2011), revisada em 2016. As características de propagação de onda ultrassônica permitem estimar a localização e a geometria de uma avaria através das imagens obtidas e estimar sua dimensão aproximada, i.e., a gravidade de uma anomalia. Uma aplicação dessa técnica é na medição da espessura fina do lubrificante existente entre os elementos rolantes e anéis de um mancal de rolamentos para detectar pequenas fraturas (PRAHER; STEINBICHLER, 2017).
- Emissão acústica, definida pela norma (ISO 22096, 2007), revisada em 2015. É o fenômeno da liberação rápida de energia de deformação e as ondas elásticas (acústicas), em e.g. pistas internas de mancais de rolamentos, quando ocorrem mudanças irreversíveis na sua estrutura interna. As principais fontes são a geração e propagação de pequenas fraturas (fissuras), mas carecem da identificação precisa da deformação. O monitoramento on-line está crescendo gradualmente para o CM em componentes rotativos (SCHNABEL et al., 2017).

No estado da arte elaborado por Tchakoua et al. (2014) sobre novas tendências do monitoramento em equipamentos mecânicos rotativos, destaca-se a análise de vibrações como técnica de medição mais eficiente, podendo se antecipar à captura de anomalias entre 1 a 9 meses, comparada com as outras técnicas já citadas, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Típico desenvolvimento de uma falha em componentes mecânicos rotativos



Fonte: Adaptado de Tchakoua et al. (2014)

Quanto à técnica de medição mais apropriada, diversas pesquisas abordam a análise de vibrações como a técnica mais confiável para a coleta de dados em mancais de rolamentos dos equipamentos da manufatura. Desta forma, Niu e Yang (2010), no estudo de sistemas de prognóstico e monitoramento de condições com abordagens inteligentes, apontam a análise de vibrações como fonte principal de dados que posteriormente são tratados como sistemas especialistas, oferecendo, assim a tendência do comportamento de uma máquina. Niu, Yang e Pecht (2010), no trabalho sobre o desenvolvimento de um sistema de CBM otimizado por fusão de dados e RCM, apontam como fonte dos dados a análise de vibrações. Sikorska, Hodkiewicz e Ma (2011), destacam a análise de vibrações como fonte de processamento de dados através de abordagens orientadas por dados estatísticos ou de sistemas especialistas, e modelos baseados no conhecimento. Para Du, Lv e Xi (2012), a previsão do processo de degradação em máquinas rotativas é baseada em modelos híbridos usando abordagens de sistemas especialistas e dados oriundos de fenômenos físicos em mancais de rolamentos que, por sua vez, são alimentados por sinais da análise de vibrações. Hu et al. (2012) abordam o prognóstico com algoritmos orientados por dados através de magnitudes de vibração e posterior estimativa da RUL em usinas de energia nuclear. Hua et al. (2012) apresentam um método de análise da degradação do desempenho baseado em modelos estatísticos que capturam eventos históricos do tempo médio para falha (MTTF - do inglês *Mean Time-to-Failure*), formados por intervenções de manutenção e dados da análise de vibrações. Teixeira, Tjahjono e Alfaro (2012) consideram que a disponibilidade operacional usando parâmetro de vibração em simulação online é adequada para conseguir o PHM na manufatura. Wang, Youn e Hu (2012) apresentam um mapa de propagação de incerteza genérica para os prognósticos da saúde e gestão da RUL carregadas com parâmetros estatísticos de vibração. Elattar, Elminir e Riad (2016), na revisão literária sobre o prognóstico, destacam a integração de sistemas de gestão da saúde dando destaque à técnica de análise de vibrações como fonte para coleta de dados e estimativa da RUL na manufatura. Liu et al. (2017) consideram que a predição da RUL de equipamentos mecânicos é obtida com o monitoramento dos parâmetros de vibração em componentes mecânicos tais como mancais de rolamentos e processados por métodos estatísticos e de AI. Wang, Hu e Li (2017) abordam o reconhecimento da degradação do mancal de rolamento como principal componente mecânico que identifica a RUL em equipamentos, através da coleta de sinais de vibração capazes de descrever características complexas das anomalias mecânicas.

Existem modelos computacionais de AI que possuem características que são relacionadas ao comportamento humano, tais como raciocínio e capacidade de solucionar

problemas, denominados de sistemas especialistas que usam o conhecimento de especialistas humanos para resolver problemas complexos. O conhecimento concentrado num especialista humano está formado de históricos e experiências adquiridas ao longo de uma vida profissional que formam o conjunto de informações que podem estar concentradas em publicações técnicas e científicas, tais como normas internacionais. Assim, os sistemas especialistas se comportam como seres humanos em domínios específicos de conhecimento que trabalham em áreas específicas, capazes de solucionar problemas por meio de algoritmos e modelo que levam à obtenção de uma solução requerida. Nesse contexto, os sistemas especialistas podem ser definidos como sistemas informatizados (hardware e software) que conseguem solucionar problemas permitindo tomada de decisões adequadas, que normalmente um especialista humano capacitado tomaria (HIDALGO, 2015).

2.5 ONTOLOGIA

A ontologia descreve formalmente um conhecimento por meio de conceitos e relações que existem em uma determinada área de concentração ou domínio específico, e.g, Gestão e Manutenção de ativos físicos de uma organização. Ontologia detalha de forma colaborativa uma determinada área de interesse, delimitando o contorno do fenômeno a ser analisado e define os termos a serem usados para a aquisição de conhecimento do determinado domínio (ARAUJO, 2003).

Por outro lado, a web semântica que é uma extensão da atual web, onde as informações têm um significado bem definido capazes de serem processadas por uma máquina (ANTONIOU; VAN HARMELEN, 2004), fornecendo uma estrutura comum que permite que os dados sejam compartilhados e reutilizados em aplicações dentro de um contorno de comunicação (OWL-RESPOSITORIES, 2016). Tecnologias de web semântica proporcionam meios mais poderosos de definição de conceitos e suas relações em um determinado domínio, o que resulta em mais clareza e menos ambiguidade quando modelado tal domínio.

Nesse contexto, a ontologia é um elemento importante da web semântica. Segundo Aljumaili et al. (2015), o termo Ontologia refere-se à filosofia que trata da natureza das coisas, suas relações e categorias. Na ciência da computação, especificamente para aplicações de AI, “uma ontologia é uma especificação explícita, formal de uma conceptualização compartilhada” (GRUBER, 1993).

A importância de uma ontologia tem sido reconhecida pela tecnologia da informação, a qual abrange: sistemas de bases de dados, representação do conhecimento, modelagem qualitativa, integração da informação, gerenciamento de conhecimento e projeto de sistemas baseados em agentes, em todas as categorias que possa assumir (PATTON et al., 2014).

A ontologia é um tópico popular de pesquisa da área de engenharia, por fornecerem um entendimento comum e compartilhado de um domínio que pode ser comunicado entre pessoas e aplicativos. As ontologias possuem uma função similar à de um esquema de base de dados, diferenciando-se nos seguintes aspectos (SCHARFFE; ZAMAZAL; FENSEL, 2014):

- Uma linguagem para definir ontologias é sintática e semanticamente mais rica do que as abordagens comuns para descrição de bases de dados;
- A informação descrita por uma ontologia consiste em textos de linguagem natural semiestruturada e não na forma de tabelas;
- Uma ontologia necessita ser uma terminologia consensual e compartilhada porque é usada para compartilhamento e troca de informação;
- Uma ontologia oferece uma teoria de domínio e não a estrutura de um repositório de dados.

Segundo Bermudez-Edo et al. (2015), a grande quantidade de dados que trafegam numa indústria de manufatura é normalmente recuperada na forma de arquivos CSV ou XML, mas com semântica muito limitada, o que dificulta o processamento automático da gestão de dados. Assim, os autores recomendam a ontologia como um mecanismo terminológico que facilita a organização de um domínio de conhecimento para o intercâmbio de informações entre pessoas e dispositivos.

Para Yin et al. (2015), a extração de informações semânticas dos processos de manufatura é realizada usando ontologias, onde quase qualquer conceito ou relação pode ser descrito e disponibilizado para contribuir com a integração entre homem e máquina, permitindo a gestão de dados tão desejada pela Manufatura Inteligente. Desta forma, López et al. (2015) consideram que a ontologia beneficia as novas abordagens do CPS para sua interoperabilidade sobre modelos de dados bem definidos graças à linguagem OWL 2 que serve para definir formalmente o vocabulário e taxonomia como também a captura dos dados de uma manufatura.

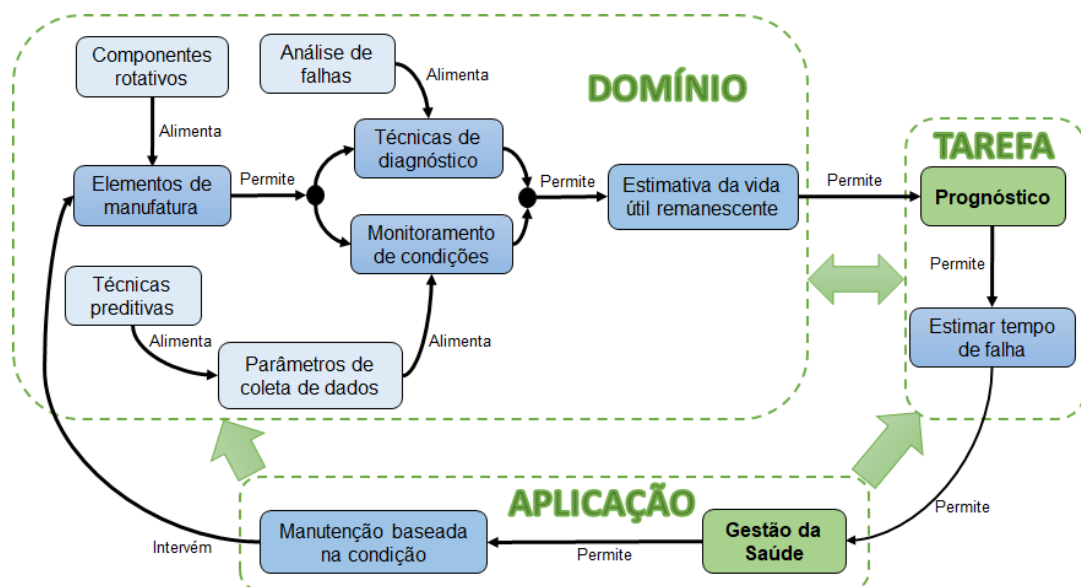
Kadiri et al. (2015) também reforçam a importância do tratamento de dados nos sistemas de manufatura, que não é apenas uma questão de padrões para troca de dados. Destacando o uso de ontologias como um meio formal de especificar conceitos compartilhados, podendo ser usado para descrever um domínio e para raciocinar sobre as entidades dentro desse

domínio. Os autores consideram que, ao modelar conhecimentos por meio da ontologia, as relações de relações adicionais possam ser construídas de forma automática ao longo do tempo. Algumas soluções para a manufatura conseguem a desejada gestão de tratamento de dados, uteis para a tomada de decisões estratégicas, adaptando normas específicas através do uso de ontologias (PALMER et al., 2016).

Uma ontologia pode ser classificada em: (i) ontologia de nível superior (ontologia superior, de alto nível ou ontologia de fundação), é uma ontologia que representa conceitos muito gerais, tais como, tempo, espaço, matéria, objeto, ação, evento, etc., independentes de um domínio específico, ou seja, uma ontologia compartilhada por uma grande comunidade de usuários; (ii) ontologia de domínio, que descreve conceitos fundamentais de acordo com um domínio genérico, como a medicina, a engenharia mecânica ou o PHM na manufatura; (iii) ontologia de tarefa, que descreve atividades fundamentais de acordo com uma função genérica, processo ou cenário, e.g. diagnosticar, prognosticar, detectar, monitorar; e (iv) ontologia de aplicação, que descreve o conhecimento específico oriundo de uma tarefa e domínio, i.e. funções desempenhadas pelos indivíduos de um domínio ao executar uma determinada tarefa (GUARINO, 1998).

Nesse contexto, os tipos de ontologia desenvolvidos nesta tese são de domínio, na implementação do PHM em máquinas mecânicas; de tarefa, na estimativa do início de uma falha funcional; e de aplicação, na solicitação de uma intervenção preventiva baseada nas condições. Na Figura 9 são apresentados os tipos de ontologias aplicados neste trabalho.

Figura 9 - Tipos de ontologias aplicadas no PHM de máquina mecânicas



Fonte: Adaptado de Guarino (1998)

Para a modelagem de uma ontologia, a linguagem de ontologia na web (OWL 2) é a mais recomendada para a padronização da web semântica segundo o consórcio W3C (do inglês *World Wide Web Consortium*) (SAFIA; AICHA, 2014). Além disso, ontologias em OWL 2 podem ser usadas junto à informação escrita em RDF (WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, 2012). Além disso, sob OWL 2 consultas podem ser formuladas utilizando a linguagem SPARQL para extrair informações armazenadas na ontologia (W3C et al., 2013). Além do mais, De Farias, Roxin e Nicolle (2016) consideram que, dependendo da complexidade do modelo ontológico, o processo de relacionamento da ontologia pode ser realizado através da linguagem de regras da web semântica (SWRL - do inglês *Semantic Web Rule Language*) (HORROCKS et al., 2004).

OWL 2 é eficiente na descrição de conceitos de um domínio e suas relações entre si, mas carece da capacidade de raciocínio de regras. Assim, SWRL que é uma extensão para o OWL definir regras compostas por duas partes: o antecedente e o conseqüente, onde cada regra é uma implicação entre o antecedente e o conseqüente, i. e. quando as condições do antecedente são verdadeiras, então as condições do conseqüente também são verdadeiras (ZHAO; LIU, 2008)

Finalmente, ontologia, também pode ser definida com um modelo que possui um conjunto de axiomas lógicos, criados para explicar as relações que possui um domínio, o que resulta em um entendimento compartilhado que pode ser conectado com a semântica do mundo real, permitindo que uma máquina entenda melhor o seu funcionamento (FENSEL, 2001). Porém, para modelar um domínio, usando ontologia, devem ser seguidos procedimentos que guiem sua construção. Tal necessidade é atendida graças à engenharia de ontologia.

2.5.1 Engenharia de ontologia

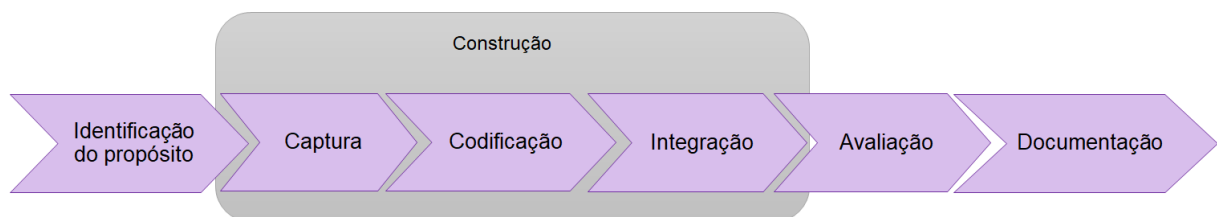
Existem vários procedimentos para o desenvolvimento de ontologia na literatura. De Uschold e King (USCHOLD; KING, 1995), Grüninger e Fox (GRÜNINGER; FOX, 1995) e METHONDOLOGY (LÓPEZ et al., 1999) são exemplos de procedimentos tradicionais de engenharia de ontologias. Para Bautista-Zambrana (2015), outros procedimentos para a construção de ontologias de forma sistemática com um conjunto de atividades são: On-to-Knowledge (STAAB et al., 2001), OntoClean (GANGEMI; GUARINO; OLTRAMARI, 2001), DILIGENT (PINTO; STAAB; TEMPICH, 2004), *Ontology Development 101* (NOY; MCGUINNESS, 2001) e DOGMA (JARRAR; MEERSMAN, 2002). Além disso, Hong e Yin

(HONG; YIN, 2016) destacam os seguintes procedimentos: UPON (DE NICOLA; MISSIKOFF; NAVIGLI, 2005) e NEON (SUÁREZ-FIGUEROA; GÓMEZ-PÉREZ; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, 2012).

A seguir é fornecida uma breve visão de alguns procedimentos de engenharia de ontologias proeminentes e relevantes com o objetivo de justificar o procedimento adotado nesta pesquisa. Levantamentos detalhados sobre os procedimentos de concepção de ontologias podem ser encontrados em (SIMPERL; TEMPICH, 2006; SÁNCHEZ; CAVERO; MARTÍNEZ, 2007) (Jones et al., 1998, Simperl, Tempich 2006, Sánchez, Cavero e Martínez 2007).

Uschold e King (1995) é um dos primeiros procedimentos de criação de ontologias, que consiste de quatro fases e três estratégias para a identificação de conceitos na atividade de captura de dados, conforme apresentado na Figura 10. Estas estratégias são: *bottom-up*, *top-down* e *middle-out*. A abordagem *bottom-up* começa com a definição das classes mais específicas com base nas instâncias disponíveis no mundo real, com posterior agrupamento dessas classes em conceitos mais gerais. A abordagem *top-down* começa com a identificação dos conceitos mais gerais, organizando-os em uma taxonomia de alto nível e sistema de axiomas, e posteriormente detalha os conceitos e axiomas mais específicos. Esta abordagem, quando realizada de forma adequada, pode cobrir a estrutura básica do domínio em estudo. Finalmente, a abordagem *middle-out* começa por identificar os termos básicos e, em seguida, os específicos e generaliza conforme necessário.

Figura 10 - Procedimento de modelagem de ontologia Uschold e King



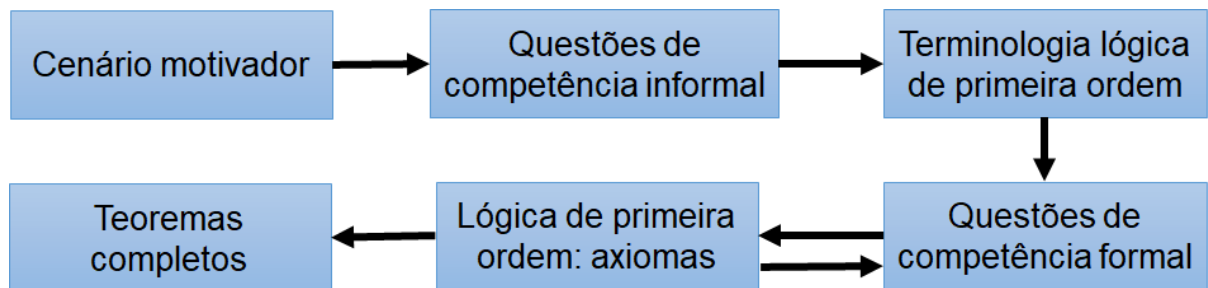
Fonte: adaptado de Uschold e Gruninger (1996)

A principal desvantagem do procedimento Uschold e King (1995) é a falta de recomendações para a formalização do conhecimento e modelagem conceitual (GOMEZ-PEREZ; FERNANDEZ-LOPEZ; CORCHO, 2004).

Grüninger e Fox (1995) é inspirado no desenvolvimento de sistemas baseados no conhecimento, usando lógica de primeira ordem. Os autores sugerem o uso de questões de competência para definir o escopo do domínio e também definir a terminologia e relações ao

criar a ontologia. Questões de competência são de dois tipos neste procedimento: informal e formal. Questões de competência informais são definidas com base em um conjunto de cenários de motivação que deverão ser definidos como requisitos da ontologia que é escrito em linguagem natural. Estas questões da competência desempenham um papel central na especificação do requisito para uma ontologia e são consideradas como um meio adequado para a avaliação da ontologia. Questões formais de competência são definidas em forma de axiomas com base no apontamento que a ontologia foi definida. Este método pode considerar consultas ontológicas que podem ser executadas por meio de um modelo ontológico. Esse procedimento é apresentado na Figura 11.

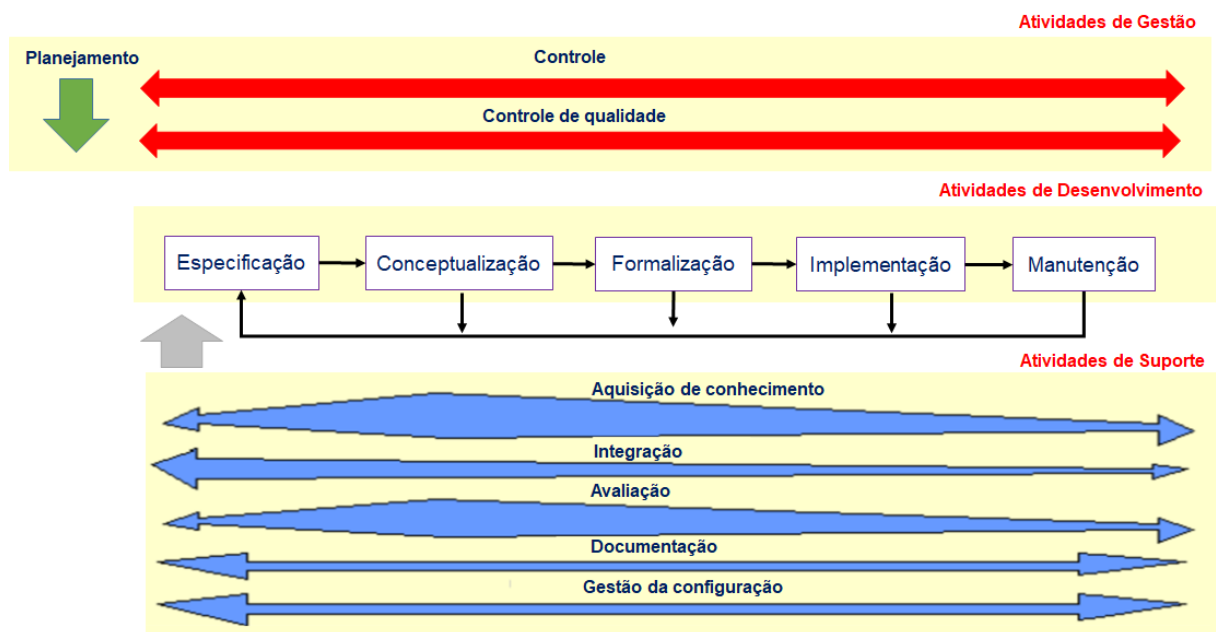
Figura 11 - Procedimento de concepção e avaliação de ontologia Grüninger e Fox



Fonte: adaptado de Grüninger e Fox (1995)

Por outro lado, na Figura 12 é apresentado o procedimento para o desenvolvimento de ontologias, denominado de METHONTOLOGY.

Figura 12 - Processo de desenvolvimento e ciclo de vida de METHONTOLOGY

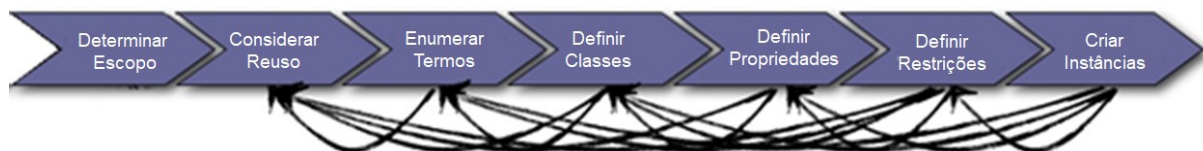


Fonte: adaptado de Corcho et al. (2005)

METHONTOLOGY (1999) é uma estrutura que facilita a construção de ontologias, a nível conceptual e tem suas raízes em métodos de engenharia de software e engenharia do conhecimento. É constituída por: (a) um processo de desenvolvimento de ontologias com a identificação das principais atividades, tais como, conceptualização, configuração, gestão, avaliação, implementação de integração; (b) um ciclo de vida com base na evolução de protótipos; e (c) um método, especificando as etapas para a realização das atividades, as técnicas utilizadas, os resultados e sua avaliação.

Após detalhar sucintamente os procedimentos tradicionais para a concepção de ontologias, percebe-se que esses procedimentos possuem em comum atividades de especificação, conceptualização, formalização, implementação e manutenção. Assim, para Rautenberg (2016), considera-se pertinente a combinação de alguns procedimentos tradicionais para o ciclo de vida de uma ontologia, atendendo assim a aspectos de expressividade e funcionalidade de diversos processos. Nesse sentido, destaca o procedimento **METHONTOLOGY** e sua combinação com o procedimento *Ontology Development 101*. Sendo que **METHONTOLOGY** contribui com a documentação do artefato, mas, a parte central da concepção de uma ontologia é por meio do procedimento *Ontology Development 101*, aportando um processo iterativo de sete passos que guia o desenvolvimento correto da ontologia, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Etapas sugeridas de acordo com o procedimento de desenvolvimento 101



Fonte: Adaptado de Natalya e Deborah (2001)

Assim, neste trabalho usa-se o procedimento 101 para a construção de um modelo ontológico. Mas, além de especificar o procedimento a ser adotado, a modelagem de ontologia requerer de ferramentas que suportem todas as suas atividades de desenvolvimento. Algumas ferramentas comerciais de plataforma fechada são TopBraid e OntoStudio e, nas versões gratuitas ou plataforma aberta mais usadas tem-se: OntoEdit (SURE; ANGELE; STAAB, 2002), HOZO (KOZAKI; KITAMURA; MIZOGUCHI, 2005) e Protégé (GARCÍA-PEÑALVO et al., 2012). Sendo que dentre essas ferramentas (ou editores de ontologia), o Protégé destaca-se como plataforma aberta e que possui uma extensibilidade para *Plug-ins*, junto com capacidades de importação e exportação em formatos XML(S), OWL, RDF(S) e

Excel, além de oferecer taxonomia gráfica, consultas em SPARQL, regras na linguagem SWRL, *reasoner Hermit, Pellet*, entre outros.

Pellet é o primeiro *reasoner* completo para OWL, disponível no editor Protégé, com suporte extensivo para avaliação de indivíduos, tipos de dados definidos pelo usuário e suporte de depuração para ontologias. Pellet começou como um sistema de prova de conceito para ajudar a atender os requisitos de experiência de implementação do W3C, mas, tornando-se na atualidade uma ferramenta prática e popular para trabalhar com a linguagem OWL, oferecendo uma variedade de recursos, incluindo resposta de consultas conjuntas, suporte de regras, raciocínio para indicar axiomas, validação do modelo, entre outros. Pellet fornece várias interfaces, incluindo ligações de API para ferramentas RDF/OWL. Pellet inclui um mecanismo de consulta que pode responder de forma eficiente às consultas expressadas em SPARQL. Além disso, Pellet suporta tipos derivados de usuários com base em tipos numéricos ou de data e hora (SIRIN et al., 2007).

Em Sim e Brouse (2015) aplicações da ontologia na engenharia consideram o Protégé como uma plataforma de edição gráfica da linguagem OWL 2, onde representam-se conceitos para a construção de processos, como uma interface de usuário gráfica intuitiva e fácil de usar, sem exigir muita experiência para seu domínio. No trabalho de Djaid, Saadia e Ramdane-Cherif (2015), usam-se conceitos de ontologia que descrevem os ambientes de um sistema de manufatura e sua relação com os componentes. E para a verificação da consistência de relacionamento de ditos componentes usam o Protégé.

De uma forma geral, pode-se definir o Protégé como um editor de ontologias em linguagem OWL 2, que funciona numa plataforma gráfica de código aberto para construção de modelos baseados em ontologias, implementando ações de apoio na sua criação, visualização e manipulação que futuramente podem aceitar inserção de dados físicos (KHAN; KUMAR, 2014). Atualmente, o Protégé, que foi desenvolvido pela Universidade de Stanford, está na sua versão 5.2.0. Protégé é suportado por uma comunidade de cientistas, governo e usuários corporativos, que utilizam essa ferramenta para construir soluções baseadas no conhecimento em diversas áreas de atuação (STANFORD UNIVERSITY, 2017).

Algumas pesquisas que destacam o uso da plataforma de edição Protégé são: Wang et al. (2017), no uso de ontologias para realizar análises de ameaças e desenvolver estratégias defensivas para segurança móvel; Wan et al. (2017), na gestão de processos e conhecimento em um sistema de planejamento de manutenção colaborativa para máquinas-ferramentas; Manupati et al. (2017), na modelagem de melhorias para o serviço de manufatura; Lyu, Chu e

Xue (2017), na modelagem do conhecimento de produtos, computação distribuída e perspectivas de ciclo de vida; Khouri, Berkani e Bellatreche (2017), na representação do rastreamento do armazenamento de dados semânticos no ciclo de vida de projetos; Bilal et al. (2017), na aplicação da web em dados de materiais de construção para análise de resíduos de construção; Wang e Wang (2016), na aplicação da modularização de ontologia no projeto da interface humano-web para compartilhamento de conhecimento; Svátek, Dudás e Zamazal (2016), adaptando ontologias a artefatos de melhores práticas usando padrões de transformação; Kethavarapu e Saraswathi (2016), na criação de uma ontologia dinâmica baseada em conceito para um sistema de recomendação de trabalho; Evchina e Martinez Lastra (2016), na abordagem híbrida para entrega seletiva de fluxos de informação em sistemas de monitoramento intensivos de dados; Cheng e Chen (2016), no estudo sobre a construção de uma ontologia entre línguas; Benomrane, Sellami e Ben Ayed (2016), na modelagem de um sistema multiagente adaptativo orientada por ontologias; Zhang et al. (2015), na modelagem de uma estrutura de conhecimento baseada em ontologia para seleção de material de engenharia; Dermeval et al. (2015), na modelagem de características com base em ontologia; Santodomingo et al. (2014), no pareamento de ontologias para futuras aplicações em redes inteligentes de energia; Neves, Carvalho e Ralha (2014) na modelagem de uma arquitetura baseada em agentes para recomendação de eventos conscientes e personalizados.

Assim, para este capítulo pode-se concluir que foi realizado o levantamento bibliográfico dos sistemas de manufatura, começando pelas principais formas de comunicação de dados existentes dentro deles, além das definições de ameaças que podem sofrer. Posteriormente, abordam-se os principais conceitos do prognóstico e gestão da saúde para sistemas de manufatura e sua relação com a gestão e manutenção de seus ativos físico. Finalmente apresentaram-se os principais conceitos de ontologia destacando o procedimento de desenvolvimento de ontologias 101, usando a linguagem OWL 2, e o editor de ontologias Protégé que já conta com o *reasoner* Pellet e as linguagens SPARQL e SWRL, para realizar inferências. A continuação, no seguinte capítulo é detalhado o procedimento de desenvolvimento 101 para o modelo ontológico desta tese que aborda a implementação do Prognóstico e Gestão da Saúde na Manufatura.

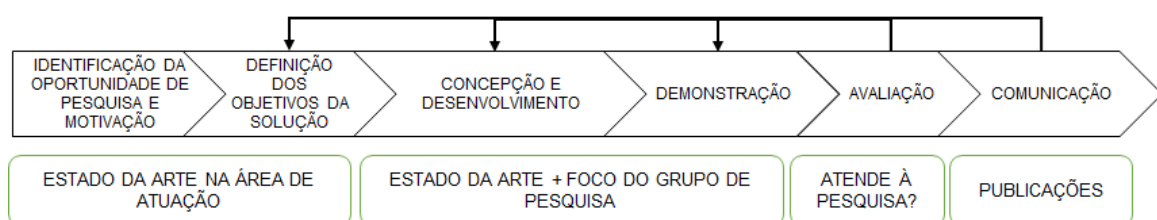
3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Neste trabalho é apresentado o estudo delimitado do prognóstico e gestão da saúde de máquinas mecânicas, elaborado com base em uma pesquisa científica que procura a real contribuição para o mundo acadêmico NBR 14724 (2011). Assim, são desenvolvidos procedimentos para implementação do PHM em sistemas de manufatura por meio da modelagem ontológica que auxilia na sua implementação para a tomada de decisões adequadas que evitem paradas desnecessária do processo produtivo.

Assim, segundo Lacerda et al. (2013), os métodos de pesquisa que consistem em uma série de passos, aceitos pela comunidade acadêmica, servem para a construção de um conhecimento científico, dando assim maior rigor à condução da pesquisa. Todo método de pesquisa deve responder a um problema ou oportunidade de pesquisa e evidenciar seus procedimentos que garantam a confiabilidade dos seus resultados. Quando o método é aplicado na área da ciência natural, o foco é no conhecimento da classe e/ou no fenômeno natural. Por sua vez, quando o método é aplicado na engenharia, esse foco é na concepção de um artefato, ou seja, não é um processo descritivo e sim prescritivo, i.e., sugere como se deve criar o algo.

O presente trabalho segue o método DSR - do inglês *Design Science Research*, que é uma estrutura bem aceita para o desenvolvimento de modelos na engenharia de ontologia (GONG; JANSSEN, 2013; LAU; LI; LIAO, 2014). Segundo Vaishnavi e Kuechler (2015), o DSR possui procedimentos analíticos que permitem o correto desenvolvimento de uma determinada pesquisa em qualquer área de conhecimento, mas com maior potencial na área de engenharia, com diversas aplicações (PURAO, 2013; RAJALA; VAYRYNEN, 2013; SAURIN et al., 2014; TEH et al., 2014; RASOULI et al., 2015; KUKULIES; FALK; SCHMITT, 2016; VAN AKEN; CHANDRASEKARAN; HALMAN, 2016; FILL; PITTL; HONEGGER, 2017; HÄNEL; FELDEN, 2017). Na Figura 14, pode ser observado o detalhamento das etapas do DSR conforme Peffers et al (2007).

Figura 14 - Etapas do Método de Pesquisa DSR



Fonte: Adaptado de Brandtner et al. (2015)

A seguir é descrita a abordagem do método DSR para o presente trabalho, sendo que as etapas do método, conforme apresentado na Figura 14, são: (1) identificação da oportunidade de pesquisa e motivação, (2) definição dos objetivos da solução, (3) concepção e desenvolvimento, (4) demonstração, (5) avaliação, e (6) comunicação. As etapas 1 e 2 são abordadas pelo estado da arte, as etapas 3 e 4 pela concepção do modelo ontológico usando o procedimento 101 e sua demonstração com uma máquina que possua dados reais, a etapa 5 consiste na avaliação da ontologia e finalmente a etapa 6 destaca os meios de comunicação usados pelo pesquisador para divulgar seu trabalho.

3.1 IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE DE PESQUISA E MOTIVAÇÃO

Esta etapa define como deve ser encontrada a oportunidade de pesquisa e justificar o valor de uma solução, i.e., por meio da elaboração do estado da arte de uma área de conhecimento ou atuação do grupo de pesquisa ao qual pertence o trabalho, usa-se a bibliometria em publicações acadêmicas para encontrar tendências que orientem a proposta do presente trabalho para o desenvolvimento de um artefato que possa efetivamente fornecer uma solução e que seja aceito pelo mundo científico.

A primeira etapa do DSR pode ser classificada como uma abordagem qualitativa em função da interpretação que deve ser realizada de alguns valores obtidos, e.g. os índices de citações que classificam os periódicos, fontes de informação para o estado da arte. Tal procedimento pode ser considerado do tipo bibliográfico, por ser a principal fonte que motiva a identificação da oportunidade de pesquisa da presente tese (GIL, 2008).

Pode-se considerar que o estado da arte realiza também o levantamento de todos os tópicos relacionados a um determinado assunto, seja de um artefato, técnica, abordagem, aplicações ou campo de conhecimento, em um determinado intervalo de tempo (FERREIRA, 2002). Para a consistência da pesquisa, esse mapeamento deve ser alimentado por publicações científicas consolidadas, como artigos científicos, já que é através desses meios que os pesquisadores comunicam os seus resultados mais importantes e atuais à comunidade científica de uma dada área.

Esses artigos, geralmente, são publicados em diversos periódicos científicos gerando uma grande quantidade de dados que torna difícil e complexa a identificação do grau de importância de uma dada publicação em uma certa área de conhecimento. Na atualidade, a experiência pessoal de um pesquisador não é mais uma ferramenta suficiente que auxilia na

tomada de decisões para escolher um artigo ou periódico que oriente aspectos relevantes e inovadores para identificar uma oportunidade de pesquisa. Para tal, há a necessidade de ser seletivo, para destacar trabalhos científicos que contribuam efetivamente com a pesquisa científica (MINGERS; LEYDESDORFF, 2015).

Um outro fator que dificulta tal seleção é o aumento massivo de meios de acessibilidade das publicações anuais devido a era da digitalização na Internet. Nesse contexto, criam-se conflitos na tomada de decisões, sendo que o pesquisador muitas vezes escolhe periódicos tradicionais que podem tornar a identificação de uma oportunidade ou problema de pesquisa superficial e desatualizada (MUND; NEUHÄUSLER, 2015).

Tradicionalmente, a classificação de periódicos era feita por listas institucionais estabelecidas por líderes acadêmicos ou através de voto em comissões, contudo essas abordagens são imprecisas em relação ao prestígio e qualidade real de uma publicação. Assim, uma boa identificação de oportunidade de pesquisa exige fontes externas de avaliação da qualidade de periódicos, por meio da bibliometria, eliminando, por conseguinte, avaliações subjetivas (LOWRY et al., 2013).

Nesse contexto, a bibliometria (às vezes chamada Cientometria) torna-se a principal ferramenta nesta etapa do DSR para a análise quantitativa das citações de publicações, principalmente, de artigos em periódicos acadêmicos. Esse procedimento permite a avaliação da importância das publicações que estão sendo desenvolvidas pelos seus pares (LEYDESDORFF; MILOJEVIĆ, 2015).

Na bibliometria, a análise quantitativa em artigos de periódicos oferece vantagens na coleta de informações objetivas, necessárias para tomada de decisões, superando as questões políticas, local de produção ou a reputação passada de autores ou laboratórios. Embora a bibliometria seja uma forma válida de avaliação, é importante que os dados e métodos de análise selecionados sejam apropriados para garantir a confiabilidade dos seus resultados, isto é, na análise de citações para publicações científicas (LEYDESDORFF; MILOJEVIĆ, 2015).

Nesse contexto, o processamento das citações deve contar com fontes que permitam uma coleta de produções científicas mundiais. Essa exigência tem se tornado mais fácil, devido ao poder de alcance das bases de dados, tais como a *Web of Science (WoS)*, *Scopus*, *Google Scholar* e *Capes* (LI et al., 2010). Embora, recentemente, o *Google Scholar* venha sendo aceito pelo mundo científico como uma ferramenta bibliométrica para coletar informações sobre o impacto de citações de publicações, pesquisadores ou periódicos acadêmicos, estudos

comprovam que ainda sua qualidade de dados não é tão precisa comparada com WoS ou *Scopus* (MOED; BAR-ILAN; HALEVI, 2016).

Em particular, várias métricas com base em contagens de citações têm sido desenvolvidas para avaliar o impacto dos periódicos acadêmicos, sendo o Fator de Impacto (IF - do inglês *Impact Factor*) o mais usado e pioneiro nesse sentido (GARFIELD, 2006). Assim, o IF tem se tornado a forma mais usada no mundo acadêmico para a realização da bibliometria de publicações científicas (MOED, 2010).

No entanto, embora o IF seja o índice mais usado, surgem novas necessidades em desenvolver outros índices que o complementem para fortalecer a escolha de um periódico e, conseqüentemente, a elaboração de um estado da arte melhor fundamentado e mais preciso. Essas novas métricas representam o impacto de uma publicação como uma função não apenas da quantidade de citações recebidas por uma publicação, senão o prestígio e a área dos periódicos onde são citadas, ou seja, procura-se uma combinação entre quantidade e qualidade de citações (GONZÁLEZ-PEREIRA; GUERRERO-BOTE; MOYA-ANEGÓN, 2010).

Na atualidade, há uma crescente criação de indicadores científicos que podem guiar na identificação dessa tendência numa determinada área de atuação. Desta forma, além do IF, destacam-se o uso da Classificação de Periódicos Científicos (SJR - do inglês *SCImago Journal Rank*) e a Fonte Normalizada de Impacto por Artigo (SNIP - do inglês *Source Normalized Impact per Paper*) (VÍIU, 2016).

Para o presente trabalho, procura-se a classificação e seleção dos principais periódicos da área de Engenharia de Manufatura e Mecânica, por meio do índice de citações IF, SNIP e SJR. E o resultado dessa classificação, mostrou os principais periódicos do interesse da pesquisa, permitindo que sejam estudados os artigos mais relevantes e dos últimos 3 anos. Assim, foram encontradas tendências na manufatura, especificamente, aplicações de CPS e modelos que podem melhorar o funcionamento dos processos produtivos. Esta etapa é apresentada no capítulo 1 na introdução, motivação, identificação de oportunidade de pesquisa e justificativa.

3.2 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DA SOLUÇÃO

Esta etapa está vinculada à abordagem a ser adotada para solucionar a oportunidade de pesquisa. Lembrando que a oportunidade de pesquisa é criar um modelo que oriente a implementação do PHM na manufatura e que tenha capacidade de ser usado posteriormente por

aplicações da Internet. Assim, nesta etapa identifica-se a ferramenta a ser abordada para solucionar a oportunidade de pesquisa por meio do desenvolvimento de um artefato que atenda à oportunidade de pesquisa identificada no estado da arte (MANSON, 2006). O objetivo nesta etapa é qualitativo, i.e. garantir recursos que levem ao desenvolvimento de um novo artefato para soluções ainda não foram identificadas mas ao mesmo tempo que sejam viáveis, confiáveis, possíveis e formais (PEFFERS et al., 2007). Segundo Hevner (2007), a solução para a oportunidade de pesquisa é alcançada no consenso obtido na apresentação de um projeto de tese, por exemplo, junto às partes envolvidas, ou seja, orientador, orientando e banca examinadora, considerado que a proposta de solução atende à motivação da tese.

Assim, esta etapa do DRS está contida neste trabalho no Capítulo 2 (fundamentação teórica), onde é apresentada as principais características do cenário a ser abordado e principalmente os conceitos de ontologia e sua forma de criação que é o artefato de solução que atende à nossa oportunidade de pesquisa (implementação do PHM em máquinas mecânicas de um sistema de manufatura).

3.3 CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO

Nesta etapa, o DSR define que o artefato a ser criado pode ser do tipo: constructo (e.g., vocabulário de termos usados num domínio), modelo (e.g., uma ontologia que pode expressar as relações entre constructos), método (e.g., conjunto de orientações usadas para executar uma determinada tarefa) ou instanciação (i.e., um artefato que operacionaliza um constructo, modelo ou método, mostrando sua viabilidade e eficácia). Além disso, o DSR destaca que para garantir a funcionalidade correta do artefato, precisa-se de um procedimento consolidado que oriente sua construção (LACERDA et al., 2013).

Nesse contexto, o presente trabalho desenvolve um modelo ontológico para o PHM, e sua concepção é guiada usando o procedimento de Desenvolvimento de ontologias 101. A seguir é detalhado o procedimento 101 considerando o trabalho de Noy e McGuinness (2001):

3.3.1 Determinação do Escopo

Esta fase do procedimento 101 recomenda começar o desenvolvimento da ontologia definindo seu domínio e alcance, i.e., respondendo as seguintes questões:

- Qual é o domínio da ontologia a ser construída?

- Qual será a aplicabilidade da ontologia?
- Quais tipos de informações devem ser entregues pela ontologia?
- Quem usará e manterá a ontologia?

Visto que o procedimento 101 é um processo iterativo, respostas a essas questões podem mudar ao longo do processo de criação da ontologia, com o intuito de ter um modelo ontológico cada vez mais delimitado, preciso que atenda à a pesquisa desta tese. Além disso, para auxiliar no domínio da ontologia, podem ser feitas questões de competência que servem de referência, mas não precisam ser muito exaustivas. A partir desse tipo de questões, o modelo ontológico possuirá dados importantes referentes ao domínio a ser representado. Essas questões que ajudam a identificar a competência da ontologia são:

- A ontologia possui suficiente informação para responder às questões de domínio e aplicação do modelo?;
- As respostas requerem de um determinado nível de detalhamento de uma determinada área de conhecimento?

3.3.2 Consideração de reuso

É importante considerar o modelo ontológico criado por outro pesquisador e verificar se pode ser adaptado à proposta desta pesquisa. Reuso de ontologias se torna existente se a mesma precisa interagir com outros domínios. Existem muitas ontologias disponíveis, por exemplo, algumas ontologias de alto nível são: OpenCYC, descontinuada em 2017, mas disponível, sob solicitação, para pesquisa (CYCORP, 2016); *GeoNames*, banco de dados geográficos que contém mais de 10 milhões de nomes geográficos com mais de 9 milhões de características únicas, das quais 2,8 milhões são lugares habitados e 5,5 milhões nomes alternativos. *GeoNames* está integrado a dados geográficos, como nomes de lugares em várias línguas, elevação, população, coordenadas latitude e longitude (GEONAMES, 2017); DBpedia, que permite extrair 4,58 milhões de coisas, das quais 4,22 milhões são classificadas em uma ontologia consistente, incluindo 1.445.000 pessoas, 735.000 lugares, 411.000 obras criativas, 241.000 organizações, 251.000 espécies e 6.000 doenças (DBPEDIA, 2017); ORG que representa a organização de pessoas em uma determinada comunidade social, comercial ou política (ORG, 2014). O repositório de ontologias *Linked Open Vocabularies* que atualmente possui 604 ontologias de reuso, podendo serem aproveitadas suas estruturas (LOV, 2017). Além de outros repositórios de ontologias como OWL-Ontologias (OWL-ONTOLOGIES, 2016),

OWL-RESPOSITORIES (OWL-RESPOSITORIES, 2016), e LOD Laundromat (LAUNDROMAT, 2017).

Nesse sentido, e.g. será recomendado usar uma ontologia que aborde componentes mecânicos, análise de falhas, técnicas preditivas, monitoramento de dados, especificação dos principais equipamentos de uma manufatura, entre outras. Caso não seja possível reusar alguma base de conhecimento de outra ontologia em classes propriedade ou instâncias na ontologia desta tese, então, a criação do modelo ontológico deve partir do zero.

3.3.3 Enumeração de termos

Nesta fase do procedimento 101, é recomendado listar todos os termos relacionados ao domínio da ontologia a ser criada, algumas questões que auxiliam na identificação desses termos são:

- Quais são os termos relacionados ao domínio em estudo?
- Quais são as características dos termos a serem listados?

Inicialmente, é importante obter uma lista completa de termos sem considerar se é uma classe, propriedade, suas relações ou hierarquias ou se é um objeto (instância), já que isso será feito nas fases posteriores que desenvolvem a hierarquia e definição de propriedades, consideradas as fases mais importantes no processo de construção da ontologia.

3.3.4 Definição de Classes e Hierarquias

Nesta fase, o procedimento 101 classifica os tipos de abordagens em:

- Abordagens *top-down* que começa com a definição dos termos mais genéricos do domínio, e.g., pode-se começar criando classes para os conceitos gerais do PHM tais como o Prognóstico e Gestão da Saúde, Monitoramento, Diagnóstico, Manufatura.
- Abordagem *bottom-up* que começa com a seleção dos termos mais específicas, que fazem parte de um conceito mais genérico, e.g., Análise de Vibrações, Modo de Falhas, Avaria, Defeito, Magnitude, Eixo, Mancal, entre outros.
- Abordagem combinada que é o resultado das abordagens *top-down* e *bottom-up*: definindo primeiramente os termos mais importantes para depois listar os

genéricos e específicos. Pode-se começar com alguns termos gerais para depois alimentar dentro desse termo outros termos afins específicos

Para a presente pesquisa recomenda-se o uso da abordagem combinada, até os termos listados passem a compor uma taxonomia hierárquica. Sendo que para a organização de cada termo, se é uma classe ou subclasse, deve ser realizada a seguinte observação: fazendo uma analogia e considerando uma classe como um conjunto de elementos, então uma subclasse é um subconjunto. Além disso, se uma classe A é uma superclasse da classe B, então cada instancia de B é também de A. Em outras palavras, a classe B representa um conceito que é um tipo de A, e.g., para classificar os termos componente mecânico e mancal de rolamentos em classe ou subclasse realiza-se a seguinte questão: todo mancal de rolamentos é uma subclasse de componente mecânico, então todo mancal de rolamentos é um componente mecânico. Caso atenda às questões, pode ser considerada uma hierarquia correta de classes.

3.3.5 Definição de propriedades e restrições

Mesmo tendo definido a hierarquia das classes, elas de forma isoladas não oferecem suficiente informação para responder às perguntas de competência da fase 1. Sendo assim, após a classificação da hierarquia de classes, deve ser definida a estrutura interna de cada classe. Para tal, os termos listados na fase 3, que não tenham sido usados como classe ou subclasse, devem ser analisados para considera-los como uma possível propriedade que auxilie na interação (relacionamento) de classes.

Existem três tipos de propriedades: ‘Propriedade de Objeto’, que estabelece uma relação entre duas classes de uma ontologia, ‘Propriedade de Dados’, que relaciona as classes com diferentes tipos de dados, e ‘Propriedade de Anotações’, que permite a adição de descrições para as classes, instâncias (indivíduos) e até mesmo outros tipos de propriedades.

Assim, após identificados os termos que são usados como Propriedades de Objeto ou de Dados, a seguir é vinculada a cada propriedade a sua restrição admitida de atuação. As restrições na Propriedade de Objeto definem-se que relação devem ter as Classes entre si. E, por meio de restrições na Propriedade de Dados define-se os valores que cada classe terá, podendo ser numéricos, alfabéticos ou alfanuméricos. A seguir são definidas as principais restrições para as Propriedades de Dados, usadas no presente trabalho:

- **String** é o tipo de valor mais simples, usado para indicar uma característica alfabética à propriedade, i.e., um texto;

- **Number** descreve a propriedade com valores numéricos, podendo ser *integer* para números inteiros ou *decimal* para números decimais.

Por outro lado, também devem ser definidas as restrições de alcance que tem as Propriedades de Dados ou de Objeto para com as Classes, i.e., os dados que são vinculados às Propriedades são extraídos de uma determinada Classe por meio da definição da restrição *Range*, e esses dados podem interagir com uma outra determinada Classe por meio da definição da restrição *Domain*.

Além disso, uma restrição que é usada para o desenvolvimento da ontologia deste trabalho, é a restrição transitiva que opera da seguinte forma: se B é uma subClasse de A e C é uma subClasse de B, então C é uma subClasse de A.

Neste trabalho para representar as restrições Transitivas das Propriedades é usada a linguagem SWRL, que é uma linguagem baseada em OWL, e para sua aplicação e entendimento é apresentado o seguinte exemplo: para uma ontologia que contém duas classes: Aviso e Componente: Aviso tem duas propriedades de dados: temValor com *Range* xsd:integer, e temEstado com Range xsd:string, ambas propriedades de dados tem como *Domain* a classe Aviso. Além disso, existe uma propriedade de objeto denominada avisoDeFalha que tem Aviso como *Domain* e Componente como *Range*. Para inferir uma asserção transitiva da propriedade de dados com a linguagem SWRL temos a seguinte regra:

$$\text{Aviso}(?x) \wedge \text{temValor}(?x, ?y) \wedge \text{swrlb:greaterThan}(?y, 150) \wedge \text{swrlb:lessThan}(?y, 300) \rightarrow \text{temEstado}(?x, \text{"alto"})$$

Logo, para inserir uma restrição Transitiva à Propriedade de Objeto *avisoDeFalha*, usando a linguagem SWRL, a regra fica:

$$\text{Aviso}(?x) \wedge \text{temEstado}(?x, \text{"alto"}) \wedge \text{Componente}(?c) \rightarrow \text{avisoDeFalha}(?x, ?c)$$

Assim, ativando o *Reasoner* Pellet no editor de ontologias Protégé, é realizado o seguinte teste: para um indivíduo que pertence à Classe Aviso é inserido o dado 200 na Propriedade de Dado temValor. Então será inferida a seguinte asserção: temEstado “alto” e aparecerá a mensagem de avisoDeFalha.

3.3.6 Criação de instâncias

É a última fase do desenvolvimento da ontologia, e consiste em criar instâncias individuais na hierarquia de Classes. Assim, uma instância deve escolher uma Classe para que possa relacionar as Propriedades vinculadas a cada classe.

3.4 DEMONSTRAÇÃO

Esta etapa do método DSR deve comprovar a aplicabilidade do artefato no que se refere a representar um ou mais cenários do mundo real. Visto que a proposta desta tese é apresentar um modelo ontológico de implementação do Prognóstico e Gestão da Saúde em máquinas mecânicas, foram levantadas as principais máquinas que toda manufatura pode possuir na sua linha de produção. Segundo relação de máquinas que são citadas nas normas internacionais relacionadas ao PHM, publicações técnicas onde listam as principais máquinas a serem estudadas para análise de falhas, e finalmente as máquinas que são mais citadas em publicações científicas quando se refere ao PHM e análise de falhas na manufatura, as principais máquinas genéricas que a presente ontologia atende são: Redutores (caixa de trem de engrenagens), Ventiladores centrífugos, Turbinas, Compressores, Bombas hidráulicas, e Motores elétricos.

Por outro lado, para a presente tese foram visitadas diversas manufaturas: indústria de papel e celulose, Agroindústrias de óleo de soja, Agroindústrias de Malte de cerveja, Agroindústrias de farinha de trigo e Agroindústrias de ração de animais. Nessas indústrias comprovou-se que dos equipamentos levantados na nossa revisão bibliográfica, todo processo fabril, independente do produto que realiza, possui as seguintes máquinas: compressores, redutores, ventiladores, motores elétricos e bombas hidráulicas. Dentre essas máquinas, todas as indústrias visitadas possuem bombas centrífugas nos seus processos principais e/ou críticos, além disso, pelo fato de encontrar muito material referente a uma máquina bomba centrífuga, essa é a máquina selecionada para demonstrar a aplicabilidade da nossa ontologia na implementação do PHM num cenário real. Cabe destacar que esta etapa do método DSR é um processo iterativo com a etapa de desenvolvimento do artefato, dessa forma o desenvolvimento do artefato é constantemente atualizado pela etapa demonstração até alcançar uma ontologia genérica que atenda a proposta da tese.

3.5 AVALIAÇÃO E COMUNICAÇÃO

A avaliação é definida como o processo de verificação da funcionalidade do artefato, i.e., verificando a consistência do modelo ontológico. Para Tremblay, Hevner e Berndt (2010), a rigorosidade da avaliação consiste em evidenciar que o artefato, efetivamente, é uma solução consistente para um cenário real, ou seja, a aplicabilidade dos resultados do artefato não estão

comprometidos por erros de modelagem. Hevner et al.(2004) definem uma forma de avaliar o artefato por meio de métodos experimentais, i.e., realizar testes do artefato em ambientes controlados, como a simulação, para verificar sua usabilidade.

Nesta etapa a proposta da presente tese - modelo ontológico do PHM - recebe o acrônimo de OntoProg e é avaliado para checagem da sua consistência. Isso incluiu uma validação lógica usando o *reasoner* Pellet que verifica consistência em: relações de subclasses e classes, relação de instâncias com classes, relação de instancias com propriedade e classes. Além disso, o artefato foi validado por um especialista de ontologias e um especialista de manutenção preditiva. O primeiro validou o método de construção da ontologia e o segundo validou os resultados que entrega a ontologia quando consultada, considerando que as consultas são similares a respostas que o especialista humano daria. Esta etapa de avaliação também é um processo iterativo que atualiza a etapa de desenvolvimento do método DSR, visto que quando surge uma inconsistência no modelo ontológico, o mesmo deve ser verificado e ajustado até a ontologia não apresentar inconsistências, mas ao mesmo tempo atender tanto a etapa de desenvolvimento como a de demonstração.

Pries-Heje, Baskerville e Venable (2008) consideram que deve ser definido, quando deve ocorrer a avaliação do artefato, se é antes, depois ou durante sua construção. Além disso, deve ser especificado se será avaliado para atender a um cenário específico (estudo de caso pontual) ou a cenários gerais (estudo de caso que abrange um problema genérico). Outro fator a ser considerado é se avaliasse a construção do artefato (produto) ou a capacidade do artefato em atender um determinado domínio (processo). Nesse contexto, o modelo da presente tese é considerado um artefato produto que é avaliado antes, durante e depois da sua construção, tendo a capacidade de atender a um processo genérico, i.e., o domínio de PHM para máquinas mecânicas.

Finalmente, o método DSR exige a comunicação da pesquisa e sua importância para com o mundo científico, por meio da divulgação dos principais resultados do trabalho em publicações acadêmicas, difundindo a forma de construção do artefato e sua aplicação no mundo real.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados conduzidos nesta pesquisa. O presente trabalho é desenvolvido dentro do grupo de pesquisa em ciclo de vida de produto que pertence ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da UTFPR. Dentro do grupo de pesquisa há a demanda por pesquisar sobre Sistemas produtivos de operação baseados em modelos que conduzam e mantenham os processos produtivos em pleno funcionamento. Assim, seguindo o método DSR, na primeira etapa de Identificação de oportunidade de pesquisa, é realizada a análise bibliométrica usando os principais índices de citação para identificar os periódicos mais relevantes que ofereçam tendências a serem identificadas como oportunidade desta pesquisa. Esta etapa é apresentada no capítulo 1 (Introdução), onde contextualiza-se a tendência dos sistemas de manufatura que passam por uma nova geração caracterizada pela digitalização de dados e comunicação destes por meio da Internet. Sendo assim, o presente trabalho identificou como oportunidade de pesquisa desenvolver um modelo que seja passível de trabalhar na plataforma web e que futuramente possa disponibilizar dados via Internet. Nesse contexto, um modelo ontológico atende tal necessidade usando a linguagem OWL 2 recomendada pela W3C. Além disso, na identificação da oportunidade de pesquisa, o foco principal é a demonstração e aplicabilidade de um modelo ontológico que seja capaz de funcionar como um sistema especialista que responda a questões relacionadas à vida útil remanescente de uma máquina mecânica, antes de entrar numa falha funcional. Também, outro fator que influencia na motivação deste trabalho é que existem vários grupos de pesquisa científica e técnica que tem o interesse em padronizar a forma coleta de dados para determinar o PHM na manufatura. Alguns grupos que podem ser destacados: Centro de Sistemas de Manutenção Inteligente (IMS, 2017), o Projeto PHM do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST, 2017), as conferências internacionais sobre a implementação do PHM (IEEE PHM, 2017), e a Sociedade PHM que reúne pesquisadores para fomentar os avanços do PHM como disciplina de engenharia e, no desenvolvimento e adoção de normas internacionais, métodos de pesquisa, e formas de coleta de dados (PHM-SOCIETY, 2017).

A segunda etapa do método DSR que é a Definição da solução para a pesquisa é atendida graças à Fundamentação Teórica desenvolvida no capítulo 2, onde é apresentada a análise de dependabilidade como um dos pilares para alimentar a construção do modelo de PHM, especificamente, nesta pesquisa adota-se a técnica de análise de sintomas e modos de falhas (FMSA) para capturar informações relevantes de anomalias que qualquer máquina

mecânica pode conter, assim, posteriormente esses dados alimentam o modelo OntoProg. No capítulo 2 também foi identificada, segundo normas, a forma correta de delimitar os parâmetros de um valor coletado, quando a máquina está em funcionamento, por meio do uso da técnica de análise de vibrações. Finalmente, no capítulo 2 consegue-se definir os principais termos usados no modelo segundo normas internacionais o que alavanca o formalismo e padronização do modelo OntoProg.

4.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Nesta seção é descrito o processo de criação do modelo ontológico OntoProg utilizando o procedimento de desenvolvimento de ontologias 101.

4.1.1 Determinação do Escopo

Nesta primeira fase, são respondidas questões básicas que servem para entender o escopo do propósito de construção da ontologia, definindo domínio e abrangência, para tal são respondidas as seguintes questões:

- Qual é o domínio que a ontologia deve cobrir? - Representar o prognóstico e gestão da saúde de máquinas mecânicas de um sistema de manufatura, quando se encontram em pleno funcionamento;
- Qual será o uso da ontologia? Estimar anomalias prematuras nos componentes das máquinas mecânicas por meio de técnicas de diagnóstico e monitoramento de condições.
- Quem vai manter e usar a ontologia? Será mantida pelo grupo de pesquisa LAMIS da UTFPR, podendo ser usada em máquinas mecânicas para intervenções oportunas de manutenção baseada na condição da manufatura.

Nesse contexto, o domínio da ontologia é prognosticar e gerir a saúde dos principais componentes das máquinas mecânicas, formalizando a coleta dos seus principais eventos de diagnóstico e monitoramento de condições. Além disso, a ontologia realiza a tarefa de estimar a ocorrência de uma falha funcional, e sua aplicação é o fornecimento de avisos para intervenções oportunas de manutenções baseadas na condição.

As questões de competência que devem ser consideradas pela ontologia, para determinar seu alcance e orientar na identificação de termos e por sua vez na modelagem de classes, propriedades e instâncias da ontologia são:

- Quais são as técnicas de diagnóstico usadas para prognósticas falhas funcionais?
- Quais são as técnicas de monitoramento de condições usadas para prognósticas falhas funcionais?
- Quais são as técnicas preditivas usadas para o monitoramento de condições de uma máquina mecânica?
- Análise de vibrações é a técnica de monitoramento de condições mais apropriada para o prognóstico prematuro de falhas?
- Análise de modos de falha é a técnica de diagnóstico mais adequada para capturar informações relevantes num componente mecânico?
- Qual é a relação entre as técnicas de diagnóstico e as técnicas de monitoramento de condições no PHM?
- Qual é o melhor parâmetro de análise de vibração para prognosticar uma falha funcional?
- Qual é o melhor parâmetro de análise de vibrações para tomada de decisões?
- Quais são os principais componentes mecânicos que possui uma máquina mecânica para o prognóstico de falhas?
- Quais são os principais modos de falha que afetam um componente mecânico rotativo?
- Qual é a estratificação dos elementos de um sistema de manufatura?
- Quais são os principais sintomas de um componente mecânico rotativo apresenta?
- Quais são os principais efeitos de uma falha mecânica na manufatura?
- Quais são as principais causas de falha mecânica nos componentes mecânicos?
- Quais são os critérios para classificar o impacto dos modos de falha, causa, efeito, sintomas e técnicas de medição de uma máquina mecânica?
- Quais são as mensagens de aviso para prever uma falha funcional?
- Quais são as funções requeridas que uma máquina deve atender na manufatura?
- Qual é o critério para considerar o início de uma falha funcional?
- Qual é o critério para definir o intervalo da vida útil remanescente do componente mecânico?

- Qual é o critério para identificar o local de um ponto de coleta de dados?
- Quais são as ações tomadas após identificada uma falha funcional?
- Quais são as principais máquinas mecânicas de um sistema de manufatura?
- Quais são os principais componentes mecânicos de uma máquina mecânica dentro de uma manufatura?
- Quais são as zonas de anomalia de um valor coletado pela técnica de análise de vibrações?
- Quais são os principais dispositivos para coletar dados de análise de vibrações?
- Quais são as principais magnitudes usadas na técnica de análise de vibrações?
- Quais são as principais técnicas de monitoramento de condições instrumentadas usadas para máquinas mecânicas numa manufatura?

4.1.2 Consideração de Reuso

Nesta etapa, deve ser adotado o reuso de uma ontologia, de preferência de alto nível, que ofereça classes e/ou propriedades para o modelo em desenvolvimento. Embora exista a disponibilidade de ontologias de alto nível, para o presente trabalho não se encontrou nenhuma ontologia que atendesse ao escopo, terminologia, classificação ou propriedades relacionadas ao prognóstico de falhas em elementos mecânicos. Porém, para atender o procedimento de desenvolvimento da ontologia, no reuso, são consideradas ontologias encontradas em publicações relacionadas ao tema de pesquisa, tais como, a pesquisa sobre o diagnóstico inteligente de falhas em turbinas eólicas, (ZHOU; YU; ZHANG, 2015). Essa pesquisa apresenta uma ontologia aplicada a um equipamento mecânico específico, mas auxilia na estruturação das classes de modos de falha, efeitos, relacionadas com a hierarquia de um equipamento mecânico, além de orientar o uso de restrições por meio de regras na linguagem SWRL. Também, reusou-se alguns conceitos da publicação: modelo ontológico de dependabilidade em CPS (SANISLAV; MICLEA, 2015), onde apresenta-se uma taxonomia para classificar uma ontologia em técnicas de FMEA que é similar a técnica FMSA usada neste trabalho. Esse trabalho orientou também na elaboração de consultas usando a linguagem SPARQL.

4.1.3 Enumeração de Termos

Diversos termos são considerados para esta ontologia, relacionados ao prognóstico de falhas. Para que essa etapa seja padronizada, os principais termos e seus significados foram adotados de normas internacionais e artigos científicos consolidados, tais como: processos para análise de modos de falha e efeitos (IEC-60812, 2006; SAE J1739, 2009), vocabulário de dependabilidade (IEC 60050-192, 2015), vocabulário de monitoramento de condições e diagnóstico (ISO 13372, 2012), terminologia na gestão de ativos (ISO 55000, 2014) e vocabulário para análise de vibrações (ISO 2041, 2009). A seguir, são apresentados os termos usados na ontologia com seu significado entre parênteses no idioma inglês, visto que a ontologia deve ser divulgada e compartilhada. Sendo que todos os artigos da área de concentração são no idioma Inglês:

Equipamento (*Equipment*), Máquina com acionamento separado (*Machine with separate driver*), Máquina com acionamento integrado (*Machine with integrated driver*), Máquina (*Machine*), Bomba (*Pump*), Compressor (*Compressor*), Motor elétrico (*Electrical motor*), Ventilador (*Fan*), Turbina (*Turbine*), Redutor (*Gearbox*), Componente (*Component*), Mancal (*Bearing*), Mancal de Rolamentos (*Rolling Bearing*), Mancal deslizante (*Journal Bearing*), Acoplamento (*Coupling*), Rotor (*Rotor*), Lubrificante (*Lubricant*), Vedação (*Seal*), Selo mecânico (*Mechanical Seal*), Graxeta (*Gland packing*), Eixo (*Shaft*), Técnicas de Diagnóstico (*Diagnostics Technique*), Dados de FMSA (*FMSA data*), Efeito da falha (*Effect*), Vazamento externo (*External leak*), Alto custo de reparo (*High repair cost*), Operação comprometida (*Operation impaired*), Máquina inoperável (*Unable operate machine*), temperatura elevada (*Overheat*), Barulho (*Sound*), Modo de Falha (*Failure mode*), Deformação (*Deformation*), Incrustação (*fouling*), Fratura (*Fracture*), Desgaste (*Wear*), Sintoma (*Symptom*), Temperatura (*Temperature*), Propriedades do lubrificante (*Lubricant property*), Vibração (*Vibration*), Vazamento de fluido (*Fluid leak*), Ruído (*Noise*), Vazão (*Flow rate*), Pressão (*Pressure*), Velocidade (*Speed*), Verificação de medidas (*Length measures*), Causa potencial da falhas (*Potential Cause*), Monitoramento de condições (*Condition Monitoring*), Parâmetros para coleta de dados (*Data collection parameters*), Tipos de coletores (*Collector type*), Acelerômetro (*Accelerometer transducer*), Transdutor de velocidade (*Velocity transducer*), Zonas de limite (*Zone boundary*), Grupo de zona de limite (*Group*), Magnitude (*Magnitude*), Aceleração (*Vibration acceleration*), Velocidade RMS (*Vibration Velocity*), Deslocamento (*Vibration Displacement*), Local de medição (*Measurement location*), Medição

de vibração (*Vibration Measurement*), Técnicas de medição (*Measurement Technique*), Emissão acústica (*Acoustic Emission*), Termografia (*Infrared Thermography*), Análise de óleo (*Oil Analysis*), Ultrassom (*Ultrasound*), Análise de Vibrações (*Vibration Analysis*), Inspeção visual (*Visual inspection*), Possui velocidade (*has Velocity*), Tem o aviso (*has Warning*), Tem estado de saúde (*has Health*), Usa a Magnitude (*use Magnitude*), Tem medida de (*has Measurement*), Possui o Grupo (*has Group*), Usa o coletor (*use collector*), Possui a valor atual de (*has current value*), Possui severidade de (*has SEV*), Identificação do local é (*has location ID*), Tem unidade (*has unit*), Tem zona (*has zone*), Pode ser detectado com (*is detected with*), Possui o efeito (*has effect*), Possui o modo de falha (*has mode*), Tem especificação (*has specification*), Tem diagnóstico de (*has DGN*), Tem detectabilidade de (*has DET*), Possui sintoma de (*has Symptom*), Tem o seguinte valor de falha (*has failure value*), Tem espectro de frequência (*has frequency spectrum*), Tem direção da medição de (*has measurement direction*), A causa da falha é (*is caused by*), Tem identificação (*has ID*), Tem a função de (*has function*), É parte de (*is part of*), Dados para o PHM (*PHM data*).

Nesta fase, os termos citados têm significados que podem ser encontrados em normas internacionais, mas não são agrupados por classe, propriedade ou instância. Nas fases posteriores será realizada essa separação.

4.1.4 Definição de Classes e Hierarquia

Após identificados os termos, são reconhecidas as classes da ontologia por meio da abordagem combinada, i.e. *top-down e bottom-up*. A identificação de termos com classes e sua hierarquia é realizada considerando a seguinte pergunta: Se todo B é uma subclasse de A, então todo B é também A. Os termos que se enquadram nessa pergunta são considerados classes e ao mesmo tempo define-se o nível de hierarquia que tem na ontologia.

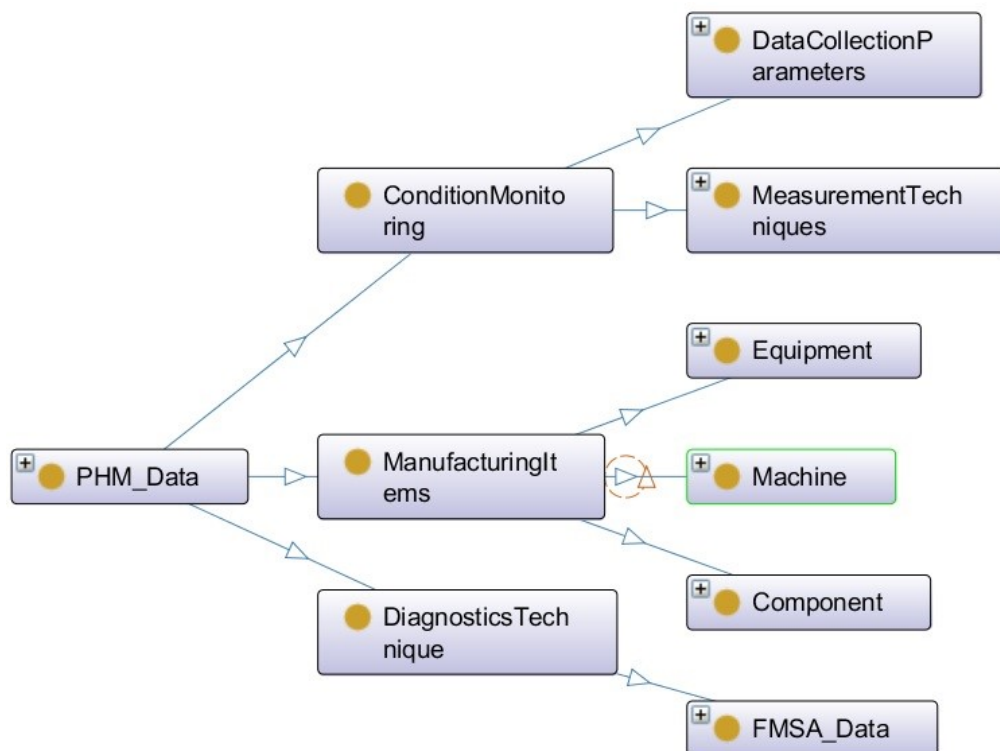
Assim, a classe e hierarquia de primeiro nível é: PHMdata e as classes de segundo nível desta (subclasses) são: ConditionMonitoring, DiagnosticsTechniques, e ManufacturingItems. As classes de terceiro nível (subclasses das classes do segundo nível) são: Equipment, Machine, Component, FMSA_Data, DataCollectionParameters, e MeasurementTechniques. Esta hierarquia é comprovada realizando a pergunta:

- Todo ConditionMonitoring é uma subclasse de PHMdata, então todo ConditionMonitoring é um PHMdata;

- Toda DiagnosticsTechniques é uma subclasse de PHMdata, então toda DiagnosticsTechniques é um PHMdata;
- Todo ManufacturingItems é uma subclasse de PHMdata, então todo ManufacturingItems é um PHMdata;
- Todo Equipment é uma subclasse de ManufacturingItems, então todo Equipment é um ManufacturingItems;
- Toda Machine é uma subclasse de ManufacturingItems, então todo Machine é um ManufacturingItems; e assim sucessivamente até encontrar todas as classes e suas hierarquias.

Na Figura 15, usando o *plugging OntoGraf* (ONTOGRAF, 2015), do editor de ontologias Protégé, é apresentada a hierarquia das classes de primeiro, segundo e terceiro nível.

Figura 15 - Hierarquia de classes de nível 1, 2 e 3



Fonte: o próprio autor

Após a identificação das principais classes, na sequência são encontradas as classes de quarto e quinto nível. Para a classe Componente são realizadas as seguintes perguntas que comprovam a hierarquia de classes:

- Todo Bearing é uma subclasse de Component, então todo Bearing é um Component;

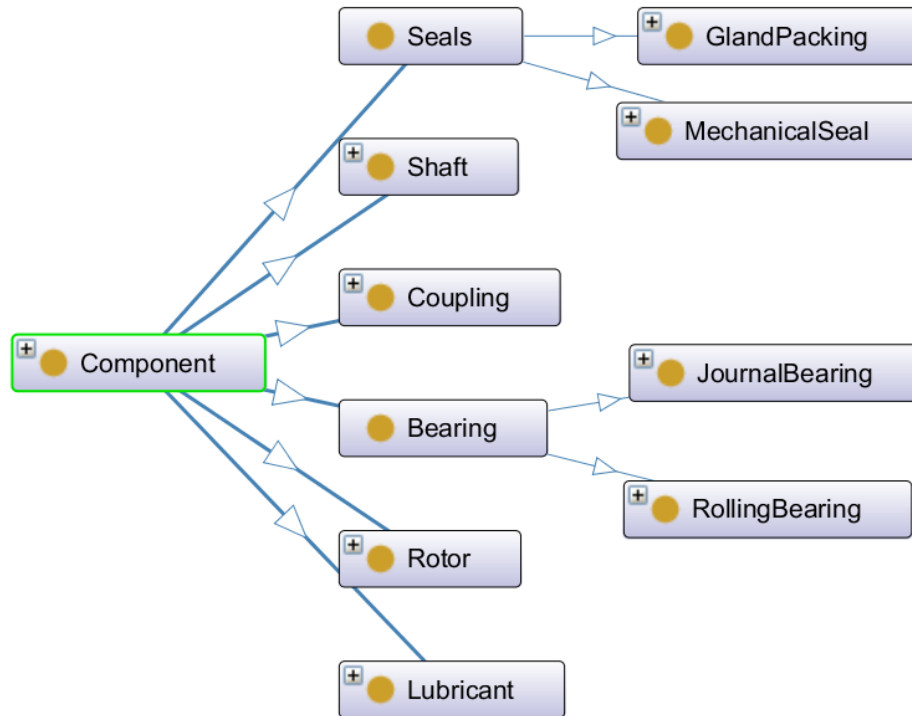
- Todo Coupling é uma subclasse de Component, então todo Coupling é um Component;
- Todo Rotor é uma subclasse de Component, então todo Rotor é um Component.

Esse tipo de perguntas é realizado até encontrar todas as classes de quarto nível. A continuação, são apresentadas algumas perguntas para encontrar classes de quinto nível:

- Todo JournalBearing é uma subclasse de Bearing, então todo JournalBearing é um Bearing;
- Todo RollingBearing é uma subclasse de Bearing, então todo RollingBearing é um Bearing;
- Todo GlandPacking é uma subclasse de Seal, então todo GlandPacking é um Seal;
- Todo MechanicalSeal é uma subclasse de Seal, então todo MechanicalSeal é um Seal;
- Todo Noise é uma subclasse de Symptom, então todo Noise é um Symptom;
- Todo Noise é uma subclasse de Symptom, então todo Noise é um Symptom;
- Toda Fracture é uma subclasse de FailureMode, então todo Fracture é um FailureMode;
- Toda OperationImpaired é uma subclasse de Effect, então todo OperationImpaired é um Effect;
- Toda VibrationAcceleration é uma subclasse de Magnitude, então todo VibrationAcceleration é um Magnitude;
- Toda AccelerometerTransducer é uma subclasse de CollectorType, então todo AccelerometerTransducer é um CollectorType; e assim sucessivamente até selecionar todas as classes.

Na Figura 16, apresenta-se as classes de nível 4 e 5 da classe Componente.

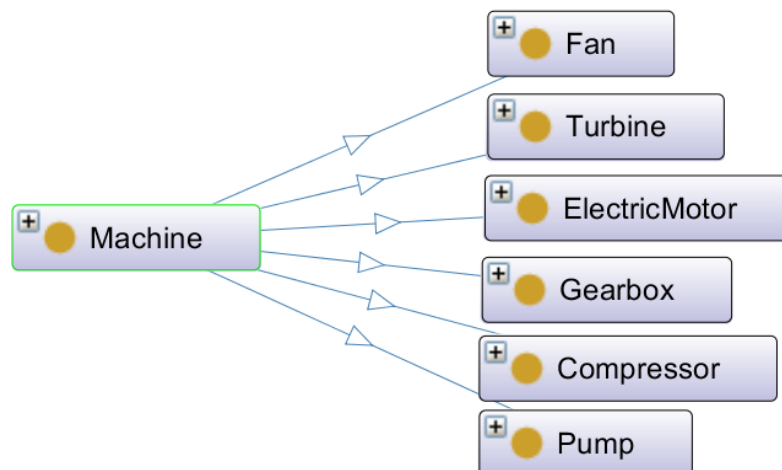
Figura 16 - Hierarquia de classes de nível 4 e 5 para a classe Component



Fonte: o próprio autor

Na Figura 17, apresenta-se as classes de nível 4 e 5 da classe Máquina.

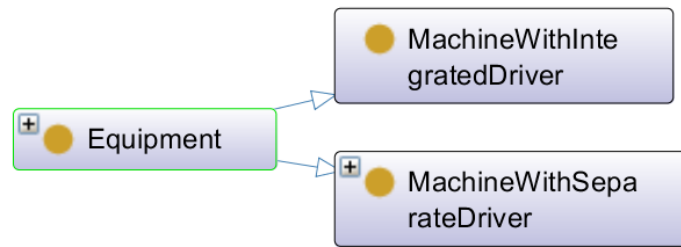
Figura 17 - Hierarquia de classes de nível 4 e 5 para a classe Machine



Fonte: o próprio autor

Na Figura 18, apresenta-se as classes de nível 4 e 5 da classe Equipamento.

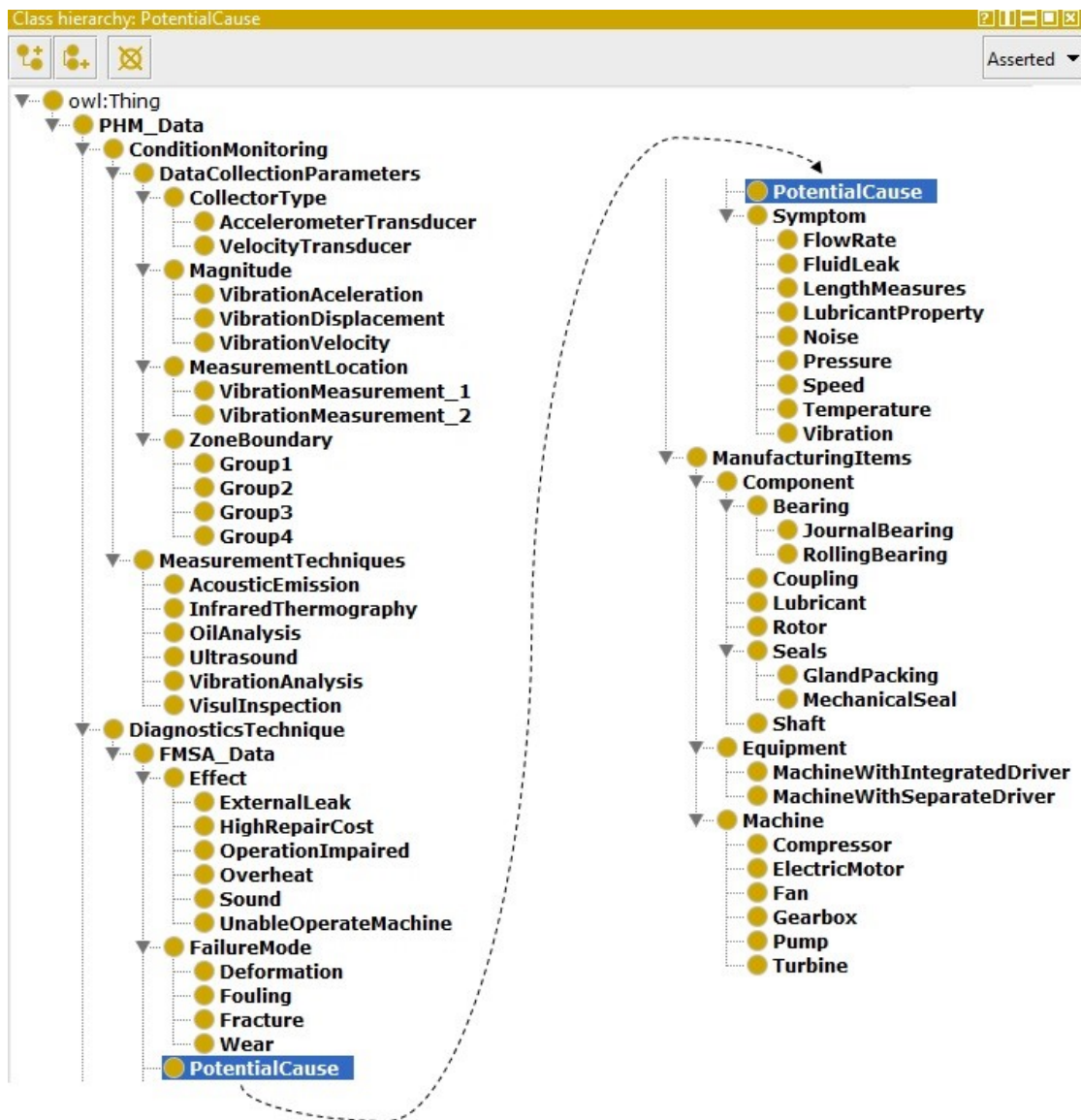
Figura 18 - Hierarquia de classes de nível 4 e 5 para a classe *Machine*



Fonte: o próprio autor

Na Figura 19, apresenta-se todas as classes e suas hierarquias do modelo OntoProg.

Figura 19 - Hierarquia das classes no modelo OntoProg



Fonte: o próprio autor

Na Figura 19, a hierarquia de classes começa pelo nível 1 Dados para o PHM (PHM_Data), até as classes de nível 5. O modelo ontográfico do presente trabalho denominado de ontologia para Prognóstico OntoProg é apresentado na sua forma gráfica no Apêndice A. Além disso, a ontologia completa é compartilhada num repositório público, que permite o acompanhamento da versão e o trabalho colaborativo. Disponível em: <https://github.com/LiraNunezDavid/Ontology-for-Mechanical-Prognostics>

Na hierarquia de classes do modelo OntoProg a relação de subordinação entre classe e subclasse é um axioma do tipo ‘SubClassOf’. O axioma do tipo de relacionamento ‘DisjointWith’ existe entre classes, para que uma instância nela contido não possa ser mais de uma das classes envolvidas num tipo de conexão. Por exemplo, Component é ‘DisjointWith’ Machine e Equipment. Assim, automaticamente Machine é ‘DisjointWith’ Component e Equipment, e Equipment é ‘DisjointWith’ Component e Machine.

4.1.5 Definição de Propriedades e Restrições

Nesta parte são identificados os termos que são usados para realizar o relacionamento entre classes, i.e., selecionar os termos que se enquadram como propriedades de objeto. Na Tabela 7 são listadas propriedades de objeto e suas relações de Domain e Range.

Tabela 7 - Propriedades de objeto no modelo OntoProg

Propriedade de objetos	Domain	Range
hasCause	FailureMode	PotentialCause
hasEffect	FailureMode	Effect
hasGroup	Magnitude	ZoneBoundary
hasMeasurement	MeasurementTechniques	MeasurementLocation
hasMode	Component	FailureMode
hasSymptom	PotentialCause	Symptom
isDetectedWith	Symptom	MeasurementTechnique
isPartOf	ManufacturingItems	ManufacturingItems
useCollector	MeasurementLocation	CollectorType
useMagnitude	CollectorType	Magnitude

Fonte: o próprio autor

Na Tabela 8 são listados os termos que oferecem às classes a possibilidade que sejam alimentadas algumas características, denominadas de propriedades de dados, a seguir são listadas as propriedades de dados do modelo OntoPro com suas restrições de *Domain* e *Range*.

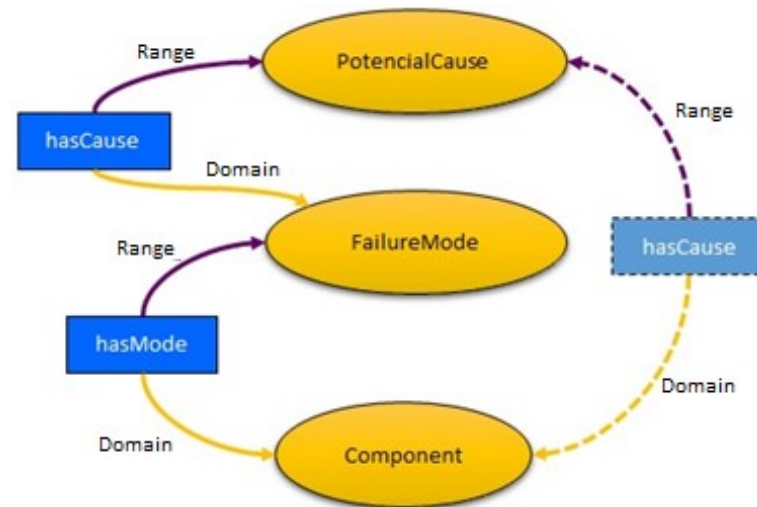
Tabela 8 - Propriedade de dados no modelo OntoProg

Propriedade de dados	Domain	Range
hasCurrentValue	MeasurementLocation	xsd:decimal
hasDET	Symptom	xsd:integer
hasDGN	Symptom	xsd:integer
hasFailureValue	PotentialCause	xsd:decimal
hasFrequencySpectrum	PotentialCause	xsd:string
hasFunction	ManufacturingItems	xsd:string
hasHealth	MeasurementLocation	xsd:string
hasID	MeasurementItems	xsd:string
hasLocationID	MeasurementLocation	xsd:string
hasMeasurementDirection	PotentialCause	xsd:string
hasSEV	Effect	xsd:integer
hasSpecification	PHM_Data	xsd:string
hasUnit	Magnitude	xsd:string
hasVelocity	ZoneBoundary	xsd:string
hasWarning	MeasurementLocation	xsd:string
hasZone	ZoneBoundary	xsd:string
isCausedBy	PotentialCause	xsd:string

Fonte: o próprio autor

Para evitar a concepção de várias propriedades de objeto que ofereçam a relação entre outras classes além das já definidas, usando a linguagem SWRL cria-se regras transitivas nas propriedades de objeto. Dessa forma, são aplicadas novas conexões às classes que permitem aumentar as inferências de asserção. Além disso, o conjunto de regras SWRL permite extensões adicionais na aplicação de futuros trabalhos, além de oferecer flexibilidade para outras implementações. As regras específicas SWRL usadas são as SWRL built-in (SWRLb) que melhoraram o modelo de forma significativa, oferecendo maior expressividade da linguagem OWL 2, podendo aceitar diversos argumentos de acordo com requerimentos específicos do mundo real (HORROCKS et al., 2004).

Uma propriedade transitiva é considerada quando, por exemplo: Se a subclasse Component tem a propriedade de objeto hasMode, e a subclasse FailureMode tem a propriedade de objeto hasCause com a subclasse PotentialCause, então a subclasse Component tem a propriedade de objeto hasCause com a subclasse PotentialCause. Assim, considerando que Component = C1, FailureMode = FM1 e PotentialCause = PC1, a regra SWRL fica: $hasMode(?C1, ?FM1) \wedge FailureMode(?FM1) \wedge Component(?C1) \wedge PotentialCause(?PC1) \wedge hasCause(?FM1, ?PC1) \rightarrow hasCause(?C1, ?PC1)$. A Figura 20 representa essa regra.

Figura 20 - Reagra transitiva SWRL

Fonte: o próprio autor

Na Tabela 9 são apresentadas todas as variáveis vinculadas a cada classe do modelo OntoProg.

Tabela 9 - Classes usadas para criar regras SWRL

Classe para criar Regras	Variável
FailureMode	?FM1
Component	?C1
PotencialCause	?PC1
Symptom	?Sy1
ConditionMonitoring	?Tch1
VibrationMeasurement	?M1
VibrationCollector	?T1
VibrationMagnitude	?Mg1
VibrationZoneBoundary	?Z1
Group3	?Gp3

Fonte: o próprio autor

Finalmente, na Tabela 10 são apresentadas todas as regras SWRL que permitem conexões adicionais as classes do modelo OntoProg que ao mesmo tempo proporcionam flexibilidade para várias implementações.

Tabela 10 - Propriedade da OntoProg com regras SWRL

Propriedade	Regra SWRL
hasCause	$\text{hasMode}(?C1, ?FM1) \wedge \text{FailureMode}(?FM1) \wedge \text{Component}(?C1) \wedge \text{PotentialCause}(?PC1) \wedge \text{hasCause}(?FM1, ?PC1) \rightarrow \text{hasCause}(?C1, ?PC1)$
hasSymptoms	$\text{hasCause}(?C1, ?PC1) \wedge \text{Component}(?C1) \wedge \text{Symptom}(?Sy1) \wedge \text{PotentialCause}(?PC1) \wedge \text{hasSymptom}(?PC1, ?Sy1) \rightarrow \text{hasSymptom}(?C1, ?Sy1)$
isDetectedWith	$\text{hasSymptom}(?C1, ?Sy1) \wedge \text{Component}(?C1) \wedge \text{isDetectedWith}(?Sy1, ?Tch1) \wedge \text{Symptom}(?Sy1) \wedge \text{MeasurementTechniques}(?Tch1) \rightarrow \text{isDetectedWith}(?C1, ?Tch1)$
hasMeasurement	$\text{isDetectedWith}(?C1, ?Tch1) \wedge \text{MeasurementLocation}(?M1) \wedge \text{Component}(?C1) \wedge \text{hasMeasurement}(?Tch1, ?M1) \wedge \text{MeasurementTechniques}(?Tch1) \rightarrow \text{hasMeasurement}(?C1, ?M1)$

useCollector	$\text{hasMeasurement}(?C1, ?M1) \wedge \text{MeasurementLocation}(?M1) \wedge \text{Component}(?C1) \wedge \text{CollectorType}(?T1) \wedge \text{useCollector}(?M1, ?T1) \rightarrow \text{useCollector}(?C1, ?T1)$
useMagnitude	$\text{useCollector}(?C1, ?T1) \wedge \text{Magnitude}(?Mg1) \wedge \text{useMagnitude}(?T1, ?Mg1) \wedge \text{Component}(?C1) \wedge \text{CollectorType}(?T1) \rightarrow \text{useMagnitude}(?C1, ?Mg1)$
hasGroup	$\text{hasGroup}(?Mg1, ?Z1) \wedge \text{Magnitude}(?Mg1) \wedge \text{useMagnitude}(?C1, ?Mg1) \wedge \text{Component}(?C1) \wedge \text{ZoneBoundary}(?Z1) \rightarrow \text{hasGroup}(?C1, ?Z1)$
hasVelocity	$\text{Group3}(?Gp3) \wedge \text{hasZone}(?Gp3, \text{"Good"}) \rightarrow \text{hasVelocity}(?Gp3, \text{"greater than or equal 0 and less than or equal 2.3"})$
hasVelocity	$\text{Group3}(?Gp3) \wedge \text{hasZone}(?Gp3, \text{"Satisfactory"}) \rightarrow \text{hasVelocity}(?Gp3, \text{"greater than 2.3 and less than or equal 4.5"})$
hasVelocity	$\text{Group3}(?Gp3) \wedge \text{hasZone}(?Gp3, \text{"Alert"}) \rightarrow \text{hasVelocity}(?Gp3, \text{"greater than 4.5 and less than or equal 7.1"})$
hasVelocity	$\text{Group3}(?Gp3) \wedge \text{hasZone}(?Gp3, \text{"Alarm"}) \rightarrow \text{hasVelocity}(?Gp3, \text{"greater than 7.1"})$
hasHealth	$\text{swrlb:greaterThanOrEqual}(?A, 0) \wedge \text{MeasurementLocation}(?M1) \wedge \text{hasCurrentValue}(?M1, ?A) \wedge \text{swrlb:lessThanOrEqual}(?A, 2.3) \rightarrow \text{hasHealth}(?M1, \text{"Good"})$
hasHealth	$\text{MeasurementLocation}(?M1) \wedge \text{hasCurrentValue}(?M1, ?B) \wedge \text{swrlb:greaterThan}(?B, 2.3) \wedge \text{swrlb:lessThanOrEqual}(?B, 4.5) \rightarrow \text{hasHealth}(?M1, \text{"Satisfactory"})$
hasHealth	$\text{swrlb:greaterThan}(?C, 4.5) \wedge \text{MeasurementLocation}(?M1) \wedge \text{hasCurrentValue}(?M1, ?C) \wedge \text{swrlb:lessThanOrEqual}(?C, 7.1) \rightarrow \text{hasHealth}(?M1, \text{"Alert"})$
hasHealth	$\text{swrlb:greaterThan}(?D, 7.1) \wedge \text{MeasurementLocation}(?M1) \wedge \text{hasCurrentValue}(?M1, ?D) \rightarrow \text{hasHealth}(?M1, \text{"Alarm"})$
hasWarning	$\text{hasHealth}(?M1, ?A) \wedge \text{swrlb:equal}(?A, \text{"Good"}) \wedge \text{MeasurementLocation}(?M1) \rightarrow \text{hasWarning}(?M1, \text{"Collect new data in 3 months"})$
hasWarning	$\text{hasHealth}(?M1, ?B) \wedge \text{MeasurementLocation}(?M1) \wedge \text{swrlb:equal}(?B, \text{"Satisfactory"}) \rightarrow \text{hasWarning}(?M1, \text{"Collect new data in 1 months"})$
hasWarning	$\text{hasHealth}(?M1, ?C) \wedge \text{MeasurementLocation}(?M1) \wedge \text{swrlb:equal}(?C, \text{"Alert"}) \rightarrow \text{hasWarning}(?M1, \text{"Schedule Condition-based Maintenance"})$
hasWarning	$\text{hasHealth}(?M1, ?D) \wedge \text{MeasurementLocation}(?M1) \wedge \text{swrlb:equal}(?D, \text{"Alarm"}) \rightarrow \text{hasWarning}(?M1, \text{"Turn off equipment"})$

Fonte: o próprio autor

4.1.6 Criação de Instâncias

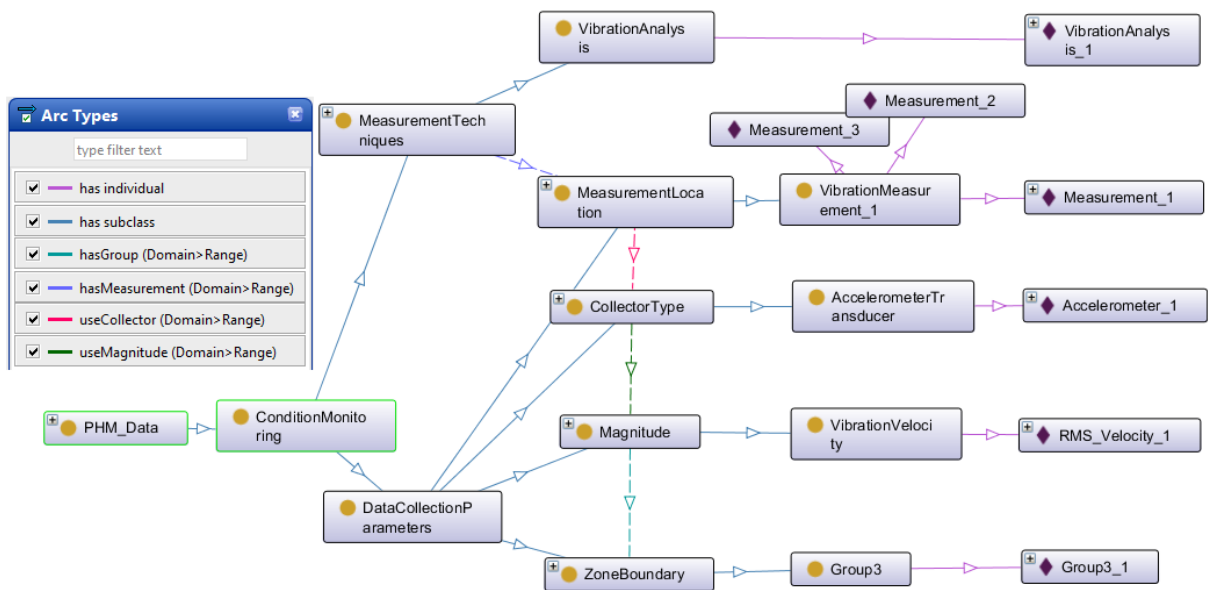
Esta é a última etapa do procedimento para criação do modelo OntoProg, onde são criadas instâncias (denominadas também de objetos, valor ou indivíduos). As instâncias são utilizadas para representar elementos específicos, isto é, os próprios agentes da ontologia que representarão os elementos físicos a serem analisados. Para cada instância precisa-se definir a qual classe pertence e vincular uma propriedade de objeto, dados e/ou anotação.

Na Figura 21, por exemplo, a classe PHM_Data tem a subclasse ConditionMonitoring que por sua vez tem duas subclasses MeasurementTechnique e DataCollectionParameter. Por sua vez, MeasurementTechnique tem a subclasse VibrationAnalysis que possui a instância VibrationAnalysis_1. Por outro lado, a classe DataCollectionParameter tem as subclasses: MeasurementLocation que por sua vez tem a subclasse VibrationMeasurement_1; a subclasse TypeCollector que por sua vez tem a subclasse AccelerometerTransducer; a subclasse Magnitude que tem a subclasse VibrationVelocity; a subclasse ZoneBoundary que tem a subclasse Group3. A

subclasse *VibrationMeasurement_1* pode ter três pontos de coleta representados pelas instâncias *Measurement_1*, *Measurement_2* e *Measurement_3*; a subclasse *AccelerometerTransducer* tem a instância *Accelerometer_1*; a subclasse *VibrationVelocity* tem a instância *RMS_Velocity_1*; a subclasse *Group3* tem a instância *Group3_1*.

A seguir, usando o *plugging OntoGraf*, na Figura 21 a conexão de uma classe com uma instância é representada pela cor rosa que significa “tem individuo”, a cor azul “tem classe”, as setas tracejadas indicam que há uma propriedade de objeto entre classes com *Domain* e *Range*.

Figura 21 - Instâncias da subclasse Monitoramento de Condições



Fonte: o próprio autor

Assim, as principais instâncias criadas para o modelo OntoProg são apresentadas na Tabela 11. O restante de instâncias pode ser observado no Apêndice A, onde o modelo OntoProg é ilustrado graficamente.

Tabela 11 - Instancias do modelo OntoProg

Subclasse	Subclasse de	Subclasse de	Instancia
MachineWithSeparate Driver Pump RollingBearing	Equipment Machine Component Bearing	ManufacturingItems ManufacturingItems ManufacturingItems	MachineWithSeparate Driver_1 Pump_1 RollingBearing_1
Frature	FMSA_Data FailureMode	DiagnosticsTechnique	Frature_1
Effect	FMSA_Data OperationImpaired	DiagnosticsTechnique	OperationImpaired_1
PotentialCause Vibration	FMSA_Data FMSA_Data Symptom	DiagnosticsTechnique DiagnosticsTechnique	PotentialCause_1 Vibration_1

VibrationAnalysis	MeasurementTechniques	ConditionMonitoring	VibrationAnalysis_1
VibrationMeasurement_1	DataCollectionParameters MeasurementLocation	ConditionMonitoring	Measurement_1
AccelerometerTransducer	DataCollectionParameters CollectorType	ConditionMonitoring	Accelerometer_1
VibrationVelocity	DataCollectionParameters Magnitude	ConditionMonitoring	RMS_Velocity_1
Group_3	DataCollectionParameters ZoneBoundary	ConditionMonitoring	Group3_1

Fonte: o próprio autor

4.2 DEMONSTRAÇÃO DO MODELO

Após do detalhamento do procedimento para construir o modelo (Capítulo 3), e criado o modelo no item 4.1. A seguir é demonstrada a aplicabilidade do modelo usando como exemplo, o tipo de máquina bomba centrífuga que foi escolhida nas fabricas que está pesquisa teve acesso. Coletando dados, principalmente seus históricos de funcionamento e manutenção.

Segundo a norma IEC-60812 (2006), que define o fluxograma para iniciar a análise de falhas numa máquina, e as normas que definem o fluxograma para monitorar condições de máquinas mecânicas (ISO 17359, 2011; ISO 13379-1, 2012), o processo de demonstração começa selecionando os componentes rotativos que a máquina possui e que apareçam no modelo OntoProg. Posteriormente, são descritas as funções requeridas de cada componente para o funcionamento correto da máquina. Também são levantados todos os modos de falha, efeitos, causas, sintomas e técnicas de medição que os componentes dessa máquina possuem, usando a técnica FMSA. Na sequência, ainda com auxílio da técnica FMSA são descritos os locais de medição mais relevantes e suas zonas de limites quando coletados valores de medição usando a técnica preditiva de Análise de Vibrações e orientadas pelas normas ISO 13373-1:2002, ISO 13373-2:2016 e ISO 10816-3:2009. A identificação de componentes mais relevantes com suas técnicas de medição mais adequadas é alcançada usando a classificação da FMSA, ponderando o maior número de SEV, DGN, DET e PGN.

Assim, o equipamento utilizado para orientar a criação e demonstração do modelo ontológico é uma bomba centrífuga com acionamento separado (motor elétrico), e juntos devem realizar a função de tratamento de água em determinado setor de uma determinada organização. A máquina abordada é uma bomba centrífuga que tem a função requerida de transportar água do ponto A para o B, a uma determinada vazão em m³/h.. Finalmente, usando a FMSA para priorização do componente com maior potencial de prognosticar falhas é escolhido um mancal

de rolamentos que, por sua vez, tem a função de suporte e permite que o eixo de acionamento do rotor (impulsor) gire sem fricção, a uma determinada rotação em rpm.

A análise de falhas, através da técnica FMSA, foi realizada levantando as principais falhas registradas nesse tipo de máquina. Tal informação foi extraída de uma indústria de papel e celulose, uma agroindústria, publicações técnicas dos fabricantes desse tipo de máquina, fontes acadêmicas (KARDEC; NASCIF, 2001; AFFONSO, 2005; DE SIQUEIRA, 2009), consultores da área de análise preditivo, normas internacionais (ISO 13373-1, 2002; SAE J1739, 2009; ISO 17359, 2011; ISO 13379-1, 2012) e do banco de dados de 11 indústrias internacionais de petróleo e gás (OREDA, 2002).

O levantamento histórico dos principais eventos encontradas na bomba centrífuga são apresentados no Apêndice B. Neste item é focada demonstração no componente mecânico mancal de rolamentos que é o elemento mais importante na análise de prognóstico de falhas identificando-se a ‘fratura’ como o modo de falha mais relevante devido a ter uma causa potencial de ‘fadiga nas partes do rolamento pelo desalinhamento entre mancais’. Essa escolha foi em função da causa potencial desse modo de falha ter uma gravidade SEV=4 para o efeito ‘comprometer a operação do processo produtivo’. Além disso, esse tipo de modo de falha selecionado possui o sintoma ‘vibração’ que obteve a maior característica de possibilitar um adequado diagnóstico, i.e. DGN=5. Por sua vez, a técnica preditiva para monitorar a condição desse sintoma que apresenta melhor detectabilidade é a ‘Análise de Vibrações’, i.e. DET=5. Finalmente, a magnitude ‘velocidade’ oferece a melhor característica de prognósticas uma falha funcional, i.e. PGN=3, além disso, a magnitude velocidade a única que possui parâmetros padronizados para a análise de vibrações disponíveis em norma ISO. Multiplicando esses valores o MPN é igual a 300, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - FMSA parcial para modelagem e demonstração do PHM

Componente/ Função	Modo de Falha	Causa potencial	Efeito potencial	S E V	Sintom a	D G N	Técnica de medição	D E T	Magni- tude	P G N	M P N
Mancal de Rolamentos / Suporta e permite a rotação do eixo do rotor a uma determinada rpm	Fratura	Fadiga nas partes do rolamento devido ao desalinha- mento do mancal	Operação compro- metida	4	Vibraçã o	5	Análise de vibrações	5	Velocidade em mm/s r.m.s.	3	30 0

Fonte: Adaptado de Nuñez e Borsato (2017)

Considerando as regras SWRL contidas no modelo, na demonstração do equipamento em estudo é usada a norma ISO 10816-3:2009 para avaliar dados coletados da análise de vibrações. Assim, quando coletado um valor de 4,52 mm/s r.m.s, usando um transistor acelerômetro em um equipamento com motor de acionamento separado, e potência acima de 15 kW. Logo, ativando o *plugging reasoner* Pellet no editor de ontologias Protégé, a asserção para esse valor acusa que a saúde do componente está em ‘alerta’ e o estado de saúde é inferido lançando o aviso com a mensagem ‘Programas manutenção baseada na condição’, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Asserções alimentadas de regras transitivas elaboradas em swrlb

The screenshot displays the Protégé ontology editor interface. On the left, a class hierarchy for 'VibrationMeasurement_1' is shown, including subclasses like 'ConditionMonitoring', 'DataCollectionParameters', 'CollectorType', 'Magnitude', 'MeasurementLocation', 'VibrationMeasurement_1', 'VibrationMeasurement_2', 'ZoneBoundary', 'MeasurementTechniques', 'DiagnosticsTechnique', and 'ManufacturingItems'. The main window shows a list of SWRL rules under the 'Rules' tab. A red box highlights several rules, including:

- `MeasurementLocation(?M1), swrlb:greaterThanOrEqual(?A, 0), hasCurrentValue(?M1, ?A), swrlb:lessThanOrEqual(?A, 2.3) -> hasHealth(?M1, "Good"^^xsd:string)`
- `MeasurementLocation(?M1), hasCurrentValue(?M1, ?B), swrlb:greaterThan(?B, 2.3), swrlb:lessThanOrEqual(?B, 4.5) -> hasHealth(?M1, "Satisfactory"^^xsd:string)`
- `MeasurementLocation(?M1), swrlb:greaterThan(?C, 4.5), hasCurrentValue(?M1, ?C), swrlb:lessThanOrEqual(?C, 7.1) -> hasHealth(?M1, "Alert"^^xsd:string)`
- `MeasurementLocation(?M1), swrlb:greaterThan(?D, 7.1), hasCurrentValue(?M1, ?D) -> hasHealth(?M1, "Alarm"^^xsd:string)`
- `hasHealth(?M1, ?D), MeasurementLocation(?M1), swrlb:equal(?D, "Alarm"^^xsd:string) -> hasWarning(?M1, "Turn off equipment"^^xsd:string)`
- `hasHealth(?M1, ?A), swrlb:equal(?A, "Good"^^xsd:string), MeasurementLocation(?M1) -> hasWarning(?M1, "Collect new data in 3 months"^^xsd:string)`
- `hasMeasurement(?C1, ?M1), MeasurementLocation(?M1), Component(?C1), CollectorType(?T1), useCollector(?M1, ?T1) -> useCollector(?C1, ?T1)`
- `hasHealth(?M1, ?B), MeasurementLocation(?M1), swrlb:equal(?B, "Satisfactory"^^xsd:string) -> hasWarning(?M1, "Collect new data in 1 months"^^xsd:string)`

 Below the rules, the 'Instances: Measurement_3' tab shows property assertions for 'Measurement_3'. A yellow box highlights the following assertions:

- `useCollector Accelerometer_1`
- `hasCurrentValue 4.52`
- `hasLocationID "BOM0225_003_AC_180_R_N"^^xsd:string`
- `hasWarning "Schedule Condition-based Maintenance"^^xsd:string`
- `hasHealth "Alert"^^xsd:string`

 Dashed orange arrows indicate the flow of information from the highlighted rules to the corresponding assertions in the instance view.

Fonte: o próprio autor

Dando continuidade ao método DSR, após alimentar o modelo OntoProg com dados de uma bomba centrífuga, são apresentados os resultados do modelo a consultas realizadas usando a linguagem SPARQL

Para tanto, usa-se o *plugin* SPARQL do editor de ontologias Protégé para realizar consultas. Primeiramente, cria-se o prefixo `utfpr` para conectar as consultas com o modelo OntoProg, conforme ilustrado na Figura 23. E isto é possível pelo recurso de identificador de recurso internacional (IRI do inglês *International Resource Identifier*), que é uma generalização do identificador uniforme de recurso (URI – do inglês *Uniform Resource Identifier*), denominado neste trabalho de: <http://www.semanticweb.org/david/ontologies/2016/untitled-ontology-286>.

Figura 23 - Prefixo utfpr para conectar consultas SPARQL com OntoProg

```

PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX utfpr: <http://www.semanticweb.org/david/ontologies/2016/untitled-ontology-286#>

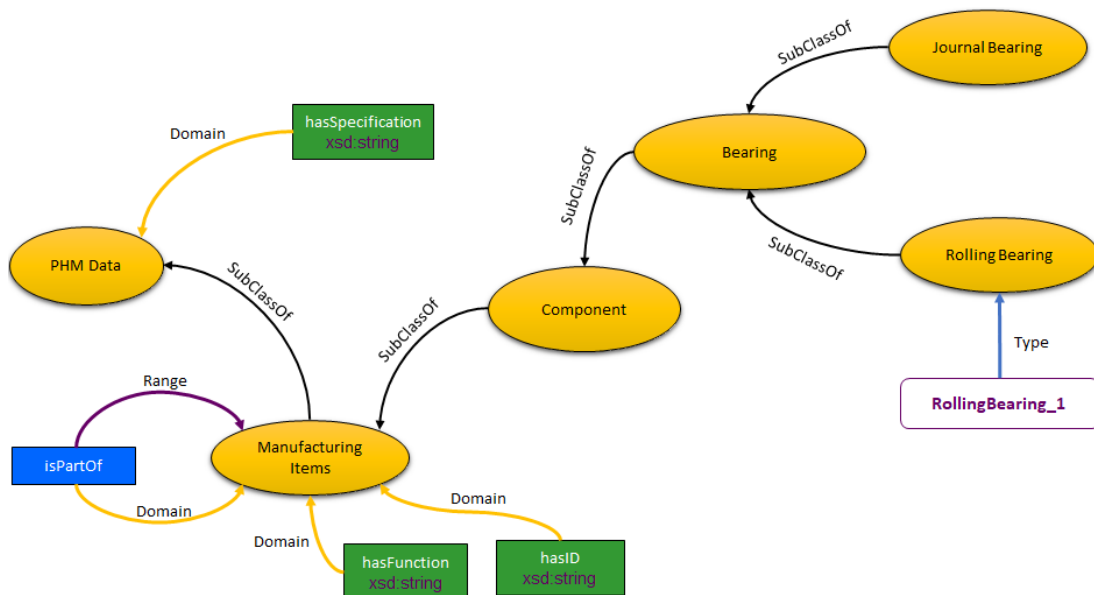
```

Fonte: o próprio autor

A seguir são elaboradas algumas consultas usando a linguagem SPARQL, para avaliar o retorno de informações contidas no modelo OntoProg. Assim, por meio do uso da estrutura de descrição de recursos RDF, é possível fazer afirmações sobre qualquer dado contido no modelo OntoProg. Essas afirmações consistem em três elementos (uma tripla) e possui a seguinte estrutura: <recurso> <propriedade> <valor>. Sendo que uma afirmação RDF representa uma relação entre o valor e o recurso (RDF, 2014).

A Figura 24 ilustra o grafo RDF com as principais relações da instância Component.

Figura 24 - Grafo RDF das características do componente



Fonte: o próprio autor

O grafo RDF, da Figura 24 representa o componente mecânico com as seguintes propriedades de dados: tem especificação (hasSpecification), tem função (hasFunction), tem número de identificação (hasID), e uma propriedade de objeto: é parte de (isPartOf). Além disso, nessa relação pode ser encontrado, por exemplo, um determinado componente com sua identificação, especificação, função necessária, e a qual máquina pertence, por meio da seguinte consulta:

```

SELECT ?Component ?ComponentID ?TypeOfComponent ?OfMachine ?ComponentFunction
WHERE {?Component utfpr:hasID "6310_C3";
      utfpr:hasID ?ComponentID;
      utfpr:hasSpecification ?TypeOfComponent;
      utfpr:isPartOf ?OfMachine;
      utfpr:hasFunction ?ComponentFunction }

```

As consultas na linguagem SPARQL começam com o caractere “?”, podendo ser inserido em qualquer uma das três posições de uma tripla no conjunto de dados RDF. Os padrões de triplas da cláusula SELECT têm a mesma forma de triplas normais, exceto que qualquer uma das três partes da tripla pode ser substituída por uma variável. A cláusula SELECT retorna uma tabela de variáveis com os valores que satisfazem a consulta. Dessa forma, após realizada a consulta, o retorno da Figura 24A seguir são elaboradas algumas consultas usando a linguagem SPARQL, para avaliar o retorno de informações contidas no modelo OntoProg. Assim, por meio do uso da estrutura de descrição de recursos RDF, é possível fazer afirmações sobre qualquer dado contido no modelo OntoProg. Essas afirmações consistem em três elementos (uma tripla) e possui a seguinte estrutura: <recurso> <propriedade> <valor>. Sendo que uma afirmação RDF representa uma relação entre o valor e o recurso (RDF, 2014).

A Figura 24 ilustra o grafo RDF com as principais relações da instância Component.

Figura 24 é apresentado na Tabela 13.

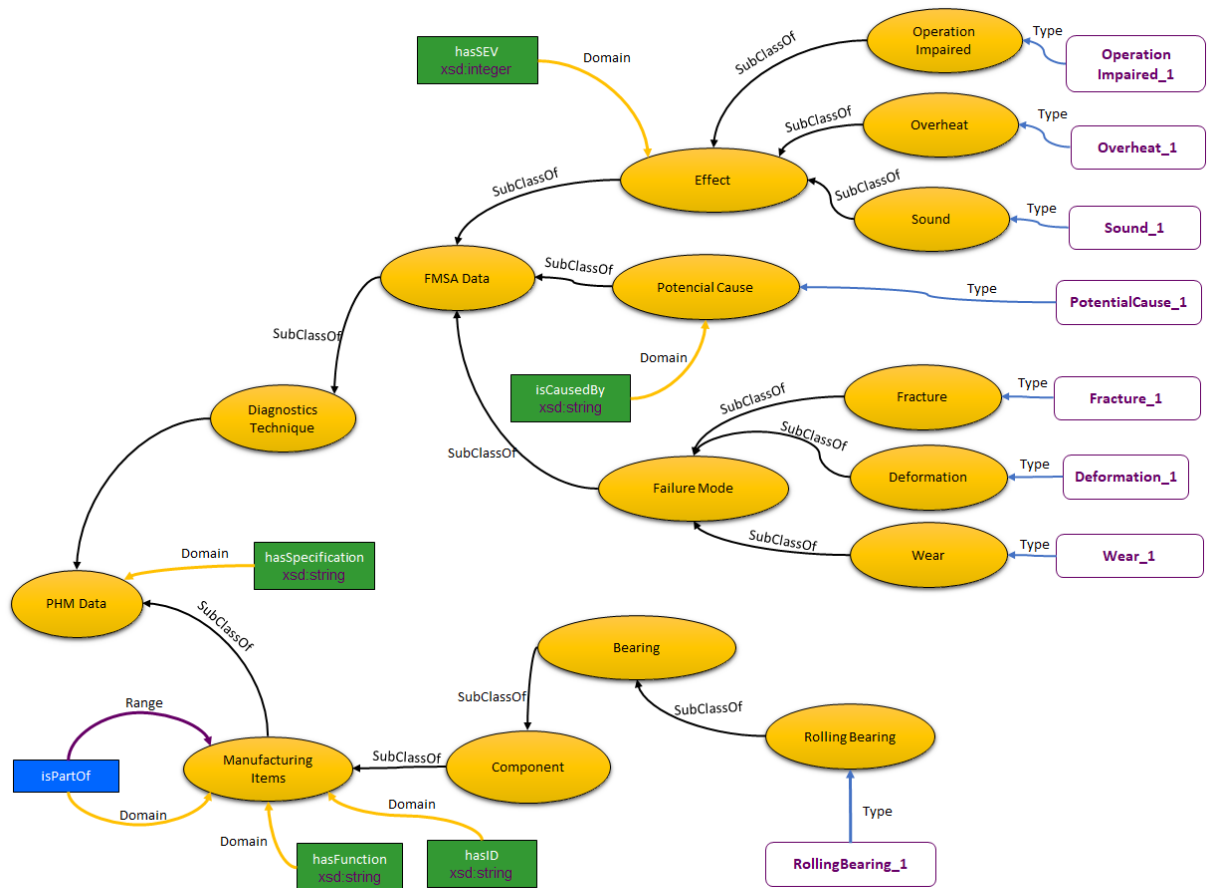
Tabela 13 - Resultado de consulta para identificar as características do componente

Component	ComponentID	TypeOfComponent	Ofmachine	ComponentFunction
utfpr:RollingBearing_1	6310_C3^^xsd:string	Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	utfpr:Pump_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string

Fonte: o próprio autor

Após identificadas as principais características do componente a ser demonstrado, neste caso RollingBearing_1, podem ser realizadas consultas para analisar as falhas contidas em tal componente (alimentados pela técnica FMSA). Assim, na Figura 25 ilustra-se o grafo contendo as principais relações que possibilitam dita necessidade.

Figura 25 - Grafo RDF das características FMSA do componente



Fonte: o próprio autor

Na Figura 25, que representa uma parte do modelo OntoProg, consulta-se: qual é o componente mecânico em análise, quais são seus modos de falha cadastrados, quais são os efeitos que possui, quais são as causas desses modos de falha, e finalmente qual é a gravidade (SEV) de cada efeito cadastrado para com o processo produtivo ao qual pertence tal componente. Dessa forma, por meio da linguagem SPARQL, a consulta fica da seguinte forma:

```
SELECT ?Component ?FailureMode ?FailureCause ?Effect ?SEV
WHERE {?Component utfpr:hasID "6310_C3";
      utfpr:hasMode ?FailureMode.
      ?FailureMode utfpr:hasCause ?Cause.
      ?Cause utfpr:isCausedBy ?FailureCause.
      ?FailureMode utfpr:hasEffect ?Effect.
      ?Effect utfpr:hasSEV ?SEV }
ORDER BY ?SEV
```

O retorno de tal consulta é apresentado na Tabela 14. O retorno a essa consulta pode ser organizado em função a valores de menor a maior grau de severidade (SEV). Isso é possível usando o comando ORDER BY.

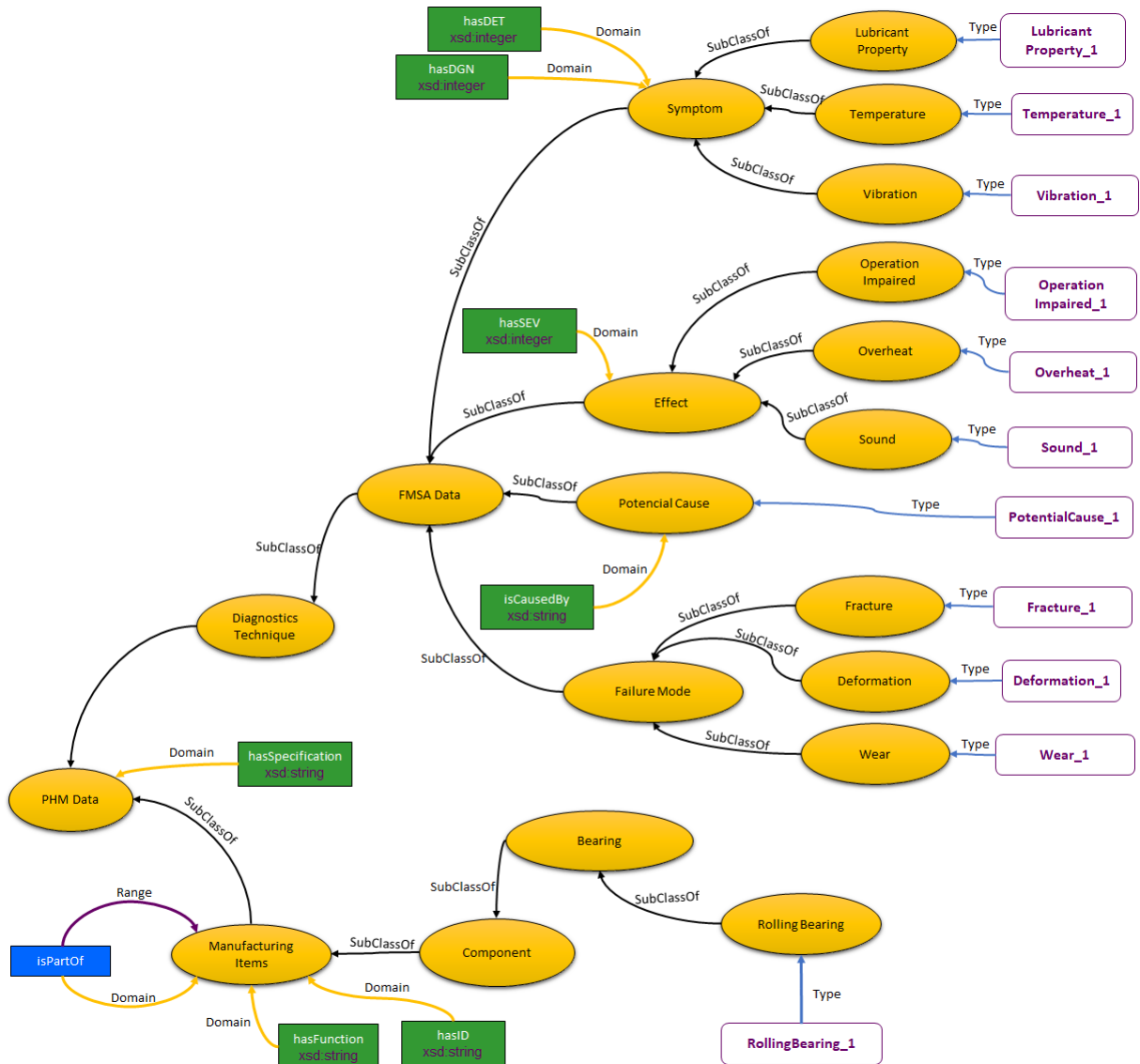
Tabela 14 - Resultado de consulta para identificar a FMSA do componente

Component	FailureMode	FailureCause	Effect	S E V
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Deformation_1	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Overheat_1	3
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Deformation_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Overheat_1	3
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4

Fonte: o próprio autor

Dando continuidade às consultas, sabendo as principais características de um determinado componente, sua análise de falhas cadastradas. Na sequência é necessário saber a relação que possui cada causa potencial de falha com determinados sintomas recomendados por norma. Dessa forma, pode ser ponderada a relevância que cada sintoma possui para elaborar diagnósticos corretos. Na Figura 26 é ilustrada parte da ontologia que representa os grafos RDF para atender tal requerimento.

Figura 26 - Grafo RDF das características de sintoma contidas no componente



Fonte: o próprio autor

A consulta da Figura 26 que identifica os sintomas que possuem o melhor potencial para realizar um diagnóstico (DGN), é elaborado da seguinte forma:

```
SELECT ?Component ?ComponentFunction ?FailureMode ?FailureCause ?Symptom ?DGN
WHERE {?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
        ?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause.
        ?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
        utfpr:hasSymptom ?Symptom.
        ?Symptom utfpr:hasDGN ?DGN }
ORDER BY ?FailureMode
```


O retorno dessa consulta é apresentado na Tabela 14, organizada pelo modo de falha (ou motivo da falha) que possui o componente em estudo.

Tabela 15 - Resultado de consulta para identificar sintomas para o diagnóstico do componente

Component	ComponentFunction	FailureMode	FailureCause	Symptom	D G N
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_10	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_11	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string	utfpr:Temperature_3	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string	utfpr:Temperature_4	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:Vibration_15	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Temperature_2	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Vibration_13	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string	utfpr:Vibration_14	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:Vibration_12	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string	utfpr:Vibration_9	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Vibration_7	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string	utfpr:Vibration_8	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string	utfpr:Vibration_4	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string	utfpr:LubricantProperty_2	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string	utfpr:LubricantProperty_3	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_5	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string	utfpr:Temperature_1	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string	utfpr:LubricantProperty_1	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string	utfpr:Vibration_6	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string	utfpr:Vibration_3	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_2	4

utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string	utfpr:Vibration_1	5
------------------------	---	--------------	--	-------------------	---

Fonte: o próprio autor

Além disso, do grafo RDF ilustrado na Figura 26, podem ser extraídas a informações que contenham as técnicas de medição, (também conhecida como técnicas preditivas), mais apropriadas. Dessa forma, pode ser ponderada a detectabilidade de cada técnica preditiva para o correto monitoramento de condições do componente. A consulta é elaborada da seguinte forma:

```
SELECT ?Component ?ComponentFunction ?FailureMode ?FailureCause ?Symptom ?Technique ?DET
WHERE {?Component utfpr:hasID "6310_C3";
      ?ComponentFunction
      utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
      ?FailureMode
      utfpr:hasMode ?FailureMode.
      ?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause.
      ?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
      ?FailureCause
      utfpr:hasSymptom ?Symptom.
      ?Symptom
      utfpr:isDetectedWith ?Technique;
      ?Technique
      utfpr:hasDET ?DET }
ORDER BY ?FailureMode
```

O retorno para tal consulta é apresentado na Tabela 16, organizada pelo modo de falha que possui o componente RollingBearing_1.

Tabela 16 - Resultado de consulta para identificar técnicas de medição do componente

Component	ComponentFunction	Failure Mode	FailureCause	Symptom	Technique	D E T
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_10	utfpr:VibrationAnalysis_1	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_11	utfpr:VibrationAnalysis_1	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string	utfpr:Temperature_3	utfpr:InfraredThermography	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string	utfpr:Temperature_4	utfpr:InfraredThermography	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:Vibration_15	utfpr:VibrationAnalysis_1	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Temperature_2	utfpr:InfraredThermography	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Vibration_13	utfpr:VibrationAnalysis_1	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string	utfpr:Vibration_14	utfpr:VibrationAnalysis_1	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:Vibration_12	utfpr:VibrationAnalysis_1	5

utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string	utfpr:Vibration_9	utfpr:VibrationAn alysis_1	3
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Vibration_7	utfpr:VibrationAn alysis_1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Vibration_7	utfpr:VisulInspect ion_1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string	utfpr:Vibration_8	utfpr:VibrationAn alysis_1	3
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string	utfpr:Vibration_4	utfpr:VibrationAn alysis_1	4
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string	utfpr:LubricantP roperty_2	utfpr:OilAnalysis _1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string	utfpr:LubricantP roperty_3	utfpr:OilAnalysis _1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_5	utfpr:VibrationAn alysis_1	3
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string	utfpr:Temperatu re_1	utfpr:InfraredTher mography	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string	utfpr:LubricantP roperty_1	utfpr:OilAnalysis _1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string	utfpr:Vibration_6	utfpr:VibrationAn alysis_1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string	utfpr:Vibration_3	utfpr:VibrationAn alysis_1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to lack of tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_2	utfpr:VibrationAn alysis_1	4
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string	utfpr:Vibration_1	utfpr:VibrationAn alysis_1	5

Fonte: o próprio autor

Depois de identificar SEV, DGN e DET cadastrados no componente, corrobora-se que a análise de vibração é a técnica de medição mais indicada por meio da elaboração da seguinte consulta:

```
SELECT ?Component ?FailureMode ?FailureCause ?Effect ?SEV ?Symptom ?DGN ?Technique ?DET
WHERE {?Component utfpr:hasID "6310_C3";
      utfpr:hasMode ?FailureMode.
?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause;
      utfpr:hasEffect ?Effect.
?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
      utfpr:hasSymptom ?Symptom.
?Symptom utfpr:isDetectedWith ?Technique;
utfpr:hasDGN ?DGN;
utfpr:hasDET ?DET.
?Effect utfpr:hasSEV ?SEV.
FILTER (?SEV = 4 )
FILTER (?DGN = 5 )
FILTER (?DET = 5 ) }
```

Assim, a Tabela 17, retorno à consulta dos maiores valores para SEV, DGN e DET.

Tabela 17 - Resultado de consulta para identificar a melhor forma de monitorar o componente

Component	FailureMode	FailureCause	Effect	S E V	Symptom	D G N	Technique	D E T
utfpr:RollingBearin g_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:Operation Impaired_1	4	utfpr:Vibration_1 5	5	utfpr:VibrationA nalysis_1	5
utfpr:RollingBearin g_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:Operation Impaired_1	4	utfpr:Vibration_1 2	5	utfpr:VibrationA nalysis_1	5

Fonte: o próprio autor

Neste ponto, sabe-se que a técnica de medição para o componente RollingBearing_1 é a análise de vibrações. Sendo assim, é realizada uma consulta que guia a coleta correta de dados, por meio da identificação do: número de medição, identificação do local de medição, tipo de transdutor que deve ser usado, magnitude que deve ser empregada e as unidades usadas para sua interpretação. A consulta para simular tal cenário é:

```
SELECT ?Component ?Measurement ?LocationID ?Transducer ?Magnitude ?Unit
WHERE {?Component utfpr:hasID "6310_C3";
      utfpr:hasMeasurement ?Measurement;
      utfpr:useCollector ?Transducer;
      utfpr:useMagnitude ?Magnitude.
      ?Measurement utfpr:hasLocationID ?LocationID.
      ?Magnitude utfpr:hasUnit ?Unit}
```

O resultado para tal consulta é representado na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultado de consulta para coleta correta de dados do componente

Component	Measurement	LocationID	Transducer	Magnitude	Unit
utfpr:RollingBearin g_1	utfpr:Measurement_1	BOM0225_003_AC_180_R N^^xsd:string	utfpr:Accelerometer_1	utfpr:RMS_Velo city_1	mm/s rms^^xsd:string

Fonte: o próprio autor

Após identificar: as principais características do componente em estudo, seus eventos de FMSA cadastrados, conseqüentemente a análise de vibração como técnica mais apropriada para coletar dados, e por sua vez a forma correta da coleta de tais dados. A continuação, devem ser encontradas formas corretas de interpretar os dados coletados. Nesse contexto, considera-se a norma ISO 10816-3 (2009) para interpretar os valores de velocidade r.m.s. coletados por um acelerômetro, na análise de vibrações. Mas, essa norma possui 4 grupos para avaliação dos dados coletados, dependendo do tipo de equipamento. O equipamento que está sendo usado para a demonstração do artefato é uma bomba centrífuga com motor de acionamento separado que se enquadra no Grupo 3 da norma.

Dessa forma, é simulada uma consulta no modelo OntoProg para identificar as zonas consideradas como estado: Good, Satisfactory, Alert e Alarm, dependendo do valor coletado. Por

exemplo, quando simulada uma coleta de dado no local de medição (Measurement_1) que possui ID BOM0225_003_AC_180_R_N (nomenclatura definida pela norma ISO 13373-1:2002), se o valor coletado for 2.1, realiza-se a consulta para saber qual é a saúde do componente e sua mensagem de aviso que foi cadastrada. Para obter esta consulta, deve ser inserir o valor 2.1 nas propriedades de dados, tem valor atual (hasCurrentValue). Assim a consulta é:

```
SELECT ?Component ?MeasurementPoint ?Health ?WarningMessage
WHERE {?Component utfpr:hasID"6310_C3";
      ?MeasurementPoint ?MeasurementPoint.
      ?MeasurementPoint utfpr:hasLocationID "BOM0225_003_AC_180_R_N";
      utfpr:hasCurrentValue "2.31";
      utfpr:hasHealth ?Health;
      utfpr:hasWarning ?WarningMessage }
```

O resultado dessa consulta é representado na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultado da consulta para a saber a saúde do componente

Component	MeasurementPoint	HealthMessage	WarningMessage
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Measurement_1	Satisfactory^^xsd:string	Collect new data in 1 months^^xsd:string

Fonte: o próprio autor

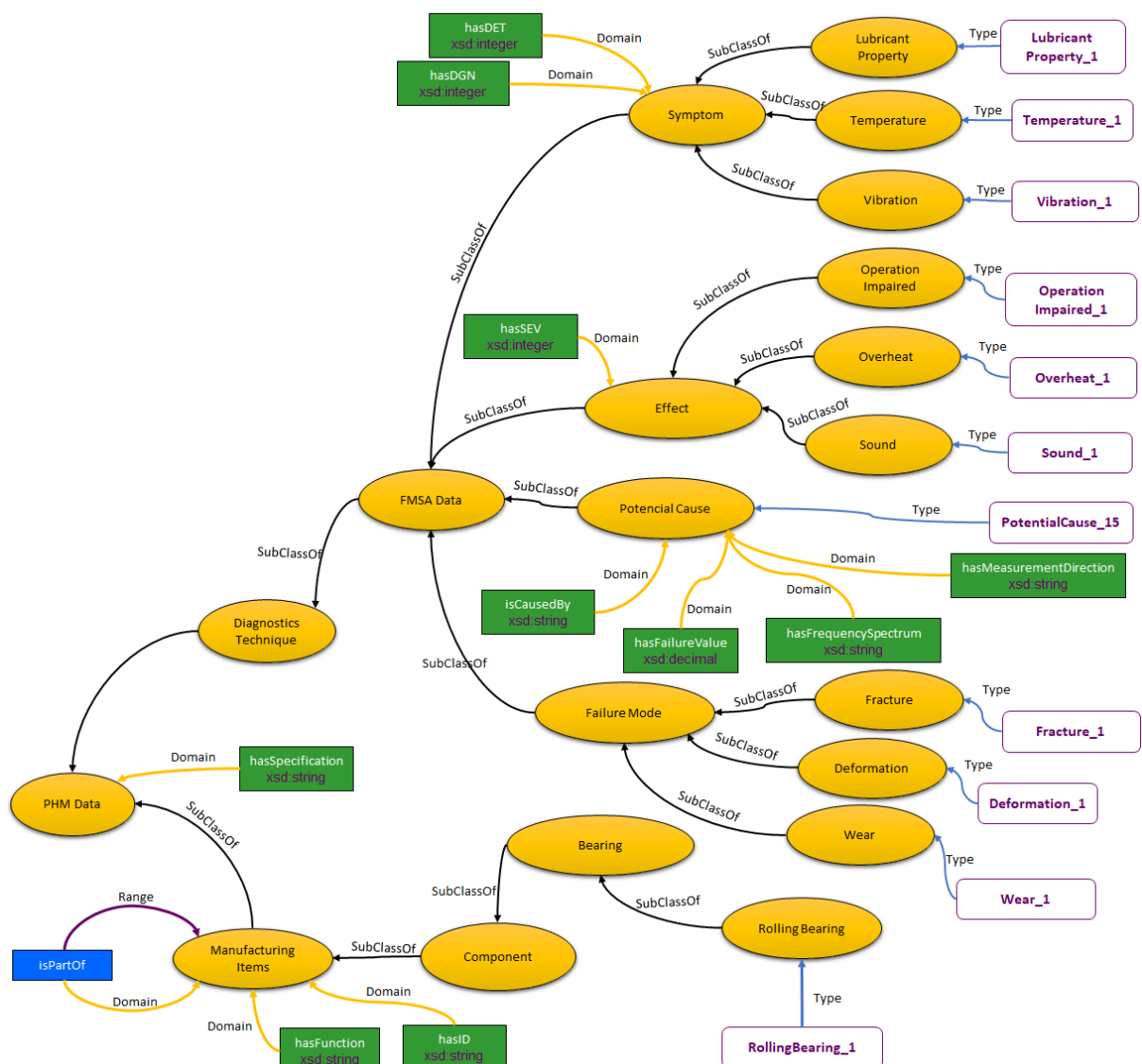
Não obstante, quando valores medidos são coletados e se a saúde tem estado: Good, Satisfactory ou Alarme, as consultas em SPARQL informam mensagens de aviso específicas, definidas pela equipe segundo critérios adotados por normas ou estratégias da empresa. Esses avisos podem ser ‘coletar novos dados em x meses’, ou ‘desligar o equipamento imediatamente’. Porém, quando a saúde tem estado Alert, o modelo OntoProg deve avisar para programar uma intervenção de manutenção baseada na condição.

Assim, após apresentar um estado de Alert, o modelo OntoProg apresenta características de Sistema Especialista, uma vez que informa, de forma autônoma, as possíveis causas potenciais relacionadas à falha que levou a tal estado. Dessa forma, é possível considerar que o modelo permite a tomada de decisões precisas permitindo intervenção que identificam pontualmente a causa que levou o componente a uma falha e possibilita a sua recuperação antes de virar uma falha funcional.

Para atender a essa exigência de um Sistema Especialista, cada causa potencial deve ser constantemente atualizada, alimentando novos eventos vindos do conhecimento de especialistas, novas intervenções de manutenção, informações de normas atualizadas, e novas recomendações do fabricante da máquina. Essas novas informações são vinculadas (rotuladas) às características específicas de cada causa potencial do modelo OntoProg, por meio de propriedades de dados conforme ilustrado na Figura 27.

Nesse contexto, por exemplo, no modelo OntoProg a causa de número 15 (PotencialCause_15) tem rotulada as seguintes propriedades de dados: tem direção de medição (hasMeasurementDirection) radial; tem o valor de falha (hasFailureValue) 5.1 mm/s r.m.s.; e tem espectro de frequência (hasFrequencySpectrum) 1x e 2x a frequência nominal de rotação do eixo. Lembrando que, segundo a norma ISO 10816-3 (2009), sabe-se que para a máquina em estudo o valor global de 5.1 mm/s r.m.s. representa o estado de saúde Alert, logo a mensagem será: ‘programar manutenção baseada na condição’.

Figura 27 - Grafo RDF das propriedades de dados da classe Causa Potencial de falha



Fonte: o próprio autor

Assim, quando realizada a consulta para as características dessa causa, ou seja, quando aparece o valor 5,1 na direção radial com frequência 1x e 2x, a informação recebida diante da

consulta é que a causa é (isCausedBy) ‘desalinhamento paralelo do eixo devido a montagem incorreta’. Logo, a ordem de manutenção emitida é acompanhada com essa descrição o que possibilita uma intervenção na máquina mais precisa. A consulta elaborada é:

```
SELECT ?Component ?PossibleCause
WHERE {?Component utfpr:hasID"6310_C3";
      utfpr:hasCause ?Cause.
      ?Cause utfpr:hasFailureValue "5.1";
      utfpr:hasMeasurementDirection "Radial";
      utfpr:hasFrequencySpectrum "one-time the frequency (1X), two-time the frequency
(2x)".
      ?Cause      utfpr:isCausedBy ?PossibleCause }
```

O resultado da consulta é representado na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultado da consulta para a saber a causa da falha funcional

Component	PossibleCause
utfpr:RollingBearing 1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect [^] xsd:string

Fonte: o próprio autor

O resultado das consultas apresentadas neste capítulo podem interagir com o espaço físico usando aplicativos de software, tais como, o Jena Semantic Web Toolkit (MCCARTHY, 2016), Apache Jena-Fuseki APACHE JENA-FUSEKI (2016), Openlink Virtuoso (VIRTUOSO, 2016) e StarDog (STARDOG UNION, 2017), entre outros. Além das consultas apresentadas neste capítulo, podem ser encontradas outras consultas no Apêndice C.

4.3 AVALIAÇÃO E COMUNICAÇÃO DO MODELO

Segundo March e Smith (1995), de acordo com o método DSR, um artefato modelo pode ser avaliado também em termos de sua fidelidade com os fenômenos do mundo real, completude, nível de detalhamento, robustez e consistência interna.

Assim, um modelo tem características de Fidelidade quando representa o funcionamento de elementos do mundo real, capturados por técnicas e representadas por métodos consolidados. Nesta tese, tal exigência é atendida através da análise de dependabilidade que captura os modos de falha de máquinas mecânicas reais usando a FMSA.

Conforme Fan et al. (2016), a verificar da Completude de um artefato modelo, é verificada quando o modelo ontológico possui características que abrangem completamente um determinado cenário. Nesse contexto, a Completude do modelo ontológico desta tese é avaliada em relação ao escopo do modelo, que é atender a todas as possíveis interações dos elementos

mecânicos quando monitoradas as suas condições de funcionamento usando a técnica de análise de vibrações, proporcionando um mapeamento dos procedimentos para a implementação do PHM em máquinas mecânicas.

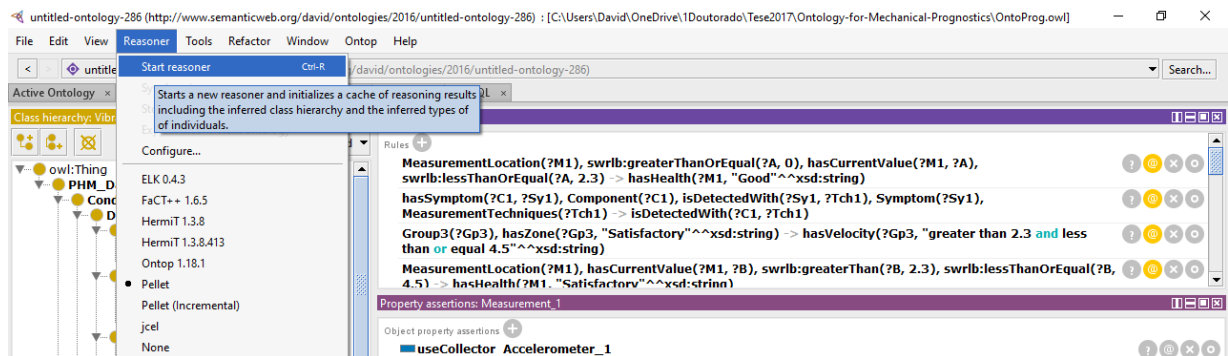
O Nível de detalhamento de um modelo interage com a capacidade da sua Fidelidade, e é avaliado ao seguir rigorosamente um procedimento consolidado da engenharia de ontologia, e é avaliado ao seguir rigorosamente um procedimento consolidado da engenharia de ontologia, nesta tese a modelagem é guiada pelo procedimento de desenvolvimento de ontologias 101 (MARCH; SMITH, 1995). Por sua vez, a avaliação da Robustez do modelo é realizada com diversas simulações. Nessa tese, tal exigência é atendida com a elaboração de várias consultas ao modelo ontológico usando a linguagem SPARQL, e comprovando que o modelo responde satisfatoriamente as consultas requeridas para atender um cenário real, ou seja, é um modelo que tem características de Sistema Especialista que responde a questões, e estas respostas são similares às que um especialista humano daria (HERAVI; LYCETT; DE CESARE, 2014; ETUDO; YOON; LIU, 2017; UYSAL; SOGUT, 2017).

A Consistência do modelo ontológico é avaliado com o *reasoner* Pellet (SIRIN et al., 2007), instalado no editor de ontologia Protégé, durante o processo de desenvolvimento e demonstração da ontologia, para evitar inconsistências na especificação de classes e propriedades do modelo (GERBER; GERBER; VAN DER MERWE, 2014; VOM BROCKE et al., 2014).

A avaliação do modelo OntoProg verifica sua eficiência na representação do conhecimento e na realização de outras tarefas para as quais foi criada sem apresentar inconsistências ou conflitos entre suas classes, propriedades e instâncias. Mesmo usando o procedimento para desenvolvimento de ontologias 101, esse procedimento e outros não apresentam um consenso na construção da ontologia. Assim, a forma de validar a ontologia é procurando a análise da sua consistência usando um *reasoner*.

Neste trabalho usou-se o *reasoner* Pellet que verifica hierarquias de classes, Domain, Range, e asserções disjuntas conflitantes. Caso haja um erro de consistência o editor Protegé acusa um aviso com um símbolo triangular vermelho de alerta. A seguir, ativa-se o *reasoner* Pellet para encontrar qualquer inconsistência, conforme apresentado na Figura 28.

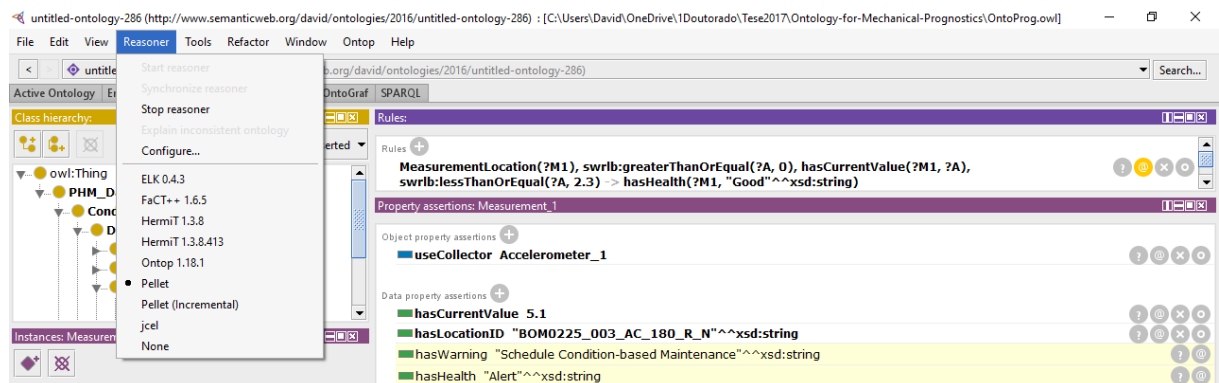
Figura 28 - Ativando o reasoner Pellet para verificar inconsistência no modelo OntoProg



Fonte: o próprio autor

Após ativado o *reasoner* Pellet constata-se que não há nenhum aviso de inconsistência no modelo OntoProg. Na sequência, o editor Protégé entrega asserções que previamente foram estabelecidas usando regras na linguagem SWRL, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Resultado da verificação de consistência



Fonte: o próprio autor

Por último, a comunicação da pesquisa inicialmente foi para atender a fase de identificação da oportunidade de pesquisa e motivação, por meio do estudo publicado com o título de “Panorama atual dos CPS no contexto da Manufatura” (LIRA; BORSATO, 2015). A fase de definição dos objetivos da solução foi cumprida com a publicação do artigo “Modelagem da dependabilidade para atender ao Prognóstico de Falhas dentro do contexto da Manufatura Inteligente” (LIRA; BORSATO, 2016). Finalmente, a comunicação da construção, o desenvolvimento e as avaliações prévias do artefato foram satisfeitas com a publicação do trabalho “Modelo ontológico para o Prognóstico e Gestão da Saúde em Máquinas” (NUÑEZ; BORSATO, 2017). Além disso, realizaram-se diversos seminários apresentando resultados do trabalho ao grupo de pesquisa e disponibilizando o modelo ontológico no repositório GitHub.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentam-se os principais tipos e formas de comunicação de dados em uma manufatura, as suas tendências e novidades relacionadas à Manufatura Inteligente. Apresenta-se o PHM como uma abordagem para atender uma nova demanda industrial, que requer a padronização da coleta de dados e tomada de decisões mais precisas e autônomas, levando a uma competitividade empresarial graças à diminuição de paradas de produção desnecessárias, e custos elevados de manutenção, aumentando assim a produtividade e, consequentemente os lucros das organizações.

Nessa tese aponta-se, pela literatura científica, o PHM como uma iniciativa nova, não na sua criação, mas, sim no seu potencial para atender aos tempos atuais delimitados pelo CPS, envolvendo IoT, sensores inteligentes, dispositivos móveis, web semântica, entre outras tendências. Embora existam pesquisas relacionadas ao uso do PHM, as mesmas são direcionadas para aplicações específicas e, quando se procura uma aplicação mais genérica existe muita informação desencontrada, o que dificulta uma implementação real do PHM num sistema de manufatura real. Para tal, o presente trabalho propõe, através de um modelo ontológico a padronização da sua implementação em sistemas de manufatura novos ou a adequação em sistemas existentes, além de orientar como devem ser tratados os dados oriundos de técnicas de medição e eventos históricos em intervenções de manutenção.

No presente trabalho, as normas internacionais são consideradas para apoiar a visão de uma arquitetura de PHM genérica aplicada a qualquer tipo de sistema de manufatura. As regras, implementadas sob a forma de ontologia formal, padronizam termos, tais como sistema, subsistema, componente, falha, entre outros, para abordar a análise de falhas em componentes mecânicos. As normas também orientam o estabelecimento da classificação para critérios de severidade, detecção, diagnóstico e prognóstico dos modos de falha aplicáveis em vários processos de fabricação. E, consequentemente, orientam a escolher a melhor técnica preditiva para o monitoramento, além de especificar como, com que o onde coletar tais dados.

O método DSR foi adotada para guiar na construção de um artefato do tipo modelo ontológico chamado de OntoProg que possui as seguintes características:

- Usa o procedimento de desenvolvimento de ontologia 101, garantindo a formalização da concepção do modelo, o qual, neste trabalho representou formalmente o domínio PHM usando a técnica FMSA e a análise de vibrações, provando que por meio delas, as falhas e causas potenciais, que atingem um

determinado componente mecânico, podem ser consultadas para tomada de decisões de prognóstico de anomalias e consequentes intervenções prematuras, antes de uma falha potencial converter-se em uma falha funcional catastrófica,

- O modelo foi construído em linguagem OWL 2 usando o editor de ontologias Protégé que possui o *reasoner* Pellet, além da linguagem de consultas SPARQL que permite consultas em componentes mecânicos. Ele também provou a escalabilidade e usabilidade do artefato, pois é capaz de representar informações reais que podem ser usadas pelos profissionais de manutenção sobre um determinado componente mecânico, disponibilizando informações como função requerida, modos de falha, causas potenciais de falhas, sintoma relevante, técnica de medição utilizada, parâmetros para coleta de dados e mensagem de advertência, entre outras informações. Ou seja, a ontologia é um Sistema Especialista que responde a um cenário real da mesma forma que um especialista humano o faria.

O modelo foi demonstrado considerando uma bomba centrífuga real provando sua Fidelidade, Completude, Nível de detalhamento, Robustez e Consistência, entregando informações da FMSA que foram previamente alimentadas por dados reais extraídos de indústrias reais. Assim, a ontologia é formalmente estruturada para implementação potencial do conceito de PHM na manufatura.

Destaca-se também, que o modelo OntoProg pode servir como protocolo de implementação do PHM em diversos tipos de manufatura, já que apresenta uma estrutura formal dos principais equipamentos, máquinas, componentes mecânicos, seus modos de falha, efeito, sintomas e técnicas de medição guiados por normas internacionais consolidadas na área da Engenharia de Manufatura. Além disso, destaca-se nas consultas apresentadas nesta tese, que o modelo OntoProg aumenta sua característica de Sistema Especialista sempre que as causas potenciais do modelo forem constantemente atualizadas por informações de especialistas, normas, fabricantes e intervenções de manutenção.

Futuros trabalhos podem demonstrar a aplicabilidade do artefato OntoProg em diversos outros equipamentos mecânicos, com diversos outros eventos de diagnóstico e outras técnicas de medição, alavancando o modelo até ser considerada uma ontologia de alto nível, permitindo a sua inclusão na estrutura de dados da Web através, e.g. do projeto de dados abertos ligados entre si (LOD – do inglês *Linked Open Data*), servindo assim a páginas web, compartilhando informações entre diferentes organizações de uma forma que tais informações possam ser interpretadas de forma autônoma por computadores, permitindo a conexão e

consulta entre as máquinas de uma mesma organização ou com máquinas de outras empresas inseridas no LOD, permitindo assim a realização efetiva de consultas na web, dentro da Internet. Assim, num futuro próximo, a previsão da RUL dos componentes de uma máquina se tornará cada vez mais ubíqua para a tomada de decisão dos gestores sobre a manutenção de ativos físicos, alertando-os sobre o tempo estimado até uma falha funcional, possibilitando o planejamento estratégico de manutenção baseado em condições reais de saúde da máquina.

Os futuros passos do presente trabalho focam-se na implantação de uma bancada de laboratório para que, dentro de um ambiente controlado, possam ser realizadas mais aplicações em equipamentos similares ao desenvolvido neste trabalho ou outros que sejam de interesse de indústrias próximas da região onde fica instalado o grupo de pesquisa.

Além disso, pretende-se realizar novas demonstrações em outros cenários com outro tipo de máquinas mecânicas e comprovar a respostas a consultas com especialistas da área, dessa forma comprova-se que a ontologia é genérica e é um Sistema especialista que atende vários tipos de máquinas.

REFERÊNCIAS

- AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 2005.
- AHUJA, Inderpreet P Singh; KHAMBA, Jaimal Singh. Total productive maintenance: literature review and directions. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 25, n. 7, p. 709-756, 2008.
- AHUJA, IPS; KHAMBA, JS. An evaluation of TPM implementation initiatives in an Indian manufacturing enterprise. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 13, n. 4, p. 338-352, 2007.
- AL-BUKHITAN, Saeed; HELMY, Tarek; AL-MULHEM, Mohammed. Semantic Annotation Tool for Annotating Arabic Web Documents. **Procedia Computer Science**, v. 32, p. 429-436, 2014.
- AL-NAJJAR, Basim. Total quality maintenance: an approach for continuous reduction in costs of quality products. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 2, n. 3, p. 4-20, 1996.
- ALFIERI, Arianna et al. Usage of SoS methodologies in production system design. **Computers & Industrial Engineering**, v. 64, n. 2, p. 562-572, 2013.
- ALI, Sajid; PIEVATOLO, Antonio. High quality process monitoring using a class of inter-arrival time distributions of the renewal process. **Computers & Industrial Engineering**, v. 94, p. 45-62, 2016.
- ALTUG, S.; MO-YUEN, Chen; TRUSSELL, H. J. Fuzzy inference systems implemented on neural architectures for motor fault detection and diagnosis. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 46, n. 6, p. 1069-1079, 1999.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/ISA-95: Enterprise-Control System Integration**, 2010.
- ANTONIOU, Grigoris; VAN HARMELEN, Frank. **A semantic web primer**: MIT press, 2004.
- APACHE JENA-FUSEKI. Serving RDF data over HTTP. Disponível em: http://jena.apache.org/documentation/serving_data. Acesso em: 20 ago. 2016.
- ARAUJO, Olga Fernanda Nabuco de. Proposta de uma rede de compartilhamento de habilidades no ambiente da Manufatura. v., p., 2003.
- AUBRY, Jean-Francois; BRINZEI, Nicolae; MAZOUNI, Mohammed-Habib. **Systems Dependability Assessment: Benefits of Petri Net Models**: John Wiley & Sons, 2016.
- AVIŽIENIS, Algirdas et al. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. **Dependable and Secure Computing, IEEE Transactions on**, v. 1, n. 1, p. 11-33, 2004.

AZAB, Ahmed; NADERI, Bahman. Modelling the Problem of Production Scheduling for Reconfigurable Manufacturing Systems. **Procedia CIRP**, v. 33, p. 76-80, 2015.

AZADEH, A. et al. Condition-based maintenance effectiveness for series-parallel power generation system—A combined Markovian simulation model. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 142, p. 357-368, 2015.

BACKLUND, Fredrik; AKERSTEN, Per-Anders. RCM introduction: process and requirements management aspects. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 9, n. 3, p. 250-264, 2003.

BARALDI, Piero; MANGILI, Francesca; ZIO, Enrico. Investigation of uncertainty treatment capability of model-based and data-driven prognostic methods using simulated data. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 112, p. 94-108, 2013.

BAUTISTA-ZAMBRANA, María Rosario. Methodologies to Build Ontologies for Terminological Purposes. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 173, p. 264-269, 2015.

BENKAMOUN, Nadège et al. Architecture Framework for Manufacturing System Design. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 88-93, 2014.

BENOMRANE, Souad; SELLAMI, Zied; BEN AYED, Mounir. An ontologist feedback driven ontology evolution with an adaptive multi-agent system. **Advanced Engineering Informatics**, v. 30, n. 3, p. 337-353, 2016.

BERMUDEZ-EDO, Maria et al. Managing technological knowledge of patents: HCOntology, a semantic approach. **Computers in Industry**, v. 72, p. 1-13, 2015.

BILAL, Muhammad et al. The application of web of data technologies in building materials information modelling for construction waste analytics. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 11, p. 28-37, 2017.

BITTENCOURT, A. C.; AXELSSON, P. Modeling and Experiment Design for Identification of Wear in a Robot Joint Under Load and Temperature Uncertainties Based on Friction Data. **Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on**, v. 19, n. 5, p. 1694-1706, 2014.

BLAISE, Jean-Christophe; LEVRAT, Eric; IUNG, Benoit. Process approach-based methodology for safe maintenance operation: From concepts to SPRIMI software prototype. **Safety Science**, v. 70, p. 99-113, 2014.

BLOCH, Heinz P. Dealing with asset management and life extension. **Hydrocarbon Processing**, v. 91, n. 1, p. 15-16, 2012.

BOUZIDI, Zahra et al. Neuro-fuzzy model for Prognostic as a Service in private cloud computing. **Cloud Computing Technologies and Applications (CloudTech), 2016 2nd International Conference on**. IEEE, 2016. p.360-367.

BRANDTNER, Patrick et al. Multi-criteria Selection in Design Science Projects—A Procedure for Selecting Foresight Methods at the Front End of Innovation. **International Conference on Design Science Research in Information Systems**. Springer, 2015. p.295-310.

BUKOWSKI, L. System of systems dependability – Theoretical models and applications examples. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 151, p. 76-92, 2016.

CAO, Yang et al. Study on machining service modes and resource selection strategies in cloud manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 1-4, p. 1-17, 2015.

CARNERO, María Carmen. Multicriteria model for maintenance benchmarking. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, n. 2, p. 303-321, 2014.

CHAN, FTS et al. Implementation of Total Productive Maintenance: A case study. **International Journal of Production Economics**, v. 95, n. 1, p. 71-94, 2005.

CHANAMOOL, Nalinee; NAENNA, Thanakorn. Fuzzy FMEA application to improve decision-making process in an emergency department. **Applied Soft Computing**, v. 43, p. 441-453, 2016.

CHEN, Yan-Chun. An optimal production and inspection strategy with preventive maintenance error and rework. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 1, p. 99-106, 2013.

CHEN, Yan; ZHU, Feibai; LEE, Jay. Data quality evaluation and improvement for prognostic modeling using visual assessment based data partitioning method. **Computers in Industry**, v. 64, n. 3, p. 214-225, 2013.

CHEN, Yuxue; HE, Zhenzhi; YANG, Shunian. Research on on-line automatic diagnostic technology for scratch defect of rolling element bearings. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 13, n. 3, p. 357-362, 2012.

CHENG, Yi-Yun; CHEN, Hsueh-Hua. Towards a seamless multilingual Semantic Web: A study on constructing a cross-lingual ontology. **Proceedings of the Association for Information Science and Technology**, v. 53, n. 1, p. 1-6, 2016.

COELHO, Reginaldo Teixeira; OLIVEIRA, João Fernando Gomes de; GUERRINI, Fábio Müller. **Tecnologias avançadas de manufatura**. Jaboticabal: Novos Talentos, 2005.

COLLEDANI, Marcello et al. Design and management of manufacturing systems for production quality. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 63, n. 2, p. 773-796, 2014.

COOPER, Howard C.. Capture all critical failure modes into FMEA in half the time with a simple decomposition table (Actual case study savings = \$4,206,000). **2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)**. IEEE, 2015. p.1-6.

CORCHO, Oscar et al. Construcción de ontologías legales con la metodología METHONTOLOGY y la herramienta WebODE. v., p., 2005.

CORIA, V. H. et al. Analytical method for optimization of maintenance policy based on available system failure data. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 135, p. 55-63, 2015.

CPS. A Concept Map of Cyber-Physical Systems. Disponível em: <http://cyberphysicalsystems.org/>. Acesso em: 07 jun 2017.

CRESPO MÁRQUEZ, Beno et al. Value-driven engineering of E-maintenance platforms. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 25, n. 4, p. 568-598, 2014.

CUI, Yiqian; SHI, Junyou; WANG, Zili. Discrete Event Logistics Systems (DELS) simulation modeling incorporating two-step Remaining Useful Life (RUL) estimation. **Computers in Industry**, v. 72, p. 68-81, 2015.

CYCORP. CYC: Logical Reasoning with the world's Largest Knowledge base. Disponível em: <http://www.opencyc.org>. Acesso em: 07 jun. 2017.

DAWN, An; JOO HO, Choi; NAM HO, Kim. Options for Prognostics Methods: A review of data-driven and physics-based prognostics. **Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society**. PhmSociety, 2013.

DBPEDIA. OpenLink Software of Leipzig and Mannheim University. Disponível em: <http://wiki.dbpedia.org/>. Acesso em: 20 mai. 2017.

DE FARIAS, Tarcisio Mendes; ROXIN, Ana; NICOLLE, Christophe. SWRL rule-selection methodology for ontology interoperability. **Data & Knowledge Engineering**, v. 105, p. 53-72, 2016.

DE NICOLA, Antonio; MISSIKOFF, Michele; NAVIGLI, Roberto. A Proposal for a Unified Process for Ontology Building: UPON. Andersen, K. V., Debenham, J., *et al.* **Database and Expert Systems Applications: 16th International Conference, DEXA 2005, Copenhagen, Denmark, August 22-26, 2005. Proceedings**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, p.655-664.

DE SIQUEIRA, Iony Patriota. **Manutenção centrada na confiabilidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

DERIGENT, William et al. Opportunistic maintenance based on fuzzy modelling of component proximity. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, n. 1, p. 29-32, 2009.

DERMEVAL, Diego et al. Ontology-based feature modeling: An empirical study in changing scenarios. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 11, p. 4950-4964, 2015.

DFKI. Deutsches Forschungszentrum Für Künstliche Intelligenz DFKI: German Research Center for Artificial Intelligence. Disponível em: <http://www.dfki.de/web>. Acesso em: 19 jul. 2017.

DI ORIO, Giovanni; CÂNDIDO, Gonçalo; BARATA, José. The Adapter module: A building block for Self-Learning Production Systems. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 36, p. 25-35, 2015.

DJAID, Nadia Touileb; SAADIA, Nadia; RAMDANE-CHERIF, Amar. Multimodal Fusion Engine for an Intelligent Assistance Robot Using Ontology. **Procedia Computer Science**, v. 52, p. 129-136, 2015.

DO, Phuc et al. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 133, p. 22-32, 2015.

DONG, Ming; PENG, Ying. Equipment PHM using non-stationary segmental hidden semi-Markov model. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 27, n. 3, p. 581-590, 2011.

DU, Jun; WANG, Shaoping; ZHANG, Haiyan. Layered clustering multi-fault diagnosis for hydraulic piston pump. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 36, n. 2, p. 487-504, 2013.

DU, Shichang; LV, Jun; XI, Lifeng. Degradation process prediction for rotational machinery based on hybrid intelligent model. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 28, n. 2, p. 190-207, 2012.

EBRAHIMIPOUR, V.; REZAIE, K.; SHOKRAVI, S. An ontology approach to support FMEA studies. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 1, p. 671-677, 2010.

EL KADIRI, Soumaya et al. Current trends on ICT technologies for enterprise information systems. **Computers in Industry**, v. 79, p. 14-33, 2015.

ELATTAR, Hatem M.; ELMINIR, Hamdy K.; RIAD, A. M. Prognostics: a literature review. **Complex & Intelligent Systems**, v. 2, n. 2, p. 125-154, 2016.

ELGHAZEL, W. et al. Dependability of wireless sensor networks for industrial prognostics and health management. **Computers in Industry**, v. 68, p. 1-15, 2015.

ELMARAGHY, H. et al. A model for assessing the layout structural complexity of manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, n. 1, p. 51-64, 2014.

ELMARAGHY, Hoda et al. Product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems Overview of Remaining Useful Life Prediction Techniques in Through-life Engineering Services. **Procedia CIRP**, v. 16, p. 158-163, 2014.

ESMAEILIAN, Behzad; BEHDAD, Sara; WANG, Ben. The evolution and future of manufacturing: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 39, p. 79-100, 2016.

ETUDO, Ugochukwu; YOON, Victoria; LIU, Dapeng. Financial Concept Element Mapper (FinCEM) for XBRL interoperability: Utilizing the M3 Plus method. **Decision Support Systems**, v. 98, p. 36-48, 2017.

EVCHINA, Yulia; MARTINEZ LASTRA, Jose Luis. Hybrid approach for selective delivery of information streams in data-intensive monitoring systems. **Advanced Engineering Informatics**, v. 30, n. 3, p. 537-552, 2016.

FAN, Shaokun et al. A process ontology based approach to easing semantic ambiguity in business process modeling. **Data & Knowledge Engineering**, v. 102, p. 57-77, 2016.

FENSEL, Dieter. Ontologies: Dynamic networks of formally represented meaning. **Vrije University: Amsterdam**, v., p., 2001.

FERNANDES, Renato F.; BRANDÃO, Dennis. Proposal of Receiver Initiated MAC Protocol for WSN in urban environment using IoT. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 30, p. 102-107, 2016.

FERREIRA, Norma Sandra de Almeida. As pesquisas denominadas “estado da arte”. **Educação & sociedade**, v. 23, n. 79, p. 257-272, 2002.

FILL, Hans-Georg; PITTL, Benedikt; HONEGGER, Gerald. A Modeling Environment for Visual SWRL Rules Based on the SeMFIS Platform. **International Conference on Design Science Research in Information Systems**. Springer, 2017. p.452-456.

FIorentino, Michele et al. Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions. **Computers in Industry**, v. 65, n. 2, p. 270-278, 2014.

FRASER, Kym Facilities management: the strategic selection of a maintenance system. **Journal of Facilities Management**, v. 12, n. 1, p. 18-37, 2014.

FRITZSCHE, R.; GUPTA, J. N. D.; LASCH, R. Optimal prognostic distance to minimize total maintenance cost: The case of the airline industry. **International Journal of Production Economics**, v. 151, p. 76-88, 2014.

GANGEMI, Aldo; GUARINO, Nicola; OLTRAMARI, Alessandro. Conceptual analysis of lexical taxonomies: The case of WordNet top-level. **Proceedings of the international conference on Formal Ontology in Information Systems-Volume 2001**. ACM, 2001. p.285-296.

GAO, R. et al. Cloud-enabled prognosis for manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, n. 2, p. 749-772, 2015.

GARCÍA-PENALVO, Francisco José et al. Towards an ontology modeling tool. A validation in software engineering scenarios. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 13, p. 11468-11478, 2012.

GARCÍA MÁRQUEZ, Fausto Pedro et al. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. **Renewable Energy**, v. 46, p. 169-178, 2012.

GARFIELD, Eugene. The history and meaning of the journal impact factor. **Jama**, v. 295, n. 1, p. 90-93, 2006.

GARG, Amik; DESHMUKH, SG. Maintenance management: literature review and directions. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 12, n. 3, p. 205-238, 2006.

GEITNER, Fred K; BLOCH, Heinz. **Análise e Solução de Falhas em Sistemas Mecânicos**: Elsevier Brasil, 2016.

GEONAMES. GeoNames database. Disponível em: <http://www.geonames.org>. Acesso em: 07 jun 2017.

GERBER, Marthinus Cornelius; GERBER, AURONA Jacoba; VAN DER MERWE, Alta. An analysis of fundamental concepts in the conceptual framework using ontology technologies. **South African Journal of Economic and Management Sciences**, v. 17, n. 4, p. 396-411, 2014.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6 ed. . São Paulo: Atlas, 2008.

GOMEZ-PEREZ, Asuncion; FERNANDEZ-LOPEZ, Mariano; CORCHO, Oscar. Ontological Engineering: with examples from the areas of knowledge management, ecommerce and the Semantic Web. **Book by Springer**, v., p., 2004.

GONG, Yiwei; JANSSEN, Marijn. An interoperable architecture and principles for implementing strategy and policy in operational processes. **Computers in Industry**, v. 64, n. 8, p. 912-924, 2013.

GONZÁLEZ-PEREIRA, Borja; GUERRERO-BOTE, Vicente P.; MOYA-ANEGÓN, Félix. A new approach to the metric of journals' scientific prestige: The SJR indicator. **Journal of Informetrics**, v. 4, n. 3, p. 379-391, 2010.

GORECKY, D. et al. Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. **Industrial Informatics (INDIN), 2014 12th IEEE International Conference on**. 2014. p.289-294.

GRUBER, Thomas R. A translation approach to portable ontology specifications. **Knowledge Acquisition**, v. 5, n. 2, p. 199-220, 1993.

GRÜNINGER, Michael; FOX, Mark S. Methodology for the design and evaluation of ontologies. v., p., 1995.

GUARINO, Nicola. Formal ontology and information systems. **Formal Ontology in Information Systems: Proceedings of the first international conference (FOIS'98), June 6-8, Trento, Italy**. IOS press, 1998. p.3-15.

GUILLÉN, Antonio 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.

GUO, Lijie; KANG, Jianxin. An extended HAZOP analysis approach with dynamic fault tree. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 38, p. 224-232, 2015.

HAMMAMI, Maroua et al. Axle gear oils: Friction, wear and tribofilm generation under boundary lubrication regime. **Tribology International**, v. 114, p. 88-108, 2017.

HÄNEL, Tom; FELDEN, Carsten. Design and Evaluation of an Analytical Framework to Analyze and Control Production Processes. **Procedia CIRP**, v. 62, p. 141-146, 2017.

HANSSON, Jonas; BACKLUND, Fredrik; LYCKE, Liselott. Managing commitment: increasing the odds for successful implementation of TQM, TPM or RCM. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 20, n. 9, p. 993-1008, 2003.

HASHEMIAN, H. M.; BEAN, W. C. State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 60, n. 10, p. 3480-3492, 2011.

HEDLIND, Mikael; KJELLBERG, Torsten. Design specifications with engineering terminology in a geometric context for CAD/CAM. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, n. 1, p. 169-172, 2015.

HENG, Ai-wina et al. Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 23, n. 3, p. 724-739, 2009.

HERAVI, Bahareh Rahmanzadeh; LYCETT, Mark; DE CESARE, Sergio. Ontology-based standards development: Application of OntoStand to ebXML business process specification schema. **International Journal of Accounting Information Systems**, v. 15, n. 3, p. 275-297, 2014.

HEVNER, Alan R. A three cycle view of design science research. **Scandinavian journal of information systems**, v. 19, n. 2, p. 1-6, 2007.

HEVNER, Alan R. et al. Design science in information systems research. **MIS quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.

HIDALGO, Erick Miguel Portugal. **Método de aquisição de conhecimento para sistemas especialistas destinados à diagnose de falhas: aplicação de técnicas de análise de confiabilidade e de risco**. 2015. 251 f. Tese - Universidade de São Paulo, 2015.

HONG, Haibo; YIN, Yuehong. Ontology-based conceptual design for ultra-precision hydrostatic guideways with human-machine interaction. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 2, p. 11-18, 2016.

HORROCKS, Ian et al. SWRL: A semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML. **W3C Member submission**, v. 21, p. 1-30, 2004.

HU, Chao et al. Ensemble of data-driven prognostic algorithms for robust prediction of remaining useful life. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 103, p. 120-135, 2012.

HUA, Cheng et al. Long-term potential performance degradation analysis method based on dynamical probability model. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 4, p. 4410-4417, 2012.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-60300-3-1**: Dependability Management-Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability - Guide on methodology, 2003.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-60812**: Analysis techniques for system reliability - Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA), 2006.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-62264**: Enterprise-control system integration -Part 1: Models and terminology, 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60050-192**: International Electrotechnical Vocabulary -Part 192: Dependability, 2015.

IEEE PHM. International Conference on Prognostics and Health Management. Disponível em: <http://www.phmconf.org/>. Acesso em: 12 jun 2017. .

IMS. IMS Center for Intelligent Maintenance Systems Disponível em: <http://www.imscenter.net/>. Acesso em: 20 abr. de 2016.

ISMAIL MOSTAFA, Samir. Implementation of proactive maintenance in the Egyptian glass company. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 10, n. 2, p. 107-122, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2041**: Mechanical vibration, shock and condition monitoring - Vocabulary, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4406**: Hydraulic fluid power - Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10816-3**: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13372**: Condition monitoring and diagnostics of machines - Vocabulary, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13373-1**: Condition monitoring and diagnostics of machines - Vibration condition monitoring, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13374-1**: Condition monitoring and diagnostics of machines - Data processing, communication and presentation - Part 1: General guidelines, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13379-1**: Condition monitoring and diagnostics of machines — Data interpretation and diagnostics techniques - Part 1: General guidelines, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13381-1**: Condition monitoring and diagnostics of machines - Prognostics - Part 1: General guidelines, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14830-1**: Condition monitoring and diagnostics of machines systems -- Tribology-based monitoring and diagnostics - Part 1: General guidelines, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15704**: Industrial automation systems - Requirements for enterprise-reference architectures and methodologies, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17359**: Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18434-1**: Condition monitoring and diagnostics of machines - Thermography - Part 1: General procedures, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 20816-1**: Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 1: General guidelines, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22096**: Condition monitoring and diagnostics of machines -Acoustic emission, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 29821-1**: Condition monitoring and diagnostics of machines - Ultrasound - Part 1: General guidelines, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 55000**: Asset management - Overview, principles and terminology, 2014.

IUNG, Benoît et al. Conceptual framework for e-Maintenance: Illustration by e-Maintenance technologies and platforms. **Annual Reviews in Control**, v. 33, n. 2, p. 220-229, 2009.

IVEZIC, Nenad; KULVATUNYOU, Boonserm; SRINIVASAN, Vijay. On Architecting and Composing Through-life Engineering Information Services to Enable Smart Manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 22, p. 45-52, 2014.

JAFARI, L.; MAKIS, V. Joint optimal lot sizing and preventive maintenance policy for a production facility subject to condition monitoring. **International Journal of Production Economics**, v. 169, p. 156-168, 2015.

JARDINE, Andrew K. S.; LIN, Daming; BANJEVIC, Dragan. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 7, p. 1483-1510, 2006.

JARRAR, Mustafa; MEERSMAN, Robert. Formal Ontology Engineering in the DOGMA Approach. Meersman, R. e Tari, Z. **On the Move to Meaningful Internet Systems 2002: CoopIS, DOA, and ODBASE: Confederated International Conferences CoopIS, DOA, and ODBASE 2002 Proceedings**: Springer Berlin Heidelberg, 2002, p.1238-1254.

JAZDI, N. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. **Automation, Quality and Testing, Robotics, 2014 IEEE International Conference on**. 2014. p.1-4.

JEDRZEJEWSKI, J. et al. Selected Diagnostic Methods for Machine Tools Acceptance Tests. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 34, n. 1, p. 343-346, 1985.

JEONG, Ki-Young; PHILLIPS, Don T. Operational efficiency and effectiveness measurement. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 21, n. 11, p. 1404-1416, 2001.

JUNG, Kiwook et al. Mapping Strategic Goals and Operational Performance Metrics for Smart Manufacturing Systems. **Procedia Computer Science**, v. 44, p. 184-193, 2015.

KANDUKURI, Surya Teja et al. A review of diagnostics and prognostics of low-speed machinery towards wind turbine farm-level health management. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 697-708, 2016.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 2001.

KARRAY, Mohamed-Hedi; CHEBEL-MORELLO, Brigitte; ZERHOUNI, Noureddine. A Trace based System for Decision Activities in CBM Process. **Prognostics and Health Management (PHM), 2013 IEEE Conference on**. IEEE, 2013. p.1-6.

KARRAY, Mohamed-Hedi; CHEBEL-MORELLO, Brigitte; ZERHOUNI, Noureddine. PETRA: Process Evolution using a TRAcE-based system on a maintenance platform. **Knowledge-Based Systems**, v. 68, p. 21-39, 2014.

KETHAVARAPU, Uma Pavan Kumar; SARASWATHI, S. Concept Based Dynamic Ontology Creation for Job Recommendation System. **Procedia Computer Science**, v. 85, p. 915-921, 2016.

KHAC TUAN, Huynh et al. On the Use of Mean Residual Life as a Condition Index for Condition-Based Maintenance Decision-Making. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, v. 44, n. 7, p. 877-893, 2014.

KHAN, J. A.; KUMAR, S. Deep analysis for development of RDF, RDFS and OWL ontologies with protege. **Reliability, Infocom Technologies and Optimization (ICRITO) (Trends and Future Directions), 2014 3rd International Conference on**. IEEE, 2014. p.1-6.

KHOURI, Selma; BERKANI, Nabila; BELLATRECHE, Ladjel. Tracing data warehouse design lifecycle semantically. **Computer Standards & Interfaces**, v. 51, p. 132-151, 2017.

KIM, Jong Hyun; SEONG, Poong Hyun. The effect of information types on diagnostic strategies in the information aid. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 92, p. 171-186, 2007.

KOZAKI, Kouji; KITAMURA, Yoshinobu; MIZOGUCHI, Riichiro. Developing Ontology-based Applications using Hozo. **Computational Intelligence**. A Scientific and Technical Publishing Company, 2005. p.273-277.

KUKULIES, Jan; FALK, Bjoern; SCHMITT, Robert H. Development of Optimized Test Planning Procedures for Stabilizing Ramp-up Processes by Means of Design Science Research. **Procedia CIRP**, v. 51, p. 93-98, 2016.

LACERDA, Daniel Pacheco et al. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LADJ, A; VARNIER, C; TAYEB, F Benbouzid-Si. IPro-GA: an integrated prognostic based GA for scheduling jobs and predictive maintenance in a single multifunctional machine. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, p. 1821-1826, 2016.

LAU, Raymond Y. K.; LI, Chunping; LIAO, Stephen S. Y. Social analytics: Learning fuzzy product ontologies for aspect-oriented sentiment analysis. **Decision Support Systems**, v. 65, p. 80-94, 2014.

LAUNDROMAT, LOD. The LOD Wardrobe. Disponível em: <http://lodlaundromat.org/>. Acesso em: 07 jun 2017.

LEE, Jay et al. Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 42, n. 1, p. 314-334, 2014.

LEE, Jay; BAGHERI, Behrad. Cyber-Physical Systems in Future Maintenance. **9th WCEAM Research Papers**: Springer, 2015, p.299-305.

LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.

LEE, Jay; JIN, Chao; BAGHERI, Behrad. Cyber physical systems for predictive production systems. **Production Engineering**, v. 11, p. 155-165, 2017.

LEYDESDORFF, Loet; MILOJEVIĆ, Staša. Scientometrics. **International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences**, 2. ed. Oxford: Elsevier, 2015. v.21, p.322-327.

LI, Jie et al. Citation analysis: Comparison of web of science®, scopus™, SciFinder®, and google scholar. **Journal of electronic resources in medical libraries**, v. 7, n. 3, p. 196-217, 2010.

LIANG, M.; FAGHIDI, H. Intelligent bearing fault detection by enhanced energy operator. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 16, p. 7223-7234, 2014.

LIRA, David N; BORSATO, Milton. Dependability Modeling for the Failure Prognostics in Smart Manufacturing. **Transdisciplinary Engineering: Crossing Boundaries**. IOS Press, 2016. p.885 - 894.

LIRA, David Nunez et al. Fault detection in flexible assembly systems using Petri Net. **Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)**, v. 6, n. 7, p. 572-578, 2008.

LIRA, David Nunez; BORSATO, Milton. Panorama atual dos Sistemas Ciberfísicos no contexto da Manufatura. **10 Congresso Brasileiro de Gestão da Inovação e Desenvolvimento de Produtos**. 2015.

LIU, Hu-Chen; LIU, Long; LIU, Nan. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 2, p. 828-838, 2013.

LIU, S. et al. Real-time Reliability Self-assessment in Milling Tools Operation. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 32, n. 7, p. 2245-2252, 2016.

LIU, Shujie et al. Machinery condition prediction based on wavelet and support vector machine. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 28, n. 4, p. 1045-1055, 2017.

LÓPEZ-CAMPOS, Mónica A.; CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo; GÓMEZ FERNÁNDEZ, Juan F. Modelling using UML and BPMN the integration of open reliability, maintenance and condition monitoring management systems: An application in an electric transformer system. **Computers in Industry**, v. 64, n. 5, p. 524-542, 2013.

LÓPEZ, G. et al. Modeling Smart Grid neighborhoods with the ENERsip ontology. **Computers in Industry**, v. 70, p. 168-182, 2015.

LÓPEZ, Mariano Fernández et al. Building a chemical ontology using methontology and the ontology design environment. **IEEE Intelligent Systems and their applications**, v. 14, p. 37-46, 1999.

LOV. Linked Open Vocabularies. Disponível em: <http://lov.okfn.org/dataset/lov>. Acesso em: 20 jun. 2017.

LOWRY, Paul Benjamin et al. Evaluating journal quality and the association for information systems (AIS) senior scholars' journal basket via bibliometric measures: Do expert journal assessments add value? **MIS quarterly**, v. 37, n. 4, p. 993-1012, 2013.

LU, Chen; TAO, Laifa; FAN, Huanzhen. An intelligent approach to machine component health prognostics by utilizing only truncated histories. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 42, p. 300-313, 2014.

LYU, Guolin; CHU, Xuening; XUE, Deyi. Product modeling from knowledge, distributed computing and lifecycle perspectives: A literature review. **Computers in Industry**, v. 84, p. 1-13, 2017.

- MACCHI, Marco et al. Value-driven engineering of E-maintenance platforms. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 25, p. 568-598, 2014.
- MALINOWSKI, Simon; CHEBEL-MORELLO, Brigitte; ZERHOUNI, Noureddine. Remaining useful life estimation based on discriminating shapelet extraction. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 142, p. 279-288, 2015.
- MANSON, NJ. Is operations research really research? **Orion**, v. 22, n. 2, p. 155-180, 2006.
- MANUPATI, V. K. et al. Telefacturing Based Distributed Manufacturing Environment for Optimal Manufacturing Service by Enhancing the Interoperability in the Hubs. **Journal of Engineering**, v. 2017, p. 1-15, 2017.
- MARCH, Salvatore T.; SMITH, Gerald F. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, v. 15, n. 4, p. 251-266, 1995.
- MCCARTHY, Philip. Introduction to Jena. Disponível em: <http://www.ibm.com/developerworks/library/j-jena/>. Acesso em: 20 ago. 2016.
- MCKEE, Kristoffer K. et al. A vibration cavitation sensitivity parameter based on spectral and statistical methods. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 1, p. 67-78, 2015.
- MEDINA-OLIVA, G. et al. Predictive diagnosis based on a fleet-wide ontology approach. **Knowledge-Based Systems**, v. 68, p. 40-57, 2014.
- MINGERS, John; LEYDESDORFF, Loet. A review of theory and practice in scientometrics. **European Journal of Operational Research**, v. 246, n. 1, p. 1-19, 2015.
- MOBLEY, R Keith. **An introduction to predictive maintenance**: Butterworth-Heinemann, 2002.
- MOED, Henk F. Measuring contextual citation impact of scientific journals. **Journal of Informetrics**, v. 4, n. 3, p. 265-277, 2010.
- MOED, Henk F.; BAR-ILAN, Judit; HALEVI, Gali. A new methodology for comparing Google Scholar and Scopus. **Journal of Informetrics**, v. 10, n. 2, p. 533-551, 2016.
- MOGHADDASS, Ramin; ZUO, Ming J. An integrated framework for online diagnostic and prognostic health monitoring using a multistate deterioration process. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 124, p. 92-104, 2014.
- MONTGOMERY, Neil; BANJEVIC, Dragan; JARDINE, Andrew KS. Minor maintenance actions and their impact on diagnostic and prognostic CBM models. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 23, n. 2, p. 303-311, 2012.
- MUND, Carolin; NEUHÄUSLER, Peter. Towards an early-stage identification of emerging topics in science—The usability of bibliometric characteristics. **Journal of Informetrics**, v. 9, n. 4, p. 1018-1033, 2015.

MUSTAFA, Aljumaili et al. eMaintenance ontologies for data quality support. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 21, n. 3, p. 358-374, 2015.

MUTHU, S. et al. Benchmarking for strategic maintenance quality improvement. **Benchmarking: An International Journal**, v. 7, n. 4, p. 292-303, 2000.

NAKAJIMA, Seiichi. **Introduction to TPM: Total Productive Maintenance (Translation)**. Universidade de Minnesota: Productivity Press, Inc., 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724: Informação e documentação: trabalhos acadêmicos apresentação**. Rio de Janeiro, 2011.

NEVES, Ana Régia de M.; CARVALHO, Álvaro Marcos G.; RALHA, Célia G. Agent-based architecture for context-aware and personalized event recommendation. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 2, p. 563-573, 2014.

NFS. NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. Disponível em: https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286. Acesso em: 07 jun. 2017.

NI, Jun; GU, Xi; JIN, Xiaoning. Preventive maintenance opportunities for large production systems. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, n. 1, p. 447-450, 2015.

NIST. NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. Disponível em: <https://www.nist.gov/programs-projects/prognostics-health-management-and-control-phmc>. Acesso em: 10 jul 2017. .

NIU, Gang; YANG, Bo-Suk; PECHT, Michael. Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 95, n. 7, p. 786-796, 2010.

NIU, Gang; YANG, Bo-Suk. Intelligent condition monitoring and prognostics system based on data-fusion strategy. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 12, p. 8831-8840, 2010.

NIU, Gang; LAU, Daniel; PECHT, Michael. Computer manufacturing management integrating lean six sigma and prognostic health management. **International Journal of Performability Engineering**, v. 6, n. 5, p. 453-466, 2010.

NOY, Natalya F.; MCGUINNESS, Deborah L. Ontology development 101: A guide to creating your first ontology. **Stanford Medical Informatics Technical Report**, v., p., 2001.

NUÑEZ, David Lira; BORSATO, Milton. An ontology-based model for prognostics and health management of machines. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 6, p. 33-46, 2017.

ÖHMAN, Mikael; FINNE, Max; HOLMSTRÖM, Jan. Measuring service outcomes for adaptive preventive maintenance. **International Journal of Production Economics**, v. 170, p. 457-467, 2015.

OKSANEN, Timo; PIIRAINEN, Pyry; SEILONEN, Ilkka. Remote access of ISO 11783 process data by using OPC Unified Architecture technology. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 117, p. 141-148, 2015.

OMPUSUNGGU, A.; PAPY, J.; VANDENPLAS, S. Kalman filtering based prognostics for automatic transmission clutches. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 21, n. 1, p. 419-430, 2015.

ONG, S. K.; ZHU, J. A novel maintenance system for equipment serviceability improvement. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, n. 1, p. 39-42, 2013.

ONTOGRAF. OntoGraf Protégé. Disponível em: <https://protegewiki.stanford.edu/wiki/OntoGraf>. Acesso em: 07 jun 2015.

OPC. OPC Foundation. Disponível em: <https://opcfoundation.org/>. Acesso em: 20 set. de 2015.

OREDA. **OREDA Project Manager**: Offshore reliability data handbook. 4. ed. Trondheim, Noruega: OREDA Participants, 2002.

ORG. Upper Mapping and Binding Exchange Layer. Disponível em: <http://www.w3.org/ns/org#>. Acesso em: 07 jun 2017.

MACHINERY INFORMATION MANAGEMENT OPEN SYSTEM ALLIANCE-MIMOSA. **OSA-CBM 3.3.1**: Open System Architecture for Condition-Based Maintenance, 2010.

MACHINERY INFORMATION MANAGEMENT OPEN SYSTEM ALLIANCE-MIMOSA. **OSA-EAI V3.2.3A**: Open System Architecture for Enterprise Application Integration, 2014.

OWL-ONTOLOGIES. Protege Ontology Library. Disponível em: <http://owl.cs.manchester.ac.uk/tools/repositories/>. Acesso em: 07 jun 2017.

OWL-RESPOSITORIES. W3C: Ontology repositories. Disponível em: https://www.w3.org/wiki/Ontology_repositories. Acesso em: 07 jun 2017.

PALATTELLA, M. R. et al. On Optimal Scheduling in Duty-Cycled Industrial IoT Applications Using IEEE802.15.4e TSCH. **IEEE Sensors Journal**, v. 13, n. 10, p. 3655-3666, 2013.

PALMER, Claire et al. An ontology supported risk assessment approach for the intelligent configuration of supply networks. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v., p. 1-26, 2016.

PANTELEEV, V. V. et al. Intellectual Information Support for Operation of Technical Systems Based on Ontological Engineering. **Procedia Computer Science**, v. 64, p. 808-815, 2015.

PATTNAYAK, Jui; PATTNAIK, Sabyasachi. Integration of Web Services with E-Learning for Knowledge Society. **Procedia Computer Science**, v. 92, p. 155-160, 2016.

PATTON, Evan W et al. SemantEco: A semantically powered modular architecture for integrating distributed environmental and ecological data. **Future Generation Computer Systems**, v. 36, p. 430-440, 2014.

PEFFERS, Ken et al. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. **Journal of Management Information Systems**, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007.

PENG, Ying; DONG, Ming; ZUO, Ming Jian. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 50, n. 1, p. 297-313, 2010.

PHM-SOCIETY. The Prognostics and Health Management Society Disponível em: <http://www.phmsociety.org/>. Acesso em: 20 set. de 2016.

PILEGGI, Salvatore F. An Individual-centric Probabilistic Extension for OWL: Modelling the Uncertainty. **Procedia Computer Science**, v. 51, p. 1742-1751, 2015.

PINTO, H Sofia; STAAB, Steffen; TEMPICH, Christoph. DILIGENT: Towards a fine-grained methodology for Distributed, Loosely-controlled and evolvInG. **Proceedings of the 16th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2004)**. IOS Press, 2004. p.393-397.

PISCHING, Marcos A. et al. Service Composition in the Cloud-Based Manufacturing Focused on the Industry 4.0. **Technological Innovation for Cloud-Based Engineering Systems**. Springer, 2015. p.65-72.

PISTOFIDIS, Petros et al. Management of linked knowledge in industrial maintenance. **Industrial Management & Data Systems**, v. 116, n. 8, p. 1741-1758, 2016.

PORTINALE, Luigi. Behavioral Petri nets: a model for diagnostic knowledge representation and reasoning. **Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on**, v. 27, n. 2, p. 184-195, 1997.

PRAHER, Bernhard; STEINBICHLER, Georg. Ultrasound-based measurement of liquid-layer thickness: A novel time-domain approach. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 82, p. 166-177, 2017.

PRIES-HEJE, Jan; BASKERVILLE, Richard; VENABLE, John R. Strategies for Design Science Research Evaluation. **ECIS**. 2008. p.255-266.

PURAO, Sandeep. Truth or dare: The ontology question in design science research. **Journal of Database Management**, v. 24, n. 3, p. 51-66, 2013.

QU, T. et al. IoT-based real-time production logistics synchronization system under smart cloud manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, p. 147-164, 2016.

RAGAB, Ahmed et al. Remaining useful life prediction using prognostic methodology based on logical analysis of data and Kaplan–Meier estimation. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 27, n. 5, p. 943-958, 2014.

RAJALA, H. K.; VAYRYNEN, S. Participative Approach to Strategy Communication: A Case of Small- and Medium-Sized Metal Enterprises with a Review after Seven Years. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries**, v. 23, n. 4, p. 346-356, 2013.

RASOULI, Mohammad R. et al. A Dynamic Capabilities Perspective on Service-orientation in Demand-supply Chains. **Procedia CIRP**, v. 30, p. 396-401, 2015.

RAUSAND, Marvin. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 60, p. 121-132, 1998.

RAUSCH, M.; HAITAO, Liao. Joint Production and Spare Part Inventory Control Strategy Driven by Condition Based Maintenance. **Reliability, IEEE Transactions on**, v. 59, n. 3, p. 507-516, 2010.

RAUTENBERG, Sandro. Processo de desenvolvimento de ontologias: uma proposta e uma ferramenta. **Revista Tecnologia**, v. 30, n. 1, p. 133-144, 2016.

RDF. RDF 1.1 Primer Disponível em: <https://www.w3.org/TR/rdf11-primer/>. Acesso em: 20 abr. de 2017.

RICHARD, CM et al. Enhancement of maintenance management through benchmarking. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 6, n. 4, p. 224-240, 2000.

RYU, Soo-Yeol; PARK, Jong Hee. An integrated fault diagnostic mechanism based on statistical characteristics of products for heterogeneous manufacturing environments. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v. 11, n. 1-2, p. 35-42, 1998.

SAALMANN, Philipp et al. Application Potentials for an Ontology-based Integration of Intelligent Maintenance Systems and Spare Parts Supply Chain Planning. **Procedia CIRP**, v. 41, p. 270-275, 2016.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J1739**: Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA), 2009.

SAFIA, Bal-Bourai; AICHA, Mokhtari. Poss-OWL 2: Possibilistic Extension of OWL 2 for an Uncertain Geographic Ontology. **Procedia Computer Science**, v. 35, p. 407-416, 2014.

SAMY, S. N.; ALGEDDAWY, T.; ELMARAGHY, H. A granularity model for balancing the structural complexity of manufacturing systems equipment and layout. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 36, p. 7-19, 2015.

SÁNCHEZ, Diana Marcela; CAVERO, José María; MARTÍNEZ, Esperanza Marcos. The road toward ontologies. **Ontologies**: Springer, 2007, p.3-20.

SANISLAV, Teodora; MICLEA, Liviu. A Dependability Modeling Approach for Cyber-Physical Systems. **Journal of Computer Science and Control Systems**, v. 8, n. 1, p. 23-28, 2015.

SANISLAV, Teodora; MOIS, George; MICLEA, Liviu. An approach to model dependability of cyber-physical systems. **Microprocessors and Microsystems**, v. 41, p. 67-76, 2016.

SANTODOMINGO, R. et al. Ontology matching system for future energy smart grids. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 32, p. 242-257, 2014.

SANTOS, Sérgio Lopes dos. **Bombas e instalações hidráulicas**. São Paulo: LCTE, 2007.

SAURIN, Tarcisio Abreu et al. The design of scenario-based training from the resilience engineering perspective: A study with grid electricians. **Accident Analysis and Prevention**, v. 68, p. 30-41, 2014.

SCHARFFE, François; ZAMAZAL, Ondřej; FENSEL, Dieter. Ontology alignment design patterns. **Knowledge and information systems**, v. 40, n. 1, p. 1-28, 2014.

SCHNABEL, S. et al. The detection of plastic deformation in rolling element bearings by acoustic emission. **Tribology International**, v. 110, p. 209-215, 2017.

SCHOLZ-REITER, Bernd; KÜCK, Mirko; LAPPE, Dennis. Prediction of customer demands for production planning – Automated selection and configuration of suitable prediction methods. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 63, n. 1, p. 417-420, 2014.

SHAFIEE, Mahmood; FINKELSTEIN, Maxim; BÉRENGUER, Christophe. An opportunistic condition-based maintenance policy for offshore wind turbine blades subjected to degradation and environmental shocks. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 142, p. 463-471, 2015.

SHERWIN, David. A review of overall models for maintenance management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 6, n. 3, p. 138-164, 2000.

SHI, Z.; LEE, J.; CUI, P. Prognostics and health management solution development in LabVIEW: Watchdog agent® toolkit and case study. **Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu), 2016**. IEEE, 2017. p.1-6.

SHIN, Jong-Ho; JUN, Hong-Bae. On condition based maintenance policy. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 2, n. 2, p. 119-127, 2015.

SI, Xiao-Sheng et al. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. **European Journal of Operational Research**, v. 213, n. 1, p. 1-14, 2011.

SIKORSKA, J. Z.; HODKIEWICZ, M.; MA, L. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, n. 5, p. 1803-1836, 2011.

SILVA, Thiago Regal da; PEREIRA, Carlos Eduardo. Building an Ontology for Intelligent Maintenance Systems and Spare Parts Supply Chain Integration. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 47, p. 7843-7848, 2014.

SIM, Wee Wee; BROUSE, Peggy. Developing Ontologies and Persona to Support and Enhance Requirements Engineering Activities – A Case Study. **Procedia Computer Science**, v. 44, p. 275-284, 2015.

SIMPERL, Elena Paslaru Bontas; TEMPICH, Christoph. Ontology engineering: a reality check. **OTM Confederated International Conferences" On the Move to Meaningful Internet Systems"**. Springer, 2006. p.836-854.

SIRIN, Evren et al. Pellet: A practical owl-dl reasoner. **Web semantics: science, services and agents on the World Wide Web**, v. 5, p. 51-53, 2007.

SNOOKE, Neal; PRICE, Chris. Automated FMEA based diagnostic symptom generation. **Advanced Engineering Informatics**, v. 26, n. 4, p. 870-888, 2012.

SOH, Sarah S; RADZI, Nor HM; HARON, Habibollah. Review on scheduling techniques of preventive maintenance activities of railway. **Computational Intelligence, Modelling and Simulation (CIMSIM), 2012 Fourth International Conference on**. IEEE, 2012. p.310-315.

SPECHT, D.; WEISS, S.; SPUR, G. Model-Based Learning for Diagnostic Tasks. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 41, n. 1, p. 557-560, 1992.

STAAB, Steffen et al. Knowledge processes and ontologies. **IEEE Intelligent systems**, v. 16, n. 1, p. 26-34, 2001.

STANFORD UNIVERSITY. Protége 5.1.0. Disponível em: <http://protege.stanford.edu/>. Acesso em: 17 jul 2017.

STANKOVIC, J. A. Research Directions for the Internet of Things. **Internet of Things Journal, IEEE**, v. 1, n. 1, p. 3-9, 2014.

STARDOG UNION. Stardog 5.0.1. Disponível em: <http://stardog.com/>. Acesso em: 20 Jun 2017.

SUÁREZ-FIGUEROA, Mari Carmen; GÓMEZ-PÉREZ, Asunción; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, Mariano. The NeOn Methodology for Ontology Engineering. Suárez-Figueroa, C. M., Gómez-Pérez, A., *et al.* **Ontology Engineering in a Networked World**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, p.9-34.

SURE, York; ANGELE, Jürgen; STAAB, Steffen. OntoEdit: Guiding ontology development by methodology and inferencing. **On the Move to Meaningful Internet Systems 2002: CoopIS, DOA, and ODBASE**: Springer, 2002, p.1205-1222.

SVÁTEK, Vojtěch; DUDÁŠ, Marek; ZAMAZAL, Ondřej. Adapting ontologies to best-practice artifacts using transformation patterns: Method, implementation and use cases. **Web semantics: science, services and agents on the World Wide Web**, v. 40, p. 52-64, 2016.

TCHAKOUA, Pierre et al. Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges. **Energies**, v. 7, n. 4, p. 2595-2630, 2014.

TEDESCHI, Stefano et al. Security Aspects in Cloud Based Condition Monitoring of Machine Tools. **Procedia CIRP**, v. 38, p. 47-52, 2015.

TEH, P. L. et al. Age-group differences in Near Field Communication smartphone. **Industrial Management & Data Systems**, v. 114, n. 3, p. 484-502, 2014.

TEIXEIRA, Evandro Leonardo Silva; TJAHJONO, Benny; ALFARO, Sadek Crisóstomo Absi. A novel framework to link Prognostics and Health Management and Product–Service Systems using online simulation. **Computers in Industry**, v. 63, n. 7, p. 669-679, 2012.

TERKAJ, Walter; TOLIO, Tullio; URGO, Marcello. A virtual factory approach for in situ simulation to support production and maintenance planning. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, n. 1, p. 451-454, 2015.

TONG, X. et al. A novel methodology for fault identification of multi-stage manufacturing process using product quality measurement. **International Journal of Prognostics and Health Management**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2017.

TREMBLAY, Monica Chiarini; HEVNER, Alan R; BERNDT, Donald J. Focus groups for artifact refinement and evaluation in design research. **CAIS**, v. 26, p. 600-618, 2010.

UMEDA, Yasushi et al. **Toward integrated product and process life cycle planning -An environmental perspective**: secondary title, 2012. 61, 681-702 p.

USCHOLD, Michael; KING, Martin. **Towards a methodology for building ontologies**. University of Edinburgh: Citeseer, 1995.

USCHOLD, Mike; GRUNINGER, Michael. Ontologies: Principles, methods and applications. **The knowledge engineering review**, v. 11, p. 93-136, 1996.

UYSAL, Murat Pasa; SOGUT, M. Ziya. An integrated research for architecture-based energy management in sustainable airports. **Energy**, v., p. 1-11, 2017.

VAISHNAVI, Vijay K; KUECHLER, William. **Design science research methods and patterns**: Innovating information and communication technology: Crc Press, 2015.

VAN AKEN, Joan; CHANDRASEKARAN, Aravind; HALMAN, Joop. Conducting and publishing design science research. **Journal of Operations Management**, v. 47, p. 1-8, 2016.

VAN HORENBEEK, Adriaan et al. Quantifying the added value of an imperfectly performing condition monitoring system—Application to a wind turbine gearbox. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 111, p. 45-57, 2013.

VERMA, Pawan Kumar et al. Machine-to-Machine (M2M) communications: A survey. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 66, p. 83-105, 2016.

VÎIU, Gabriel-Alexandru. A theoretical evaluation of Hirsch-type bibliometric indicators confronted with extreme self-citation. **Journal of Informetrics**, v. 10, n. 2, p. 552-566, 2016.

VIRTUOSO. Open Link Vistioso. Disponível em: <http://demo.openlinksw.com/>. Acesso em: 20 de jun. de 2017.

VOGL, Gregory W; WEISS, Brian A; DONMEZ, M Alkan. **Standards Related to Prognostics and Health Management (PHM) for Manufacturing**: National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, Maryland, USA, NISTIR, 2014a.

VOGL, Gregory W; WEISS, Brian A; DONMEZ, M Alkan. Standards for Prognostics and Health Management (PHM) Techniques within Manufacturing Operations. **Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society**. 2014b.

VOM BROCKE, Jan et al. Living IT infrastructures — An ontology-based approach to aligning IT infrastructure capacity and business needs. **International Journal of Accounting Information Systems**, v. 15, n. 3, p. 246-274, 2014.

W3C, World Wide Web Consortium et al. SPARQL 1.1 Overview. Disponível em: <https://www.w3.org/TR/sparql11-overview/>. Acesso em: 20 jun. 2017.

WAN, Shan et al. Process and knowledge management in a collaborative maintenance planning system for high value machine tools. **Computers in Industry**, v. 84, p. 14-24, 2017.

WANG, Bing; HU, Xiong; LI, Hongru. Rolling bearing performance degradation condition recognition based on mathematical morphological fractal dimension and fuzzy C-means. **Measurement**, v. 109, p. 1-8, 2017.

WANG, Hai; WANG, Shouhong. Application of ontology modularization to human-web interface design for knowledge sharing. **Expert Systems with Applications**, v. 46, p. 122-128, 2016.

WANG, Jinjiang et al. A new paradigm of cloud-based predictive maintenance for intelligent manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 28, n. 5, p. 1125-1137, 2015.

WANG, Lihui; TÖRNGREN, Martin; ONORI, Mauro. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p. 517-527, 2015.

WANG, Ling; CHU, Jian; WU, Jun. Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. **International Journal of Production Economics**, v. 107, n. 1, p. 151-163, 2007.

WANG, Ping et al. Using ontologies to perform threat analysis and develop defensive strategies for mobile security. **Information Technology and Management**, v. 18, n. 1, p. 1-25, 2017.

WANG, Pingfeng; YOUN, Byeng D.; HU, Chao. A generic probabilistic framework for structural health prognostics and uncertainty management. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 28, p. 622-637, 2012.

WORLD WIDE WEB CONSORTIUM. OWL 2 Web Ontology Language Primer (Second Edition). Disponível em: <https://www.w3.org/TR/owl2-primer/>. Acesso em: 20 abr. de 2017.

WU, D. et al. Cloud-based machine learning for predictive analytics: Tool wear prediction in milling. **2016 IEEE International Conference on Big Data**. IEEE, 2017a. p.2062-2069.

WU, D. et al. A Comparative Study on Machine Learning Algorithms for Smart Manufacturing: Tool Wear Prediction Using Random Forests. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 139, n. 7, p., 2017b.

WU, Dazhong et al. Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 4, p. 564-579, 2013.

YAN, Li; LU, Chun; CHING, A. N. Y. An agent-based platform for Web-enabled equipment predictive maintenance. **Intelligent Agent Technology, IEEE/WIC/ACM International Conference on**, v., p. 132-135, 2005.

YIN, Yue H. et al. Automating design with intelligent human-machine integration. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, n. 2, p. 655-677, 2015.

YUAN, Yong; JIANG, Xiaomo; LIU, Xian. Predictive maintenance of shield tunnels. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 38, p. 69-86, 2013.

ZHANG, Qi; CHENG, Lu; BOUTABA, Raouf. Cloud computing: state-of-the-art and research challenges. **Journal of Internet Services and Applications**, v. 1, n. 1, p. 7-18, 2010.

ZHANG, Yingzhong et al. An ontology-based knowledge framework for engineering material selection. **Advanced Engineering Informatics**, v. 29, n. 4, p. 985-1000, 2015.

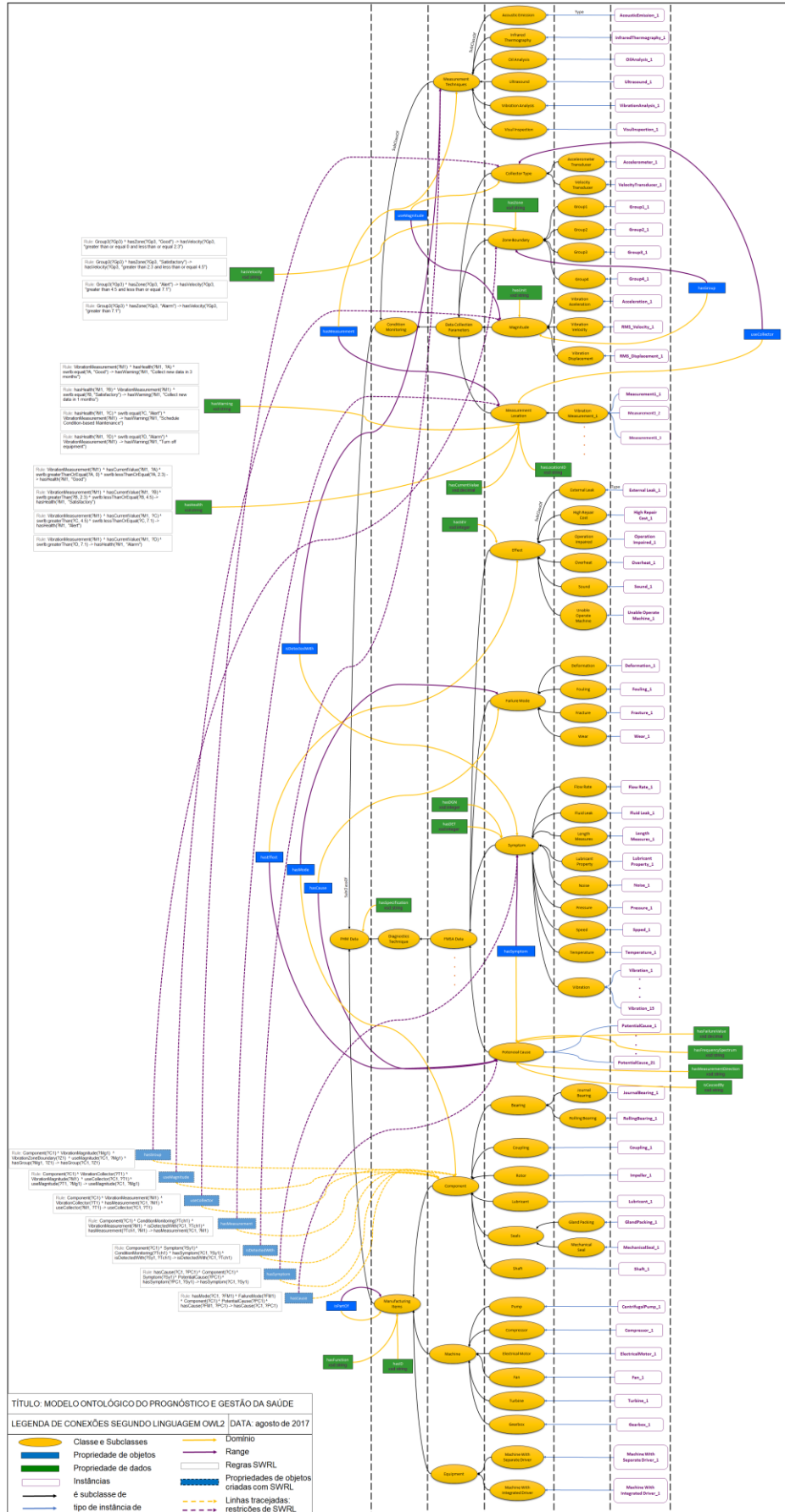
ZHAO, W.; LIU, J. K. OWL/SWRL representation methodology for EXPRESS-driven product information model: Part I. Implementation methodology. **Computers in Industry**, v. 59, p. 580-589, 2008.

ZHOU, Anmei; YU, Dejie; ZHANG, Wenyi. A research on intelligent fault diagnosis of wind turbines based on ontology and FMECA. **Advanced Engineering Informatics**, v. 29, n. 1, p. 115-125, 2015.

ZHOU, Qiang; YAN, Ping; XIN, Yang. Research on a knowledge modelling methodology for fault diagnosis of machine tools based on formal semantics. **Advanced Engineering Informatics**, v. 32, p. 92-112, 2017.

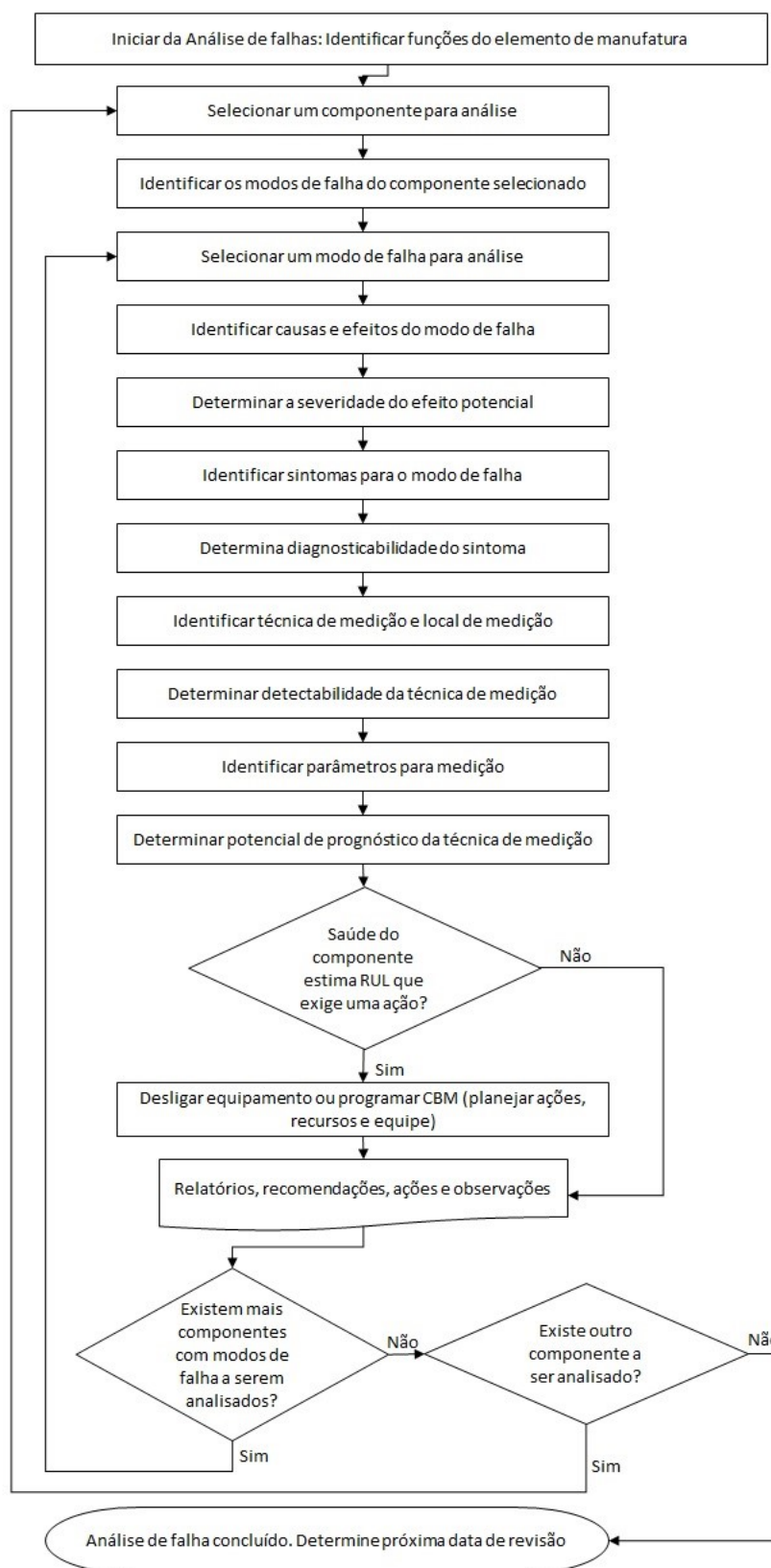
APÊNDICES

APÊNDICE A - Representação Gráfica do Modelo Ontoprog



APÊNDICE B - Procedimento para Iniciar a FMSA

Figura A 1 - Fluxograma para análise de sintomas e modos de falha num componente



A seleção do equipamento é realizada segundo análise de custos ou estratégia da empresa. Após escolhido o equipamento, o mesmo é detalhado para identificar suas principais características, entre elas os principais componentes que possui. Essas informações são preenchidas seguindo como guia a norma ISO 17359:2011. Para a demonstração do artefato é detalhado o equipamento bomba hidráulica no tratamento de água de uma determinada indústria, conforme ilustrado na Figura A.2.

Figura A 2 - Detalhamento do equipamento para demonstração do artefato

Detalhamento do equipamento segundo norma ISO 17359:2011				
Área - Setor:	TRATAMENTO		ID (TAG):	240ESBOM0225
Data da elaboração:	01/11/2016		Responsável:	Julio Kohut
Tipo de máquina	Bomba Centrífuga	X	Redutor	Motor Elétrico
	Compressor		Ventilador	Outros
Velocidade angular nominal	1780	rpm	Operação	8 h/dia
Rotação de funcionamento	Contínua	X	Intermitente	
Potencia nominal	70	kW		
Transmissão da Energia	Engrenagens		Direta	
	Acoplamento	X	Correias	
Suporte da Máquina	Amortecido		Fixo	X
Tipo de acoplamento	Rígido		Flexível	X
Alimentação de Energia	Elétrica	X	Vapor	Gás
	Alternativa		Hidráulica	Diesel
Característica da máquina	Motriz		Movida	X
Principais componentes rotativos	Mancal	X	Vedação	X
	Engrenagem		Eixo	X
	Acoplamento	X	Lubrificante	X
Tipo de fluido	Liq. refrigerante		Graxa	Óleo
	Gases		Água	X
Técnicas de medição para monitoramento de condições				
Tipo de instrumento	Análise de Vib.	X	A. Óleo	X
Intervalo de Medição	3	mês	6	mês

Fonte: Adaptado da norma ISO 17359:2011

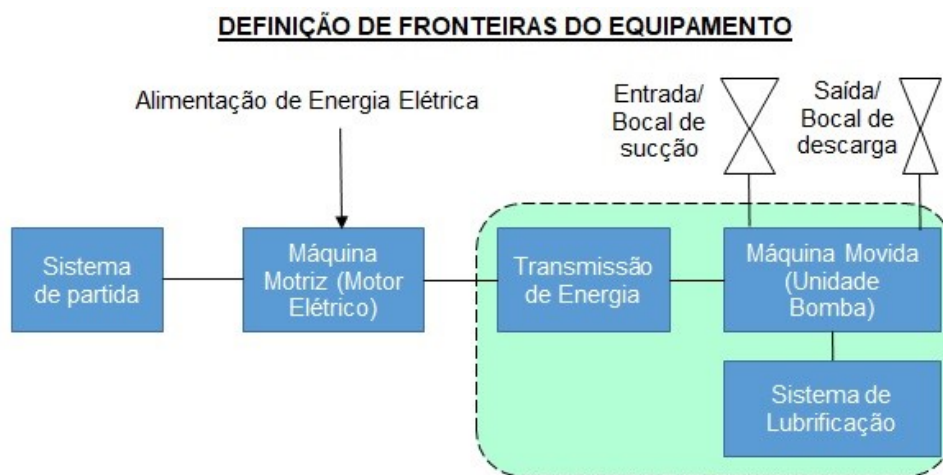
Com as principais informações do equipamento é identificado a bomba centrífuga como máquina a ser analisada. Além das principais características do equipamento, são

identificados os principais componentes rotativos propensos a monitoramento de condições e consequentemente com maior potencial de prognosticar falhas prematuras.

Para o começo do estudo deve ser feita uma pesquisa na literatura acadêmica sobre a máquina. Para este estudo, sabe-se que uma bomba hidráulica tem a característica de transferir energia cinética a um fluido e o transforma em energia potencial. São classificadas em 3 tipos: alternativas (*Reciprocating*) de pistão e diafragma; rotativas (*Rotary*) de lóbulos, engrenagem e palhetas; e centrífugas (*Centrifugal*) de escoamento axial, radiais e mista, podendo estas últimas serem de um rotor ou rotores em série (múltiplos estágios), que descarregam pressão uniforme bombeando líquidos ou líquido com sólidos, e podem possuir rotores fechados, semiabertos ou abertos (SANTOS, 2007).

Segundo a norma IEC 60812:2006, a hierarquia abordada neste estudo é *bottom-up* considerando o nível mais baixo os componentes mecânicos rotativos, num nível intermediário é considerada o subsistema máquina bomba centrífuga e no nível superior o sistema equipamento bomba hidráulica. De acordo com OREDA (2002), a delimitação de uma bomba hidráulica é apresentada na Figura A.3.

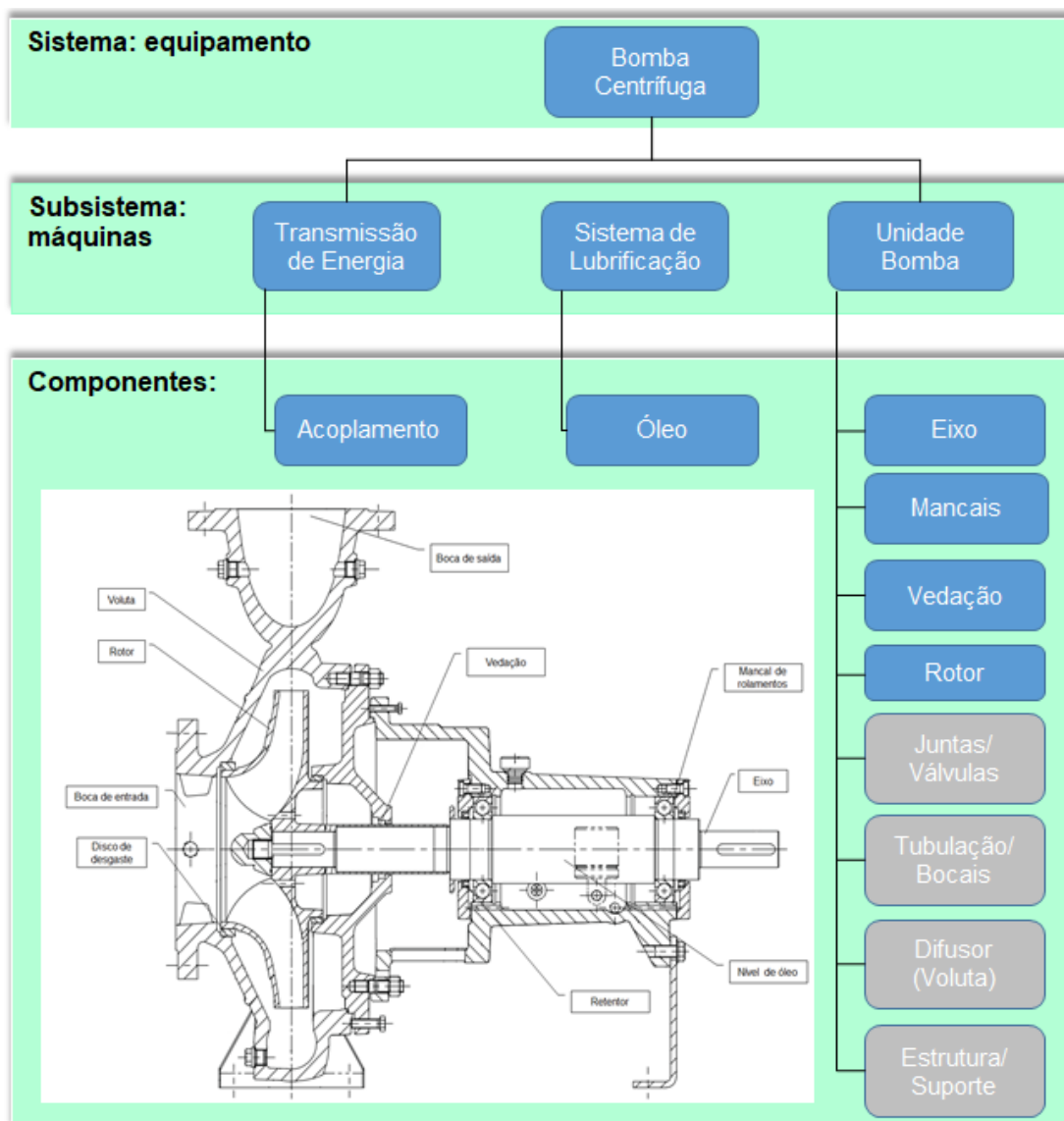
Figura A 3 - Delimitação de fronteiras num equipamento bomba hidráulica



Fonte: Adaptado de OREDA (2002)

Selecionada a região a ser analisada, nesse caso, a máquina centrífuga, a seguir na Figura A.4 é apresentada a estratificação dos seus principais componentes.

Figura A 4 - Estratificação dos componentes de uma máquina



Fonte: Adaptado de Affonso (2005, p. 255)

Selecionados os componentes rotativos, é realizado um mapeamento dos mesmos com as suas principais características e funções requeridas, conforme representado na Tabela A 1.

Tabela A 1 - Características e funções requeridas dos componentes selecionados

Componente	Características	Tipo	Função requerida no processo
Eixo	Componente mecânico que serve para suportar componentes rotativos e/ou transmitir potência ou movimento rotativo ou axial. Os eixos trabalham em condições extremamente variáveis de carregamento. Podendo se maciços, vazados, cônicos, roscados e com ranhuras	Maciço	Transmitir rotação de 1780 rpm Suportar 1 rotor

Mancal de rolamento	Permite a transferência de carga entre eixo e a caixa do mancal através de elemento rolantes. Podem ser classificados segundo a geometria do elemento rolante em: de esferas, rolos e agulhas. Classificados segundo a sua carga em: radiais e axiais.	Rolamento de esferas	Código 6310, evita atrito do eixo de rotação Suporta carga radial de 3900 kgf Permite a rotação do rotor de 1780 rpm
Vedação	Componente que impede a passagem, de forma estática ou dinâmica de líquidos, gases e sólidos. Podendo serem do tipo Gaxeta e Selo mecânico	Selo mecânico	Manter o eixo resfriado a 25°C Evitar entrada de impurezas químicas para o rotor Evitar saída de água ao exterior
Rotor	Também chamados de impulsores podem ser - Rotor fechado, para líquidos sem partículas em suspensão, tendo dois discos entre as pás; - Rotor semiaberto, apenas um disco na lateral das pás; - Rotor aberto, para líquidos com sólidos em suspensão, com palhetas montadas sobre o eixo, sem discos.	Fechado	Rotação de 1780 rpm Rotor fechado de 1 estágio transporta água Diâmetro do rotor de 315 mm, 560 m ³ /h e 39 m.c.a.

Fonte: o próprio autor

Para realizar o levantamento dos principais modos de falha dos componentes em estudo, devem ser preenchidas as principais informações da máquina tais como: Nome da empresa, processo ao qual pertence, setor/área, identificação (TAG ou ID), funções principais requeridas, tempo e tipo de funcionamento, versão, nome do autor. Essas informações foram seguindo a norma SAE J1738:2009 que especifica a análise de efeitos e modos de falha em processos de manufatura. Além disso, foi considerada também a norma ISO 13379-1:2012 que guia de forma geral o desenvolvimento da técnica de diagnóstico e interpretação de dados para componentes de máquinas monitoradas pela análise de vibrações, Figura A5 e A6.

Figura A 5 - Segunda fase da FMSA de componentes

Componente/Modo de Falha	Causa Potencial da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	Sintoma	DGN	Técnica de medição (Técnica preditiva)	DET	Magnitude de medição	PGN	MPN
Mancal de Rolamentos_1/ Desgaste_1	1-Desgaste adesivo por carga acima da capacidade projetada	Barulho_1	2	Vibração_1	5	Análise de vibrações	5	Velocidade	3	150
	2-Desgaste adesivo por especificação incorreta de lubrificante			Propriedades do lubrificante_1	5	Análise de lubrificantes	5	p.p.m	4	200
	3-Desgaste adesivo por nível baixo de lubrificante			Temperatura_1	3	Termografia	5	°C	3	90
	4-Desgaste fretting por falta de aperto (folga) nas laterais do rolamento			Vibração_2	4	Análise de vibrações	4	Velocidade	3	96
	5-Desgaste fretting por vibração da estrutura do mancal			Vibração_3	4	Análise de vibrações	5	Velocidade	3	120
	6-Desgaste fretting por vedação deficiente que contamina o lubrificante (formação de bolhas)			Propriedades do lubrificante_2	5	Análise de lubrificantes	5	p.p.m	3	150
	7-Desgaste fretting por quantidade excessiva de lubrificante (turbilhamento)			Vibração_4	5	Análise de vibrações	4	Velocidade	3	120
	8-Desgaste devido à falta de aperto de peças (folga)			Vibração_5	5	Análise de vibrações	3	Velocidade	3	90
	9-Desgaste de peças devido à má vedação que contamina o lubrificante com partículas abrasivas			Propriedades do lubrificante_3	5	Análise de lubrificantes	5	p.p.m	3	150
	10-Corrosão pitting devido à contaminação do lubrificante			Vibração_6	4	Análise de vibrações	5	Velocidade	3	120
	11-Rolamento solto devido a fratura na rosca de parafuso de fixação			Vibração_7	5	Análise de vibrações	5	Velocidade	3	150
	12-Aperto incorreto devido à falta de ferramentas			Vibração_8	4	Análise de vibrações	3	Velocidade	3	72
13-Especificação do parafuso com limite de escoamento inferior ao exigido	Vibração_9	3	Análise de vibrações	3	Velocidade	3	54			
Mancal de Rolamentos/ Deformação_1	14-Desalinhamento angular do eixo devido a montagem incorreta	Operação comprometida_1	4	Vibração_10	3	Análise de vibrações	3	Velocidade	3	108
Mancal de Rolamentos_1/ Fratura_1	15-Desalinhamento paralelo do eixo devido a montagem incorreta	Operação comprometida_1	4	Vibração_11	5	Análise de vibrações	5	Velocidade	3	300
	16-Fadiga nas partes do rolamento devido ao desalinhamento de mancais			Vibração_12	5	Análise de vibrações	4	Velocidade	3	240
	17-Fadiga nas partes do rolamento por assentamento sob pressão entre rolamento e eixo/mancal			Vibração_13	4	Análise de vibrações	3	Velocidade	3	144
	18-Trinca dúctil devido ao aperto excessivo das laterais do rolamento (fadiga)			Temperatura_2	3	Termografia	4	°C	2	72
	19-Trinca dúctil devido ao ajuste com interferência acima do especificado			Vibração_14	3	Análise de vibrações	4	Velocidade	3	144
	20-Trinca dúctil devido à falta de lado "livre" para dilatação			Temperatura_3	3	Termografia	4	°C	2	96
	21-Fadiga devido a parafusos de fixação solto			Temperatura_4	3	Termografia	4	°C	2	96
				Vibração_15	5	Análise de vibrações	5	Velocidade	2	200

Fonte: ISO 13379-1:2012 e SAE J1738:2009

Figura A 6 - Primeira fase da FMSA dos componentes mecânicos

ANÁLISE DE SINTOMAS E MODOS DE FALHAS EM MÁQUINAS (FMSA) PARA O PROGNÓSTICO				
Projeto: Implementação do PHM em Máquinas		Data: nov 2016		Versão: 003
Empresa	Processo	Setor	Equipamento (Sistema)	Máquina (Subsistema)
COPERSUL	Esmagamento de Soja	Tratamento de água	Bomba de água com motor separado	Bomba centrífuga
ID (TAG)	Tempo de funcionamento	Funcionamento		Função requerida
BOM0225	176 h/mês	Intermitente <input type="radio"/> Contínuo <input checked="" type="radio"/>		Transfere água de: A até B a 560 m3/h
Componente mecânico rotativo	Função Requerida	Modo de Falha	Causa Potencial da Falha	
Mancal de Rolamentos_1	Suportar e permitir a rotação do eixo, sem atrito, a uma determinada rpm	Desgaste_1	1-Desgaste adesivo por carga acima da capacidade projetada	
			2-Desgaste adesivo por especificação incorreta de lubrificante	
			3-Desgaste adesivo por nível baixo de lubrificante	
			4-Desgaste fretting por falta de aperto (folga) nas laterais do rolamento	
			5-Desgaste fretting por vibração da estrutura do mancal	
			6-Desgaste fretting por vedação deficiente que contamina o lubrificante (formação de bolhas)	
			7-Desgaste fretting por quantidade excessiva de lubrificante (turbilhamento)	
			8-Desgaste devido à falta de aperto de peças (folga)	
			9-Desgaste de peças devido à má vedação que contamina o lubrificante com partículas abrasivas	
			10-Corrosão pitting devido à contaminação do lubrificante	
			11-Rolamento solto devido a fratura na rosca de parafuso de fixação	
		Deformação_1	12-Aperto incorreto devido à falta de ferramentas	
			13-Especificação do parafuso com limite de escoamento inferior ao exigido	
			14-Desalinhamento angular do eixo devido a montagem incorreta	
			15-Desalinhamento paralelo do eixo devido a montagem incorreta	
		Fratura_1	16-Fadiga nas partes do rolamento devido ao desalinhamento de mancais	
			17-Fadiga nas partes do rolamento por assentamento sob pressão entre rolamento e eixo/mancal	
			18-Trinca dúctil devido ao aperto excessivo das laterais do rolamento (fadiga)	
			19-Trinca dúctil devido ao ajuste com interferência acima do especificado	
			20-Trinca dúctil devido à falta de lado "livre" para dilatação	
			21-Fadiga devido a parafusos de fixação solto	
Eixo	Suportar componentes e transmitir movimento rotativo	Fratura	por fadiga devido a concentração de tensões em cantos vivos	
			por fadiga devido ao desalinhamento dos mancais	
			por fadiga devido a eixo empenado	
			por fadiga devido a montagem errada (folgas)	
			por seleção errada do material (baixa tensão de escoamento)	
		Desgaste	por defeito de fabricação (bolha no material)	
			por carga acima do limite de escoamento passando do ponto de ruptura (erro de operação)	
			por aperto errado com o mancal produzindo atrito entre elementos devido a atrito com elemento de vedação	
		Deformação	por incorreta especificação de ajuste de montagem (folgas acima do projetado)	
			devido ao contato com água permite corrosão da superfície	
Selo mecânico	Vedação de produtos inflamáveis e/ou tóxicos a altas velocidades, temperatura e/ou pressão	Desgaste nas faces	por contaminação no fluido (partículas abrasivas)	
			devido a vedação secundária (anel-O) deficiente	
			por desalinhamento das faces	
		Fratura nas faces	devido a largura da face rotativa (macia) maior que a largura da face estacionária (dura)	
			devido a montagem errada (contaminação das faces)	
		Desgaste no anel-O	por vibração do equipamento (início na deformação fretting)	
			por pressão de contato elevada, nas faces	
			por ataque químico	
			formação de camada dura na superfície da vedação (incrustação)	
Acoplamento	Transmitir torque e rotação	Fratura	por temperatura elevada de operação	
			por especificação errada de acoplamento	
			por falta de lubrificação no acoplamento	
			por desalinhamento excessivo dos eixos	
Rotor	Impulsionar o fluido	Desgaste	por contato com produtos químicos	
			devido às pás danificadas por montagem excêntrica do rotor e/ou impulsor	
		Fratura	cavitação por formação de bolhas de vapor devido a $NPSH_r < NPSH$	
			Corrosão das pás devido a contaminantes químicos devido a rotor assimétrico ou dobrado	
Óleo lubrificante	Reduz atrito e desgaste de componentes rotativos	Desgaste	devido a trinca devido a solda mal realizada nas pás	
			devido ao desbalanceamento do rotor	
			por seleção de tipo de lubrificante incorreta	
			por procedimento errado de lubrificação	
por quantidade incorreta de lubrificante				
devido a sobreaquecimento do lubrificante				
devido a lubrificante contaminado				

Fonte: ISO 13379-1:2012 e SAE J1738:2009

APÊNDICE C - Consultas SPARQL no modelo OntoProg

C.1 CONSULTAS NO MODELO ONTOPROG, CONSIDERADO COM TIPO DE ONTOLOGIA DE DOMÍNIO

Segundo os tipos de ontologias, nesta primeira seção do apêndice C, o artefato é considerado uma ontologia de domínio para o prognóstico de falhas, denominado “OntoProg”. Tal modelo é alimentado com dados oriundos das técnicas de Diagnóstico de falhas e do Monitoramento de Condições. Dessa forma, a interação dessas duas fontes de dados num determinado componente permite consultas que auxiliam no entendimento e implementação do PHM na manufatura.

Inicialmente, são realizadas consultas que extraem a hierarquia de um determinado componente, sua função requerida, nomenclatura de identificação (ID), especificações, entre outros dados que garantem a sua correta identificação. Para tal, primeiramente carrega-se o prefixo `utfpr` do modelo OntoProg na plataforma de consultas SPARQL:

```
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX utfpr: <http://www.semanticweb.org/david/ontologies/2016/untitled-ontology-286#>
```

Realizam-se as consultas, tais como: quais são os principais componentes mecânicos rotativos (`Component`) de uma determinada máquina mecânica? (Em ordem alfabética)

```
SELECT ?Component
WHERE { ?Component rdfs:subClassOf utfpr:Component }
ORDER BY ?Component
```

Component
utfpr:Bearing
utfpr:Component
utfpr:Coupling
utfpr:GlandPacking
utfpr:Impeller
utfpr:JournalBearing
utfpr:Lubricant
utfpr:MechanicalSeal
utfpr:RollingBearing
utfpr:Seals
utfpr:Shaft

As consultas realizadas para demonstrar e validar o artefato, são na instância componente `RollingBearing_1`, que possui a identificação (ID) = “6310_C3”. Então, realiza-se a consulta para extrair essas informações do OntoProg.

```
SELECT ?Component
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3"^^xsd:string }
```

Ou também pode ser consultado da seguinte forma:

```
SELECT ?Component
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3" }
```

Ou também pode ser consultado da seguinte forma:

```
SELECT ?Component
WHERE { ?Component utfpr:hasID ?valor
FILTER (?valor="6310_C3") }
```

Component
RollingBearing_1

Em relação ao componente RollingBearing_1, qual é a sua função requerida?

```
SELECT ?Component ?ComponentFunction
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction }
```

Component	ComponentFunction
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string

Em seguida, pode ser consultado: a qual máquina pertence o componente RollingBearing_1?

```
SELECT ?Component ?OfMachine
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:isPartOf ?OfMachine }
```

Component	OfMachine
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Pump_1

Quais são os principais componentes rotativos da máquina Pump_1, passíveis de monitoramento?

```
SELECT ?Components
WHERE { ?Components utfpr:isPartOf utfpr:Pump_1 }
ORDER BY ?Components
```

Components
RollingBearing_1
Coupling_1
Impeller_1
Lubricant_1
MechanicalSeal_1
Shaft_1

Sabendo que o componente RollingBearing_1 pertence a máquina Pump_1, então, qual é o tipo dessa máquina?

```
SELECT ?Component ?OfMachine ?TypeOfPump
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:isPartOf ?OfMachine.
        ?OfMachine utfpr:hasSpecification ?TypeOfPump }
```

Component	OfMachine	TypeOfPump
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Pump_1	Is a Centrifugal Pump ^^xsd:string

Em relação à máquina Pump_1, então, qual é o sua ID?

```
SELECT ?Component ?OfMachine ?MachineID
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:isPartOf ?OfMachine.
        ?OfMachine utfpr:hasID ?MachineID }
```

Component	OfMachine	MachineID
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Pump_1	BOM0225^^xsd:string

Após saber que a máquina é do tipo bomba centrífuga, então, a qual equipamento pertence dita máquina?

```
SELECT ?Component ?OfMachine ?TypeOfPump ?OfEquipment
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:isPartOf ?OfMachine.
        ?OfMachine utfpr:hasSpecification ?TypeOfPump;
        utfpr:isPartOf ?OfEquipment }
```

Component	OfMachine	TypeOfPump	OfEquipment
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:CentrifugalPump_1	Is a Centrifugal Pump ^^xsd:string	utfpr:MachineWithSeparateDriver_1

Sabe-se que a junção de máquinas forma um equipamento, então, podemos consultar quais são as máquinas que compõem o equipamento MachineWithSeparateDriver_1?

```
SELECT ?EquipmentMachine
WHERE { ?EquipmentMachine utfpr:isPartOf utfpr:MachineWithSeparateDriver_1 }
```

EquipmentMachine
CentrifugalPump_1
ElectricMotor_1

E, qual é a função requerida da máquina Pump_1?

```
SELECT ?Machine ?MachineFunction
WHERE { ?Machine utfpr:hasID "BOM0225";
        utfpr:hasFunction ?MachineFunction }
```

Machine	MachineFunction
utfpr:Pump_1	Water transport from A to B, at a given flow rate, in m ³ /h^^xsd:string

Sabendo a hierarquia do componente, então, qual é a especificação do equipamento MachineWithSeparateDriver_1?

```
SELECT ?Component ?OfMachine ?TypeOfPump ?OfEquipment ?TypeOfEquipment
```

```
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:isPartOf ?OfMachine.
        ?OfMachine utfpr:hasSpecification ?TypeOfPump;
        utfpr:isPartOf ?OfEquipment.
        ?OfEquipment utfpr:hasSpecification ?TypeOfEquipment}
```

Component	OfMachine	TypeOfPump	OfEquipment	TypeOfEquipment
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Pump_1	Is a Centrifugal Pump^^xsd:string	utfpr:MachineWithSeparateDriver_1	Is a centrifugal pump for water supplies, with separate driver^^xsd:string

A seguir consulta-se, qual é a ID do equipamento ao qual pertence o componente em estudo?

```
SELECT ?Component ?OfMachine ?MachineID ?OfEquipment ?EquipmentID
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:isPartOf ?OfMachine.
        ?OfMachine utfpr:hasID ?MachineID;
        utfpr:isPartOf ?OfEquipment.
        ?OfEquipment utfpr:hasID ?EquipmentID }
```

Component	OfMachine	MachineID	OfEquipment	EquipmentID
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Pump_1	BOM0225^^xsd:string	utfpr:MachineWithSeparateDriver_1	ES240BOM0225^^xsd:string

Em seguida, qual é a função requerida do equipamento MachineWithSeparateDriver_1 para o processo ao qual pertence?

```
SELECT ?Equipment ?EquipmentFunction
WHERE { ?Equipment utfpr:hasID "ES240BOM0225";
        utfpr:hasFunction ?EquipmentFunction}
```

Equipment	EquipmentFunction
utfpr:MachineWithSeparateDriver_1	Water treatment in a given sector of a particular company^^xsd:string

Abrangendo consultas ao componente, máquina e equipamento, então, quais são as funções requeridas para cada um desses elementos?

```
SELECT ?Component ?ComponentFunction ?Machine ?MachineFunction ?Equipment ?EquipmentFunction
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3"^^xsd:string;
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
        utfpr:isPartOf ?Machine.
        ?Machine utfpr:hasFunction ?MachineFunction;
        utfpr:isPartOf ?Equipment.
        ?Equipment utfpr:hasFunction ?EquipmentFunction }
```

Component	Component Function	Machine	Machine Function	Equipment	Equipment Function
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Pump_1	Water transport from A to B, at a given flow rate, in m ³ /h^^xsd:string	utfpr:MachineWithSeparateDriver_1	Water treatment in a given sector of a particular company^^xsd:string

Também, podem ser elaboradas consultas mais apas para um determinado elemento. Assim, a seguinte consulta é para extrair as principais informações da máquina Pump_1, tais como função requerida, sua ID e a qual equipamento pertence?

```
SELECT ?MachineFunction ?ID ?Belonging_to
WHERE { utfpr:Pump_1 utfpr:hasFunction ?machineFunction;
        utfpr:hasID ?ID;
        utfpr:isPartOf ?Belonging_to }
```

MachineFunction	ID	Belonging to
Water transport from A to B, at a given flow rate, in m ³ /h ^{xsd:string}	BOM0225 ^{xsd:string}	utfpr:MachineWithSeparateDriver_1

Qual é a função requerida, ID e a qual máquina pertence o componente BearingRolling_1?

```
SELECT ?ComponentFunction ?ID ?Belonging_to
WHERE { utfpr:RollingBearing_1 utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
        utfpr:hasID ?ID;
        utfpr:isPartOf ?Belonging_to }
```

ComponentFunction	ID	Belonging to
Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm ^{xsd:string}	6310_C3 ^{xsd:string}	utfpr:Pump_1

Quais são as principais características do componente BearingRolling_1?

```
SELECT ?Component ?ComponentID ?TypeOfComponent ?OfMachine ?ComponentFunction
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasID ?ComponentID;
        utfpr:hasSpecification ?TypeOfComponent;
        utfpr:isPartOf ?OfMachine;
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction }
```

Component	ComponentID	TypeOfComponent	Ofmachine	ComponentFunction
utfpr:RollingBearing_1	6310_C3 ^{xsd:string}	Single row deep groove ball bearings ^{xsd:string}	utfpr:Pump_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm ^{xsd:string}

Sabendo as principais características do componente RollingBearing_1, como a sua função requerida para com a Máquina/Equipamento, entre outras. A seguir são consultadas informações da FMSA inseridas no componente que servem para o Diagnóstico de falhas. Nesse contexto, quais são os Modos de falha do componente RollingBearing_1?

```
SELECT ?Component ?RequiredFunction ?FailureMode
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasFunction ?RequiredFunction;
        utfpr:hasMode ?FailureMode }
```

Component	RequiredFunction	FailureMode
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm ^{xsd:string}	utfpr:Fracture_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm ^{xsd:string}	utfpr:Wear_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm ^{xsd:string}	utfpr:Deformation_1

Quais são as Causa Potenciais de falha para cada Modo de Falha inseridas no componente RollingBearing_1?

```
SELECT ?Component ?ComponentFunction ?FailureMode ?PotencialCause ?IsCausedBy
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
        ?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause.
        ?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?IsCausedBy }
ORDER BY ?FailureMode
```

Component	ComponentFunction	Failure Mode	Potencial Cause	IsCausedBy
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	utfpr:PotencialCause_14	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	utfpr:PotencialCause_15	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	utfpr:PotencialCause_19	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	utfpr:PotencialCause_20	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	utfpr:PotencialCause_21	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	utfpr:PotencialCause_17	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	utfpr:PotencialCause_18	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	utfpr:PotencialCause_16	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_13	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_11	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_12	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_7	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_6	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_9	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_8	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_3	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_2	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_10	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string

utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_5	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_4	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	utfpr:PotencialCause_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string

Outra forma de fazer a consulta a consulta anterior, considerando as especificações do componente.

```
SELECT ?TypeOfComponent ?ComponentFunction ?FailureMode ?FailureCause
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasSpecification ?TypeOfComponent;
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
        ?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause.
        ?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause }
ORDER BY ?FailureMode
```

TypeOfComponent	ComponentFunction	FailureMode	FailureCause
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string

Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string

A continuação é extraída a informação dos Efeitos Potencias para cada Modo de Falha e consequentemente para cada Causa Potencial de falha, relacionadas ao componente RollingBearing_1?

```
SELECT ?TypeOfComponent ?ComponentFunction ?FailureMode ?FailureCause ?Effect
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasSpecification ?TypeOfComponent;
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
        ?FailureMode utfpr:hasCause ?Cause.
        ?Cause utfpr:isCausedBy ?FailureCause.
        ?FailureMode utfpr:hasEffect ?Effect }
ORDER BY ?FailureMode
```

TypeOfComponent	ComponentFunction	FailureMode	FailureCause	Effect
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Overheat_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Overheat_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string	utfpr:Operatiompaired_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string	utfpr:Operatiompaired_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:Operatiompaired_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Operatiompaired_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string	utfpr:Operatiompaired_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:Operatiompaired_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Sound_1

Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string	utfpr:Sound_1
Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string	utfpr:Sound_1

Juntando Modos de Falha, Causas Potenciais e Efeitos do componente RollingBearing_1, a seguir, consulta-se sobre a severidade (SEV) para com o processo ao qual pertence.

```
SELECT ?Component ?FailureMode ?FailureCause ?Effect ?SEV
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
        ?FailureMode utfpr:hasCause ?Cause.
        ?Cause utfpr:isCausedBy ?FailureCause.
        ?FailureMode utfpr:hasEffect ?Effect.
        ?Effect utfpr:hasSEV ?SEV }
ORDER BY ?SEV
```

Component	FailureMode	FailureCause	Effect	SEV
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2

utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string	utfpr:Sound_1	2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Deformation_1	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Overheat_1	3
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Deformation_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Overheat_1	3
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4

Sabendo o valor de SEV que obteve cada Modo de Falha, A seguir, consulta-se quais são os Sintomas para cada Causa Potencia de falha do componente RollingBearing_1?

```
SELECT ?Component ?ComponentFunction ?FailureMode ?FailureCause ?Symptom
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
        ?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause.
        ?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
        utfpr:hasSymptom ?Symptom }
```

ORDER BY ?FailureMode

Component	ComponentFunction	FailureMode	FailureCause	Symptom
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_10
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_11
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string	utfpr:Temperature_3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string	utfpr:Temperature_4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:Vibration_15
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Temperature_2
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Vibration_13
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string	utfpr:Vibration_14
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:Vibration_12

utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string	utfpr:Vibration_9
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Vibration_7
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string	utfpr:Vibration_8
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string	utfpr:Vibration_4
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string	utfpr:LubricantProper ty_2
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string	utfpr:LubricantProper ty_3
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string	utfpr:Temperature_1
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string	utfpr:LubricantProper ty_1
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string	utfpr:Vibration_6
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string	utfpr:Vibration_3
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_2
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string	utfpr:Vibration_1

A seguir, precisa-se saber qual é o Sintoma mais eficiente para auxiliar na elaboração do Diagnóstico de falhas no componente RollingBearing_1, para tal, consulta-se qual é o valor DGN para cada Sintoma identificado?

```
SELECT ?Component ?ComponentFunction ?FailureMode ?FailureCause ?Symptom ?DGN
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
        ?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause.
        ?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
        utfpr:hasSymptom ?Symptom.
        ?Symptom utfpr:hasDGN ?DGN }
ORDER BY ?FailureMode
```

Component	ComponentFunction	FailureMode	FailureCause	Symptom	D G N
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_10	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_11	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string	utfpr:Temperature_3	3

utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string	utfpr:Temperature_4	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:Vibration_15	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Temperature_2	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Vibration_13	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string	utfpr:Vibration_14	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:Vibration_12	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string	utfpr:Vibration_9	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Vibration_7	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string	utfpr:Vibration_8	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string	utfpr:Vibration_4	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string	utfpr:LubricantProperty_2	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string	utfpr:LubricantProperty_3	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_5	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string	utfpr:Temperature_1	3
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string	utfpr:LubricantProperty_1	5
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string	utfpr:Vibration_6	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string	utfpr:Vibration_3	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_2	4
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string	utfpr:Vibration_1	5

Sabendo os Sintomas encontrados para as Causas de falha do componente RollingBearing_1, então, quais são as Técnicas de Medição mais eficientes a serem empregadas?

```

SELECT ?Component ?ComponentFunction ?FailureMode ?FailureCause ?Symptom ?Technique
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
        ?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause.
        ?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
        utfpr:hasSymptom ?Symptom.

```

?Symptom utfpr:isDetectedWith ?Technique }
ORDER BY ?FailureMode

Component	ComponentFunction	Failure Mode	FailureCause	Symptom	Technique
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_10	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_11	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string	utfpr:Temperature_3	utfpr:InfraredThermography
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string	utfpr:Temperature_4	utfpr:InfraredThermography
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:Vibration_15	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Temperature_2	utfpr:InfraredThermography
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Vibration_13	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string	utfpr:Vibration_14	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:Vibration_12	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string	utfpr:Vibration_9	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Vibration_7	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Vibration_7	utfpr:VisualInspection_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string	utfpr:Vibration_8	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string	utfpr:Vibration_4	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string	utfpr:LubricantProperty_2	utfpr:OilAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string	utfpr:LubricantProperty_3	utfpr:OilAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_5	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string	utfpr:Temperature_1	utfpr:InfraredThermography
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string	utfpr:LubricantProperty_1	utfpr:OilAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string	utfpr:Vibration_6	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string	utfpr:Vibration_3	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_2	utfpr:VibrationAnalysis_1

utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string	utfpr:Vibration_1	utfpr:VibrationA nalysis_1
----------------------------	---	--------------	--	-------------------	-------------------------------

Das Técnica de Medição que podem ser empregadas para o Monitoramento de Condições do componente RollingBearing_1. Qual é a mais eficiente no requisito de identificar uma Causa Potencial de falha? Essa informação é obtida consultando a detectabilidade (DET) de cada técnica.

```
SELECT ?Component ?ComponentFunction ?FailureMode ?FailureCause ?Symptom ?Technique ?DET
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasFunction ?ComponentFunction;
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause.
?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
        utfpr:hasSymptom ?Symptom.
?Symptom      utfpr:isDetectedWith ?Technique;
        utfpr:hasDET ?DET }
ORDER BY ?FailureMode
```

Component	ComponentFunction	FailureMode	FailureCause	Symptom	Technique	D E T
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 10	utfpr:VibrationAn alysis_1	3
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Deformation_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 11	utfpr:VibrationAn alysis_1	3
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string	utfpr:Temperatu re_3	utfpr:InfraredTher mography	4
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string	utfpr:Temperatu re_4	utfpr:InfraredTher mography	4
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 15	utfpr:VibrationAn alysis_1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Temperatu re_2	utfpr:InfraredTher mography	4
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 13	utfpr:VibrationAn alysis_1	4
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 14	utfpr:VibrationAn alysis_1	4
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 12	utfpr:VibrationAn alysis_1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 9	utfpr:VibrationAn alysis_1	3
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 7	utfpr:VibrationAn alysis_1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 7	utfpr:VisulInspect ion_1	5

utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 8	utfpr:VibrationAn alysis_1	3
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 4	utfpr:VibrationAn alysis_1	4
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string	utfpr:LubricantP roperty_2	utfpr:OilAnalysis _1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear of parts due to poor sealing that contaminates the lubricant with abrasive particles^^xsd:string	utfpr:LubricantP roperty_3	utfpr:OilAnalysis _1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 5	utfpr:VibrationAn alysis_1	3
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string	utfpr:Temperatu re_1	utfpr:InfraredTher mography	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string	utfpr:LubricantP roperty_1	utfpr:OilAnalysis _1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 6	utfpr:VibrationAn alysis_1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 3	utfpr:VibrationAn alysis_1	5
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 2	utfpr:VibrationAn alysis_1	4
utfpr:RollingBearin g_1	Support and allows the shaft rotates without friction, at a given rpm^^xsd:string	utfpr:Wear_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string	utfpr:Vibration_ 1	utfpr:VibrationAn alysis_1	5

De acordo com a proposta da presente tese, entre SEV, DGN e DET, o valor mais relevante é a SEV, então, qual é a SEV de maior valor para o componente RollingBearing_1?

```
SELECT ?Component ?FailureMode ?FailureCause ?Effect ?Symptom ?Technique ?SEV
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
  utfpr:hasMode ?FailureMode.
  ?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause;
    utfpr:hasEffect ?Effect.
  ?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
    utfpr:hasSymptom ?Symptom.
  ?Symptom utfpr:isDetectedWith ?Technique.
  ?Effect utfpr:hasSEV ?SEV;
    utfpr:hasSEV "4" }
```

Outra forma de realizar essa mesma consulta.

```
SELECT ?Component ?FailureMode ?FailureCause ?Effect ?Symptom ?Technique ?SEV
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
  utfpr:hasMode ?FailureMode.
  ?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause;
    utfpr:hasEffect ?Effect.
  ?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
    utfpr:hasSymptom ?Symptom.
  ?Symptom utfpr:isDetectedWith ?Technique.
  ?Effect utfpr:hasSEV ?SEV.
```

FILTER (?SEV = 4)}

Component	Failure Mode	FailureCause	Effect	Symptom	Technique	SEV
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	utfpr:Temperature_3	utfpr:InfraredThermography	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	utfpr:Temperature_4	utfpr:InfraredThermography	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	utfpr:Vibration_1_5	utfpr:VibrationAnalysis_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	utfpr:Temperature_2	utfpr:InfraredThermography	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	utfpr:Vibration_1_3	utfpr:VibrationAnalysis_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	utfpr:Vibration_1_4	utfpr:VibrationAnalysis_1	4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	utfpr:Vibration_1_2	utfpr:VibrationAnalysis_1	4

Após encontrar os Modos de Falha com maior SEV, então, consulta-se dessa nova seleção, qual é o Modo de Falha com maior DGN?

```
SELECT ?Component ?FailureMode ?FailureCause ?Effect ?SEV ?Symptom ?DGN ?Technique
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause;
        utfpr:hasEffect ?Effect.
?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
        utfpr:hasSymptom ?Symptom.
?Symptom utfpr:isDetectedWith ?Technique;
utfpr:hasDGN ?DGN.
?Effect utfpr:hasSEV ?SEV.
FILTER (?SEV = 4 )
FILTER (?DGN = 5 )}
```

Componente	Failure Mode	FailureCause	Effect	SEV	Symptom	DGN	Technique
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4	utfpr:Vibration_1_5	5	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:OperationImpaired_1	4	utfpr:Vibration_1_2	5	utfpr:VibrationAnalysis_1

A continuação, consulta-se, dessa nova seleção, qual são os Modos de Falha com maior SEV, DGN e DET?

```
SELECT ?Component ?FailureMode ?FailureCause ?Effect ?SEV ?Symptom ?DGN ?Technique ?DET
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasMode ?FailureMode.
?FailureMode utfpr:hasCause ?PotencialCause;
        utfpr:hasEffect ?Effect.
?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause;
        utfpr:hasSymptom ?Symptom.
?Symptom utfpr:isDetectedWith ?Technique;
```

```

utfpr:hasDGN ?DGN;
utfpr:hasDET ?DET.
?Effect utfpr:hasSEV ?SEV.
FILTER (?SEV = 4 )
FILTER (?DGN = 5 )
FILTER (?DET = 5 ) }

```

Component	FailureMode	FailureCause	Effect	SEV	Symptom	DGN	Technique	DET
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string	utfpr:Operation Impaired_1	4	utfpr:Vibration_1_5	5	utfpr:VibrationAnalysis_1	5
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Fracture_1	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string	utfpr:Operation Impaired_1	4	utfpr:Vibration_1_2	5	utfpr:VibrationAnalysis_1	5

Depois de encontrar SEV mais relevante, DGN e DET do componente RollingBearing_1, usando a técnica FMSA, foi identificada a Técnica de Medição “Análise de Vibrações”, como a mais eficiente para o prognóstico de falhas. Assim, a seguir, usando essa técnica, são realizadas consultas para saber características que garantem a coleta adequada de dados, tais como qual coletor de dados deve ser usado, qual a magnitude, unidade de medição, localização de medição, e quais são as zonas de limite, de acordo com as recomendações de normas internacionais consolidadas, que é a principal fonte de informação.

Antes de mais nada, primeiramente são criadas regras usando a linguagem SWRL, para restrições dentro das propriedades de dados e objetos do modelo OntoProg. Assim, são criadas as restrições transitivas que devem ser ativadas pelo raciocionador Pellet. Essas regras permitem também o tráfego das instâncias de diversas classes.

```

Component(?C1) ^ FailureMode(?FM1) ^ PotentialCause(?PC1) ^ hasMode(?C1, ?FM1) ^ hasCause(?FM1, ?PC1) -> hasCause(?C1, ?PC1)

```

Após essa regra pode-se ligar a classe de componentes com a de Causas Potenciais de falha, então, qual é a Causa Potencial do componente RollingBearing_1?

```

SELECT ?Component ?PotencialCause ?FailureCause
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasCause ?PotencialCause.
        ?PotencialCause utfpr:isCausedBy ?FailureCause }
ORDER BY ?PotencialCause

```

Component	PotencialCause	FailureCause
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_1	Adhesive wear due to load above projected capacity^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_10	Pitting corrosion due to contamination of the lubricant^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_11	Loose bearing due to fracture in thread of bolt^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_12	Incorrect tightening due to lack of tools^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_13	Bolt specification with lower yield strength than required^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_14	Angular misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string

utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_15	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_16	Fatigue in rolling bearing parts by housing misalignment^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_17	Fatigue in bearing parts by mounting with high pressure between housing and bearing/shaft^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_18	Ductile crack due to excessive tightening on the sides of the bearing^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_19	Ductile crack due to interference fit above of specified^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_2	Adhesive wear due to incorrect lubricant specification^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_20	Ductile crack due to lack of free side for dilation^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_21	Fatigue due to fastening bolt loose^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_3	Adhesive wear due to low lubricant level^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_4	Fretting wear due to lack tightening on the bearing sides (looseness)^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_5	Fretting wear due to vibration of bearing housing^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_6	Fretting wear due to poor sealing that contaminates the lubricant (forming blistering)^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_7	Fretting wear due to excessive amount of lubricant (swirling)^^xsd:string
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:PotencialCause_8	Wear due to lack of tightening of parts (looseness)^^xsd:string

Também cria-se a restrição transitiva usando regra SWRL para ligar a classe de componentes com a classe de Sintomas.

```
Component(?C1) ^ PotentialCause(?PC1) ^ Symptom(?Sy1) ^ hasCause(?C1, ?PC1) ^ hasSymptom(?PC1, ?Sy1) -> hasSymptom(?C1, ?Sy1)
```

Então, quais são os Sintomas das Causas Potenciais de Falha para o componente RollingBearing_1?

```
SELECT ?Component ?Symptom
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        ?Cause          utfpr:hasCause ?Cause.
        ?Cause          utfpr:isCausedBy ?PotencialCause;
        ?Cause          utfpr:hasSymptom ?Symptom}
ORDER BY ?Symptom
```

Component	Symptom
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:LubricantProperty_1
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:LubricantProperty_2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:LubricantProperty_3
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Temperature_1
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Temperature_2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Temperature_3
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Temperature_4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_1
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_10
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_11
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_12
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_13
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_14
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_15
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_2
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_3
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_4
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_5
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_6
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_7
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_8
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Vibration_9

Também, cria-se a restrição transitiva usando regra SWRL para ligar a classe componente com a classe Técnicas de Medição.

```
Component(?C1) ^ Symptom(?Sy1) ^ ConditionMonitoring(?Tch1) ^ hasSymptom(?C1, ?Sy1) ^
isDetectedWith(?Sy1, ?Tch1) -> isDetectedWith(?C1, ?Tch1)
```

Então, quais são as Técnicas de Medição com maior eficiência para serem usadas no Monitoramento de Condições do componente RollingBearing_1?

```
SELECT ?Component ?Technique
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:isDetectedWith ?Technique }
```

Component	Technique
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:OilAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:InfraredThermography_1
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:VibrationAnalysis_1
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:VisulInspection_1

Neste estudo, é utilizada a Técnica de Medição Análise de Vibrações e a magnitude velocidade em mm/s r.m.s. Então, usando regras SWRL, é criada a seguinte restrição transitiva que liga a classe componente com a classe Local de Medição.

```
Component(?C1) ^ ConditionMonitoring(?Tch1) ^ VibrationMeasurement(?M1) ^ isDetectedWith(?C1, ?Tch1) ^
hasMeasurement(?Tch1, ?M1) -> hasMeasurement(?C1, ?M1)
```

Assim, qual é o local de medição, com seu ID de localização, para o componente RollingBearing_1?

```
SELECT ?Component ?Measurement ?LocationID
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasMeasurement ?Measurement.
        ?Measurement utfpr:hasLocationID ?LocationID }
```

Component	Measurement	LocationID
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Measurement_1	BOM0225_003_AC_180_R_N ^{^xsd:string}

Posteriormente, cria-se a restrição transitiva usando regras SWRL para ligar a classe componente com a classe tipo de coletor.

```
Component(?C1) ^ VibrationMeasurement(?M1) ^ VibrationCollector(?T1) ^ hasMeasurement(?C1, ?M1) ^
useCollector(?M1, ?T1) -> useCollector(?C1, ?T1)
```

Então, qual coletor para realizar a medição é usado no ponto de medição BOM0225_003_AC_180_R_N?

```
SELECT ?Component ?Measurement ?LocationID ?Transducer
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasMeasurement ?Measurement;
```

utfpr:useCollector ?Transducer.
 ?Measurement utfpr:hasLocationID ?LocationID}

Component	Measurement	LocationID	Transducer
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Measurement_1	BOM0225_003_AC_180_R_N^^ xsd:string	utfpr:Accelerometer_1

Usando regras SWRL, é criada a seguinte restrição transitiva para ligar a classe componente com a classe magnitude.

Component(?C1) ^ VibrationCollector(?T1) ^ VibrationMagnitude(?M1) ^ useCollector(?C1, ?T1) ^ useMagnitude(?T1, ?Mg1) -> useMagnitude(?C1, ?Mg1)

Logo, qual é a Magnitude e sua unidade usada no componente RollingBearing_1?

SELECT ?Component ?Measurement ?LocationID ?Transducer ?Magnitude ?Unit
 WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
 utfpr:hasMeasurement ?Measurement;
 utfpr:useCollector ?Transducer;
 utfpr:useMagnitude ?Magnitude.
 ?Measurement utfpr:hasLocationID ?LocationID.
 ?Magnitude utfpr:hasUnit ?Unit }

Component	Measurement	LocationID	Transducer	Magnitude	Unit
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Measurement_1	BOM0225_003_AC_180_R_N^^ xsd:string	utfpr:Accelerometer_1	utfpr:RMS_Velocity_1	mm/s rms^^xsd:string

Finalmente, algumas informações de texto podem ser alimentadas nos comentários de cada propriedade de dado, objeto ou até instâncias, e em diferentes idiomas. E.g., para saber os comentários em português e inglês dos elementos de manufatura da OntoProg, realiza-se as seguintes consultas.

SELECT ?Item ?Comment
 WHERE { ?Item rdfs:subClassOf utfpr:ManufacturingItems;
 rdfs:comment ?Comment.
 FILTER (LANG (?Comment) = "pt") }

Item	Comment
utfpr:ManufacturingItems	O item de manufatura pode ser uma peça individual, componente, dispositivo, unidade funcional, máquina, equipamento, subsistema ou sistema de uma determinada fabricação IEC60050-192:2015.@pt
utfpr:Bearing	Um mancal em engenharia é uma peça ou conjunto de peças que suporta e permite a rotação do eixo de transmissão de uma dada máquina. Dependendo do tipo de projeto, o mancal pode ser de rolamentos ou deslizante.@pt
utfpr:Machine	Parte de um sistema, que é em si um sistema. Um subsistema está normalmente em um nível de subordinação inferior ao sistema do qual faz parte IEC60050-192:2015. Nesta ontologia, entende-se subsistema como uma máquina mecânica rotativa projetada expressamente para executar uma tarefa específica, como a formação de material ou a transferência e transformação de movimento, força ou energia ISO 13372:2012.@pt
utfpr:Pump	Uma bomba hidráulica é um dispositivo que adiciona energia aos líquidos, tomando energia mecânica de um eixo, de uma haste ou de um outro fluido: ar comprimido e vapor são os mais usuais. As formas de transmissão de energia podem ser: aumento de pressão, aumento de velocidade ou aumento de elevação – ou qualquer combinação destas formas de energia. Como consequência, facilita-se o movimento do líquido. É geralmente aceito que o líquido possa ser uma mistura de líquidos e sólidos, nas quais a fase líquida prepondera.@pt
utfpr:Equipment	Conjunto de itens inter-relacionados que cumprem coletivamente um requisito IEC 60050-192:2015. Nesta ontologia, o sistema é entendido como um equipamento ou grupo de máquinas rotativas ISO 13372:2012.@pt
utfpr:Component	Item rotativo reparável que pode, em determinadas condições, após uma falha, ser devolvido a um estado em que pode executar uma função requerida IEC 60050-192:2015.@pt

```

SELECT ?Item ?Comment
WHERE { ?Item rdfs:subClassOf utfpr:ManufacturingItems;
        rdfs:comment ?Comment.
FILTER (LANG (?Comment) = "en")}

```

Item	Comment
utfpr:ManufacturingItems	The manufacturing item may be an individual part, component, device, functional unit, machine, equipment, subsystem, or system of a given manufacturing IEC60050-192:2015.@en
utfpr:Machine	Part of a system, which is itself, a system. A subsystem is normally at a lower indenture level than the system of which it is a part IEC 60050-192:2015. In this ontology, subsystems is understood as a rotating mechanical machine designed expressly to perform a specific task, such as the forming of material or the transference and transformation of motion, force or energy ISO 13372:2012.@en
utfpr:Pump	A pump is a device that moves fluids (liquids or gases), or sometimes slurries, by mechanical action. Pumps can be classified into three major groups according to the method they use to move the fluid: direct lift, displacement, and gravity pumps. Pumps operate by some mechanism (typically reciprocating or rotary), and consume energy to perform mechanical work by moving the fluid. Pumps operate via many energy sources, including manual operation, electricity, engines, or wind power, come in many sizes, from microscopic for use in medical applications to large industrial pumps.@en
utfpr:Equipment	Set of interrelated items that collectively fulfil a requirement IEC 60050-192:2015. In this ontology, system is understood as a equipment or group of rotating machines ISO 13372:2012.@en
utfpr:Component	Rotating repairable item that can, under given conditions, after a failure, be returned to a state in which it can perform as required IEC60050-192:2015.@en

C.2 CONSULTAS NO MODELO ONTOLOGIA, CONSIDERADO COM TIPO DE ONTOLOGIA DE TAREFA

Segundo norma ISO 10816-3, há 4 grupos para determinar as Zonas de Limite para os valores de velocidade coletados. Quais são as especificações de cada um desses grupos para serem usado no nosso estudo?

```

SELECT ?Group ?Specification
WHERE { ?Group rdf:type utfpr:ZoneBoundary;
        utfpr:hasSpecification ?Specification }
ORDER BY ?Group

```

Group	Specification
utfpr:Group1_1	Machines with rated power: $300 \text{ kW} < P < 50 \text{ MW}$ ^xsd:string
utfpr:Group1_1	Machines with shaft height $H \geq 315 \text{ mm}$ ^xsd:string
utfpr:Group1_1	Is an electrical machine^xsd:string
utfpr:Group2_1	Machines with rated power: $15 \text{ kW} < P \leq 300 \text{ kW}$ ^xsd:string
utfpr:Group2_1	Is an electrical machine^xsd:string
utfpr:Group2_1	Machines with shaft height $160 \text{ mm} \leq H < 315 \text{ mm}$ ^xsd:string
utfpr:Group3_1	Machines with rated power: $P > 15 \text{ kW}$ ^xsd:string
utfpr:Group3_1	Used in pump machine^xsd:string
utfpr:Group3_1	Used in pump machine with separate driver^xsd:string
utfpr:Group4_1	Used in pump machine with integrated driver^xsd:string
utfpr:Group4_1	Machines with rated power: $P > 15 \text{ kW}$ ^xsd:string
utfpr:Group4_1	Used in pump machine^xsd:string

Qual desses 4 grupos atende ao componente em estudo?

```

SELECT ?Group ?characteristics
WHERE { ?Group rdf:type utfpr:ZoneBoundary;
        utfpr:hasSpecification ?characteristics;
utfpr:hasSpecification "Used in pump machine";
utfpr:hasSpecification "Machines with rated power:  $P > 15 \text{ kW}$ ";
utfpr:hasSpecification "Used in pump machine with separate driver"}

```

Groups	characteristics
utfpr:Group3_1	Machines with rated power: $P > 15 \text{ kW}$ ^xsd:string
utfpr:Group3_1	Used in pump machine^xsd:string

utfpr:Group3 1	Used in pump machine with separate driver [^] xsd:string
----------------	---

Ainda, de acordo com a norma ISO 10816-3, para a velocidade dentro do Grupo 3 são criadas as seguintes regras SWRL:

Valores ≥ 0 e ≤ 2.3 estão dentro da zona de limite considerada como estado de saúde “Bom”. Para tal é criada a restrição:

```
Group3(?Gp3) ^ hasZone(?Gp3, "Good") -> hasVelocity(?Gp3, "greater than or equal 0 and less than or equal 2.3")
```

Valores > 2.3 e ≤ 4.5 estão dentro da zona de limite considerada como estado de saúde “Satisfatório”. Para tal é criada a seguinte restrição:

```
Group3(?Gp3) ^ hasZone(?Gp3, "Satisfactory") -> hasVelocity(?Gp3, "greater than 2.3 and less than or equal 4.5")
```

Valores > 4.5 e ≤ 7.1 estão dentro da zona de limite considerada como estado de saúde “Alerta”. Para tal é criada a seguinte restrição:

```
Group3(?Gp3) ^ hasZone(?Gp3, "Alert") -> hasVelocity(?Gp3, "greater than 4.5 and less than or equal 7.1")
```

Valores > 7.1 estão dentro da zona de limite considerada como estado de saúde “Alarme”. Para tal é criada a restrição:

```
Group3(?Gp3) ^ hasZone(?Gp3, "Alarm") -> hasVelocity(?Gp3, "greater than 7.1")
```

Após a criação dessas regras, lembrando que já foram consultadas na seção C.1 informações relacionadas aos Modos de Falha, Causa, Efeito e Sintoma, Técnica de Medição do componente em estudo, além do seu Local de Medição, tipo de Coletor, Magnitude, Unidade de medição e Grupo 3 que define Zonas de Limites aceitáveis e não aceitáveis. Agora, é simulada a tarefa de coleta de dados no chão de fábrica usando a propriedade de dado `hasCurrentValue`, fazendo com que as inferências identifiquem a saúde do componente e fornecem avisos de prognóstico para a tomada de decisões no planejamento da manutenção baseada na condição.

Antes disso, são elaboradas as seguintes regras SWRL, para inferir o estado de saúde dos dados coletados:

```
VibrationMeasurement(?M1) ^ hasCurrentValue(?M1, ?A) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?A, 0) ^ swrlb:lessThanOrEqual(?A, 2.3) -> hasHealth(?M1, "Good")
```

VibrationMeasurement(?M1) ^ hasHealth(?M1, ?A) ^ swrlb:equal(?A, "Good") -> hasWarning(?M1, "Collect new data in 3 months")

VibrationMeasurement(?M1) ^ hasCurrentValue(?M1, ?B) ^ swrlb:greaterThan(?B, 2.3) ^ swrlb:lessThanOrEqual(?B, 4.5) -> hasHealth(?M1, "Satisfactory")

hasHealth(?M1, ?B) ^ VibrationMeasurement(?M1) ^ swrlb:equal(?B, "Satisfactory") -> hasWarning(?M1, "Collect new data in 1 months")

VibrationMeasurement(?M1) ^ hasCurrentValue(?M1, ?C) ^ swrlb:greaterThan(?C, 4.5) ^ swrlb:lessThanOrEqual(?C, 7.1) -> hasHealth(?M1, "Alert")

hasHealth(?M1, ?C) ^ swrlb:equal(?C, "Alert") ^ VibrationMeasurement(?M1) -> hasWarning(?M1, "Schedule Condition-based Maintenance")

VibrationMeasurement(?M1) ^ hasCurrentValue(?M1, ?D) ^ swrlb:greaterThan(?D, 7.1) -> hasHealth(?M1, "Alarm")

hasHealth(?M1, ?D) ^ swrlb:equal(?D, "Alarm") ^ VibrationMeasurement(?M1) -> hasWarning(?M1, "Turn off equipment")

Assim, por exemplo, se é coletado o valor 2.1 do local de medição Measurement_1 que tem ID BOM0225_003_AC_180_R_N. Então, qual é a saúde do componente RollingBearing_1?. Para simular essa consulta deve ser ingressado o valor 2.1 na propriedade de dado hasCurrentValue. Note-se que além de informar o estado de saúde “Bom”, a consulta fornece o aviso de que deve ser realizada uma nova coleta em 3 meses.

```
SELECT ?Component ?MeasurementPoint ?Health ?WarningMessage
WHERE { ?Component utfpr:hasID"6310_C3";
        utfpr:hasMeasurement ?MeasurementPoint.
        ?MeasurementPoint utfpr:hasLocationID "BOM0225_003_AC_180_R_N";
        utfpr:hasCurrentValue "2.1";
        utfpr:hasHealth ?Health;
        utfpr:hasWarning ?WarningMessage }
```

Component	MeasurementPoint	HealthMessage	WarningMessage
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Measurement_1	Good^^xsd:string	Collect new data in 3 months^^xsd:string

A seguir realiza-se outra consulta no mesmo local de medição. Porém, para esta nova simulação se assume o valor coletado de 2.31. Assim, segundo norma, qual é o estado de saúde e mensagem de aviso para o componente RollingBearing_1 com esse novo valor?. Lembrando que para essa nova simulação deve ser ingressado o valor 2.31 na propriedade de dados hasCurrentValue

```
SELECT ?Component ?MeasurementPoint ?Health ?WarningMessage
WHERE { ?Component utfpr:hasID"6310_C3";
        utfpr:hasMeasurement ?MeasurementPoint.
        ?MeasurementPoint utfpr:hasLocationID "BOM0225_003_AC_180_R_N";
        utfpr:hasCurrentValue "2.31";
        utfpr:hasHealth ?Health;
```

utfpr:hasWarning ?WarningMessage }

Component	MeasurementPoint	HealthMessage	WarningMessage
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Measurement_1	Satisfactory^^xsd:string	Collect new data in 1 months^^xsd:string

Assim, quando simulada a coleta de dados no chão de fábrica e os estados de saúde do componente são “Bom”, “Satisfatório” ou “Alarme”; as mensagens de aviso são pontuais, do tipo “coletar novos dados em x meses ou desligar imediatamente o equipamento. Mas, quando a saúde tem um estado “Alerta” o modelo OntoProg prognostica uma falha funcional, e informa a mensagem para realizar o planejamento de uma intervenção. Assim, por exemplo, se simulamos a coleta do valor 5.1 no local de medição Measurement_1 que tem ID BOM0225_003_AC_180_R_N, sabe-se que o estado de saúde é “Alerta”, logo a mensagem é planejar uma intervenção.

```
SELECT ?Component ?MeasurementPoint ?Health ?WarningMessage
WHERE { ?Component utfpr:hasID"6310_C3";
        utfpr:hasMeasurement ?MeasurementPoint.
        ?MeasurementPoint utfpr:hasLocationID "BOM0225_003_AC_180_R_N";
        utfpr:hasCurrentValue "5.1";
        utfpr:hasHealth ?Health;
        utfpr:hasWarning ?WarningMessage }
```

Component	MeasurementPoint	HealthMessage	WarningMessage
utfpr:RollingBearing_1	utfpr:Measurement_1	Alert^^xsd:string	Schedule Condition-based Maintenance^^xsd:string

Segundo os conceitos de Análise de Vibrações usando Magnitude velocidade, o dado 5.1 é um valor geral que acusa um estado de “Alerta” no componente RollingBearing_1. Mas, ainda não se sabe qual é a causa da falha. Assim, para a tomada de decisão e realizar uma especificação mais precisa do elemento a ser revisado, ajustado, reparado ou recuperado, consulta-se no bando da classe de Causas Potenciais de falha, qual delas atende a outras informações relacionadas com esse dado coletado, tais como: valor de velocidade igual a 5.1; medição realizada na direção radial; espectro de frequência encontrado na análise de vibrações é 1 e 2 vezes a frequência do eixo de acionamento da máquina.

```
SELECT ?Component ?PossibleCause
WHERE { ?Component utfpr:hasID"6310_C3";
        utfpr:hasCause ?Cause.
        ?Cause utfpr:hasFailureValue "5.1";
        utfpr:hasMeasurementDirection "Radial";
        utfpr:hasFrequencySpectrum "one-time the frequency (1X), two-time the frequency (2x)".
        ?Cause utfpr:isCausedBy ?PossibleCause }
```

Component	PossibleCause
utfpr:RollingBearing_1	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string

C.3 CONSULTAS NO MODELO ONTOPROG, CONSIDERADO COMO TIPO DE ONTOLOGIA DE APLICAÇÃO

Após prognosticada uma falha funcional e informada a Causa Potencial de falha, é consultada a informação que deve conter a requisição para o planejamento de manutenção.

```

SELECT ?Component ?ComponentSpecification ?ComponentID ?ComponentMachine ?MachineID
?PossibleCause
WHERE { ?Component utfpr:hasID "6310_C3";
        utfpr:hasSpecification ?ComponentSpecification;
        utfpr:hasID ?ComponentID;
        utfpr:isPartOf ?ComponentMachine.
?ComponentMachine utfpr:hasID ?MachineID.
?Component utfpr:hasCause ?Cause.
?Cause utfpr:hasFailureValue "5.1";
        utfpr:hasMeasurementDirection "Radial";
        utfpr:hasFrequencySpectrum "one-time the frequency (1X), two-time the frequency (2x)";
        utfpr:isCausedBy ?PossibleCause}

```

Component	Component Specification	ComponentID	Component Machine	MachineID	PossibleCause
utfpr:RollingBearing_1	Single row deep groove ball bearings^^xsd:string	6310_C3^^xsd:string	utfpr:Pump_1	BOM0225^^xsd:string	Parallel misalignment of shaft due to mounting incorrect^^xsd:string