

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MURILO OLIVEIRA LEME

**METODOLOGIA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA MOTORES
ELÉTRICOS BASEADA EM MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS
FÍSICAS E ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

TESE

PONTA GROSSA

2017

MURILO OLIVEIRA LEME

**METODOLOGIA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA MOTORES
ELÉTRICOS BASEADA EM MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS
FÍSICAS E ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Tese apresentada como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Trojan

PONTA GROSSA

2017

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.03/18

L551 Leme, Murilo Oliveira

Metodologia de manutenção preditiva para motores elétricos baseada em monitoramento de variáveis físicas e análise multicritério. / Murilo Oliveira Leme. 2017. 185 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Trojan

Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

1. Máquinas - Manutenção e reparos. 2. Processo decisório por critério múltiplo. 3. Motores elétricos. I. Trojan, Flavio. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III. Título.

CDD 670.42

Elson Heraldo Ribeiro Junior. CRB-9/1413. 26/01/2018.



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa**

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Tese Nº 17/2017

**METODOLOGIA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA MOTORES ELÉTRICOS
BASEADA EM MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS FÍSICAS E ANÁLISE
MULTICRITÉRIO**

por

Murilo Oliveira Leme

Esta tese foi apresentada às 14hs do dia 19 de dezembro de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha
Loures (PUCPR)**

**Prof. Dr. Rui Francisco Martins Marçal
(PUCPR)**

**Prof. Dr. Antônio Carlos de Francisco
(UTFPR)**

**Prof. Dr. Sérgio Luiz Stevan Júnior
(UTFPR)**

**Prof. Dr. Flavio Trojan
(UTFPR) - *Orientador***

**Prof. Dr. Antônio Carlos de Francisco
(UTFPR)
Coordenador do PPGEP**

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NA COORDENAÇÃO DO
CURSO

Dedico este trabalho aos meus pais
que sempre apoiaram meus estudos,
minha esposa que sempre me
incentivou e meus filhos, minha maior
fonte de inspiração.

AGRADECIMENTOS

O momento de agradecer é, sem dúvida, o mais especial deste trabalho. Hora de olhar para trás e lembrar as pessoas que contribuíram para sua concretização.

A Deus, pela benção de concluir esta etapa tão especial em minha vida.

Aos meus pais, Neila e Geraldo, pelos ensinamentos e pelo exemplo de amor, humildade e respeito.

A minha esposa Jaqueline, que nos momentos mais difíceis, encontrou palavras de apoio e conforto.

Aos meus filhos, Mariana e Daniel, pelo carinho e sorriso permanentes.

Ao meu orientador, professor Dr. Flávio Trojan pela orientação e paciência, além de todo ensinamento e contribuições ao longo deste trabalho.

Ao professor Dr. Antônio Augusto de Paula Xavier pelo apoio e orientação.

Ao professor Dr. Sérgio Luiz Stevan Júnior pelo incentivo e pelas palavras de incentivo.

Ao Departamento de Engenharia Eletrônica por ter-me concedido a licença-capacitação.

Aos professores e secretários do PPGEP pela atenção e dedicação, em especial, a Luiz César dos Santos.

A toda equipe de cardiologia do Hospital Bom Jesus, em Ponta Grossa e, especialmente ao médico Dr. Marcelo Freitas, que me acompanharam num dos momentos mais difíceis da minha vida e que, com toda a dedicação, possibilitaram o prosseguimento desse estudo.

E, por mais que eu escreva, certamente, não me lembrarei de todos, mas sou grato a cada um que, em algum momento, contribuiu para a conclusão deste trabalho.

A dúvida é o princípio da sabedoria.
Aristóteles

RESUMO

LEME, Murilo Oliveira. **Metodologia de manutenção preditiva para motores elétricos, baseada em monitoramento de variáveis físicas e análise multicritério**. 2017. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de manutenção preditiva para motores elétricos, que utiliza a técnica de monitoramento de variáveis, transmissão de dados pela rede elétrica (*Powerline Communication*) e um tratamento com os métodos multicritério para classificação (ELECTRE TRI e AHPSort) e ordenação (ELECTRE II) dos motores que apresentam condição de falha incipiente, além do aproveitamento das instalações elétricas existentes para a aquisição de dados do funcionamento de motores elétricos tais como: tensão, corrente, temperatura e vibração. Essas informações podem ser avaliadas e tratadas através de métodos multicritério para alocar os motores em classes que representam estados de funcionamento normal, aceitável e falha incipiente. Assim, nos motores classificados em condição de falha incipiente pode ser realizado um *ranking* para apontar o motor em pior estado de funcionamento. Neste trabalho, foi conduzido um ensaio de falhas programadas em bancada com um período de aquisição de 1 minuto das variáveis de funcionamento de seis motores. Neste período, pode ser feito o registro do motor que apresentou as condições mais críticas para a falha, considerando as variáveis medidas como critérios na análise. Após um largo período de análise, foram computadas todas as vezes que cada motor foi classificado na classe de falha incipiente e ranqueado em primeiro lugar, significando que ele possui condições fora do padrão normal de funcionamento e piores que dos outros motores analisados. Com isso, foi possível identificar o motor que, por mais vezes, esteve em condição de falha incipiente, refletindo as falhas inseridas durante o ensaio. Essa metodologia possibilitou indicar ao gestor da manutenção, os desvios do funcionamento normal de motores elétricos, considerando mais de uma variável ao mesmo tempo, alinhado aos objetivos do decisor, através dos pesos calculados para os critérios, limites e preferências estabelecidas em cada método multicritério utilizado na metodologia proposta neste trabalho.

Palavras-chave: Manutenção preditiva. Análise multicritério. Motores elétricos. *Powerline Communication*.

ABSTRACT

LEME, Murilo Oliveira. **Predictive maintenance methodology for electric motors, based on monitoring of physical variables and multicriteria analysis.** 2017. 167 p. Thesis (Doctorate Degree in Production Engineering) - Federal University of Technology of Paraná, Ponta Grossa, 2017.

This work presents the development of a predictive maintenance methodology for electric motors, which uses the variable monitoring technique, data transmission through the electric network (Powerline Communication) and a treatment with multicriteria methods for sorting (ELECTRE TRI and AHPSort) and ranking (ELECTRE II) electric motors with incipient failure condition and the use of existing electrical installations for the acquisition of data of the operation of electric motors such as voltage, current, temperature and vibration. This information can be evaluated and treated through multicriteria methods to allocate motors in classes that represent normal, acceptable, and incipient failure states. Thus, in electric motors classified as incipient failure condition, a ranking can be performed to detect the engine in the worst operating state. In this work, a bench experiment was conducted with a 1-minute acquisition period of the operating variables in 6 motors. In this period, the electric motor can be registered that presented the most critical conditions for the fault, considering the measured variables as criteria in the analysis. After a longer period of analysis, we computed every time this engine was classified in the incipient failure and first rank class, which means that it has conditions that are out of the normal operating range and worse than the other engines analyzed. Through this methodology it is possible to indicate to the maintenance manager deviations from the normal operation of electric motors, considering more than one variable at the same time aligned to the objectives of the decision maker, through the weights calculated for the criteria and limits and preferences established in each multicriteria method used in the methodology proposed in this work.

Keywords: Predictive maintenance. Multicriteria analysis. Electric motors. Powerline Communication.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas para elaboração da Tese.....	24
Figura 2 – Revisão bibliográfica estruturada.....	26
Figura 3 – Modelo de limitação dos riscos.....	29
Figura 4 – Ciclo de Manutenção.....	29
Figura 5 – Filosofias de manutenção.....	31
Figura 6 – Diagrama de decisão referente à manutenção.....	35
Figura 7 – Visão da integração de tecnologias na manutenção.....	37
Figura 8 – Curva da “banheira”.....	47
Figura 9 – Placa de identificação de um motor elétrico.....	48
Figura 10 – Sistema típico de diagnóstico de falha de motor elétrico.....	49
Figura 11 – Limites de variação de Tensão e frequência.....	52
Figura 12 – Indicação dos pontos de instalação dos sensores de vibração.....	55
Figura 13 – Hierarquia das redes de comunicação industrial.....	61
Figura 14 – Topologias típicas das redes industriais.....	62
Figura 15 – Sistema de comunicação PLC.....	64
Figura 16 – Matriz de decisão.....	76
Figura 17 – Avaliação da compensatoriedade.....	77
Figura 18 – Representação gráfica das relações de preferência.....	78
Figura 19 – Limites entre as classes.....	84
Figura 20 – Classificação pelo ELECTRE TRI.....	86
Figura 21 – Estrutura AHP.....	88
Figura 22 – Processo de classificação AHPSort.....	90
Figura 23 – Classificação utilizando perfis limitantes (lp).....	91
Figura 24 – Definição de classes utilizando perfis centrais locais.....	91
Figura 25 – Primeira fase da metodologia.....	103
Figura 26 – Segunda fase da metodologia.....	104
Figura 27 – Estrutura operacional da metodologia.....	105
Figura 28 – Divisor de tensão utilizado como sensor de tensão.....	110
Figura 29 – Estrutura da coleta de dados dos sensores.....	111
Figura 30 – Geração de relatório em formato.TXT.....	112
Figura 31 – Modens PLC utilizados.....	113
Figura 32 – Sistema de aquisição de dados PLC.....	113
Figura 33 – Diagrama dos módulos de comunicação.....	114

Figura 34 – Protótipo de aquisição de dados baseado em Arduino.....	115
Figura 35 – Apresentação para a realização dos julgamentos entre critérios.....	119
Figura 36 – Pesos dos critérios e teste de inconsistência AHP.....	119
Figura 37 – Limites entre as classes de condição dos motores.....	121
Figura 38 – Metodologia para o ensaio de falhas.....	129
Figura 39 – Cenário com seis motores elétricos monitorados.....	130
Figura 40 – Intervalo de aquisição de dados.....	131
Figura 41 – Informações dos motores utilizados.....	132
Figura 42 – Ensaio de falhas planejadas.....	133
Figura 43 – Resultado do julgamento realizado entre os critérios.....	134
Figura 44 – Bancada utilizada para os ensaios.....	136

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Componentes que apresentam falha.....	42
Quadro 2 – Iniciadores de falha de um motor elétrico.....	43
Quadro 3 – Contribuintes de falha em motores elétricos.....	43
Quadro 4 – Fatores ocultos.....	44
Quadro 5 – Comparação entre as técnicas de detecção de falhas.....	50
Quadro 6 – Classes dos motores.....	56
Quadro 7 – Fator de multiplicação em função da altura.....	57
Quadro 8 – Problemas de decisão.....	72
Quadro 9 – Relação entre tipo de problema e método.....	73
Quadro 10 – Tipos de problemática, métodos e softwares utilizados.....	73
Quadro 11 – Escala de Razão de Saaty.....	89
Quadro 12 – Resumo dos métodos ELECTRE.....	95
Quadro 13 – Matriz de critérios e alternativas.....	96
Quadro 14 – Limites definidos para as classes.....	122
Quadro 15 – Verificação de mais de um motor em “Falha incipiente” no minuto	123
Quadro 16 – Mapeamento das variáveis em anormalidade no minuto.....	126
Quadro 17 – Registro das falhas.....	127
Quadro 18 – Resultado da análise multicritério.....	127
Quadro 19 – Indicador de variáveis em anormalidade por motor.....	128
Quadro 20 – Resumo das características nominais dos motores utilizados.....	133
Quadro 21 – Sequência dos ensaios de falha realizados.....	135
Quadro 22 – Classificação dos motores ($\lambda = 0,75$).....	137
Quadro 23 – Resultado da análise multicritério.....	138
Quadro 24 – Mapa de anormalidades dos motores em “Falha incipiente” ($\lambda = 0,75$).....	140
Quadro 25 – Indicador de anormalidades dos motores.....	141
Quadro 26 – Classificação dos motores ($\lambda = 0,90$).....	142
Quadro 27 – Classificação final dos motores ($\lambda = 0,90$).....	144
Quadro 28 – Mapa de anormalidades dos motores em “falha incipiente” ($\lambda = 0,90$).....	147
Quadro 29 – Indicador de anormalidades dos motores ($\lambda = 0,90$).....	148
Quadro 30 – Classificação ELECTRE TRI para a falha programada.....	150
Quadro 31 – Julgamento AHPSort.....	150

Quadro 32 – Classificação AHPSort.....	152
Quadro 33 – Classificação AHPSort para a falha programada.....	152

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
CBM	<i>Condition-Based Maintenance</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IP	<i>Internet Protocol</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FS	Fator de Serviço
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i>
NBR	Norma Brasileira
PLC	<i>Powerline Communication</i>
SSM	<i>Strategic Maintenance Management</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>

LISTA DE ACRÔNIMOS

ELECTRE	<i>Elimination et Choix Traduisant la Réalité</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichmen Evaluation</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 PROBLEMA	19
1.2 JUSTIFICATIVA.....	20
1.3 OBJETIVO GERAL	21
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA	22
1.6 HIPÓTESES	22
1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	23
2 REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1 A GESTÃO DA MANUTENÇÃO	26
2.1.1 Tipos de Manutenção	30
2.1.1.1 Manutenção corretiva.....	32
2.1.1.2 Manutenção preventiva.....	32
2.1.1.3 Manutenção preditiva.....	33
2.1.2 Importância da Manutenção para a Produção	34
2.1.3 Tendências da Manutenção.....	36
2.2 MANUTENÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS	38
2.2.1 Principais Variáveis para Monitoramento de Motores Elétricos	42
2.2.2 Padrões Indicativos para Predição de Falhas em Motores Elétricos	46
2.2.3 Métodos de Diagnósticos de Motores Elétricos	49
2.2.3.1 Padrão indicativo de falha por variação de corrente elétrica.....	50
2.2.3.2 Padrão indicativo de falha por variação de tensão.....	51
2.2.3.3 Padrão indicativo de falha por variação de vibração.....	53
2.2.3.4 Padrão indicativo de falha por variação de temperatura	55
2.2.4 Infraestrutura para Manutenção Preditiva de Motores Elétricos	58
2.2.4.1 Redes de comunicação.....	59
2.2.4.2 <i>Powerline communication</i> (PLC)	63
2.2.4.3 Softwares de supervisão de processos.....	65
2.2.4.4 Sensores.....	67
2.2.5 Métodos Multicritério Aplicados à Gestão da Manutenção em Processos Produtivos	68
2.3 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO	70
2.4 CONSTRUÇÃO DE MODELOS DE DECISÃO.....	73
2.4.1 Elementos Básicos na Decisão Multicritério	75
2.4.1.1 Estrutura de preferências.....	77
2.4.1.2 Tipos de escalas	79
2.4.1.3 Procedimentos de normalização	81
2.4.2 Métodos de Classificação	83
2.4.2.1 Método ELECTRE TRI.....	83

2.4.2.2 O Método AHPSort	87
2.4.3 Métodos de Sobreclassificação	93
2.4.3.1 Família de métodos ELECTRE	94
2.4.3.1.1 ELECTRE II	95
2.4.3.2 Família de métodos PROMETHEE	99
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	102
3.1 DEFINIÇÃO DOS DADOS PARA A ESTRUTURAÇÃO DA METODOLOGIA	105
3.1.1 Definição das Variáveis Adquiridas.....	105
3.1.2 Identificação dos Limites para as Classes	106
3.1.3 Definição dos Sensores a Serem Utilizados nos Motores.....	107
3.1.4 Definição da Forma de Extração dos Dados.....	109
3.1.5 Construção do Protótipo de Aquisição de Dados.....	111
3.1.6 Validação dos Dados Coletados dos Sensores	115
3.2 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA	115
3.2.1 Normalização dos Dados	116
3.2.2 Definição dos Pesos para os Critérios	117
3.2.3 Definição das Classes dos Motores.....	119
3.2.4 Classificação no ELECTRE TRI.....	120
3.2.5 Classificação com AHPSort	123
3.2.6 Ordenação dos Motores no Método ELECTRE II	123
3.2.7 Mapeamento de Anormalidades	124
3.2.8 Classificação dos Motores no Período de Análise	125
4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	128
4.1 ENSAIO DE FALHAS PROGRAMADAS	129
4.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	133
4.2.1 Avaliação com Nível de Corte em 0,75.....	135
4.2.2 Mapa de Anormalidades para Nível de Corte em 0,75	139
4.2.3 Avaliação com Nível de corte em 0,9.....	141
4.2.4 Mapa de Anormalidades para Nível de Corte em 0,9	145
4.3 USO DO AHP-SORT PARA A CLASSIFICAÇÃO.....	148
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	153
5.1 CONCLUSÕES.....	153
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	155
REFERÊNCIAS.....	158
APÊNDICE A	168
APÊNDICE B.....	173
APÊNDICE C.....	176

1 INTRODUÇÃO

O conceito de manutenção preditiva foi concebido como um tipo de manutenção para avaliar equipamentos enquanto em funcionamento, e que procura antecipar a ocorrência de falhas, ou seja, através do monitoramento de variáveis em equipamentos em funcionamento, procura prever o momento em que esses equipamentos poderão ficar fora de operação por falha. Essa técnica, basicamente, busca por desvios que podem indicar um comportamento fora de padrão de uma variável para estimar o tempo até que esse comportamento evolua para uma falha. Ao longo dos anos, alguns procedimentos foram desenvolvidos para a utilização da manutenção preditiva, tais como análises químicas de viscosidade, medição de variáveis por sensores eletrônicos, *softwares* de acompanhamento, etc. Esses procedimentos normalmente são executados por profissionais especializados.

De maneira geral, a manutenção tem se destacado nas organizações através da mudança de padrões e pode ser abordada como uma oportunidade para aumentar a lucratividade. Essa característica da manutenção preditiva de “prever uma possível falha” está sendo cada vez mais explorada pelos pesquisadores da área, com o propósito de otimizar suas aplicações, através da proposição de novas metodologias que incrementem o conhecimento científico sobre as teorias até então estudadas. Entretanto, como a manutenção envolve vários setores e diferentes interesses, as avaliações podem ser realizadas considerando múltiplos e diferentes critérios em sua análise, apoiando, desta forma, mais consistentemente, as decisões na gestão da manutenção.

Nesse contexto, Carneiro (2014) ressaltou que, com a constante evolução da eletrônica, mecânica e automação, há um aumento considerável na quantidade e complexidade do maquinário industrial, o que impactou também em realizar procedimentos de manutenção mais complexos e especializados, especialmente se a tecnologia de fabricação envolve avançada automatização.

Este elevado nível tecnológico permite, também, o aprimoramento e a implementação de técnicas avançadas de manutenção, o que outrora não era viável. Consequentemente, isso gera oportunidade para incremento da lucratividade para as empresas e do reconhecimento da manutenção como impulsionadora de efeitos positivos sobre a competitividade. Em alguns casos, a manutenção possui uma importância semelhante à da produção nas organizações (TROJAN; MORAIS, 2012).

Os autores ainda destacam que a ação de manutenção não é apenas a execução de uma ação corretiva ou ainda a manutenção de um item, mas sim decisões sobre ações planejadas e programadas que possam garantir a disponibilidade de produtos ou serviços para assim, garantir também a eficiência na organização.

Associado a isso, existe uma crescente demanda por produtividade e qualidade, o que requer máquinas com altos níveis de confiabilidade e disponibilidade para a produção e, para isso, torna-se essencial desenvolver programas adequados de manutenção. Os trabalhos científicos desenvolvidos na área têm destacado alguns dos critérios que devem ser considerados quando se deseja avaliar a qualidade e produtividade da manutenção, tais como: tempo de inatividade, a frequência de manutenção, custos de peças de reposição, os impactos de estrangulamento da produção, entre outros. Uma estratégia de seleção de máquinas para execução de ações de manutenção pode ser feita com um método de escolha de decisão multicritério (ISHIZAKA; NEMERY, 2014).

Desta forma, a manutenção vem se tornando fundamental para o incremento do desempenho em plantas industriais, uma vez que afeta tanto a rentabilidade quanto a segurança. Portanto, para realizar manutenção adequadamente é preciso, primeiramente, responder as perguntas: “Qual o trabalho a fazer”?, “Quando fazê-lo”? e “Quais as etapas”?

Fazer manutenção de forma eficiente significa fazer o volume necessário de trabalho no momento certo e no local necessário (NARAYAN, 2012).

O monitoramento do desempenho das máquinas necessita de aquisição sistemática, com abordagem prática para essa manutenção preditiva. Tal monitoramento deve estar alicerçado em um planejamento estratégico através de sensores e computadores. Métodos multicritério de ordenação podem ser utilizados, entretanto, nem sempre é possível priorizar um equipamento em relação a outro ou definir um cronograma de manutenção, pois em muitas situações os dados utilizados são incomparáveis na aplicação do método (ISHIZAKA; NEMERY, 2014).

A evolução dos dispositivos eletrônicos e sensores, bem como das técnicas de comunicação, permitem novas formas de aquisição e compartilhamento de dados sobre o desempenho de máquinas, disponíveis quase instantaneamente em diversos pontos da planta industrial, possibilitando assim, ajustar os dados adquiridos, tornando-os compatíveis para uma aplicação multicritério.

No ambiente produtivo, os motores elétricos são a força motriz principal para as aplicações industriais. São máquinas robustas utilizadas não só para fins gerais, mas também para tarefas perigosas e em ambientes severos. As aplicações de uso geral de motores elétricos incluem bombas de sucção e de elevação de pressão, transportadores verticais e horizontais, máquinas-ferramentas, máquinas centrífugas, prensas, elevadores, equipamentos para embalagem entre outras aplicações. Essas aplicações podem estar fisicamente localizadas em locais perigosos como é o exemplo das plantas petroquímicas e de gás natural, enquanto aplicações em ambientes severos incluem elevadores de grãos, retalhamento e equipamentos para usinas de carvão (LAMIN FILHO; PEDERIVA; BRITO, 2014).

Os motores elétricos são construídos por diferentes fabricantes, e nem todos possuem informações disponíveis sobre seu adequado funcionamento para o gerenciamento de reparos, ao longo do ciclo de vida útil do motor. A gestão adequada destes reparos é uma oportunidade de melhorar a operação, aumentando a confiabilidade e reduzindo o custo geral por paradas indesejadas (WHELAN; SASSANO; KELLEY, 2006).

Esse contexto vai se tornando cada vez mais complexo na medida em que são explorados os detalhes dos equipamentos. Neste caso, os motores elétricos e os procedimentos críticos do processo produtivo, tais como criticidade de máquinas e processos, ações para aumento da produtividade, entre outros.

Assim, a manutenção preditiva pode, neste cenário, identificar uma condição de operação insatisfatória antecipadamente, predizendo a falha antes que isso resulte num efetivo prejuízo para a empresa. As falhas não previstas por falta de monitoramento resultam em elevado tempo de paradas na produção e são mais difíceis de reparar. Além disso, a substituição de um motor nem sempre é fácil, pois depende da disponibilidade do fornecedor ou de armazenamento de equipamento reserva, que nem sempre é planejado ou apresenta alto custo (SOERGEL; RASTGOUFARD, 1996).

A busca pela melhoria nos processos de manutenção de motores elétricos no processo produtivo é uma forma de reduzir paradas de operação indesejadas, que, em sua maioria, dependem dessa força mecânica que é gerada pelos motores. Além disso, o estudo do comportamento dos componentes de motores elétricos mais suscetíveis a falhas mecânicas auxiliam na identificação e prevenção de paradas não previstas.

As funções, produção e manutenção no ambiente industrial, compartilham os equipamentos destinados à operação das linhas e processos. A necessidade de paradas de máquinas para manutenção e, por outro lado, de alta disponibilidade para executar atividades, são muitas vezes conflitantes. Produção integrada e manutenção programada são exemplos da interferência na manutenção e possíveis conflitos de interesses. A manutenção preventiva normalmente é planejada em “janelas” no tempo, normalmente planejadas pelos decisores, com objetivo de que este tempo seja o menor possível. O objetivo é causar o menor impacto possível na produção, que precisa apresentar altos indicadores de produtividade (PEREZ-GONZALEZ; FRAMINAN, 2014).

A manutenção preditiva de motores elétricos é relevante quando as condições de um motor interferem diretamente no desempenho da produção se ele não funcionar corretamente ou parar repentinamente por falta de monitoramento (PICAZO-RÓDENAS et al, 2014).

Alguns autores afirmam que planejar e tomar decisões significa posicionar-se em relação ao futuro, ou ainda um processo de coletar informações relevantes, atribuir importância a elas, buscar possíveis alternativas de solução e, então, fazer uma escolha entre as alternativas (GOMES; GOMES, 2012).

No que diz respeito à tomada de decisão na manutenção preventiva, especialmente aquelas relacionadas à escolha do intervalo para manutenção, têm levado muitos artigos a relatar modelos de decisão. Relativamente, poucos trabalhos têm sido conduzidos com o objetivo de explorar a manutenção preventiva com base em modelos multicritério (ALMEIDA, 2012).

Desta forma, há a necessidade de que empresas busquem novas tecnologias que aumentem a eficiência de seus processos através de redes de supervisão e controle, baseadas em diferentes protocolos de comunicação digital nas mais variadas plantas industriais, muitas vezes resultando em semelhanças com as redes convencionais de computadores, exceto pela diferente necessidade da aplicação (GALLOWAY; HANCKE, 2013). Entretanto, a instalação e a manutenção de redes de monitoramento apresentam elevado valor de investimento, assim como o custo de manutenção associados a essas redes depois de instaladas (LU; GUNGOR, 2009).

A tecnologia PLC (*Powerline Communication*) surge como uma proposta para o uso das redes de distribuição de energia elétrica como portadora para a

comunicação de dados, através da sobreposição de um sinal de informação ao sinal de corrente alternada (ZATTAR; CARRIJO, 2012).

Esta tecnologia é considerada como uma plataforma para várias aplicações, que incluem monitoramento e supervisão, com leituras frequentes que possibilitam fornecer ao usuário final informações mais refinadas de maneira simples e, se comparada aos sistemas tradicionais, com baixo investimento (NASSAR; *et al.* 2012).

O uso da tecnologia PLC em ambiente industrial pode ser considerada como uma alternativa viável às redes de comunicação industriais existentes, solucionando problemas relacionados à infraestrutura, redução de custos e tempo de instalação de sistemas tradicionais para comunicação de dados (FARIAS et al., 2016).

Essa tecnologia pode ser ainda uma alternativa às redes de comunicação sem fio, para as recentes aplicações que exigem grande capilaridade de comunicação, como Máquina-a-Máquina e Internet das Coisas (MILONI, 2013).

Diante deste cenário, onde existe uma necessidade de planejamento adequado na manutenção de motores elétricos que impulsionam a movimentação na indústria, associado à tomada de decisão adequada e levando em conta o dinamismo do estado de funcionamento dos mesmos, definiu-se como problema deste trabalho a seguinte pergunta: **Como realizar a manutenção preditiva de motores elétricos utilizando as informações de funcionamento transmitidas pela rede elétrica sob a análise de múltiplos critérios de avaliação ao mesmo tempo?**

1.1 PROBLEMA

Na literatura pesquisada, foi identificado que na manutenção preditiva as variáveis críticas comumente exploradas para motores elétricos são: tensão, corrente, vibração, temperatura. O monitoramento dessas variáveis gera o acompanhamento de desempenho que, com base na comparação desse acompanhamento com os limites aceitáveis para cada variável, decisões podem ser tomadas para a manutenção antecipando a ocorrência da falha. Assim, para que essa decisão seja eficaz em relação à manutenção preditiva devem ser levados em consideração múltiplos critérios concomitantemente (neste caso = grandezas físicas de funcionamento), relativos à função de cada equipamento.

Por conseguinte, na literatura científica nenhuma pesquisa específica considerou o monitoramento de múltiplas variáveis de funcionamento de motores elétricos ao mesmo tempo, tampouco uma técnica com este propósito, fazendo uso da transmissão dessas variáveis realizada pela rede elétrica de alimentação. Constitui esse problema, a lacuna que justifica a originalidade deste trabalho, e que também utilizou a análise multicritério para a construção de uma nova metodologia de manutenção preditiva.

1.2 JUSTIFICATIVA

Motores elétricos representam uma parcela importante e vital na maioria dos processos produtivos, entretanto, a grande quantidade de motores envolvidos e sua diversidade nas indústrias, tornam quase impossível possuir todas as peças sobressalentes em estoque ou mesmo motores reservas para substituição. Isso torna o planejamento da manutenção destes motores uma tarefa importante para a confiabilidade e bom desempenho dos processos.

Dados do PROCEL (2008) indicam que nas indústrias atendidas por alta tensão, os motores elétricos representam mais de dois terços da energia consumida, o que sinaliza que manutenção preditiva de motores é necessária, em virtude do impacto que a manutenção não planejada pode causar nos sistemas produtivos de bens e serviços.

A proposta de transmissão de dados por um meio físico já existente (rede elétrica de alimentação dos motores) das variáveis de funcionamento de motores elétricos utilizados na produção também justificam a elaboração desse trabalho. O trabalho também apresenta na sua metodologia uma técnica de aquisição de dados objetiva e de baixo custo.

Almeida et al. (2016) afirmaram que, embora ainda haja uma literatura escassa no contexto particular do uso de métodos multicritério na gestão da manutenção, este é um importante problema de decisão, dada a sua complexidade que inclui objetivos organizacionais estratégicos e consequências diferentes, em função da decisão tomada.

De acordo com Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016), detectar falhas está se tornando mais difícil e demorado, ao mesmo tempo em que o custo do trabalho para realizar a manutenção também vem aumentando. Como resultado, a manutenção continuará a evoluir e os dois principais pilares para isso são: tecnologia e gerenciamento.

O presente trabalho pode ser considerado inédito em função do desenvolvimento de uma metodologia multicritério de apoio para a manutenção preditiva, que se baseia nas condições de funcionamento dos diversos motores elétricos, estabelecidas pelos seus fabricantes, tendo em vista a pesquisa bibliográfica realizada nas principais bases de artigos científicos disponíveis, onde nenhum trabalho específico sobre este tema foi encontrado. Foram encontrados apenas trabalhos científicos relacionados à manutenção preditiva e utilização de métodos multicritério, mas nenhum deles tratando especificamente de motores elétricos, tampouco com uso da técnica PLC. Assim, este estudo se justifica pela relevância e ineditismo relacionados à sua estrutura.

Além disso, as técnicas comumente utilizadas para a manutenção preditiva são, em sua maioria, monocritério, ou seja, orientadas por uma única informação sobre o funcionamento dos motores, como a temperatura, corrente ou vibração.

A originalidade deste trabalho também está na forma como os dados são adquiridos, transmitidos e tratados com o objetivo de apoiar a manutenção preditiva através de uma análise multicritério, onde as condições de funcionamento são analisadas em conjunto, permitindo ao decisor dar maior ou menor importância para cada uma das variáveis analisadas.

Com esse desenvolvimento, as técnicas de gestão e tomada de decisão multicritério poderão ser amplamente exploradas, com o objetivo final de tornar o processo de gerenciamento dos ativos na indústria mais eficiente, através da previsão de falhas por múltiplas variáveis ao mesmo tempo.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia de manutenção preditiva para motores elétricos, baseada em métodos multicritério, que considera em sua estrutura os dados de funcionamento de variáveis como: tensão, corrente, temperatura de operação e

nível de vibração como os critérios de análise, transmitidos através da rede elétrica pela técnica PLC.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar as principais técnicas de manutenção preditiva aplicadas para motores elétricos que se baseiam nas informações sobre o seu funcionamento;
2. Estruturar um processo de classificação baseado nos métodos multicritério mais apropriados, com foco na manutenção preditiva de motores elétricos;
3. Estruturar um processo de ordenação baseado nos métodos multicritério mais apropriados, com foco na manutenção preditiva de motores elétricos;
4. Desenvolver a metodologia para manutenção preditiva, baseada nas informações de classificação e ordenação dos motores elétricos;
5. Desenvolver um protótipo de aquisição de dados de funcionamento de motores elétricos para transmissão na técnica PLC;
6. Estruturar uma rotina de aquisição e preparação dos dados adquiridos sobre os motores elétricos baseada na condição de falha incipiente;
7. Realizar um ensaio de falhas nas condições de funcionamento dos motores elétricos e testes de sensibilidade para avaliação das etapas anteriores.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O tema desenvolvido nessa tese envolve as características da manutenção preditiva conectadas às técnicas de análise multicritério e aquisição de dados em tempo real. O trabalho está focado em estudar motores de indução de corrente alternada em ambientes produtivos. Assim, temas como engenharia de produção e manutenção, automação industrial, análise multicritério e manutenção preditiva de motores elétricos também estão relacionados a esta tese.

1.6 HIPÓTESES

A principal hipótese delineada nesse trabalho procura confirmar se é possível estruturar uma nova metodologia de manutenção preditiva, que utilize a coleta de

dados sobre o funcionamento dos motores elétricos, que possam ser transmitidos pela técnica *Powerline Communication* e, posteriormente, essas informações possam gerar uma avaliação multicritério para apoiar ações preditivas de manutenção e aumentar a confiabilidade no processo produtivo.

1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A tese está estruturada em cinco capítulos, sendo este o capítulo inicial com a apresentação do problema, hipóteses e os objetivos geral e específico. Na sequência, o Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica baseada em artigos científicos de revistas especializadas e livros sobre os temas abordados, tratando, respectivamente, a Gestão da Manutenção e sua importância dentro da produção, a Manutenção de motores elétricos e as principais formas de realização desta atividade e, por fim, os principais métodos multicritério de classificação e ordenação.

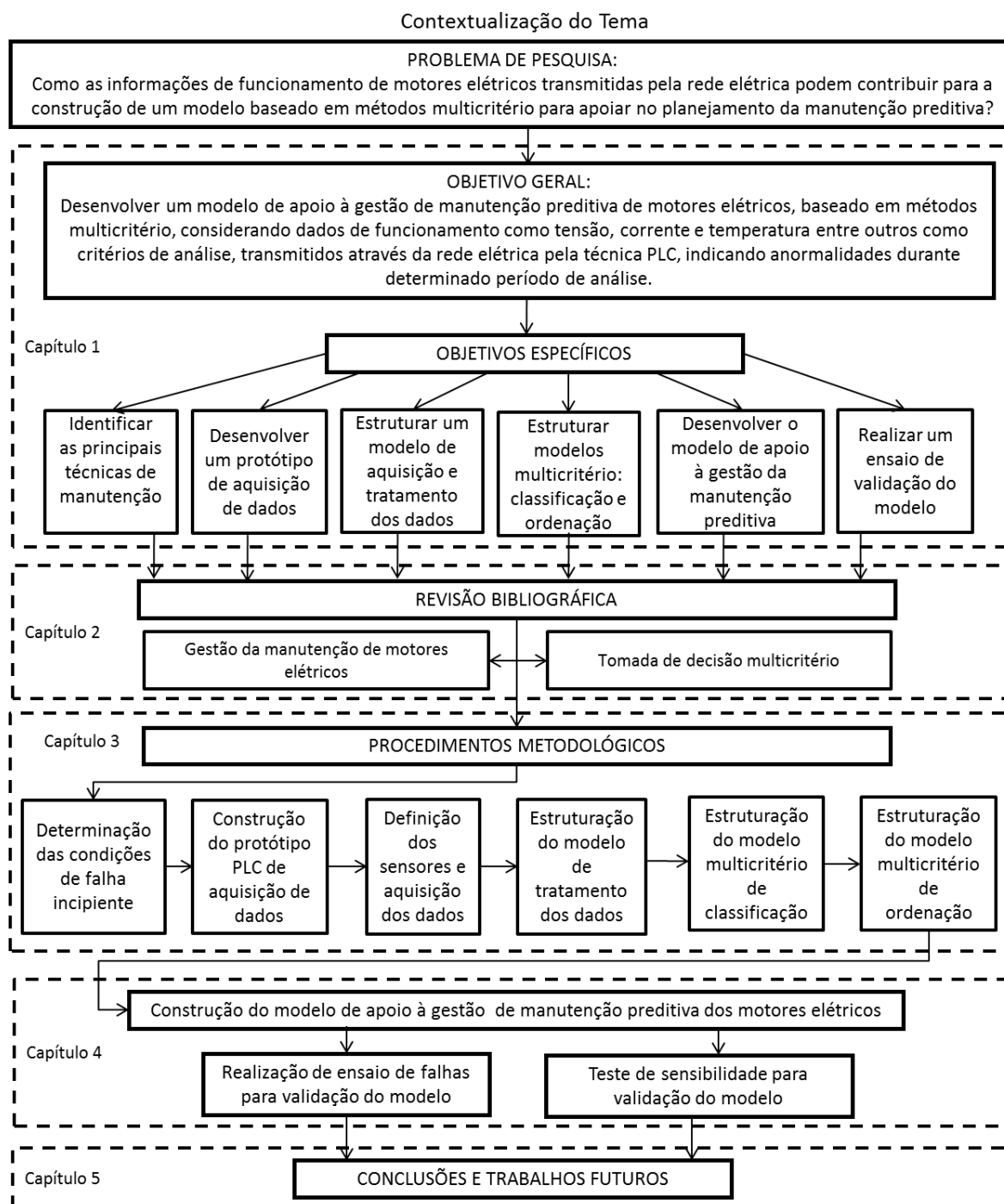
O Capítulo 3 descreve os procedimentos metodológicos que foram utilizados neste trabalho, desde a definição de falha incipiente, apresentação dos motores utilizados e todo o processo de aquisição dos dados. Também apresenta a estruturação nos métodos multicritério utilizados de classificação e ordenação.

No Capítulo 4 encontra-se uma avaliação da metodologia proposta neste trabalho de manutenção preditiva para motores elétricos. Os resultados são apresentados com base num ensaio onde foram provocadas falhas nas condições de funcionamento dos motores.

O Capítulo 5 expõe as considerações gerais, bem como apresenta sugestões para trabalhos futuros.

Com o objetivo de estruturar uma visão geral do desenvolvimento do trabalho, a Figura 1 apresenta um fluxograma das etapas desenvolvidas neste trabalho.

Figura 1 – Fluxograma das etapas para elaboração da Tese.



Fonte: Autoria Própria.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta o referencial teórico utilizado para a realização deste trabalho. Com o objetivo de abordar os aspectos relacionados aos objetivos da Tese, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática nas bases de dados “*Web of Science*” e “*Scopus*”, inicialmente. Nestas bases, foram aplicados os seguintes filtros para realização inicial da pesquisa: palavras-chave “*multicriteria + maintenance + electric motors*” em artigos publicados de 2012 em diante, sem nenhum artigo em ambas as bases. Após este primeiro filtro, a pesquisa foi realizada com as palavras-chave: “*multicriteria + maintenance*” em artigos publicados de 2012 em diante.

Uma segunda pesquisa foi realizada nestas mesmas bases com as palavras-chave: “*predictive maintenance + electric motors*” em artigos publicados de 2012 em diante.

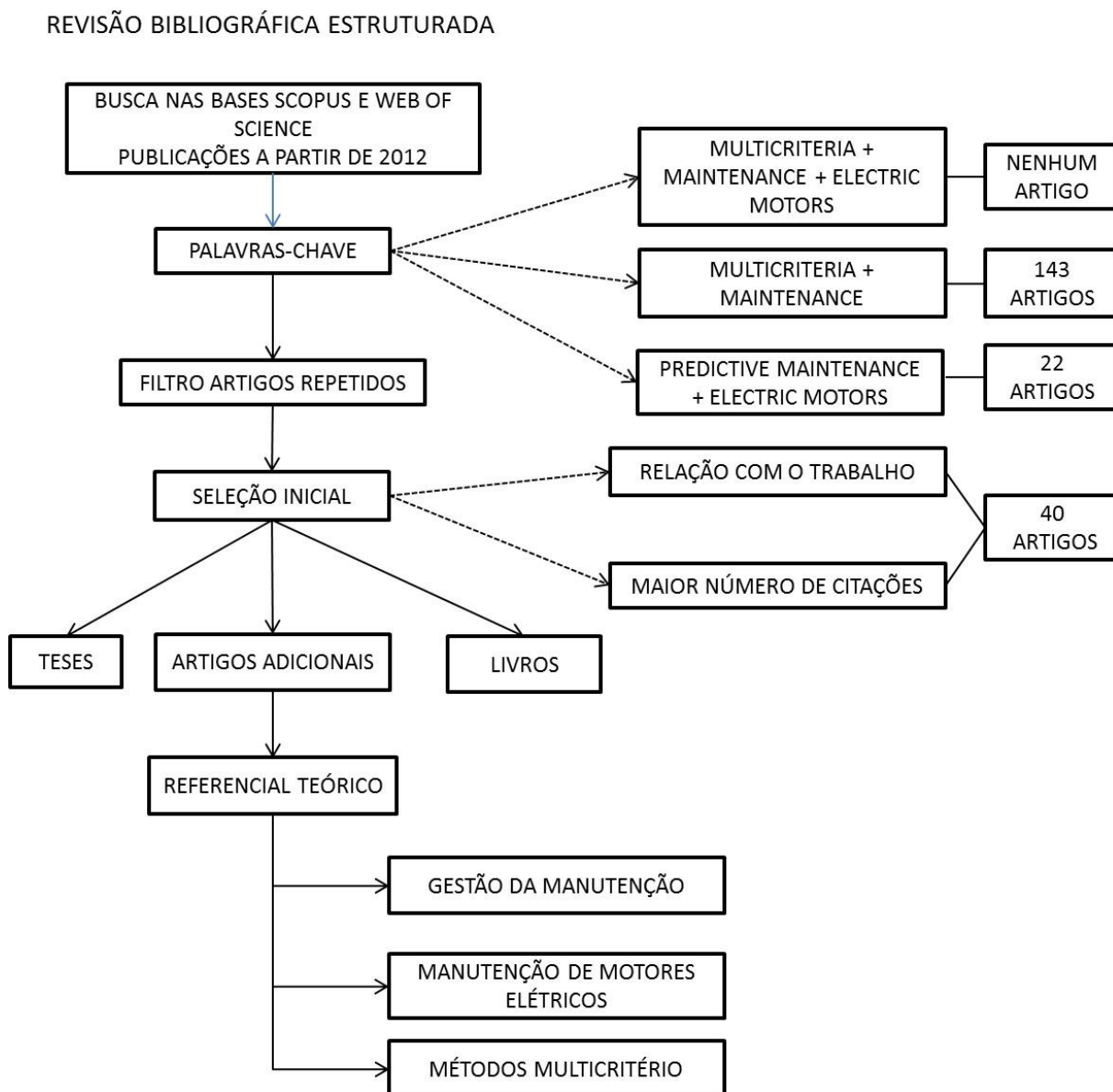
Com isso, foram obtidos, inicialmente, 165 artigos, nesta pesquisa inicial nas bases informadas. Após esta primeira etapa foi realizada uma triagem e excluídos os artigos repetidos nas duas bases. A partir deste primeiro resultado, os artigos alinhados com a proposta deste trabalho embasaram o referencial teórico utilizado.

Também fez parte deste referencial, teses de doutorado, livros, artigos de outras bases que, muitas vezes, foram referências dos artigos inicialmente selecionados.

O objetivo do referencial teórico foi de buscar, inicialmente, como tem sido abordada a gestão da manutenção na indústria; em seguida, as principais técnicas de manutenção preditiva, aplicadas aos motores elétricos, as principais falhas e os motivos que ocasionaram essas falhas. Por fim, esta pesquisa também teve como base o uso de métodos multicritério na gestão da manutenção, com o objetivo de buscar os métodos mais adequados para cada uma das etapas da metodologia proposta nesta tese.

A Figura 2 ilustra as etapas desta revisão bibliográfica estruturada:

Figura 2 - Revisão bibliográfica estruturada.



Fonte: Autoria própria.

2.1 A GESTÃO DA MANUTENÇÃO

Qualquer processo produtivo na indústria possui um elevado número de máquinas com a finalidade de auxiliar na produção de bens, entretanto, no ambiente globalizado, onde alta qualidade e atendimento a prazos significam aumento de parcela de mercado (competitividade), a manutenção possui um papel essencial para garantir a continuidade e a eficiência da produção. Atrelado a isso, a manutenção desponta como uma consequência à redução de custos. Estes custos podem ser

diretos, em função de falhas no maquinário ou indiretos, por multas em função de não cumprimento de prazos, ou ainda, a perda de um cliente.

Taylor, com o estudo do tempo e divisão do trabalho, e ainda Frank e Lillian Gilbreths, com uma técnica moderna de estudo dos movimentos foram considerados como a base para a gestão da organização até a metade do século XX, quando a manutenção era tratada de forma reativa e não planejada. Por um longo tempo, outras áreas da gestão industrial como as aplicações de técnicas formais e de tecnologia da informação ficaram esquecidas. Com os impactos gerados por essa manutenção reativa na rentabilidade das empresas, muitos pesquisadores passaram a rever a organização da manutenção e desenvolveram conceitos que discutem a gestão da manutenção eficaz (HAROUN e DUFFUAA, 2009).

A manutenção aporta valor à organização produtiva quando realizada de forma adequada, ou seja, seus objetivos sejam definidos em concordância com o negócio da organização, levando as empresas a descobrir a importância de um plano estruturado de manutenção por meio da aplicação dos conceitos de confiabilidade (FUENTES, 2006).

Segundo Haroun e Duffuaa (2009), numa organização onde existe a gestão de manutenção, esta é fortemente impactada por:

- tipo de negócio: alta tecnologia, mão de obra intensiva, produção ou serviço;
- Objetivos da organização: podem incluir maximização do lucro, aumento da participação de mercado e outros objetivos sociais ou ambientais;
- tamanho e estrutura da organização;
- cultura da organização; e,
- grau de importância da manutenção, atribuída pela organização.

Mesmo que um equipamento seja concebido da maneira mais eficiente possível, sua confiabilidade e seu desempenho, ao longo do ciclo de vida, estão associados à qualidade de operação e eficiência de manutenção. Assim, a manutenção, realizada de maneira otimizada, leva a menores custos operacionais (FLOYD, 1998).

A manutenção de equipamentos tem se tornado uma fração significativamente importante do custo total de muitos setores da indústria e o efetivo gerenciamento da manutenção requer uma abordagem multidisciplinar, quando a manutenção é vista estrategicamente para os negócios da organização. As características mais importantes dessa abordagem incluem: integração de problemas técnicos e

comerciais, um envolvimento de modelos matemáticos, o uso de todas as informações relevantes e uma melhoria contínua na gestão da manutenção (MURTHY; ATRENS; ECLESSTON, 2002).

A principal responsabilidade da manutenção é a de proporcionar um serviço que permita que uma organização possa atingir os seus objetivos, podendo estas responsabilidades variar de uma organização para outra; no entanto, elas geralmente incluem:

- manter bens e equipamentos em boas condições, bem configurados e seguros para a realização de suas funções pretendidas;
- execução de todas as atividades de manutenção, incluindo preventiva, preditiva, corretiva, revisões, modificação de projeto e manutenção de emergência de uma forma eficiente e eficaz;
- conservação e controle do uso de peças de reposição e materiais;
- organização de novas plantas e expansões; e,
- operação de ferramentas e conservação de energia.

A manutenção é apresentada como um processo iterativo, onde a melhoria deve ser refinada para a realização da Manutenção Produtiva Total, já que as máquinas evoluem e as estratégias de manutenção devem ser adaptadas. É importante que o sistema de decisão seja integrado com um sistema de recolha de dados para a redefinição dos perfis de referência e as atribuições de máquinas para estratégias de manutenção futuras (ISHIZAKA; NEMERY, 2014).

Falhas não previstas podem levar a consequências inaceitáveis para a produção, entretanto nem sempre é possível prever uma falha, mas medir períodos de manutenção e observar o equipamento ajuda a planejar a parada para manutenção antes da falha (NARAYAN, 2012).

É importante, portanto, limitar a falha e obter um quadro composto de eventos menores, que podem, eventualmente, levar a graves danos ambientais, grandes danos à propriedade ou perda grave de capacidade de produção, conforme ilustrado na Figura 3.

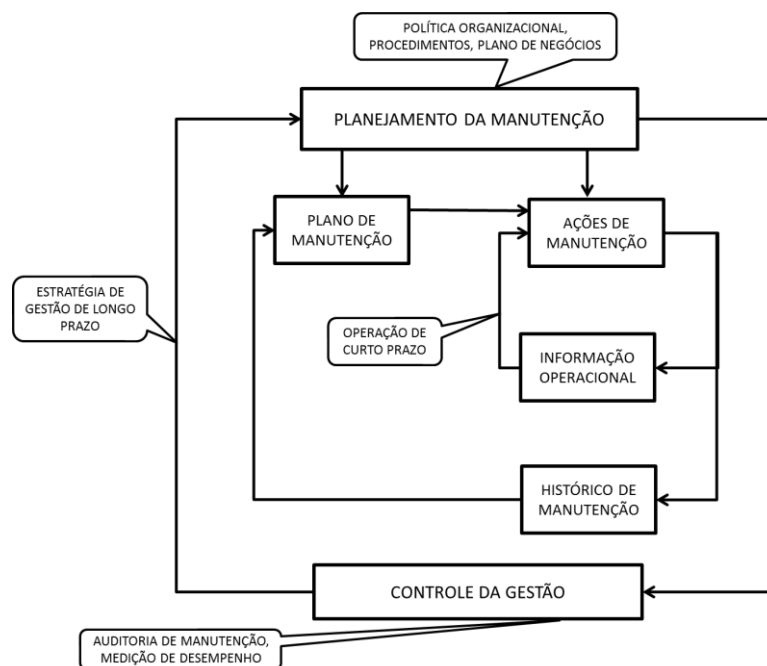
Figura 3 – Modelo de limitação dos riscos.



Fonte: NARAYAN, 2012.

Uma abordagem integrada deve considerar o ciclo de manutenção simplificado, apresentado na Figura 4 que explica os processos internos da organização em um processo de manutenção típica que, por sua vez, consiste em dois processos, um processo de ciclo externo e um processo operacional de ciclo interno (COETZEE, 1999).

Figura 4 – Ciclo de Manutenção.



Fonte: Adaptado de COETZEE (1999).

A manutenção tem o papel de minimizar o risco quantificado grave de segurança ambiental nos ativos ou, ainda, a perda de produção que pode reduzir a viabilidade e rentabilidade de uma organização, tanto a curto e longo prazo, e fazê-lo com o menor custo total (NARAYAN, 2012).

A principal responsabilidade da manutenção é oferecer um serviço que permita a uma organização atingir seus objetivos (HAROUN; DUFFUAA, 2009).

Existe a necessidade de identificar e analisar várias questões relacionadas com o desempenho da manutenção, aos desafios da gestão da manutenção, medição de desempenho de manutenção, medidas de desempenho e indicadores nos níveis estratégico, tático e operacional da organização.

Existe um saldo positivo para a quantidade de benefícios econômicos que é alcançada na realização de gestão da manutenção. A falta de manutenção, eventualmente, resulta em falhas e um alto custo para uma planta. Da mesma forma, uma quantidade extrema de manutenção pode ser considerada como um desperdício e, também, resulta em um alto custo para uma planta. O programa de manutenção ideal está no ponto de equilíbrio e pode variar para diferentes tipos de instalações (WHITE, 1998).

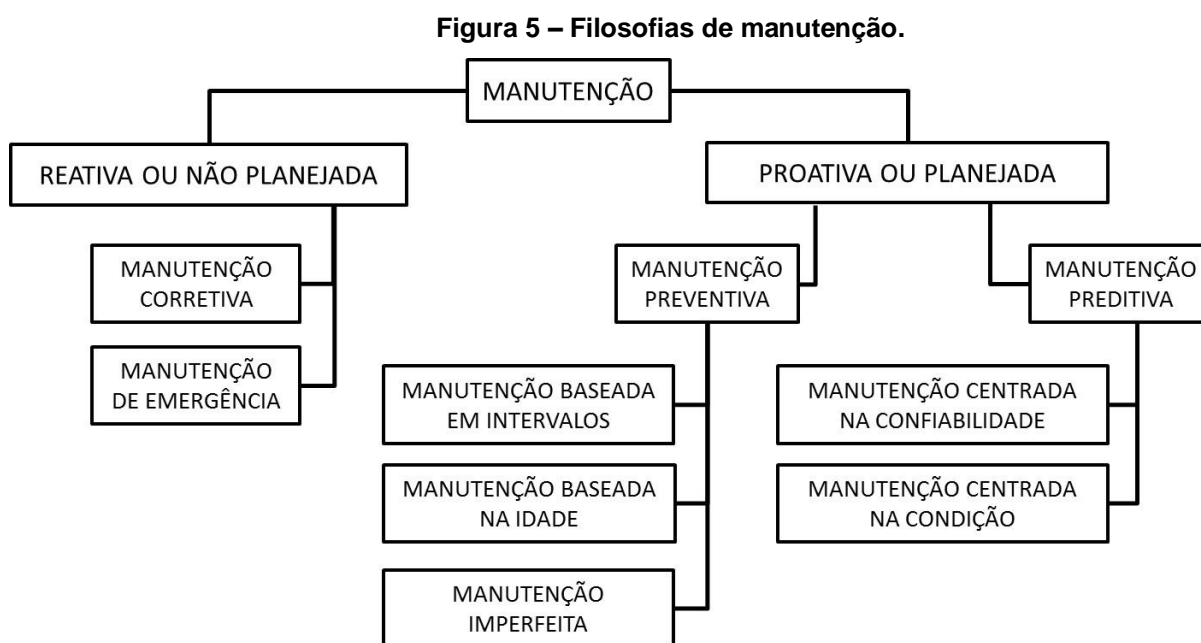
2.1.1 Tipos de Manutenção

Na concepção da manutenção, em uma organização existem importantes determinantes que devem ser considerados, como a capacidade de manutenção, centralização ou descentralização e manutenção interna ou terceirização, mas sempre pautada em responsabilidades claras, extensão efetiva de controle, facilidade de supervisão com relatórios efetivos e minimização de custos (HAROUN; DUFFUAA, 2009).

As filosofias de manutenção podem ser amplamente classificadas como reativas e proativas, sendo que a manutenção reativa ou não planejada é uma prática herdada: manutenção somente após a manifestação do defeito, da avaria ou paralisação e é apropriada para instalações onde a maquinaria instalada é mínima e a planta não é totalmente dependente da confiabilidade de qualquer máquina individual. Também pode ser apropriado quando a taxa de falha for mínima e a falha não resultar em sérios retrocessos de custo ou consequências de segurança (KOTHAMASU; HUANG; VERDUIN, 2009).

A manutenção proativa ou planejada pode ser classificada como preventiva e manutenção preditiva e como o nome sugere, as ações são proativas, não havendo a espera que o equipamento falhe antes de iniciar as operações de manutenção (KOTHAMASU; HUANG; VERDUIN, 2009).

A Figura 5 apresenta as nomenclaturas básicas utilizadas para as filosofias de manutenção reativa e proativa.



Fonte: KOTHAMASU, HUANG e VERDUIN (2009).

Além das filosofias, as ações de manutenção são geralmente classificadas na literatura em três categorias: 1) Manutenção preventiva que se caracteriza por todas as tarefas a serem realizadas numa base regular, com tarefas específicas planejadas para manter o equipamento e mantê-lo em condições de funcionamento; 2) Manutenção corretiva, que é manutenção não programada necessária para o equipamento que esteja em falha ou má operação retornar ao estado normal de operação; e, 3) Manutenção preditiva, que é o uso de medições e instrumentação para prever e diagnosticar possíveis falhas de um equipamento. Esses tipos de ações são também conhecidos como manutenção baseada em condições (DHILLON, 2002).

Cada uma destas estratégias de manutenção têm seus pontos fortes e fracos e devem estar sempre associados aos objetivos da empresa e aos recursos disponíveis para a escolha de cada uma dessas estratégias.

Além disso, estas estratégias podem estar descentralizadas e relacionadas a cada equipamento da organização e vista de maneira individual, para cada momento.

2.1.1.1 Manutenção corretiva

Na manutenção corretiva o reparo é feito após falha funcional do equipamento, por isso não é possível agendar o trabalho de reparo com antecedência e, também, é denominada manutenção em falhas (NARAYAN, 2012).

A ação de manutenção só é iniciada após uma falha funcional na manutenção corretiva. Esta perda funcional, parcial ou total, pode resultar em peças defeituosas, redução de velocidade, redução de saída e condições inseguras de operação. A falha de função ou de redução quando não devidamente atendida se tornará uma falha funcional completa quando ocorre a interrupção de função (GULATI, 2012).

O reparo feito após o início da falha leva a um desempenho degradado, pois o reparo real pode ser feito antes ou depois da falha funcional, ou seja, se está ciente da possibilidade de falha funcional antes que esta possa ocorrer. Entretanto, a manutenção só ocorrerá numa oportunidade de agendamento do reparo, ou quando ocorrer a falha funcional (NARAYAN, 2012).

Em muitas organizações, a manutenção corretiva é chamada de manutenção de reparo, quando a orientação para correção de deficiências ocorre somente depois que ele falhou ou parou de funcionar (GULATI, 2012).

2.1.1.2 Manutenção preventiva

As ações de manutenção preventiva são baseadas em períodos de utilização e têm sua implementação bastante fácil. Têm sido utilizadas em plantas de energia, petróleo e gás, refinarias, quando, previamente, as paradas são programadas e, com base em tempo de utilização, é realizada a manutenção e a troca de peças que apresentem sinais de falhas futuras. Entretanto, a otimização destas ações de manutenção podem trazer redução de custos respeitando as restrições de disponibilidade (CERTA; ENEA; LUPO, 2013).

A inspeção é realizada antes da falha funcional que, por sua vez, é realizada com base na idade de serviço e no tempo previsto de falha. Assim, se a estimativa é

pessimista, a manutenção é feita mesmo quando o equipamento está em perfeito estado de funcionamento e as revisões ou substituições programadas, as tarefas de detecção de falhas baseadas no tempo ou as tarefas em condição fazem parte do programa de manutenção preventiva (NARAYAN, 2012).

Trata-se de uma estratégia de manutenção baseada na inspeção, substituição de componentes e revisão em um intervalo fixo, independentemente de sua condição no momento.

Geralmente, são realizadas inspeções agendadas para avaliar a condição de um equipamento, substituindo itens de serviço como, por exemplo, filtros, óleos, correias e peças lubrificantes e esta inspeção pode exigir outra ordem de trabalho para reparar outras discrepâncias encontradas durante a substituição de algum item (GULATI, 2012).

As atividades de manutenção preventiva estão relacionadas a dados históricos dos equipamentos e, na falta desses dados, as informações dos operadores e conhecimento a respeito da relação entre falhas e tempo de uso podem ajudar na definição apropriada da tarefa (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

2.1.1.3 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva parte do objetivo de prever a tendência futura da condição do equipamento e, para isso, utiliza princípios de controle de processo estatístico, análise de tendências e limiares pré-selecionados para determinar em que ponto as futuras atividades de manutenção devem ser agendadas (GULATI, 2012).

A diferença em relação à manutenção preventiva é que, neste caso, não há uma programação fixa de manutenção, mas determinada por alguma informação vinda do próprio equipamento no qual será realizada a manutenção, tornando esta programação uma manutenção adaptativa (KOTHAMASU; HUANG; VERDUIN, 2009).

Têm por finalidade estabelecer numa instalação industrial, quais são os parâmetros que devem ser escolhidos em cada máquina ou equipamento e com base nestas informações, uma análise que permita que sejam tomadas providências visando evitar estragos de monta ou mesmo situações catastróficas irreversíveis (NEPOMUCENO, 2014).

Dentro da manutenção preditiva está a Manutenção Baseada na Condição (*Condition-Based Maintenance - CBM*), que busca avaliar a condição de um equipamento através de monitoramento periódico ou contínuo com o objetivo de realizar a manutenção em um ponto programado no tempo, quando a atividade de manutenção é mais rentável, mas antes de ocorrer uma falha do equipamento em serviço (GULATI, 2012).

A fim de manter o equipamento em operação, é necessário construir uma estratégia de inspeção que especifique uma sequência de verificação de inspeção, pois quanto mais frequentemente o equipamento for inspecionado, mais curto será o período entre a falha e sua detecção, entretanto cada inspeção envolve um custo. Esta estratégia deve considerar o tempo de vida do componente, o custo incorrido para realizar uma inspeção e o custo relacionado ao período de inatividade entre a ocorrência da falha e a sua detecção (CHELBI; AIT- KADI, 1998).

2.1.2 Importância da Manutenção para a Produção

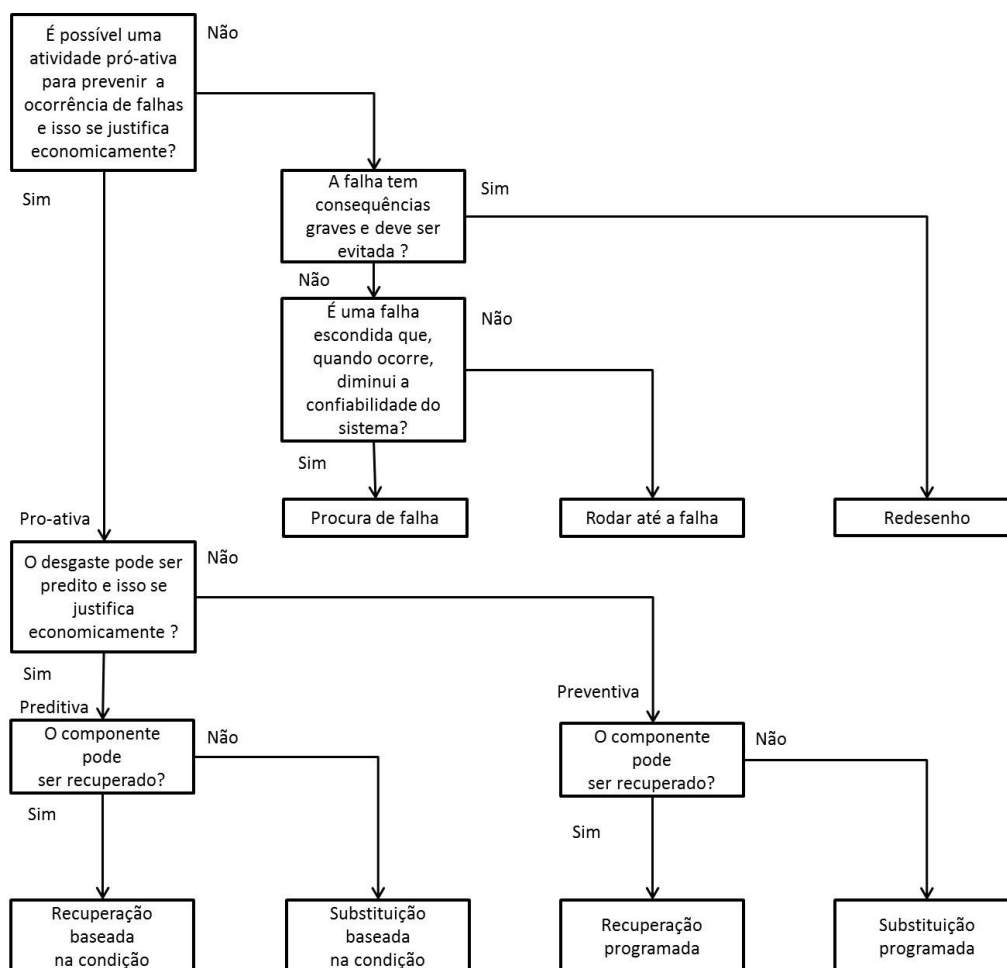
Em qualquer organização, os ativos são necessários para produzir produtos ou prestar serviços e podem ser definidos como componentes ou dispositivos de hardware eletrônico ou mecânico, produtos de software ou sistemas ou processos de fabricação. A manutenção tem como objetivo melhorar a confiabilidade dos ativos em uma organização garantindo que estejam disponíveis para executar funções específicas, quando necessárias, de uma forma economicamente viável (GULATI, 2012).

Em alguns casos, a manutenção é necessária para aumentar a eficácia operacional, receitas e satisfação dos clientes, ao mesmo tempo em que reduzem os custos de suporte, tornando-se um dos maiores desafios que as empresas de produção enfrentam nos dias atuais. Para isso, é necessário alinhar a estratégia de manutenção com a logística e, também, manter-se atualizado com as melhores práticas atuais (KOTHAMASU; HUANG; VERDUIN, 2009).

O diagrama apresentado na Figura 6 pode ser utilizado no auxílio para definição da atividade de manutenção adequada a cada item e seu respectivo modo de falha, de modo que a primeira questão é verificar se é possível antecipar falhas e, em caso positivo, encaminhar para atividades preditivas ou preventivas. Contudo, muitas vezes, a predição não pode ser feita, devido à impossibilidade ou alto custo

das medições ou avaliações associadas a esta e, neste caso, a recomendação é o uso de manutenção preventiva, quando o reparo ou a substituição são feitos a intervalos predefinidos (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

Figura 6 – Diagrama de decisão referente à manutenção.



Fonte: FOGLIATO e RIBEIRO (2009).

A gestão da manutenção passou a receber mais atenção nos últimos anos, e com razão, pois com a alta produtividade e alto custo de capital das modernas máquinas de produção, bem como o alto custo de manutenção dessas unidades que levam para uma abordagem com foco no aumento da eficiência da função de manutenção que inclui: a manutenção centrada na fiabilidade, a produtividade total da manutenção, manutenção baseada em condições, manutenção computadorizada baseada em sistemas de gestão, sistemas de auditoria entre outros (COETZEE, 1999).

No entanto, não existe uma metodologia universalmente aceita para a concepção de sistemas de manutenção. Organizações de produtos idênticas, mas

diferentes no avanço tecnológico e no tamanho da produção, podem aplicar sistemas de manutenção diferentes e os diferentes sistemas podem ser executados com sucesso. Assim, os sistemas de manutenção são projetados usando experiência e julgamento suportados por uma série de ferramentas e técnicas de decisão formal (HAROUN; DUFFUAA, 2009).

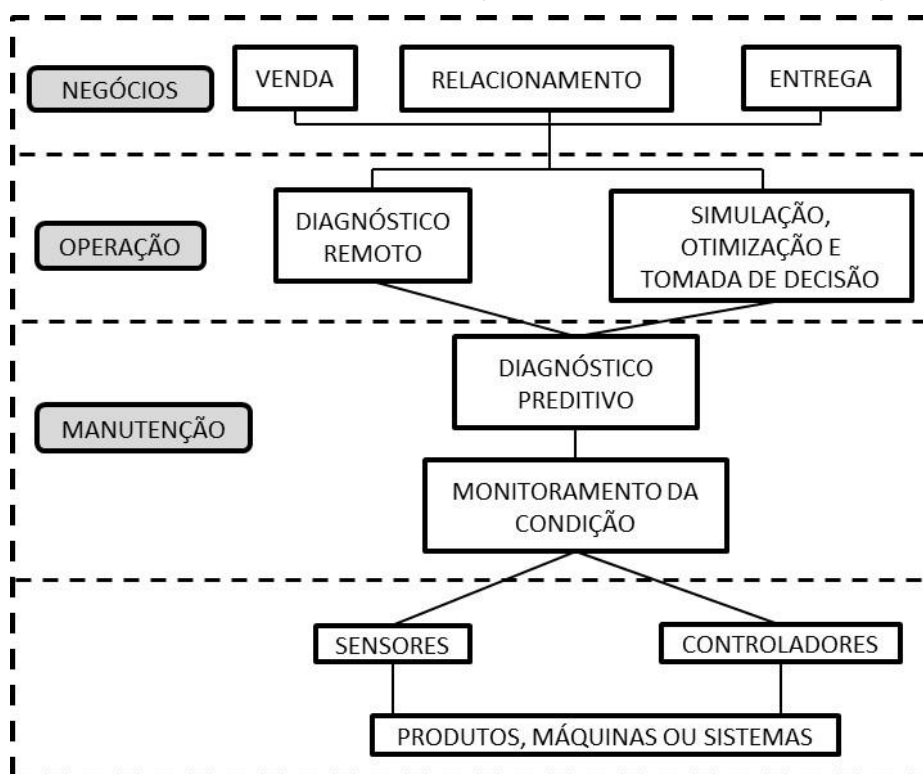
2.1.3 Tendências da Manutenção

A abordagem sobre a manutenção sofreu uma considerável mudança no último século, desde a década de 1940 quando era considerada como um custo inevitável, sendo que a única forma de manutenção era a corretiva, passando pelo uso de Pesquisa Operacional a partir da Segunda Guerra Mundial e, depois na década de 1970, quando novos modelos de gestão da manutenção surgiram, como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* - Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos), RCM (*Reliability Centered Maintenance* – Manutenção Centrada na Confiabilidade), TMP (*Total Productive Maintenance* - Manutenção Produtiva Total) e conceitos como SSM (*Strategic Maintenance Management* – Gestão Estratégica da Manutenção) (MURTHY; ATRENS; ECCLESTON, 2002).

No ano 2000, surgiu o termo “*e-maintenance*”, que se referia à manutenção de excelência na literatura. Entretanto, este termo passou a ter o significado de integração das tecnologias de informação e comunicação dentro das estratégias de manutenção para enfrentar novas necessidades emergentes de formas inovadoras de suporte à produção e negócios (MULLER et al., 2008).

Uma visão desta integração de tecnologias aplicadas na manutenção dentro de uma empresa é apresentada na Figura 7:

Figura 7 – Visão da integração de tecnologias na manutenção.



Fonte: Adaptado de MULLER (2008).

Mais recentemente, surgiu a proposta de implementação de IloT (*Industrial Internet of Things* ou Internet das Coisas na Indústria) na gestão de manutenção, com uso pela primeira vez, das redes industriais de comunicação para prever e diagnosticar problemas na produção. Isso proporcionou uma base estratégica para a manutenção preditiva e proativa na indústria, sendo um dos motivadores da IloT com uso de novos protocolos de comunicação como o Industrial Ethernet que é 100% compatível com o Ethernet já utilizado em outros setores dentro das indústrias (GILCHRIST, 2016).

Uma grande preocupação em relação à implementação de IloT é a interoperabilidade entre dispositivos e máquinas que usam protocolos diferentes e têm arquiteturas diversas. Para minimizar os problemas destas diferenças, a adoção de novos padrões deve promover a interoperabilidade e o desenvolvimento de arquiteturas comuns.

No mesmo período em que foi proposta a IloT, surgiu em 2013, na Alemanha, uma iniciativa nacionalista denominada INDÚSTRIE 4.0 que tinha por objetivo alavancar a indústria alemã em um patamar diferenciado em termos de tecnologia e comunicação.

O termo "Indústria 4.0" representa a quarta revolução industrial. Enquanto a Terceira revolução estava focada na automação de máquinas e processos únicos, a "Indústria 4.0" se concentra na digitalização de ponta a ponta de todos os recursos físicos e na integração em ecossistemas digitais com parceiros de cadeia de valor. Um exemplo desta "indústria inteligente" é a manutenção preditiva dos ativos principais, usando algoritmos preditivos para otimizar a programação e planejamento de reparo e manutenção e, com isso, melhorar o tempo de atividade dos ativos, permitindo assim, uma manutenção mais assertiva e de menor custo (PCW, 2016).

Em uma iniciativa global, o *Industrial Internet Consortium* (consórcio industrial da internet) patrocina uma série de projetos colaborativos pioneiros, chamados 'bancos de teste', que se concentram em diferentes etapas do processo de fabricação. Neste contexto, muitas demandas diferentes são colocadas em máquinas em termos de engenharia, modularidade, comunicação, análise de dados e sistemas inteligentes. A análise de dados em particular pode ser baseada em condições *on-line* e *off-line*, manutenção preditiva, reconhecimento de padrões, otimização de máquina ou arquivamento de dados de processo por longo prazo (GILCHRIST, 2016).

Assim, a tendência é de que a manutenção continue passando por novas transformações com uso de novas tecnologias de comunicação e recursos computacionais.

2.2 MANUTENÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

O primeiro dínamo construído por Werner Siemens, em 1866, possuía uma potência de 30 W e uma rotação de 1.200 rpm, provando que a tensão necessária para o magnetismo podia ser retirada do próprio enrolamento do rotor e, também, poderia funcionar como motor, desde que aplicada corrente contínua em seus bornes (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2013).

O motor elétrico tornou-se um dos mais notórios inventos do homem ao longo de seu desenvolvimento tecnológico por ser uma máquina de construção simples, de baixo custo, versátil e não poluente, fazendo com que tenha um papel relevante no mundo de hoje (WEG, 2016).

O princípio de funcionamento dos motores não mudou significativamente até os dias atuais, apenas o tamanho e os materiais aplicados apresentaram significativa

evolução. Enquanto um motor trifásico, em 1891, tinha uma relação peso/potência de 66kg/kW, em 1984, esta relação era de 6,8kg/kW (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2013).

A deterioração do equipamento elétrico é normal, entretanto uma manutenção preventiva eficaz deve ser desenvolvida para realizar quatro funções básicas: manter o equipamento limpo, seco e selado, e minimizar o atrito. Água, poeira, temperatura ambiente alta ou baixa, alta umidade, vibração, qualidade dos componentes e inúmeras outras condições podem afetar o funcionamento adequado do equipamento elétrico (KOVAL, 1998).

Tradicionalmente, o procedimento de manutenção de máquinas elétricas é feito naturalmente pelo reparo ou substituição de equipamentos após uma avaliação de seu estado, conhecido como manutenção corretiva. No entanto, este procedimento tem perdas econômicas consideráveis, levando as empresas a pensar numa manutenção mais adequada destes equipamentos, o que pode contribuir significativamente para o seu desempenho geral (TOUHAMI et al, 2013).

Nas condições de máxima exigência de carga de um motor elétrico e temperatura ambiente (40°C), a vida útil mínima esperada, tanto para os isolantes como para os mancais, é de 20.000 horas em regime contínuo, porém, como na maioria das aplicações as condições de funcionamento não são extremas, a vida útil (excetuando a dos mancais) normalmente é superior a 10 anos para motores de potências menores e 30 anos para motores de potências maiores, desde que haja um bom e eficiente sistema de manutenção preventiva (ELETROBRÁS, 2009).

Os motores elétricos são um componente crítico de processos industriais, normalmente integrados a outras máquinas ligadas aos processos industriais, fornecendo recurso essencial para a produção (BENBOUZID, 2000). São os mais populares na indústria devido a sua confiabilidade e simplicidade de construção, mas ainda que sejam confiáveis, eles são sujeitos de algum modo a falhas mecânicas ou elétricas (SINGH; KAZAZ, 2003).

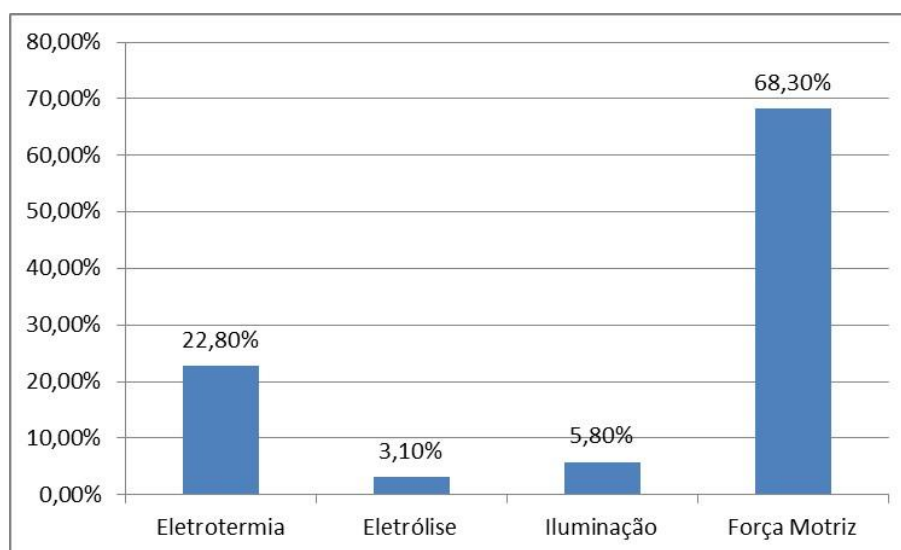
Na escolha de um motor elétrico, várias perguntas devem ser respondidas em relação aos requisitos de alimentação de entrada e disponibilidade, interfaces mecânicas e o acoplamento à carga, natureza da carga, temperatura e ambiente de trabalho, bem como proteções contra incêndio e ferimentos pessoais (TOLIYAT; KLIMAM, 2004).

A manutenção preventiva elétrica deve ser realizada regularmente, conforme determinado pela inspeção e análise de quaisquer falhas que possam ocorrer verificando se o equipamento elétrico é mantido limpo, seco, selado e com atrito mínimo por inspeção visual (KOVAL, 1998).

Como a espinha dorsal da indústria moderna, os motores elétricos desempenham um papel importante na fabricação, transporte, entre outros e uma falha pode causar muitas perdas, o que faz com que o diagnóstico de falhas desses motores seja muito importante para a operação segura e prevenção de paradas (ZHONGMING; BIN, 2000).

Em pesquisa realizada pela PROCEL sobre consumo de energia elétrica dos equipamentos na indústria, com dados de 2005, apresenta-se a distribuição deste consumo por uso final apresentado no Gráfico 1 (PROCEL, 2008):

Gráfico 1 – Distribuição do consumo de energia por uso final na indústria de alta tensão no Brasil.

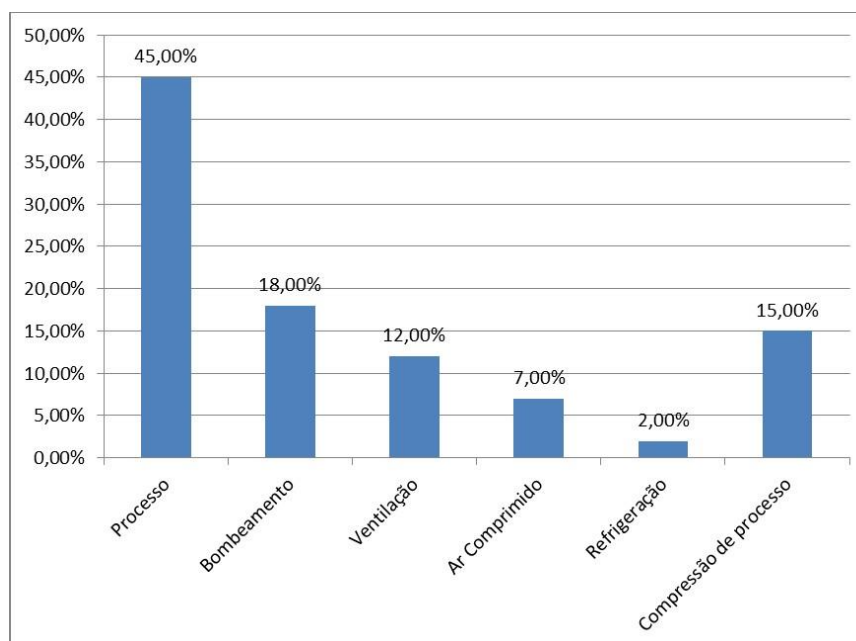


Fonte: Adaptado de PROCEL (2008).

Os motores representam uma parcela significativa do consumo de energia no setor industrial, o que demonstra sua importância no processo produtivo.

Para melhor interpretar e identificar a finalidade de utilização desses motores, a mesma pesquisa apresenta o consumo de energia destes motores pela sua aplicação na indústria, conforme o Gráfico 2 (PROCEL, 2008):

Gráfico 2 – Distribuição do consumo de energia de motores na indústria de alta tensão no Brasil.



Fonte: Adaptado de PROCEL (2008).

Motores elétricos, como quaisquer outras máquinas rotativas, estão sujeitos a falhas, desgaste e envelhecimento e se nenhuma providência for tomada durante o processo de envelhecimento, eles vão falhar em algum ponto no tempo degradando as condições ambientais e operacionais (LOISELLE; XU; VOLOH, 2015). Com isso, a manutenção preditiva de motores elétricos tornou-se uma área com crescente relevância nas indústrias, hoje em dia. Mais especificamente, as condições de campo de um motor de indução é um campo de interesse especial, devido ao uso generalizado destas máquinas da indústria (PICAZO-RÓDENAS et al., 2014).

Historicamente, os motores elétricos não foram uma das principais causas de inatividade nas plantas, porém, com o envelhecimento das plantas, houve um aumento crescente de problemas nestes equipamentos, que levaram ao surgimento de técnicas disponíveis para determinar a saúde dos motores elétricos, permitindo uma utilização mais inteligente do equipamento (TOLIYAT; KLIMAM, 2004).

Várias técnicas de monitoramento “off-line” são utilizadas pela indústria, mas com a produção contínua em muitos setores da indústria onde a interrupção de uma única unidade pode levar a perdas econômicas elevadas, várias técnicas de monitoramento “on-line” das condições de funcionamento têm sido utilizadas com objetivo de uma alta confiabilidade baseada no monitoramento contínuo das

condições como corrente e vibração para a manutenção preventiva (NUSSBAUMER; WOLBANK; VOGELSBERGER, 2013).

Um aviso adequado de falhas incipientes por meio de monitoramento de condições tem algumas vantagens importantes, tais como prevenção de desligamentos dispendiosos, tempo suficiente para o encerramento controlado do processo, redução dos custos de tempo de interrupção e reparos, diagnóstico de necessidades atuais de manutenção, além de uma operação mais segura dos motores (DUQUE-PEREZ et al., 2012).

2.2.1 Principais Variáveis para Monitoramento de Motores Elétricos

Os fatores que afetam o comportamento dos motores elétricos podem ser agrupados em problemas de origem elétrica ou magnética e problemas de origem mecânica, e dada à importância de conhecer as fontes destes distúrbios para o diagnóstico que levam às falhas, vários estudos que buscam as possíveis características que levam às falhas têm sido realizados (LAMIN FILHO; PEDERIVA; BRITO, 2014).

O Quadro 1 apresenta os componentes do motor elétrico que apresentaram falhas, com base numa pesquisa realizada pelo *Motor Reability Working Group*, em um grupo de 1.141 motores, diante das falhas apresentadas.

Quadro 1 – Componentes que apresentam falha.

Componente	Total
Rolamento	166 ocorrências
Enrolamento	97 ocorrências
Eixo	19 ocorrências
Dispositivo externo	18 ocorrências
Escovas ou anéis	16 ocorrências
Rotor	13 ocorrências
Outros	51 ocorrências

Fonte: Adaptado de BELL et al. (1985).

O Quadro 2 apresenta as principais causas iniciais das falhas ocorridas em motores elétricos, onde os resultados são muito próximos ao de pesquisa realizada no ano de 1973, quando os três principais iniciadores de falhas eram: ruptura

mecânica, superaquecimento e quebra de isolamento, ou mais de uma combinadas, associadas à deterioração normal pelo tempo de uso.

Quadro 2 – Iniciadores de falha de um motor elétrico.

Iniciador da falha	Percentual
Quebra mecânica	33,1 %
Superaquecimento	13,2 %
Quebra de isolamento	12,3 %
Falhas elétricas	7,6 %
Sobre tensão transitória	1,5 %
Motor parado	0,9 %
Outras	31,4 %

Fonte: Adaptado de BELL et al. (1985).

O Quadro 3 apresenta os principais contribuintes de falhas em motores elétricos de acordo com a mesma pesquisa.

Quadro 3 – Contribuintes de falha em motores elétricos.

Contribuinte da falha	Percentual
Deterioração normal pelo tempo	26,4 %
Alta vibração	15,5 %
Pouca lubrificação	15,2 %
Umidade anormal	5,8 %
Sobrecarga persistente	4,3 %
Produtos químicos agressivos	4,2 %
Pouca ventilação	3,9 %
Alta temperatura ambiente	3,0 %
Tensão anormal	1,5 %
Frequência anormal	0,6 %
Outros	19,7 %

Fonte: Adaptado de BELL et al. (1985).

Muitas técnicas de diagnóstico industrial de falha em motores de indução existentes atualmente contam com a análise das grandezas como corrente ou vibração (PICAZO-RÓDENAS et al., 2014).

O Quadro 4 apresenta os fatores ocultos que causam falhas em motores elétricos de acordo com a mesma pesquisa.

Quadro 4 – Fatores ocultos.

Fatores ocultos que causam falha	Percentual
Manutenção inadequada	21,4 %
Componente defeituoso	20,1 %
Má instalação	12,9 %
Erro do operador	6,8 %
Proteção física inadequada	6,1 %
Proteção elétrica inadequada	5,8 %
Incompatibilidade de equipamentos	4,9 %
Fatores externos	3,9 %
Operação imprópria	3,6 %
Manuseio impróprio	0,6 %
Outros	13,9 %

Fonte: Adaptado de BELL et al. (1985).

Em geral, estas técnicas de monitoramento de condições se concentraram na detecção de modos de falhas específicas em um de três componentes de motor elétrico: o estator, o rotor ou os rolamentos. Por muitos anos, foi utilizado o monitoramento das condições térmicas e de vibração para motores elétricos, mas a maior parte da pesquisa recente tem sido direcionada para o monitoramento das variáveis elétricas do motor para verificação das condições de funcionamento (BENBOUZID, 2000).

Os programas de manutenção preditiva de motores elétricos devem incluir várias técnicas para monitorar a sua condição, e entre essas técnicas, os dois mais clássicos são, provavelmente, análise de vibração e análise de corrente elétrica. Infelizmente, em ambos os casos desvantagens inerentes, tornam difícil a sua utilização *in loco* em plantas industriais (LAMIN FILHO, PEDERIVA, BRITO, 2014).

Muitas das técnicas disponíveis exigem conhecimento para distinguir uma condição de funcionamento normal de um modo de falha potencial, isso ocorre porque, vibração e corrente, por exemplo, podem resultar de várias fontes, incluindo aquelas relacionadas a condições normais de operação (BENBOUZID, 2000).

A corrente do motor é uma quantidade fácil de medir de forma não invasiva e o software necessário para o seu processamento e análise é bastante simples e com carga computacional reduzida. O monitoramento de condição baseado em vibração também está presente na indústria, devido à sua capacidade para diagnosticar muitas falhas com origem mecânica. No entanto, muitas vezes, requer a instalação de

sensores e transdutores (acelerômetros), um fato que nem sempre é possível, sem perturbar a operação da máquina. Em qualquer caso, nem análise de corrente, nem vibração permitem o diagnóstico de todas as falhas possíveis de ocorrer em motores de indução. Existem alguns defeitos (por exemplo, um curto-circuito do estator) que são difíceis de serem diagnosticados com análise de vibração e corrente, enquanto falhas do rolamento, muito comuns nos motores de indução, podem ser detectadas por monitorização de sinais de vibração que nem sempre estão disponíveis dentro das indústrias. (PICAZO-RÓDENAS et al., 2014).

A maioria dos tipos de falhas dos motores elétricos pode ser evitada ou, pelo menos mitigada, através de detecção de falhas e intervenção precoce associada à manutenção adequada. Mas para isso, são necessárias informações corretas e precisas sobre as condições de funcionamento do motor, e que componentes do motor necessitam serem reparados ou substituídos. Embora haja algumas variações em dados de falhas estatísticas, o que é sabido é que muitas falhas são de natureza térmica e, portanto, monitorar as condições e desempenho do motor, particularmente monitorização da temperatura, pode otimizar a vida útil do motor. É importante utilizar tempo real ou informação histórica disponível a partir do monitoramento do motor, seja essa informação elétrica ou ambiental, assim como dados de desempenho mecânico (LOISELLE; XU; VOLOH, 2015).

Com isso, a possibilidade de monitoramento das condições de funcionamento dos motores elétricos pode contribuir para que a manutenção destes equipamentos possa ocorrer de maneira adequada.

O monitoramento de condição é essencial para detectar condições degradantes de motor, antes que isso evolua para as faltas permanentes e cause desligamentos do sistema. Ao usar as técnicas de monitoramento continuado da condição do motor e avaliação das condições normais durante o funcionamento, permite que se tenha um monitoramento abrangente e não somente um monitoramento baseado em tempos, tem-se os seguintes benefícios (LOISELLE; XU; VOLOH, 2015):

- aumento da confiabilidade;
- produtividade aumentada;
- redução de paradas de processos inesperados;
- redução da indisponibilidade do sistema;
- programações otimizadas de manutenção preventiva;

- melhor gerenciamento de peças de reposição;
- diminuição de custos de manutenção.

O diagnóstico preciso e manutenção no tempo correto, direcionada melhora na disponibilidade de motores podem ajudar a alcançar grande economia de custos (LOISELLE; XU; VOLOH, 2015).

As falhas de isolamento rotor e do estator normalmente levam anos ou mesmo décadas para progredir para a insuficiência, e este longo período de tempo, entre o início de um processo de falha e quando a falha ocorre na verdade, promove a necessidade de monitoramento para antecipar quando poderá ocorrer a falha. Ao longo dos últimos 50 anos, e, particularmente, na última década, avanços significativos foram feitos no monitoramento, tanto com motores desligados ou funcionando normalmente, de tal forma que esta combinação de testes de diagnóstico e monitoramento do isolamento de rotores e estatores permitem perceber a maioria (mas não todos) dos sinais de envelhecimento relacionados com processos de falha dos motores (STONE, 2013).

Assim, as condições de funcionamento do motor elétrico, baseadas na avaliação contínua de grandezas como tensão, corrente e vibração indicam as suas condições de uso e podem indicar a necessidade de manutenção.

2.2.2 Padrões Indicativos para Predição de Falhas em Motores Elétricos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua norma NBR-5462 - Confiabilidade e Manutenibilidade (1994) define a garantia de confiabilidade e manutenibilidade como a implementação de um conjunto apropriado de ações planejadas e sistemáticas para que se tenha confiança de que um item atenderá a requisitos de confiabilidade e manutenibilidade, incluindo uma avaliação contínua da adequação e efetividade das funções e atividades, a fim de deflagrar medidas corretivas e de realimentação quando necessárias e, em cada caso particular, a garantia inclui planos e ações para prover confiança, através de verificações detalhadas, auditorias e avaliações.

O diagnóstico e proteção de falhas é tão antigo quanto os próprios motores elétricos, quando fabricantes e usuários inicialmente confiaram em proteção simples, como sobrecorrente, sobretensão, falha à terra, entre outros e que, por muito tempo, foi confiável e suficiente. Porém, à medida que as tarefas executadas por estas

máquinas se tornaram cada vez mais complexas, melhorias surgiram no campo do diagnóstico de falhas de tal forma que agora é muito importante esse diagnóstico no seu início, uma vez que o tempo de inatividade não programado pode comprometer prazos e causar perdas financeiras consideráveis (NANDI; TOLIYAT; LI, 2005).

Um plano de manutenção adequado de motores elétricos deve ser baseado em algumas informações como (KELJIK, 2013):

(a) a importância do motor para a produção, ou seja, se o motor falhar a produção pode parar ou ficar lenta;

(b) a taxa de utilização do motor durante a produção;

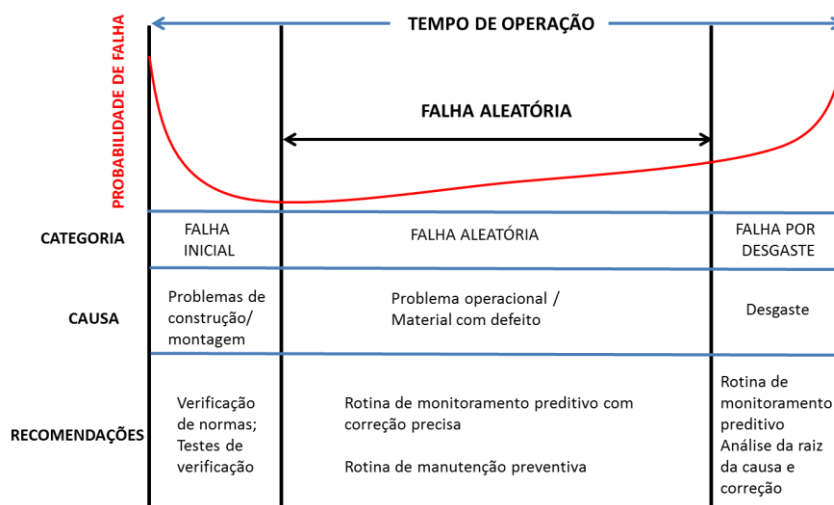
(c) a natureza do serviço realizado pelo motor; e,

(d) o ambiente de trabalho do motor.

Uma estratégia que melhorou a operação de manutenção foi a técnica de detecção de falhas iniciais. Esta metodologia permite o monitoramento de tendências e previsão de falhas. Dessa forma, sistemas especialistas podem ser adaptados à máquina para interpretação de dados e monitoramento das condições, permitindo aos técnicos uma análise das condições (RAD; TORABIZADEH; NOSHADI, 2011).

A manutenção preditiva de motores com ferramentas de monitoramento das condições das máquinas auxilia na identificação de causas, otimizando a tarefa de manutenção, podendo modificar a curva da “banheira” ou o perfil de falha normal de máquinas, representado na Figura 8.

Figura 8 – Curva da “banheira”.



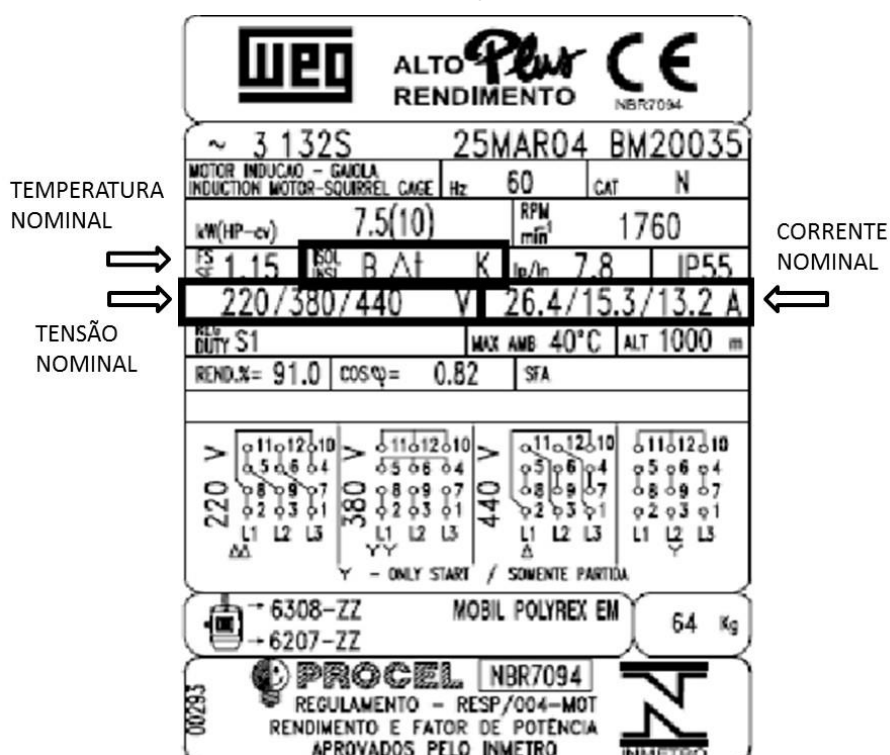
Fonte: Adaptado de TOLIYAT e KLIMAN (2004).

Ainda com relação à manutenção preditiva, busca-se detectar uma potencial falha antes dela se tornar uma falha funcional, que pode ser relacionada com a exposição ao estresse da máquina ou baseada nas condições de funcionamento. Embora muitos modos de falha não sejam relacionados à idade, a maioria deles dá algum tipo de aviso de que a falha está prestes a ocorrer, de tal modo que muitas vezes é possível detectar que a falha está ocorrendo durante os estágios finais de deterioração, permitindo que medidas sejam tomadas para evitar que ocorra a falha completa ou evitar as consequências (DUFFUAA; RAOUF, 2015).

Para o bom funcionamento do motor elétrico, deve ser verificada a placa de identificação do motor, que contém as informações que determinam as suas características construtivas e de desempenho, definidas pela NBR-7094 (WEG, 2016).

A Figura 9 apresenta uma placa de identificação de um motor elétrico. Nela estão informações importantes como tensão e corrente de trabalho, bem como a temperatura nominal máxima que o mesmo suporta, sem danos.

Figura 9 – Placa de identificação de um motor elétrico.



Fonte: WEG (2005).

Quando estas condições de operação para as quais o motor foi construído não são respeitadas, falhas podem acontecer ou ainda diminuir a vida útil do motor.

Monitorar estas condições de funcionamento do motor pode indicar que seu funcionamento pode não estar adequado e, assim, prever a necessidade de manutenção ou verificação da sua condição de funcionamento.

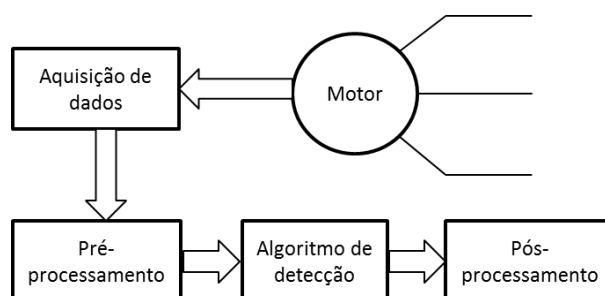
2.2.3 Métodos de Diagnósticos de Motores Elétricos

A detecção de falhas em motores elétricos e diagnóstico rápido permitem sua preservação e uma manutenção programada, traduzindo-se num aumento de desempenho e confiabilidade associado à redução com custos de manutenção. Enquanto a detecção visa encontrar a falha, o diagnóstico visa descobrir o tipo de falha e sua respectiva causa (CHOW, 2000).

Métodos, supervisão e gerenciamento de falhas são normalmente embasados por processos de detecção e diagnósticos que se fundamentam, respectivamente, pela coleta de variáveis mensuráveis por meio de instrumentos e pelo seu acompanhamento realizado pelos seus respectivos operadores. Num processo automatizado, não deve limitar-se apenas à medição de variáveis em tempo real, mas é necessário o conhecimento analítico do processo e a análise da evolução das variáveis. Essa medida deve ser realizada por profissional com vasta experiência e conhecimento heurístico (ISERMANN, 2006).

Um sistema típico de diagnóstico de falha do motor de indução *on-line* é ilustrado na Figura 10 e consiste em quatro partes: aquisição de dados, pré-processamento de dados, algoritmo de detecção e pós-processamento (ZHONGMING; BIN, 2000).

Figura 10 – Sistema típico de diagnóstico de falha de motor elétrico.



Fonte: ZHONGMING; BIN (2000).

Os principais métodos de detecção para identificar as falhas de um motor elétrico são listados a seguir (ZHONGMING; BIN, 2000):

- Monitoramento de vibração;
- Análise de assinatura da corrente do motor (MCSA);
- Monitoramento de campo eletromagnético usando bobinas de busca;
- Análise química (resíduos de óleo lubrificante, gás refrigerante);
- Medição de temperatura;
- Medição infravermelha;
- Medição do ruído acústico;
- Monitoramento de emissões de radiofrequências;
- Medição de descarga parcial.

Algumas das abordagens, principalmente as mais utilizadas são comparadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Comparação entre as técnicas de detecção de falhas.

Método	Falha que pode ser detectada			
	Isolamento	Enrolamento de estator	Enrolamento de rotor	Dano físico
Vibração	Não	Não	Sim	Sim
Análise de corrente	Não	Sim	Sim	Sim
Análise química	Sim	Sim	Não	Não
Medição de descarga parcial	Sim	Não	Não	Não

Fonte: ZHONGMING; BIN (2000).

Vários métodos de detecção de falhas e diagnósticos têm sido desenvolvidos envolvendo diferentes grandezas físicas, cada um deles com suas vantagens e desvantagens. Além disso, os métodos de detecção e diagnósticos de falhas se diferenciam pela forma como monitoram a grandeza física, podendo ser não invasivos, ou seja, sem a necessidade de parada do motor ou desmonte do mesmo, ou invasivos, quando esse tipo de ação se faz urgente para a aquisição da informação necessária (BALLAL et al., 2007).

2.2.3.1 Padrão indicativo de falha por variação de corrente elétrica

O método clássico para diagnóstico de falha de motor é conhecido como análise de sinal de corrente de motor (MCSA - *Motor Current Signature Analysis*) e baseia-se na análise da forma de onda da corrente demandada pelo motor durante o funcionamento em estado estacionário e na avaliação das amplitudes dos harmônicos

ligados às diferentes falhas, como danos no rotor que elevam os harmônicos de corrente (ANTONINO-DAVIU et al., 2016).

A corrente absorvida pelo motor é uma indicação de carga, bem como a condição dos enrolamentos e potência do motor, desde a sua partida ou entrada em funcionamento e a análise do sinal de corrente indicam a condição do sistema mecânico do motor (LOISELLE; XU; VOLOH, 2015).

A corrente nominal de um motor é utilizada para dimensionamento dos sistemas básicos de proteção, que também levam em conta a capacidade dos condutores que irão alimentá-lo. A sobrecorrente em um motor elétrico é um indicativo de sobrecarga (MAMEDE FILHO, 2013).

2.2.3.2 Padrão indicativo de falha por variação de tensão

Quando a tensão medida estiver disponível, ela pode ser utilizada para monitorar a condição da alimentação de tensão (faseamento e equilíbrio), juntamente com a proteção e monitorização adicional, além de funções como: fator de potência e parâmetros de potência, curvas de tensão de sobrecarga do motor, entre outros (LOISELLE; XU; VOLOH, 2015).

Os motores elétricos podem não funcionar satisfatoriamente, caso a tensão de alimentação tenha uma variação de mais ou menos 10% de sua tensão nominal, o que pode acontecer facilmente, se cargas monofásicas forem ligadas ou desligadas num sistema desigualmente distribuído (TOLIYAT; KLIMAN, 2004; MAMEDE FILHO, 2013).

Com a redução da tensão de alimentação de um motor, abaixo das condições nominais previstas pelo fabricante, algumas características podem ser observadas (MAMEDE FILHO, 2013):

- aumento da corrente, que pode levar à atuação do sistema de proteção por corrente do motor, levando a desligamentos intempestivos e à parada do processo produtivo;
- aumento do fator de potência; e,
- diminuição da velocidade, acarretando deficiências indesejáveis de ventilação e aumento de temperatura do motor.

Por outro lado, o aumento na tensão de alimentação de um motor elétrico acima daquelas condições nominais previstas pelo fabricante, algumas características podem ser observadas (MAMEDE FILHO, 2013):

- a corrente diminui;
- o fator de potência diminui o que leva à perda de eficiência energética, tornando mais onerosa a conversão energia elétrica x energia mecânica; e,
- a velocidade aumenta, melhorando as condições de ventilação.

Conforme as normas da NBR-17094 (2008), para os motores de indução, as combinações das variações de tensão e de frequência são classificadas como Zona A ou Zona B, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Limites de variação de tensão e frequência.



Fonte: ABNT NBR 17094 (2008).

Um motor deve ser capaz de desempenhar sua função principal continuamente na Zona A, entretanto, pode ter suas características de desempenho comprometidas, caso tensão e frequência nominal apresentem alguns desvios, levando ao aumento de temperatura.

Na Zona B, um motor também deve ser capaz de desempenhar sua função principal, mas pode apresentar desvios superiores àqueles da Zona A no que se refere às características de desempenho, à tensão e frequência nominais. As elevações de

temperatura podem ser superiores às verificadas com tensão e frequência nominais, de modo que o funcionamento prolongado na periferia da Zona B não é recomendado.

Além disso, na NBR-5410 define como limite de queda de tensão para motores elétricos $4\% + 0,005V$ por metro até o limite de 4,5%. O aumento da tensão faz com que as proteções convencionais dos motores não sejam suficientes para desligar o motor da rede em caso de necessidade, colocando, desta forma, o motor, todo o processo e pessoas envolvidas, em risco (MAMEDE FILHO, 2013).

2.2.3.3 Padrão indicativo de falha por variação de vibração

Na indústria, a análise de vibração é, provavelmente, a técnica diagnóstica mais difundida e tipicamente empregada para diagnosticar falhas de origem mecânica, sendo necessário acesso aos motores para instalar sensores (ANTONINO-DAVIU et al., 2016).

A vibração do motor é uma combinação de problemas mecânicos e magnéticos e o problema mais comum é a mudança na abertura de ar, desequilíbrio, desalinhamento, frouxidão, falhas no rolamento ou, ainda, uma barra de rotor quebrado. A vibração pode ser detectada usando sensores de vibração ou análise de espectro (LOISELLE; XU; VOLOH, 2015).

A vibração pode ser definida como o movimento de uma massa em relação ao seu ponto de repouso, sob a ótica de todas as posições de volta ao ponto de repouso, e o tempo que este movimento leva é seu período, enquanto o número de repetições deste ciclo em um determinado tempo é a sua frequência e a gravidade da vibração é determinada pela amplitude (DUFFUAA; RAOUF, 2015).

Quando uma peça tem alteradas suas características mecânicas por desgaste ou trinca, um componente de frequência do sistema será alterado. Folgas ou desalinhamentos de rolamentos ou mancais de máquinas rotativas refletem-se na alteração da frequência de vibração ou no surgimento de novas (MARÇAL; SUSIN, 2005).

A premissa fundamental na qual se baseia a análise de vibração como técnica aplicada à manutenção industrial é de que cada componente ou cada tipo de deficiência mecânica de uma máquina em operação produz uma vibração de frequência específica que, em condições normais de funcionamento, alcança uma amplitude máxima determinada. Assim, é possível medindo-se e analisando-se a vibração, se estabelecer

sua origem, identificar cada componente da máquina e o tipo de falha que a está gerando, além de avaliar o estado mecânico do componente que a produz ou a gravidade da deficiência detectada (MARÇAL; SUSIN, 2005).

A medição da amplitude da vibração no motor elétrico e nos componentes acoplados ao mesmo permite avaliar, por comparação com valores limites, previamente estabelecidos, se a vibração corresponde a um funcionamento normal ou anormal e o grau de importância da falha detectada (MARÇAL; SUSIN, 2005).

Mesmo sendo, provavelmente, a análise de vibração a técnica mais difundida na indústria, geralmente utilizada para identificar falhas de origem mecânica, esta técnica tem algumas desvantagens como a necessidade de acessar o motor para instalar sensores adequados (o que pode ser uma restrição crucial em aplicações onde a máquina não é facilmente acessível como motores submersos ou motores em gabinetes especiais). Além disso, esta técnica carece de confiabilidade ao diagnosticar falhas de origem elétrica (ANTONINO-DAVIU et al., 2016).

O monitoramento de vibração é realizado comparando-se as características de vibração medidas quando a máquina esta funcionando normalmente (DUFFUAA; RAOUF, 2015).

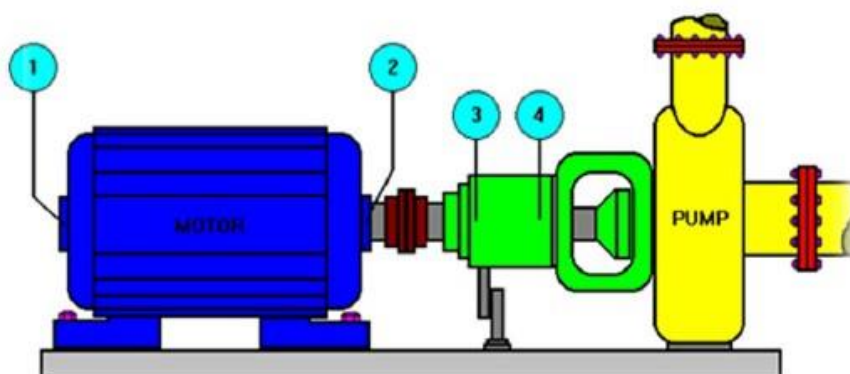
As técnicas de análise de vibração podem ser utilizadas para monitorar equipamentos mecânicos que giram como caixas de engrenagens, rolamentos, motores elétricos, bombas, ventiladores, turbinas, entre outros que tenham ação dinâmica (DUFFUAA; RAOUF, 2015).

Para a análise da vibração como condição monitorada, devem ser levados em conta três princípios: todas as máquinas girando vibram; a vibração aumenta ou diminui à medida que a condição do equipamento se deteriora; e, a vibração pode ser medida com precisão e interpretada (MAZUR; KAY; MAZUR, 2015).

As causas fundamentais de vibração são: forças que mudam de sentido com o tempo, isto é, rotação desequilibrada; forças que mudam em amplitude ou intensidade com o tempo, isto é, problemas nos motores; e, alteração na força de atrito (MAZUR; KAY; MAZUR, 2015).

Um exemplo de um sistema simples de monitoramento da condição de um conjunto motor/bomba por vibração é representado na Figura 12. Os principais pontos onde os sensores de vibração podem ser instalados estão ilustrados na figura e referem-se aos extremos do eixo do rotor e aos extremos do mancal. (MAZUR; KAY; MAZUR, 2015).

Figura 12 – Indicação dos pontos de instalação dos sensores de vibração.



Fonte: MAZUR; KAY; MAZUR (2015).

Estes sensores da Figura 12 podem ser acelerômetros monitorando o espectro de frequências de vibração da máquina e, estas amplitudes de frequência, podem indicar anomalias e serem usadas como gatilhos para manutenção preditiva, indicando condições tais como desequilíbrio, desgaste mecânico e desgaste do rolamento (MAZUR; KAY; MAZUR, 2015).

2.2.3.4 Padrão indicativo de falha por variação de temperatura

O aumento admissível da temperatura é o fator limitante na carga do motor e deve ser considerado na escolha do tamanho do referido motor, ou classificação, para uma aplicação específica já que o aumento de carga leva ao aumento de temperatura permitido, que quando é excedido, diminui a vida útil do isolamento do motor levando a falhas (TOLIYAT; KLIMAN, 2004).

A temperatura é um dos parâmetros mais monitorados e indicativos da condição do motor, ainda que o monitoramento da temperatura absoluta forneça um valor limitado para diagnóstico. Uma vez que o motor esteja em operação, várias temperaturas continuam a subir até que o equilíbrio térmico seja atingido: o calor é igual à dissipação do calor produzido por uma dada condição de carga. Isto produz resultados como calor de perdas do rotor e do estator, atrito e ventilação. No entanto, este equilíbrio pode ser alterado devido a fatores como a degradação do sistema de arrefecimento ou condições de sobrecarga (LOISELLE; XU; VOLOH, 2015).

Uma regra prática útil é a de que a cada 10°C de elevação acima da temperatura nominal de trabalho de um motor elétrico, a sua curva de vida é reduzida pela metade, mesmo com as construções de motores já tendo uma margem entre a temperatura nominal de trabalho e a temperatura máxima suportada (LOISELLE; XU; VOLOH, 2015; TOLIYAT; KLIMAN, 2004).

A NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) em acordo com o IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) *Standards* 112 e 114, especifica designações de letras para as classificações de temperatura de isolamento do motor. Estas classificações de temperatura de isolamento são designadas por Classes representadas por letras e estão apresentadas no Quadro 6, todas baseadas numa temperatura ambiente máxima de 40°C e altitude menor que 1000 metros e são determinados pelo "método de resistência", no qual a resistência dos enrolamentos é medida com uma ponte após o motor ter atingido o equilíbrio térmico sob carga. Se a temperatura ambiente passar de 40°C, as temperaturas de referência de cada classe passam a 50°C, 65°C, 90°C e 115°C, respectivamente (NEMA MG-1, 2004).

Quadro 6 – Classes dos motores.

Classe	Temperatura (°C)
A	60 - 65
B	80 - 85
F	105 - 110
H	120 - 135

Fonte: NEMA MG-1 (2004).

A vida útil de um motor depende quase exclusivamente da vida útil do sistema de isolamento dos enrolamentos, que é afetado por muitos fatores, como a umidade, as vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores, o mais importante é, sem dúvida, a temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados. Um aumento de 8 a 10 graus acima do limite da classe térmica na temperatura do sistema de isolamento pode reduzir a vida útil do enrolamento pela metade (WEG, 2016).

Quando a altitude de trabalho do motor for superior a 1.000 metros, a equação (1) deve ser utilizada para cálculo das temperaturas limite (NEMA MG-1, 2004) em que:

$$T_T = T_C \left[1 - \frac{(Alt - 1.000)}{10.000} \right] \quad (1)$$

T_T = Temperatura de trabalho [°C];

T_C = Temperatura da Classe [°C];

Alt = Altitude de trabalho [m].

A WEG apresenta uma tabela na qual relaciona a temperatura ambiente e altura em relação ao nível do mar onde o motor foi instalado, e a potência útil do motor, onde fica evidenciada a influência destes fatores no bom desempenho do motor. O Quadro 7 apresenta o fator de multiplicação da potência útil em função da temperatura ambiente em graus Celsius (°C) e da altitude em metros.

Quadro 7 – Fator de multiplicação em função da altura.

Temperatura em °C	Altura em metros (m)						
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
10	1,16	1,13	1,11	1,08	1,04	1,01	0,97
15	1,13	1,11	1,08	1,05	1,02	0,98	0,94
20	1,11	1,08	1,06	1,03	1,00	0,95	0,91
25	1,08	1,06	1,03	1,00	0,95	0,93	0,89
30	1,06	1,03	1,00	0,96	0,92	0,90	0,86
35	1,03	1,00	0,95	0,93	0,90	0,88	0,84
40	1,00	0,97	0,94	0,90	0,86	0,82	0,80
45	0,95	0,92	0,90	0,88	0,85	0,82	0,78
50	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,74
55	0,88	0,85	0,83	0,81	0,78	0,76	0,73
60	0,83	0,82	0,80	0,77	0,75	0,73	0,70

Fonte: WEG (2016).

Quando se fala da diminuição da vida útil do motor por temperaturas elevadas, não é a queima do isolante e o enrolamento destruído repentinamente, mas sim, da vida útil da isolação em termos de temperatura de trabalho, bem abaixo daquela em que o material se queima, referindo-se ao envelhecimento gradual do isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo o poder isolante, até que não suporte mais a tensão aplicada e produza o curto-circuito, enquanto a isolação tem uma duração praticamente ilimitada, se a sua temperatura for mantida abaixo do limite de sua classe térmica (WEG, 2016).

O aumento da temperatura de um motor também pode ser um indicativo de sobrecarga contínua, que pode ocorrer depois de algumas horas de funcionamento contínuo nesta condição (MAMEDE FILHO, 2013).

2.2.4 Infraestrutura para Manutenção Preditiva de Motores Elétricos

Procedimentos tradicionais de manutenção na indústria tinham dois caminhos: o primeiro era realizar a manutenção em intervalos de tempo fixos, e o segundo caminho era simplesmente reagir à falha quando ela acontecia. Entretanto, a abordagem de manutenção preditiva, através do monitoramento de condições da planta, aumentou a disponibilidade e o desempenho das máquinas, reduzindo danos e aumentando sua vida útil, reduzindo inventários de peças sobressalentes e reduzindo a manutenção por quebra (SINGH; KAZAZ, 2003).

A maioria dos motores não sofre uma rápida deterioração, a menos que haja uma falha séria na aplicação ou na construção, permitindo que uma inspeção periódica seja suficiente para a detecção de falhas e o monitoramento *on-line* normalmente está voltado a falhas relacionadas eletricamente ao motor e são geralmente instalados para proteção e, normalmente, são de ação rápida (TOLIYAT; KLIMAN, 2004).

Diferentes métodos de identificação foram desenvolvidos e utilizados de forma eficaz para diagnóstico de falhas de motores em diferentes estágios usando diferentes variáveis, como corrente, tensão, velocidade, eficiência, temperatura e vibrações, sendo necessário acompanhar o comportamento de grandes motores, bem como pequenos motores, principalmente, trabalhando em processos críticos de produção (TOLIYAT; KLIMAN, 2003).

Existem técnicas disponíveis no mercado para monitorar motores elétricos, com o objetivo de assegurar um elevado grau de fiabilidade, mas, ainda assim, muitas empresas ainda enfrentam falhas inesperadas e a redução da vida útil do motor, o que indica que estas técnicas ainda necessitam de evolução nos sensores, algoritmos e arquiteturas para tornar mais eficaz o monitoramento de falhas incipientes, principalmente de motores de baixa e média potência (BENBOUZID, 2000).

Para a identificação de falhas através da detecção de sinais a elas relacionados, muitos métodos de diagnóstico têm sido desenvolvidos neste sentido,

envolvendo campos diferentes da ciência e tecnologia. Entre esses métodos estão (NANDI; TOLIYAT; LI, 2005):

- monitoramento do campo eletromagnético;
- medição de temperatura;
- reconhecimento infravermelho;
- monitoramento de emissões de radiofrequência (RF);
- monitoramento de vibrações;
- análises químicas;
- medição acústica;
- análise do sinal da corrente do motor (MCSA); e,
- técnicas baseadas em redes neurais.

O monitoramento da condição de funcionamento de um motor exige a gravação de valores analógicos com captura de dados de menor resolução durante um longo período de tempo para fins de tendências ou a captura de dados para eventos de curta duração com maior resolução para examinar os detalhes durante curto período de tempo (LOISELLE; XU; VOLOH, 2015).

Entretanto, os métodos apresentados até aqui, baseiam-se em análises monocritério, ou seja, fazem uso apenas de uma única condição de funcionamento para predizer uma falha ou necessidade de manutenção ou verificação da sua condição de funcionamento.

Para a realização de monitoramento e aquisição dos dados de campo dos motores, faz-se necessário o uso de redes de comunicação de dados. Os dados adquiridos devem ser levados para um banco de dados para posterior análise e planejamento da manutenção conforme estratégia definida.

2.2.4.1 Redes de comunicação

Poucos desenvolvimentos mudaram tão profundamente a automação, como a introdução de redes de comunicação, influenciando na flexibilidade e desempenho dos sistemas de automação modernos, tornando-se imprescindíveis desde a automação da fábrica, passando pelo controle de processos até a distribuição de energia. Esses e outros campos da automação passaram a depender fortemente da

disponibilidade de redes apropriadas que respondem às demandas especiais de cada aplicação individual (SAUTER, 2015b).

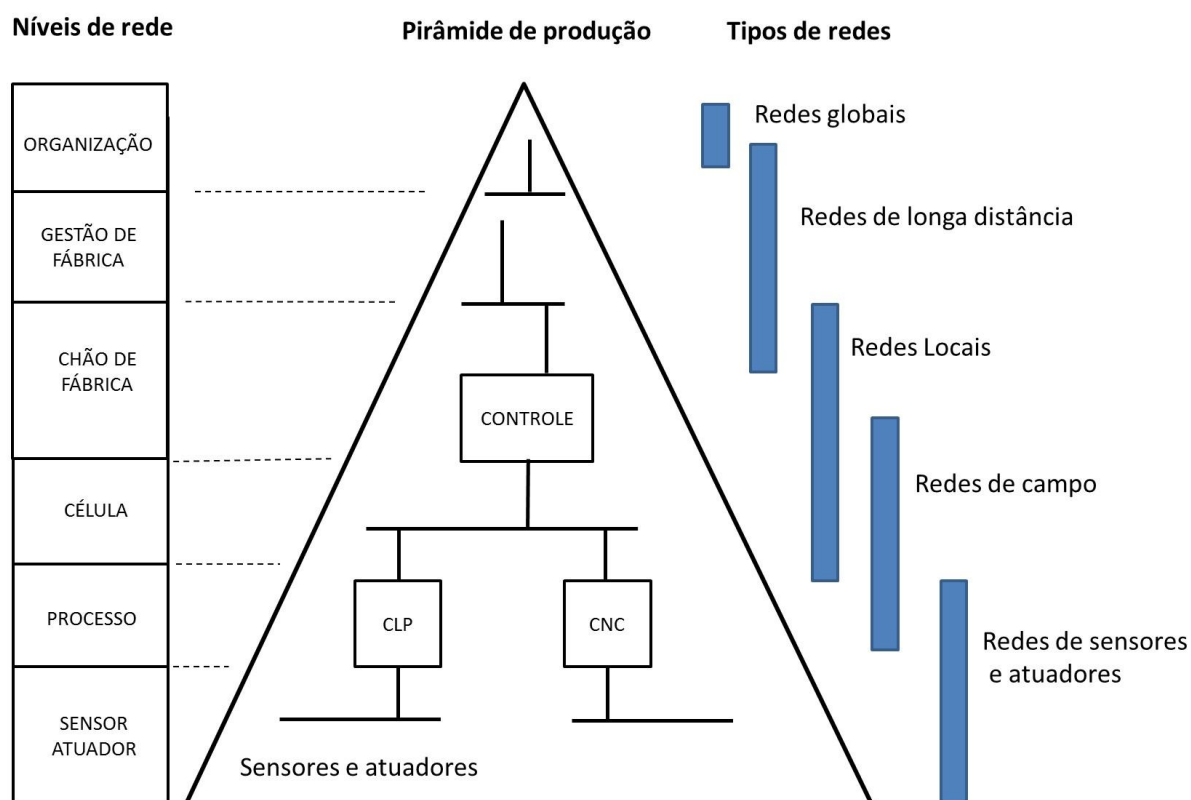
A comunicação em um ambiente industrial entre os equipamentos de campo, controladores digitais e sistemas de supervisão é realizada normalmente com a implementação de redes industriais, que envolvem ainda vários pacotes de software e, também, sistemas externos. Isso levou à necessidade de sistemas de comunicação que pudessem suportar requisitos típicos das aplicações em ambiente industrial como: ambientes hostis, interferências eletromagnéticas, aplicações em tempo real, o que obriga a busca por novas técnicas e meios para estabelecer esta comunicação. Desta forma, as empresas buscaram novas tecnologias que conseguissem aumentar a agilidade e a eficiência e passaram a investir em sistemas que fossem capazes de gerenciar, supervisionar, controlar e proteger as redes industriais (GALLOWAY; HANCKE, 2013).

As redes de comunicação industrial foram padronizadas pela IEC 61158, que as define como “Um barramento de campo é um barramento de dados digital, serial, *multidrop*, para comunicação com dispositivos de controle e instrumentação industrial, tais como: transdutores, atuadores e controladores locais, mas não limitado a estes” (SAUTER, 2015b).

Hoje, as redes e dispositivos de comunicação industrial também podem ser considerados como sistemas embarcados em rede, no entanto, suas principais características e estímulos de desenvolvimento são os mesmos e entre eles está o de auxílio à manutenção, cujo objetivo é de monitoramento de equipamentos para tornar mais fácil a tarefa de manutenção (SAUTER, 2015a).

A Figura 13 apresenta uma estrutura hierárquica das redes industriais convencionais, bem como o nível de atuação de cada uma delas, onde se caracteriza uma maior quantidade de dispositivos no campo ou chão de fábrica, transmitindo dados de pequenos tamanhos, enquanto no nível de fábrica, onde estão as gerências, a quantidade de dispositivos é menor, mas o tamanho dos dados trafegados é maior.

Figura 13 – Hierarquia das redes de comunicação industrial.



Fonte: Adaptado de SAUTER (2015b).

Estas características das redes levam a diferentes velocidades de comunicação de dados das redes de campo, que estão na ordem dos *quilobits* por segundo (kbps), enquanto as redes no nível gerencial estão na ordem dos megabits por segundo (Mbps).

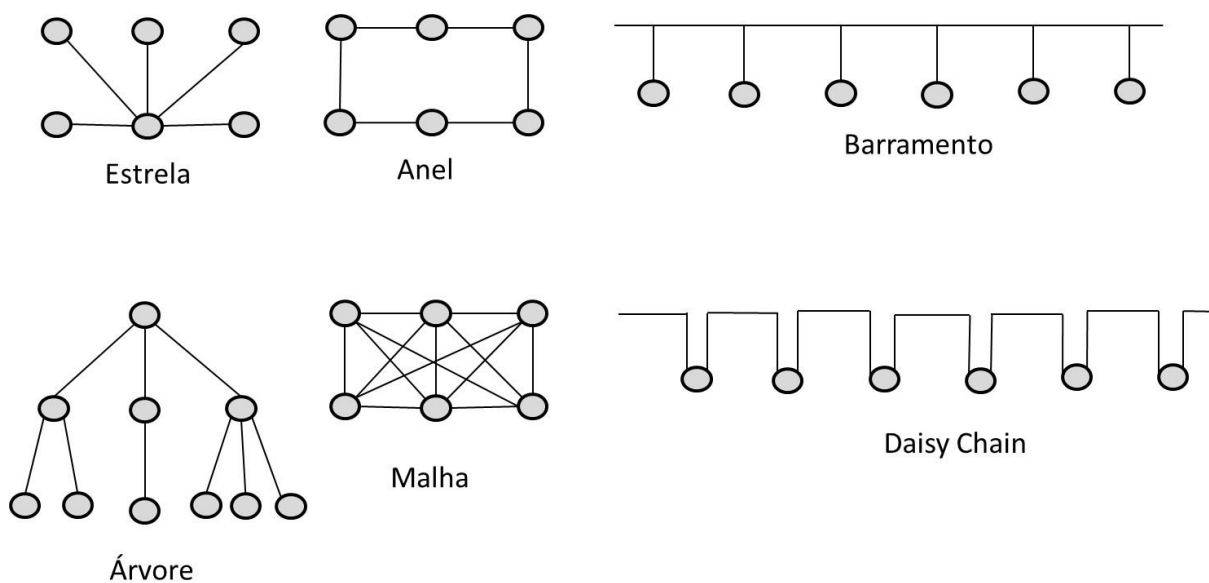
Esta hierarquia passa, atualmente, por uma proposta de integração. A convergência de tecnologias de comunicação, associadas a uma grande quantidade de novos sensores, leva a um novo conceito definido pelo RAMI 4.0 (*Reference Architectural Model Industrie 4.0*). Neste novo conceito, a ordem é de total integração em todo o ambiente de produção. Os protótipos são avaliados em impressoras 3D, associados a simuladores que permitem uma avaliação num período muito menor, com um ganho enorme de tempo e aumento considerável da produtividade. Este é um dos conceitos da Indústria 4.0, ou a quarta Revolução Industrial (EPPLÉ, 2016).

As redes tornaram-se parte integrante da fabricação nas últimas duas décadas, substituindo as comunicações ponto-a-ponto em todos os níveis. Em níveis mais baixos na infraestrutura de fábrica, as redes oferecem maior confiabilidade, visibilidade e capacidade de diagnóstico e permitem recursos como: controle

distribuído, diagnóstico, segurança e interoperabilidade de dispositivos. Em níveis mais elevados, as redes podem alavancar os serviços da Internet para permitir programação, controle e diagnóstico automatizados em toda a fábrica, além de melhorar o armazenamento e a visibilidade dos dados (MOYNE; TILBURY; ANAND, 2015).

As redes industriais, principalmente aquelas voltadas à troca de dados de sensores e atuadores têm uma importante característica, que é a sua topologia. A Figura 14 mostra as topologias mais relevantes para as redes de automação com fio onde é necessário satisfazer requisitos bastante exigentes como robustez, imunidade a perturbações eletromagnéticas, segurança intrínseca para áreas perigosas e custo baixo (SAUTER, 2015b).

Figura 14 – Topologias típicas das redes industriais.



Fonte: SAUTER (2015b).

Com o objetivo de minimizar custos e aumentar a interoperabilidade das redes industriais, várias novas tecnologias têm sido utilizadas para comunicação, modificando, assim, este cenário, como o uso do padrão Ethernet em diferentes aplicações, em diferentes níveis do processo de produção (MOYNE; TILBURY; ANAND, 2015).

Na Tabela 1, são apresentados os principais padrões de comunicação utilizados nas redes industriais e, como pode ser observado, o percentual de utilização

de cada uma, somado, passa de 100%, o que indica que mais de um padrão é utilizado dentro das indústrias.

Tabela 1 – Principais padrões de redes industriais.

Rede	Usuários	Velocidade máxima	Máximo de dispositivos
Ethernet TCP/IP	78 %	1 Gb/s	1024 ud
Modbus	48 %	35 Mb/s	32 ud
Devicenet	47 %	500 kb/s	64 ud
ControlNet	39 %	5 Mb/s	99 ud
WiFi (IEEE 802.11b)	35 %	11 Mb/s	Não definido
Modbus TCP	34 %	1 Gb/s	256 ud
PROFIBUS-DP	27 %	12 Mb/s	127 ud
AS-I	17 %	167 kb/s	31 ud

Fonte: MOYNE; TILBURY; ANAND (2015).

Cada um dos principais padrões tem suas vantagens e desvantagens, quando se trata de ambiente industrial, pois as aplicações são diversas, enquanto umas necessitam de tempo real, outras podem suportar pequenos atrasos, quando se trata de monitoramento, por exemplo.

Além disso, existem ambientes mais ruidosos, que causam interferência nos dados transmitidos, havendo a necessidade de cabos blindados para a comunicação, característicos de alguns protocolos.

Entretanto, estamos diante da quarta Revolução Industrial que é impulsionada pelas tendências de conectividade, materiais avançados que permitem o desenvolvimento de novos sensores, tecnologias de processamento mais rápidas, redes de produção avançadas, redes de dispositivos de fabricação controlados por computadores, permitindo uma interação entre o real e o virtual de maneira muito mais integrada.

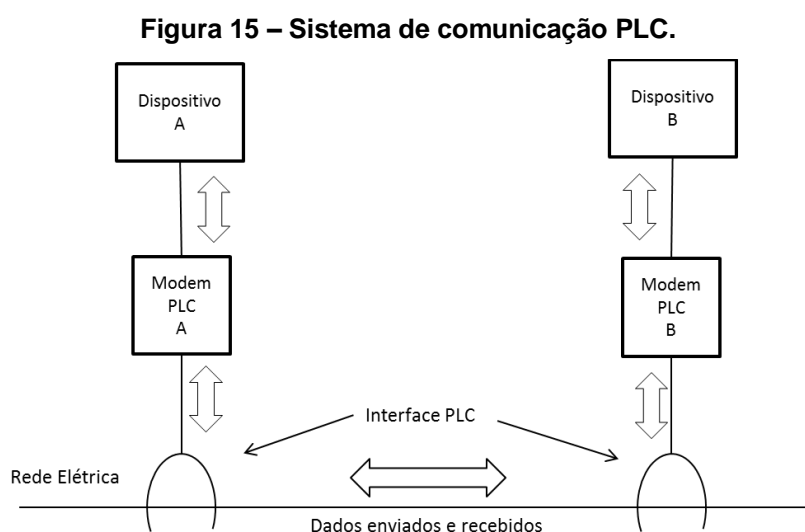
2.2.4.2 *Powerline communication (PLC)*

Em 2005, 20 empresas concordaram em formar o IEEE 1901, um grupo de trabalho patrocinado pelo *IEEE Communications Society* que teve como resultado padrões para Banda Larga sobre as redes de energia elétrica, ou seja, aplicações de acesso à Internet, voz sobre IP, e aplicações utilitárias como o controle do uso de

energia pelas empresas fornecedoras de energia elétrica (GOLDFISHER; TANABE, 2010).

A técnica do uso da rede elétrica para a transmissão de dados, denominada *Powerline Communication* (PLC) não é recente e tem tido como foco de pesquisas para a transmissão da Internet. A tecnologia surge como uma alternativa para fornecer serviços de banda larga a bairros e regiões onde os demais serviços como ADSL, cabo ou wireless não atendem baseados em custo/benefício (ZATTAR; CARRIJO, 2012).

O termo PLC é usado para designar a tecnologia que permite a transmissão de dados através da rede elétrica (CARCELLE, 2006). A Figura 15 ilustra um sistema de comunicação PLC, onde a informação a ser transmitida é modulada em alta frequência e, então, transportada pela rede elétrica através da sobreposição deste sinal modulado com o sinal presente na rede elétrica.



Fonte: Adaptado de HRANSNICA; HAIDINE; LEHNET (2004).

A tecnologia PLC é tão competitiva como outras como ADSL (*Assymmetric Digital Subscriber Line*), que na distribuição fazem uso de infraestrutura de cabos e fibras ópticas já instaladas, entretanto, como as redes de energia não foram desenvolvidas para comunicação, existem alguns aspectos como a atenuação do meio e a ocorrência de distúrbios frequentes, além do alto nível de ruído variável, que limitam a frequência e velocidade de transmissão de dados. (MELIT et al., 2012).

Esta tecnologia é vista como uma plataforma para várias aplicações, que incluem monitoramento em tempo real e balanceamento local, melhorando a robustez

da rede e possibilitando a interligação de fontes alternativas de energia, com medições inteligentes com leituras frequentes que possibilitam fornecer ao usuário final informações sobre o uso de carga e que possam otimizar a geração de energia com informações mais afinadas, além de poder ajustar seus padrões de consumo de energia para redução de custos (NASSAR et al., 2012).

Os sistemas de comunicação baseados em PLC podem se divididos em duas classes: PLC de banda estreita (*Narrowband PLC*), apropriado para aquisição de dados em ambientes de produção e sistemas de medição inteligentes e banda larga (*Broadband PLC*), voltado para aplicações *Smart Home* e pequenas redes locais de computadores, onde o nível de ruído na rede elétrica é menor (MLYNEK et al., 2014; OSKA et al., 2006).

Esta tecnologia pode contribuir para a transição da indústria tradicional para a quarta revolução industrial denominada Indústria 4.0, que propõe alta flexibilidade na produção industrial em termos de volume de produção e customização, extensiva em integração entre consumidores, companhias e fornecedores e, acima de tudo, sustentável, fazendo uso do legado existente (SHROUF; ORDIERES; MIRAGLIOTTA, 2014).

O uso de PLC apresenta-se como uma alternativa de comunicação por fazer uso do legado existente nas indústrias mais antigas, quando na concepção de suas plantas fabris não havia qualquer projeto de comunicação, ou em ambientes onde a instalação de novos cabos de comunicação torna-se inviável.

2.2.4.3 Softwares de supervisão de processos

Os Sistemas de Informação são requisitos básicos para a decisão automatizada, e as informações, de preferência, devem estar totalmente integradas, e esta integração deverá ser preferencialmente feita por computadores em rede, permitindo aos membros da empresa o acesso aos dados mais recentes da empresa a qualquer momento (GOMES; GOMES, 2012).

Trazer os dados de campo de sensores e atuadores para o nível gerencial da indústria, ou seja, verticalizar a integração das informações de produção é papel realizado normalmente pelos sistemas SCADA acrônimo do inglês *Supervisory*

Control and Data Acquisition ou, simplesmente, Sistemas de Controle Supervisório e Aquisição de Dados (SAUTER, 2015b).

Os sistemas SCADA são sistemas de controle e supervisão de execução de fabricação, onde os fabricantes podem consolidar e trocar informações de máquinas entre sistemas para coletar dados de produção, auxiliar no gerenciamento de ativos e notificar diagnósticos e alarmes, auxiliando na redução do tempo de inatividade e promovendo a utilização eficiente, multiplicando os benefícios da integração de máquinas, automatizando ações que melhoram a eficiência geral dos equipamentos (HIBBARD; LUTZ; LARSEN, 2015).

Um SCADA típico oferece interfaces lógicas de comunicação com equipamentos, um sistema para registro contínuo de dados ("*data logger*"), além de uma interface gráfica para usuário, conhecida como "IHM" ou Interface Homem-Máquina onde são disponibilizados elementos gráficos como botões, ícones e displays, representando o processo real que está sendo monitorado ou controlado (SCADABR, 2010).

Os sistemas SCADA, em rede, geralmente oferecem uma solução em nível de supervisão para toda a fábrica para a coordenação de diagnósticos de máquinas e processos, juntamente com outras informações de fábrica e de operações. No entanto, as redes estão sendo usadas em todos os níveis da hierarquia de produção, normalmente definidos como dispositivo, máquina, célula, subsistema, sistema, fábrica e empresa. Dentro do ambiente de fabricação, a aplicação de redes pode ser dividida em subdomínios de controle, diagnóstico e segurança (MOYNE; TILBURY; ANAND, 2015).

Com sistemas SCADA são construídos desde aplicativos simples de sensoriamento e automação, até "Painéis de Controle" utilizados para acompanhamento e supervisão de processos em empresas de geração e distribuição de energia elétrica, centrais de controle de tráfego e outros aplicativos afins. Algumas das funções mais utilizadas em sistemas SCADA são (SCADABR, 2010):

- geração de gráficos e relatórios com o histórico do processo;
- detecção de alarmes e registro de eventos em sistemas automatizados; e,
- controle de processos, incluindo envio remoto de parâmetros e *set-points*, acionamento e comando de equipamentos.

Estes sistemas de supervisão permitem levar informação ao usuário que não está diretamente ligado ao sistema de produção de uma maneira mais simples,

através de gráficos e figuras que permitam que a informação seja transmitida de maneira simples, rápida e eficiente.

2.2.4.4 Sensores

A indústria usa uma variedade de sensores para controlar suas operações e os dispositivos mais conhecidos incluem termopares e medidores de pressão, que medem uma única variável em um único ponto no processo, entretanto, os processos de fabricação mais complexos necessitam mais tipos de informações. A maioria desses sensores opera em princípios relativamente simples baseados na interação entre matéria e som, luz ou campo elétrico (SCOTT, 2008).

Os sensores constituem a base não só para avaliar o estado do item, mas também para o diagnóstico de falhas. Alguns sensores medem quantidades que estão diretamente relacionadas aos modos de falha identificados como candidatos para o diagnóstico. Entre eles, estão os sensores de tensão elétrica, sensores ultrassônicos, dispositivos sensores de proximidade, sensores de emissão acústica, sensores de fadiga eletroquímica e, assim por diante (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016).

Outros sensores são de tipo polivalente e são projetados para monitorar variáveis de processo para controle e/ou avaliação de desempenho, além do diagnóstico (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016). São geralmente instalados diretamente nos equipamentos ou tubulações ligadas ao processo e, normalmente, fornecem uma leitura contínua (SCOTT, 2008).

Existem muitos tipos diferentes de sensores e muitos métodos diferentes de classificação, mas, basicamente, os sensores podem ser classificados de duas formas: como ativos ou passivos e como analógicos ou digitais.

Um sensor ativo requer uma fonte externa de energia para operar e produzir o sinal de saída. Não gera um sinal elétrico em si, mas alimentado por uma fonte externa, como uma bateria, que pode ter sua resistência elétrica medida detectando variações na corrente e/ou tensão em resposta a um estímulo externo. Já um sensor passivo não precisa de nenhuma fonte de energia externa e gera diretamente um sinal elétrico em resposta a um estímulo externo. Um exemplo disso é um termopar. Já os sensores passivos são sensores diretos que alteram suas propriedades físicas, como resistência, capacitância ou indutância. (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016).

Na concepção de um sistema de aquisição de dados baseado na informação de sensores, duas definições importantes devem ser previstas: a forma de transmissão das informações e o modo de troca de informações entre os sensores e o sistema para o qual as informações serão enviadas. Assim, o tipo de rede de comunicação, as características dos sensores, processador, memória de armazenamento, interfaces devem ser cuidadosamente avaliados (NAWROCKI, 2005).

2.2.5 Métodos Multicritério Aplicados à Gestão da Manutenção em Processos Produtivos

Não existe uma metodologia aceita universalmente para a concepção de sistemas de manutenção, ou seja, não há uma abordagem estruturada levando a um melhor sistema de manutenção com a estrutura organizacional ou com uma hierarquia idêntica para todo tipo de organização, pois estas são diferentes em avanço tecnológico e tamanho da produção para poder aplicar diferentes sistemas de manutenção e os diferentes sistemas com êxito. Assim, os sistemas de manutenção são projetados usando experiência e julgamento apoiado por uma série de ferramentas de decisão formais e técnicas. No entanto, duas considerações importantes devem ser pensadas: estratégia que decide sobre qual o nível dentro da planta para realizar a manutenção e, portanto, delineando uma estrutura que irá suportar a manutenção; e, planejamento, que lida com decisões do dia a dia, em que tarefas de manutenção para serem executadas e fornecer os recursos para realizar essas tarefas (HAROUN; DUFFUAA, 2009).

Espera-se que um decisor analise o problema a partir da mais ampla perspectiva possível, a fim de melhor compreender o problema. Assim, a metodologia multicritério é uma alternativa muito promissora para lidar com problemas de decisão que têm mais de um critério a ser considerado na tomada de decisão, como a adição ao custo da manutenção do sistema, a disponibilidade do sistema nos critérios de que serão considerados num modelo de decisão. Isso pode ajudar a auxiliar o tomador da decisão para que possa gerir as ações de manutenção de forma mais eficaz (CAVALCANTE; LOPES, 2015).

Numa análise multicritério sempre há um fator humano, de tal forma que a decisão nunca será ser totalmente concebida por meio de algoritmos, ou seja, esta

análise tem objetivo de trazer um apoio ou auxílio para a escolha das alternativas entre as várias possíveis (GOMES; GOMES, 2012).

Um modelo que inclui várias estratégias de manutenção e pode descrever as consequências de uma política de manutenção em termos de custos e disponibilidade é muito apropriado (CAVALCANTE; LOPES, 2015). No entanto, em primeiro lugar, é extremamente importante identificar corretamente quem é o decisor, porque o processo de tomada de decisão pode envolver impactos sociais, operacionais e econômicos. Portanto, o decisor deve ter conhecimento e experiência sobre o comportamento do sistema ao qual está sob seu contexto, como as possíveis falhas, os cenários de perigo, dos riscos inerentes, das medidas de prevenção, entre outros (GARCEZ; ALMEIDA, 2014). As alternativas de decisão dependem da natureza e os objetivos do problema, sob a perspectiva do decisor (NIXON et al., 2016).

Em empresas de manufatura, há uma necessidade crítica para a manutenção adequada das instalações e das máquinas de fabricação. O processo de manutenção adequado aumenta a confiabilidade dos produtos, e aumenta o lucro do fabricante. Portanto, uma seleção política de manutenção adequada é uma questão crítica para os fabricantes, como uma política de manutenção ineficiente afeta não apenas o custo direto da empresa, mas também os outros aspectos. A abordagem multicritério é eficiente na incorporação de dados, no processo de avaliação de alternativas de política de manutenção (CHAN; PRAKASH, 2012).

No sistema de produção industrial, modelos de decisão geralmente não precisam de modelagem multicritério, pois neste sistema o cliente não está diretamente em contato com o sistema de produção, enquanto este cliente está sendo servido, isto é, o produto pode ser recebido pelo cliente mesmo se houver interrupções causadas por falhas. Na maioria dos casos, as perdas relativas a falhas do sistema ou interrupção para manutenção preventiva pode ser convertida para uma forma monetária, ou seja, as consequências de falhas são transformadas em custos para o cliente final. Assim, manutenção preventiva adequada reduz o custo total de produção (ALMEIDA, 2012).

Em face da crescente concorrência, que tem levando a uma necessidade cada vez maior de produtividade, existe uma necessidade de métodos, ferramentas e tecnologias que permitem aos sistemas de produção adquirir vantagens competitivas. Com isso, as decisões de manutenção preventiva têm sido bastante relevantes para os resultados estratégicos de qualquer organização empresarial, nos quais um

sistema de produção tem que produzir, seja bens ou serviços e, com isso, o tipo de produto faz uma grande diferença na maneira pela qual a manutenção e, em particular, a manutenção preditiva que, em geral, está ligada aos resultados do negócio (ALMEIDA et al., 2015).

Para estruturar um modelo multicritério é necessário preparar um questionário solicitando objetivos, processos e informações relacionadas à manutenção. Tal questionário deve ser respondido pelo gerente do departamento de manutenção da empresa (CARNERO, 2014).

Ao otimizar um modelo de manutenção usando apenas uma dimensão, o modelo assume implicitamente que esta dimensão pode representar todo o problema de decisão, por exemplo, quando o modelo de otimização, no que diz respeito aos custos, pressupõe a necessidade de minimização desses custos. Por outro lado, quando o critério considerado é a disponibilidade, presume-se que o tomador de decisão está disposto a pagar qualquer preço para obter uma ótima disponibilidade. No entanto, em termos práticos, o Decisor de Manutenção quer tanto disponibilidade suficiente quanto baixo custo. Portanto, o modelo multicritério satisfaz o requisito de se tomar uma decisão de manutenção com base em uma perspectiva mais ampla (CAVALCANTE; LOPES, 2015).

O planejamento de manutenção preditiva torna-se uma decisão mais estratégica e está ligada a um nível mais alto da estrutura organizacional hierárquica. Para um dado contexto de decisão, as consequências são caracterizadas por objetivos múltiplos e menos tangíveis, que podem exigir um modelo multicritério de tomada de decisão com peculiaridades de dois diferentes tipos de sistemas: serviço e bens de produção (ALMEIDA et al., 2015).

2.3 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO

Um problema de decisão multicritério tem como característica a existência de pelo menos duas alternativas para escolha. Escolha esta conduzida pelo desejo de atender múltiplos objetivos ou critérios, que podem ser até conflitantes entre si e variáveis que permitam a avaliação de cada alternativa, de acordo com o objetivo que se deseja (ALMEIDA, 2013).

Os tipos de problemáticas a serem esclarecidas através de métodos multicritério são descritos por ROY (1996):

Problemática de escolha α ($P\alpha$): tem como objetivo selecionar ou escolher o melhor subconjunto de alternativas dentre um conjunto de alternativas apresentadas;

Problemática de classificação β ($P\beta$): tem como objetivo a alocação de cada alternativa dentro de determinadas classes ou categorias definidas a priori, a partir de normas aplicáveis ao conjunto de ações, alocando às alternativas as categorias previamente definidas;

Problemática de ordenação γ ($P\gamma$): tem como objetivo ordenar as alternativas;

Problemática de descrição δ ($P\delta$): tem como objetivo descrever ou detalhar ao decisor, as alternativas para facilitar seu processo de decisão.

Problemas de decisão, tais como problemas de classificação, escolha e classificação, geralmente são complexos, pois normalmente envolvem vários critérios, de modo que as empresas têm considerado múltiplos critérios em seu processo de decisão abrangendo matemática, gestão, informática, psicologia, ciências sociais e economia.

Essas decisões podem ser classificadas como: táticas, estratégicas ou operacionais, dependendo da perspectiva do tempo e das consequências (ISHIZAKA; NEMERY, 2013), conforme o Quadro 8.

Quadro 8 - Problemas de decisão.

Decisão	Perspectiva de tempo	Estrutura exigida	Automação
Estratégica	Longo prazo	Baixa	Baixa
Tática	Médio prazo	Semiestruturada	Média
Operacional	Curto prazo	Bem definida	Alta

Adaptado de ISHIZAKA; NEMERY (2013).

O sucesso do uso de métodos multicritério nas últimas décadas tem sido impulsionado por uma série de avanços teóricos associados ao estabelecimento de conexões com áreas relacionadas como análise de decisões, inteligência artificial e

informática, bem como por inúmeras aplicações em uma ampla gama de áreas com forte orientação prática, motivado por problemas práticos reais, encontrados no setor público e privado (NORESE, 2017).

Na tomada de decisão multicritério, é possível que os critérios utilizados possuam importâncias diferentes entre si e, para isso, adotam-se diferentes “pesos”.

Os "pesos" dos critérios são, naturalmente, parâmetros cruciais em cada método multicritério. Seu significado depende completamente do método onde eles são usados, de tal modo que o conceito de importância dos critérios não tem interpretação intrínseca, mas depende da maneira como é manipulado (ROY, 1999).

Assim, se os valores forem dados aos pesos independentemente das escalas usadas para expressar as funções da utilidade, esses valores não podem ser usados em um modelo aditivo. Como consequência, o significado dos pesos e a maneira como eles são manipulados é que geralmente, dois métodos diferentes não podem ser comparados, aplicando a eles em um mesmo exemplo numérico e usando os mesmos pesos. Além disso, é perigoso usar em um método, pesos que são dados espontaneamente por um tomador de decisão (ROY, 1999).

Várias decisões são tomadas diariamente nas organizações e o desempenho dos decisores impacta diretamente na competitividade destas organizações. Desta forma, a construção de modelos e a escolha de métodos adequados correspondem a uma representação formal com a simplificação do problema através de método multicritério de apoio à decisão (ALMEIDA, 2013).

Alguns dos métodos mais populares, conhecidos e utilizados e sua finalidade estão apresentados no Quadro 9, entretanto, existem muitos outros métodos.

Quadro 9 - Relação entre tipo de problemática e método.

Tipos de problemática			
Escolha	Ordenação	Classificação	Descrição
AHP	AHP	AHPSort	GAIA-FS-Gaia
ANP	ANP	UTADIS	
MAUT/UTA	MAUT/UTA	Flowsort	
MACBETH	MACBETH	ELECTRE TRI	
PROMETHEE	PROMETHEE		
ELECTRE I	ELECTRE II		
TOPSIS	TOPSIS		
DEA	DEA		

Adaptado de ISHISAKA; NEMERY (2013).

Pesquisadores e empresas desenvolveram, na última década, vários softwares para ajudar os usuários a estruturar e resolver seus problemas de decisão. O Quadro 10 apresenta alguns dos softwares disponíveis. Além desses e outros softwares disponíveis, as planilhas do Microsoft Excel também são utilizadas na aplicação dos métodos (ISHISAKA; NEMERY, 2013).

Quadro 10 - Tipos de problemas, métodos e softwares utilizados.

Tipos de problemas	Métodos	Softwares
Escolha, ordenação e classificação	PROMETHEE-GAIA	Decision Lab, D-Sight, Smart Picker Pro, Visual Promethee
Ordenação e escolha	PROMETHEE, ELECTRE, UTA, AHP	DECERNS Electre IS, Electre III-IV, Right Choice, UTA+, DECERNS MakeltRational, ExpertChoice, Decision Lens, HIPRE 3+, RightChoiceDSS, Criterium, EasyMind, Questfox, ChoiceResults, 123AHP, DECERNS
	ANP, MACBETH, TOPSIS, DEA	Super Decisions, Decision Lens, M-MACBETH, DECERNS Win4DEAP, Efficiency Measurement System, DEA Solver Online, DEAFrontier, DEA-Solver PRO, Frontier Analyst
Escolha, classificação e descrição	FlowSort - FS-GAIA ELECTRE-Tri, UTADIS, AHPSort	Smart Picker Pro, Electre Tri, IRIS

Adaptado de ISHISAKA e NEMERY (2013).

O tomador de decisão é responsável por alimentar o software em um computador com informações que são processadas para auxiliar na tomada de decisões, no entanto, o computador não é capaz de criar novos modelos, cabendo ao tomador de decisão, a análise inicial e, ao computador, apenas um auxílio à formalização, memorização e cálculos matemáticos (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2000).

2.4 CONSTRUÇÃO DE MODELOS DE DECISÃO

Existe uma série de possibilidades que levam a modelos diferentes a partir de diferentes hipóteses ou formas distintas de se estabelecer os diversos ingredientes de um problema (ALMEIDA, 2013).

Os modelos de apoio à decisão têm crescido, e oferecem uma arquitetura conceitual que se desenvolveu gradualmente através do contato com problemas concretos e visando elucidar, de forma mais ou menos limitada, pelo menos seis grandes categorias de preocupações na fase de concepção do modelo decisório (ROY, 1999): (a) identificar possíveis ações ou alternativas que merecem consideração; (b) estruturação de consequências relevantes para a avaliação da decisão; (c) conceber escalas para avaliar sem necessariamente quantificar; (d) validar os critérios; (e) discutir o peso atribuído a cada critério; e, (f) evitar dados dos quais não se tenha conhecimento completo.

Pomerol e Barba-Romero (2000) apresentam algumas etapas para a construção do modelo multicritério: (a) exposição do problema de maneira informal; (b) entendimento do contexto e acordo sobre um termo de referência; (c) modelagem de alternativas e critérios; (d) aceitação do modelo com os refinamentos necessários e construção da matriz para avaliação de alternativas e critérios; (e) discussão sobre a escolha do método, informações sobre pesos; (f) aplicação do método; e, (g) análise de sensibilidade e recomendações de alterações necessárias. Lembram ainda que não há necessidade de linearidade das etapas e podem ser vistas como orientações para a construção do modelo.

Outro procedimento para a construção de um modelo multicritério é proposto por Almeida (2013) e consiste em três fases principais, cada uma dividida em várias etapas, da seguinte forma: (a) fase preliminar, com as etapas de caracterização dos decisores, identificação dos objetivos, estabelecer a problemática, identificar fatores não controlados; (b) fase de modelagem de preferências e escolha do método, com as etapas de modelagem de preferências, avaliação intracritério e avaliação intercritério; e, (c) fase de finalização, com as etapas de avaliação das alternativas, análise de sensibilidade, análise de resultados e implementação do modelo.

Existem diferentes maneiras de escolher os métodos apropriados de decisão multicritério para resolver problemas específicos. Uma maneira é olhar para a informação de entrada necessária, isto é, os dados e parâmetros de entrada do método e depois a aplicação da modelagem analisando os resultados (ISHISAKA; NEMERY, 2013).

2.4.1 Elementos Básicos na Decisão Multicritério

Na análise de multicritério, a fase de coleta de informações se aplica a todo o problema em questão. Numa primeira fase, a coleta envolve uma pesquisa dos critérios e possível construção dos conjuntos de alternativas, avaliando-os para cada um dos critérios escolhidos e, numa segunda fase, com a escolha, isto é, o momento em que uma alternativa é selecionada (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2000).

Além do tomador de decisão, é necessário um segundo ator no processo - o analista. O analista é a pessoa que realmente modela a situação em estudo e quem fará qualquer recomendação sobre a escolha final sem expressar preferências pessoais, apenas tratando-as o mais objetivamente possível (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2000).

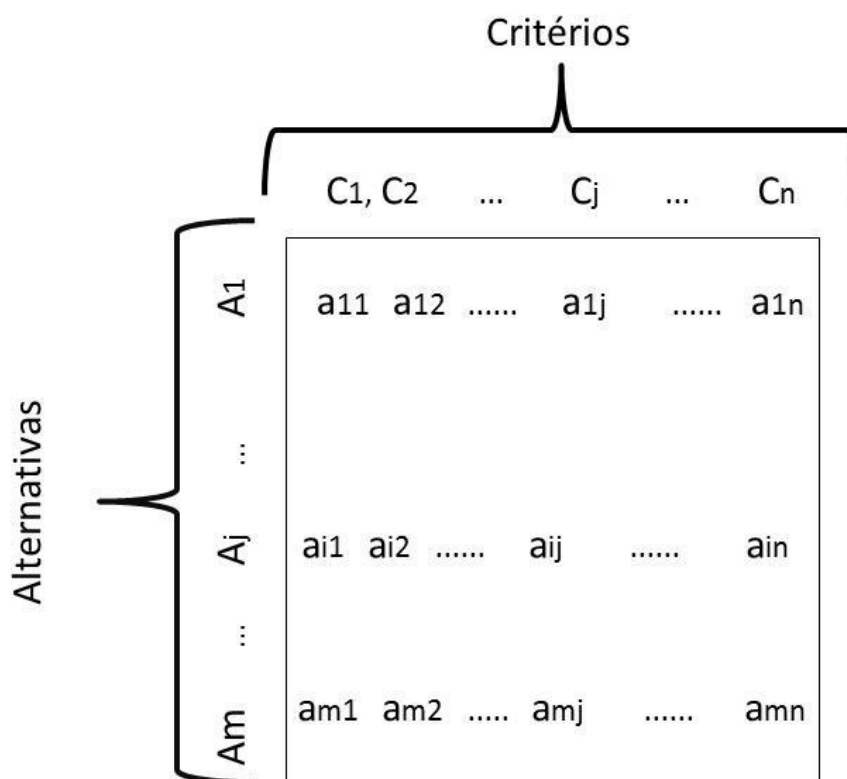
A escolha do tomador de decisão deve ser feita a partir de um número finito de alternativas, e o conjunto dessas alternativas é chamado de conjunto de opções entre os quais uma escolha deve ser feita. Em geral, deve-se denotar essas alternativas como $A_i, i=1, \dots, m$ e o conjunto de alternativas $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ como A (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2000).

Quando o decisor está fazendo sua escolha entre as alternativas, assume-se que ele tem à sua disposição várias (pelo menos uma) linhas de avaliação que são conhecidas como atributos das alternativas e os termos “eixo de avaliação” e “característica” também são usados, nos métodos multicritério sob o nome de critério. Um critério expressa de forma relativamente precisa, as preferências do tomador de decisão em um determinado atributo. Assume-se que haja um número finito de critérios denotados por C_1, C_2, \dots, C_n (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2000).

Assim, tem-se para cada alternativa do conjunto a notação a_{ij} (para a alternativa i do critério j), formando a matriz A_{mn} , chamada matriz de decisão, onde temos em cada linha i as alternativas e nas colunas n os critérios, enquanto a posição a_{ij} denota a avaliação da alternativa i no critério j , conforme ilustrado na Figura 16 (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2000).

A matriz de decisão apresenta o conjunto entre alternativas e critérios pelos quais serão julgadas as alternativas, formando assim, os elementos básicos numa análise multicritério de decisão.

Figura 16 - Matriz de decisão.



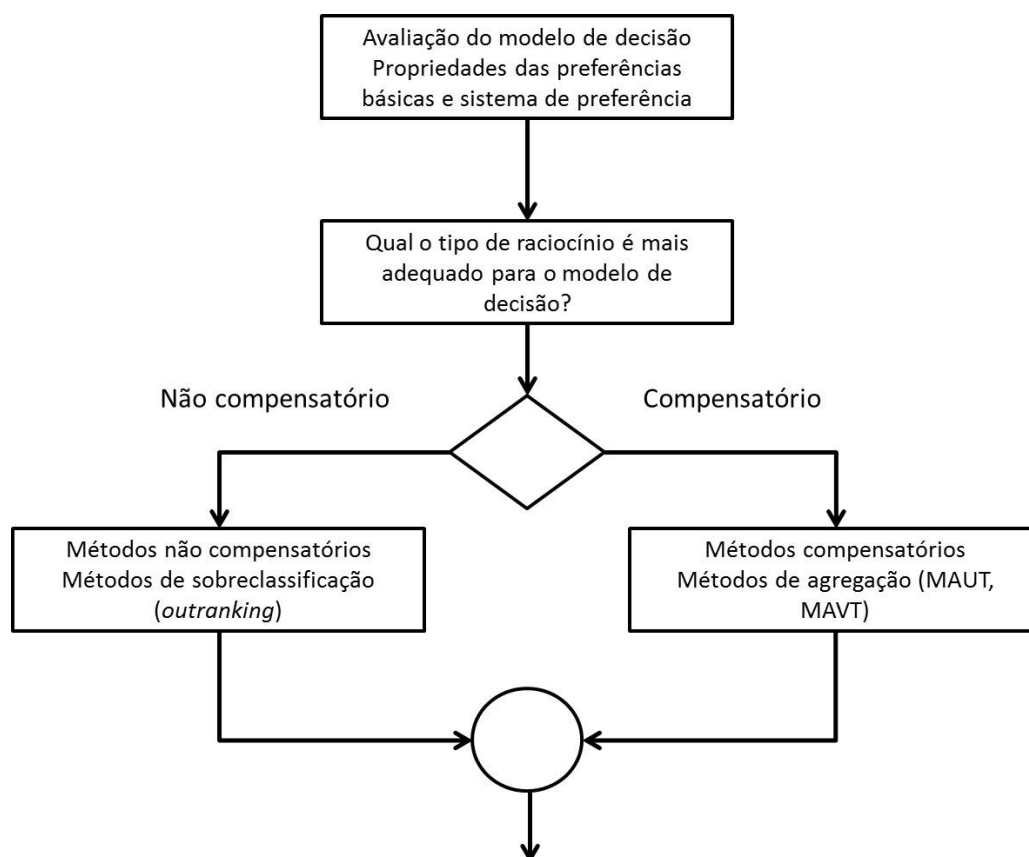
Adaptado de POMEROL e BARBA-ROMERO (2000).

Além disso, para alguns contextos de decisão, três passos podem ser realizados de forma sequencial, sem repetições ou retornos, considerando a natureza do processo de modelagem de preferências, analisando a matriz de decisão quanto à compensação entre critérios, para a escolha do método, conforme a Figura 19 (ALMEIDA et al., 2016).

Conforme ilustrado na Figura 17, uma seleção preliminar é realizada do método multicritério numa etapa inicial. Entretanto, esta escolha preliminar não deve ser encarada como definitiva, de tal modo a fechar o pensamento a respeito de outros métodos ou possibilidades (ALMEIDA, 2013).

Esta seleção preliminar baseia-se nas propriedades de preferências básicas e no sistema de preferência, exigidos para a tomada de decisão.

Figura 17 - Avaliação da compensatoriedade.



Adaptado de ALMEIDA et al. (2016).

Os elementos básicos na decisão multicritério são importantes para o processo de construção do modelo e, entre estes elementos, estão as estruturas de preferências, tipos de escalas que serão utilizadas, procedimentos de normalização que são para a escolha do método a ser utilizado (ALMEIDA, 2013).

2.4.1.1 Estrutura de preferências

As situações de preferência básicas são importantes para a escolha do método multicritério, já que representam a estrutura de preferências do decisor em relação às consequências, na análise de um problema de decisão (ALMEIDA, 2013).

As relações binárias são utilizadas para estabelecer um conjunto de pares ordenados onde uma relação binária R sobre um conjunto de elementos $A = \{a, b, c, \dots, n\}$ é um subconjunto do produto cartesiano $A \times A$, ou seja, um conjunto de pares

ordenados (a,b) onde a relação R poderá ser encontrada para alguns destes elementos e várias propriedades são definidas, para $\forall a, b, c \in A$ (ALMEIDA, 2013):

Reflexiva, se aRa ;

Irreflexiva, se não (aRb) ;

Simétrica, se $aRb \Rightarrow bRa$;

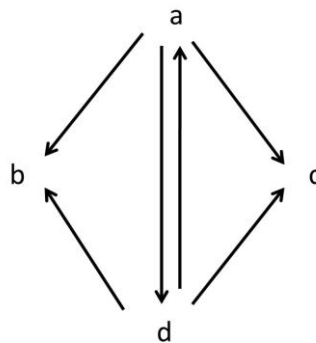
Assimétrica, se $aRb \Rightarrow$ não (bRa) ;

Completa, quando aRb ou bRa ;

Transitiva, se aRb e $bRc \Rightarrow aRc$

Estas relações podem ser representadas de forma gráfica, através da Figura 18, onde se tem a relação R com quatro elementos: a, b, c e d (Almeida, 2013):

Figura 18 - Representação gráfica das relações de preferência.



Fonte: ALMEIDA, 2013.

Na modelagem de preferências, as relações são denominadas relações de preferência e podem ser ditas como (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2000; ALMEIDA, 2013):

- Indiferença (I): quando existe a equivalência clara para o decisor entre dois elementos.

Representação: aIb .

Propriedades: reflexiva: aIa ; simétrica: $aIb \Rightarrow bIa$.

- Preferência estrita (P): quando existe a preferência clara para o decisor por um dos dois elementos.

Representação: aPb

Propriedade: assimétrica: $aPb \Rightarrow$ não (bPa)

- Preferência fraca (Q): quando não existe preferência clara para o decisor em relação a nenhum dos dois elementos para a preferência estrita, entretanto, também não existe uma indiferença entre os dois elementos.

Representação: aQb

Propriedade: assimétrica $aQb \Rightarrow \text{não } (bQa)$

- Incomparabilidade (R): quando nenhuma das três condições anteriores se justifica.

Representação: aRb

Propriedade: simétrica $aRb \Rightarrow bRa$, irreflexiva $\text{não } (aRa)$

Uma estrutura de preferências é uma coleção de relações de preferências (ou relações binárias) aplicadas a um conjunto A de alternativas, e entre estas estruturas, as que mais se destacam na modelagem multicritério são (Almeida, 2013):

Estrutura (P, I)

Estrutura (P, Q, I)

Estrutura (P, Q, I, R)

Os modelos de preferência são representações formais de comparações de alternativas e, como tal, devem ser estabelecidos através do uso de uma linguagem formal e abstrata, capturando a estrutura do mundo que está sendo descrito e suas manipulações. Esta é a razão pela qual a modelagem de preferências é utilizada em uma grande variedade de campos, como a economia, negócios, produção e, é claro, nas análises de decisão (ÖZTURK; TSOUKIÀS; VINCKE, 2004).

2.4.1.2 Tipos de escalas

Na seleção do tipo de escala, Hammond, Keeney e Raiffa (1999) orientam para a seleção de uma escala significativa que capture a essência das alternativas correspondentes, levando em consideração os seguintes aspectos:

- (a) construa uma escala subjetiva que possa medir diretamente seu objetivo;
- (b) use dados concretos, pois serão sempre confiáveis, consistentes e relevantes, mas não porque eles parecem mais fáceis de obter;
- (c) use ao máximo as informações disponíveis;

(d) use sabiamente os “especialistas”, pois saberão mais do que você sobre as alternativas e consequências; e,

(e) escolha escalas que reflitam um nível de precisão apropriado, pois muitas vezes, implicam num nível de precisão maior ou menor que o razoável ou útil.

Existem dois tipos de escalas, a princípio: a numérica e a verbal. Uma escala verbal pode ter características apenas qualitativas ou pode ter características quantitativas. Dentre as escalas numéricas, destacam-se as escalas de razão, intervalar e ordinal (ALMEIDA, 2013).

A escala ordinal é a que tem menor quantidade de informação, onde os números representam apenas a ordem entre os objetos avaliados e não podem efetuar operações básicas, como soma e multiplicação (ALMEIDA, 2013).

Assim como na modelagem de preferências, o desempenho das consequências pode ser expresso em termos de números apresentados em uma determinada escala. A escala em que um critério é apresentado pode definir as possibilidades de escolha do método multicritério. Se a escala de informação dada na matriz de consequências ou na matriz de decisão fornece apenas informações ordinais, pode-se identificar que uma determinada consequência pode ser maior ou menor do que a outra, mas, por quanto não pode ser medida. Portanto, as escalas impõem restrições ao tipo de método a ser aplicado (ALMEIDA et al., 2016).

A escala de razão é a que tem maior quantidade de informações e tem unidade e origem, que pode ser representada pelo zero (0), que indica a ausência da propriedade considerada. Peso e comprimento são exemplos clássicos deste tipo de escala, que também tem a facilidade de conversão em outra unidade, através de equações do tipo $y = ax$, com $a > 0$ (ALMEIDA, 2013).

Na escala intervalar, o significado de cardinalidade dos números está no intervalo, de modo que o zero (0) não tem o mesmo significado que na escala de razão, significando apenas o menor valor que se deseja considerar. Apresenta uma característica muito relevante para a percepção do decisor que é a comparação entre alternativas; mostra quando uma alternativa acrescenta a mais de valor em relação à outra (ALMEIDA, 2013).

Escalas comuns devem ser usadas para descrever as consequências, pois muitas vezes, as descrições verbais de consequências, por bem organizadas que sejam, não serão suficientes para resolver um problema de decisão. Nesses casos,

as escalas permitirão descrever as consequências com mais clareza e tornar as decisões difíceis com mais facilidade (HAMMOND; KEENEY; RAIFFA, 1999).

Muitas escalas verbais e numéricas são aplicadas para resultados de critérios, representados por escalas subjetivas que, no final, apresentam informações que são apenas consistentes com uma escala ordinal. Na verdade, a maioria das informações coletadas de um decisor, por avaliação subjetiva, usando uma escala verbal ou numérica, não são consistentes com uma escala cardinal, a menos que seja aplicado um procedimento adequado para garantir que elas sejam (ALMEIDA et al., 2016)

Cada um dos critérios é usado para avaliar qualquer ação potencial em uma escala qualitativa ou quantitativa apropriada, mas, na maioria dos casos, não existe uma regra aritmética óbvia e aceitável que possa manter escalas heterogêneas, substituindo uma única escala baseada em uma unidade comum para cada uma delas (ROY, 2004).

2.4.1.3 Procedimentos de normalização

Um procedimento de normalização consiste em realizar uma transformação de escala de modo a alterar todos os critérios para a mesma escala, uma vez que alguns métodos exigem isso para determinar o processo de agregação. Esses procedimentos podem alterar a unidade ou a origem da escala original (ALMEIDA, et al., 2016).

Em métodos multicritério, em geral, esta transformação para normalização é feita para uma escala de 0 a 1. Nesse caso, as consequências menos preferidas (X_{min}) e as mais preferidas (X_{max}) têm os valores 0 e 1, respectivamente (ALMEIDA, et al., 2016).

Deve-se ter cuidado para não confundir procedimentos estatísticos de normalização com os procedimentos de normalização em modelos de decisão multicritério, onde a normalização consiste em transformação na escala de avaliação, visto que o interesse está relacionado à avaliação preferencial, envolvendo julgamento de valor para a tomada de decisão. Em geral, é utilizado o intervalo de (0,1) para os valores (ALMEIDA, 2013).

Considerando o conjunto discreto de valores de x na matriz de consequências, quatro procedimentos de normalização são apresentados nas equações (2), (3), (4) e

(5). Para todos os procedimentos, os valores de $v_j(x)$ são obtidos no intervalo $0 \leq v_j(x) \leq 1$ (ALMEIDA et al., 2016; POMEROL; BARBA-ROMERO, 2000):

a) Procedimento 1:

$$V_j(X) = \frac{(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (2)$$

O procedimento 1 usa uma escala de intervalo e os valores de $v_j(x)$ podem ser interpretados como a porcentagem do intervalo $(x_{\max} - x_{\min})$. Neste procedimento, o zero significa o valor mínimo x_{\min} e, assim, este procedimento não mantém a proporcionalidade de x , ou seja, a relação $V_j(X_k)/V_j(X_j)$ pode não ser a mesma proporcionalidade que X_k/X_j .

b) Procedimento 2:

$$V_j(X) = \frac{X}{X_{\max}} \quad (3)$$

O procedimento 2 mantém a proporcionalidade de x e usa uma escala de proporção e os valores de $v_j(x)$ podem ser interpretados como a porcentagem do valor máximo de x (x_{\max}), indicando a distância à alternativa líder na matriz de consequência. Neste procedimento, o zero significa $x = 0$.

c) Procedimento 3:

$$V_j(X) = \frac{X}{\sum_i X_i} \quad (4)$$

O procedimento 3 mantém a proporcionalidade de x e usa uma escala de proporção. Os valores de $v_j(x)$ podem ser interpretados como a porcentagem do somatório de todas as consequências de X (x_i), indicando a distância à alternativa líder na matriz consequente. Neste procedimento, zero significa $x = 0$. Esse procedimento é amplamente aplicado ao normalizar pesos de critérios.

Há um quarto procedimento apresentado por POMEROL e Barba-Romero (2000):

d) Procedimento 4:

$$V_j(X) = \frac{X}{\sqrt{\sum_i X_i^2}} \quad (5)$$

O procedimento 4 mantém a proporcionalidade de x e usa uma escala de proporção.

Todos esses procedimentos de normalização podem ser considerados como variações diferentes de um único método de unificação: a escolha de uma escala de medição para traçar distâncias para dois pontos de mesma "origem" (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2000).

2.4.2 Métodos de Classificação

O gerenciamento efetivo de processos permite trazer vantagem competitiva para a organização. O gerente precisa monitorar e controlar os processos pelos quais é responsável e melhorá-los continuamente. No entanto, o tempo é um problema para o gerente e, na maioria das vezes, não pode monitorar e controlar todos os seus processos de perto. Como resultado, uma vez que diferentes processos requerem diferentes níveis de atenção, ele deve priorizar os processos que exigem os mais altos níveis de atenção (CAMPOS; ALMEIDA, 2015).

Uma classificação de seus processos em categorias de procedimentos gerenciais para fins de planejamento das atividades, no curto prazo, baseada em uma avaliação de critérios múltiplos, permite que suas atividades associadas a cada processo, sejam gerenciadas de forma eficaz. Modelos de métodos multicritério de classificação podem ser usados por gerentes em todos os tipos de organizações, pois podem ajustar o modelo de acordo com os objetivos e estratégias de sua organização e seu próprio estilo de liderança (CAMPOS; ALMEIDA, 2015).

Entre os métodos multicritério de classificação mais importantes estão o ELECTRE TRI e o AHPSort (ISHISAKA; NEMERY, 2013).

2.4.2.1 Método ELECTRE TRI

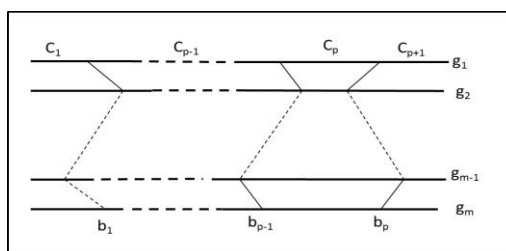
O ELECTRE TRI é um método para a problemática de classificação que aloca alternativas em categorias ou classes predefinidas. A alocação de uma alternativa resulta da sua comparação com alternativas de referência, denominados perfis, onde são definidos os limites para as categorias (MOUSSEAU; SLOWINSKI, 1998; MOUSSEAU; FIGUEIRA; NAUX, 2001; ALMEIDA, 2013).

Para a aplicação do método, são consideradas as avaliações das alternativas para cada critério $\{g_1, \dots, g_i, \dots, g_m\}$ e um conjunto de índices de perfis $\{b_1, \dots, b_h, \dots, b_p\}$. São definidas $(p+1)$ categorias, em que b_h representa o limite superior da categoria C_h e o limite inferior da categoria C_{h+1} , para $h = 1, 2, \dots, p$.

As preferências por cada critério são definidas mediante um pseudocritério, no qual os limiares de preferência e indiferença $p_j[g(b_h)]$ e $q_j[g(b_h)]$ constituem as informações intracritério. Desta forma, $q_j[g(b_h)]$ especifica a maior diferença $g_j(a) - g_j(b_h)$, que preserva a indiferença entre a e b_h no critério g_j e $p_j[g(b_h)]$ representa a menor diferença $g_j(a) - g_j(b_h)$, compatível com uma preferência de a sobre b_h no critério g_j .

A Figura 19 ilustra os perfis e seu posicionamento para os diversos critérios.

Figura 19 – Limites entre as classes



Fonte: MOUSSEAU; FIGUEIRA; NAUX (2001)

Em que:

$C_1, C_{p-1}, C_p, C_{p+1}$ são as classes;

b_1, b_{p-1}, b_p são os limites entre as classes; e,

g_1, g_2, g_{m-1}, g_m são os critérios.

A estrutura de preferência com pseudocritério $p_j[g(b_h)]$ e $q_j[g(b_h)]$ evita uma passagem repentina entre a indiferença e a preferência estrita, onde ocorre uma zona representada pela preferência fraca.

As relações de sobreclassificação S são construídas a partir de comparação das alternativas com os perfis; isto é, aSb (ou b_hSa). Duas considerações devem ser verificadas para validar a afirmação aSb_h :

- Concordância: para uma sobreclassificação aSb_h ser aceita, a maioria dos critérios deve estar a favor da afirmação aSb_h .
- Não discordância: quando a condição de concordância for atendida, nenhum dos critérios deve opor-se fortemente à afirmação aSb_h .

Para a construção de S , no ELECTRE TRI, é utilizado um conjunto de limiares de veto ($v_1(b_h), v_2(b_h), \dots, v_m(b_h)$), usado no teste de discordância e $v_j(b_h)$ representa a menor diferença $g_j(b_h) - g_j(a)$, incompatível com a afirmação aSb_h .

Os índices de concordância parcial $c_j(a,b)$ são obtidos através das equações (6), (7) e (8):

$$c_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) \geq p_j(b_h) \\ 1 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) \leq q_j(b_h) \\ \frac{p_j(b_h) + g_j(a) - g_j(b_h)}{p_j(b_h) - q_j(b_h)} & \text{n.c.} \end{cases} \quad (6)$$

Os índices de concordância $c(a,b)$ são obtidos através da equação (7):

$$c(a,b) = \frac{\sum_{j \in F} k_j c_j(a,b_h)}{\sum_{j \in F} k_j} \quad (7)$$

E os índices de discordância parcial $d_j(a,b)$ são obtidos através das equações (8):

$$d_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) \leq p_j(b_h) \\ 1 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) > v_j(b_h) \\ \frac{g_j(b_h) + g_j(a) - p_j(b_h)}{v_j(b_h) - p_j(b_h)} & \text{n.c.} \end{cases} \quad (8)$$

Neste processo, é verificado o grau de credibilidade $\delta(a,b_h) \in [0,1]$, $\delta(b_h,a)$, respectivamente, da afirmação aSb_h , $a \in A$, $h \in B$. A afirmação aSb_h é considerada válida se $\delta(a,b_h) \geq \lambda$. λ inicia um nível de corte tal que $\lambda \in [0.5,1]$ (MOUSSEAU; FIGUEIRA; NAUX, 2001).

Os valores de $\delta(a,b_h)$ e λ determinam as situações de preferências entre a e b_h da seguinte forma:

$\delta(a,b_h) \geq \lambda$ e $\delta(b_h,a) \geq \lambda$, temos aSb_h e b_hSa , assim a é indiferente a b_h ;

$\delta(a,b_h) \geq \lambda$ e $\delta(b_h,a) < \lambda$, temos aSb_h e não b_hSa , assim a é preferível a b_h ;

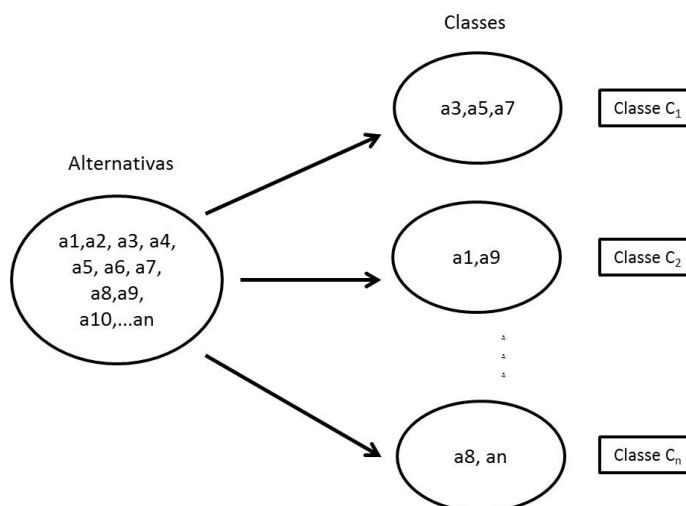
$\delta(a,b_h) < \lambda$ e $\delta(b_h,a) \geq \lambda$, temos não aSb_h e b_hSa , assim b_h é preferível a a ;

$\delta(a,b_h) < \lambda$ e $\delta(b_h,a) < \lambda$, temos não aSb_h e não b_hSa , assim a é incomparável

a b_h .

Desta forma, quanto maior o valor de λ no método, mais severas serão as condições de subordinação de uma alternativa às fronteiras das classes. Por ser utilizado essencialmente como método de classificação, o ELECTRE TRI atribui o desempenho das alternativas a uma das classes pré-definidas, conforme a Figura 20.

Figura 20 – Classificação pelo ELECTRE TRI.



Fonte: MOUSSEAU e SLOWINSKI (1998).

Dois procedimentos de atribuição das classes podem ser utilizados: procedimento otimista e procedimento pessimista (MOUSSEAU; FIGUEIRA; NAUX, 2001):

Procedimento pessimista: (a) comparar a sucessivamente com b_i para $i = p, p-1, \dots, 1$ e (b) b_h sendo o primeiro perfil de aSb_h atribuindo para a a classe C_{h+1} ($a \rightarrow C_{h+1}$);

Procedimento otimista: (a) comparar a sucessivamente com b_i para $i = 1, 2, \dots, p$ e (b) b_h sendo o primeiro perfil de b_hPa atribuindo para a a classe C_h ($a \rightarrow C_h$);

Se b_{h-1} e b_h denotarem o perfil inferior e superior da classe C_h , o procedimento pessimista atribui a alternativa a para a classe C_h mais alta, de modo que um a sobreclassifica b_{h-1} , isto é, aSb_{h-1} . Ao usar este procedimento com $\lambda = 1$, uma alternativa a pode ser atribuída à classe C_h somente se $g_j(a)$ for igual ou superior a $g_j(b_h)$ até um limiar (*threshold*) para cada critério no procedimento pessimista.

O procedimento otimista atribui a para a classe mais baixa para a qual o perfil inferior b_h é preferido para a , isto é, b_hSa . Ao usar este procedimento com $\lambda = 1$, uma alternativa a pode ser atribuída à classe C_h quando $g_j(b_h)$ excede $g_j(a)$ até um limite (*threshold*) pelo menos para um critério.

Quando λ diminui, o comportamento dos procedimentos otimista e pessimista é atenuado.

Um programa para uso do método ELECTRE-TRI encontra-se disponível para download no endereço eletrônico do LAMSADE - Laboratório de Análise e Modelagem de Sistemas para Auxílio à Decisão - Universidade de Paris Dauphine (<http://www.lamsade.dauphine.fr>). A entrada de dados do programa é amigável e seus resultados são apresentados de forma clara, inclusive com representação gráfica. Os dados podem ser gravados e a importação de dados pode ser feita através de arquivos "TXT".

2.4.2.2 O Método AHPSort

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process* – Processo Hierárquico Analítico) trata de um método de agregação aditivo com ênfase em procedimento próprio para modelagem de preferências do decisor, apresentando uma forma bem estruturada para estabelecer os objetivos e critérios numa forma hierárquica (ALMEIDA, 2013).

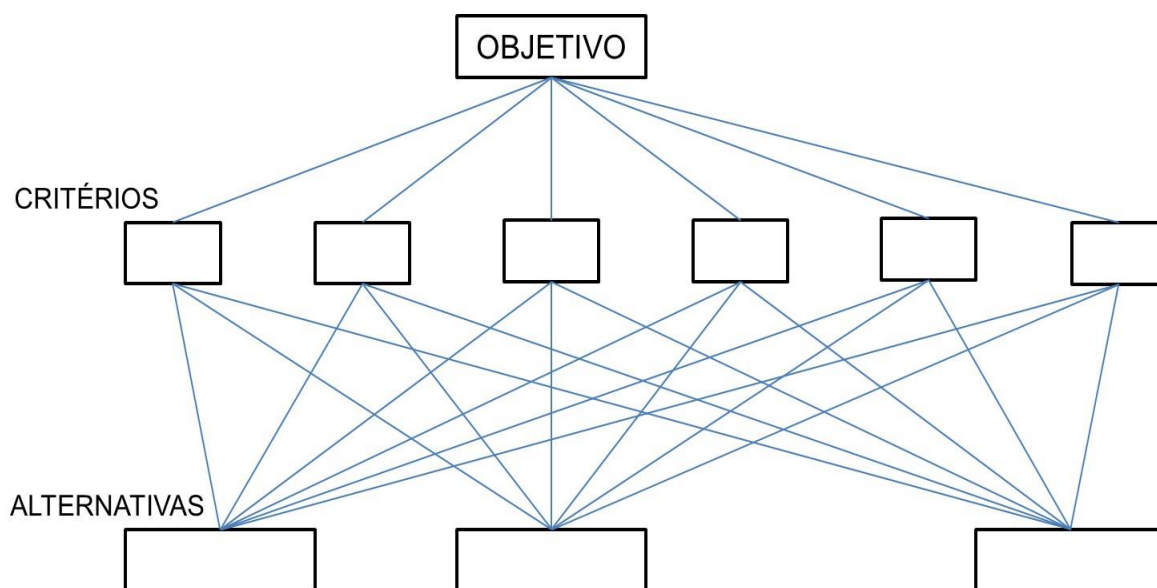
O Processo de Hierarquia Analítica (AHP) é uma abordagem básica para a tomada de decisões. Ele foi desenvolvido para lidar com o racional e o intuitivo para selecionar o melhor de uma série de alternativas avaliadas em relação a vários critérios. Neste processo, o decisor executa simples julgamentos de comparação em pares que são usados para desenvolver prioridades gerais para classificar as alternativas.

O AHP tanto permite a verificação da inconsistência nos julgamentos, como também fornece um meio para melhorar consistência (SAATY; VARGAS, 2012).

A forma mais simples usada para estruturar um problema de decisão é uma hierarquia consistindo em três níveis: o objetivo da decisão no nível superior, seguido de um segundo nível consistindo nos critérios pelos quais as alternativas, localizadas no terceiro nível, serão avaliadas.

A estrutura hierárquica é ilustrada na Figura 21.

Figura 21 – Estrutura AHP.



Adaptado de SAATY e VARGAS (2012).

Segundo Saaty (2001), os indivíduos são capazes de dividir qualitativamente seus julgamentos em três grandes categorias: alta, média e baixa e, refinando esta escala, desenvolveu a Escala de Razão ou Escala Fundamental de Saaty, com nove divisões, conforme o Quadro 11.

Quadro 11 – Escala de Razão de Saaty.

Intensidade da Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

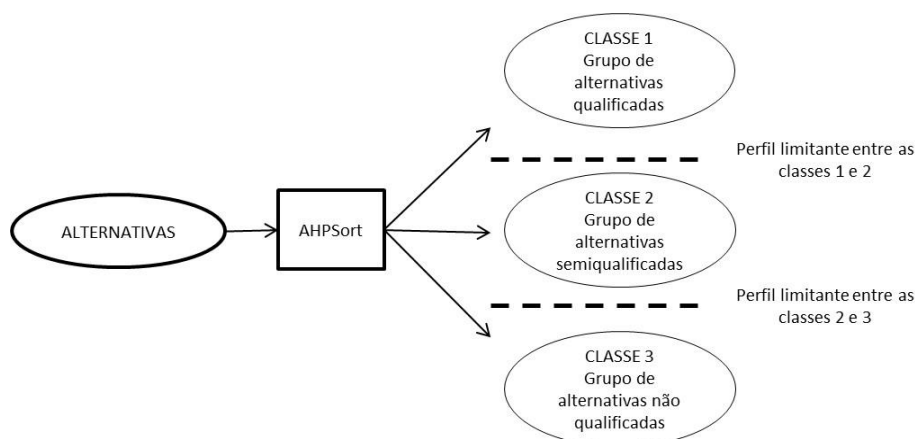
Fonte: SAATY (2001).

O AHP foi amplamente aplicado com sucesso para problemas de seleção de fornecedores, mas é inadequado quando o número de alternativas é alto e é frequentemente usado na literatura para problemas de seleção de fornecedores, mas é limitado a um baixo número de alternativas. Algumas técnicas foram propostas para reduzir o número de comparações, mas nenhum deles é totalmente satisfatório. O AHPSort é uma nova adaptação do AHP para classificação. Este método também pode ser usado no contexto de classificação de um grande número de alternativas (ISHIZAKA; PEARMAN; NEMERY, 2012).

O método AHPSort foi proposto para solução das limitações descritas quanto à quantidade de alternativas e pode ser utilizado para problemas que envolvam triagem e classificação das alternativas. Uma das vantagens do AHPSort é que gera um menor número de comparações em relação às realizadas no AHP, tornando sua aplicação prática, viável (ISHIZAKA; PEARMAN; NEMERY, 2012).

O método AHPSort baseia-se na separação das alternativas em classes pré-definidas utilizando, como base, os critérios e pesos identificados pelo AHP com base na comparação com perfis limitantes de cada uma das classes, e posterior alocação de cada alternativa dentro das classes, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Processo de classificação AHPSort.



Adaptado de ISHIZAKA; PEARMAN; NEMERY, 2012.

O AHPSort baseia-se em oito etapas, dentro de três fases, descritas a seguir (ISHIZAKA; PEARMAN; NEMERY, 2012):

(a) Primeira Fase: Definição do objetivo, dos critérios e das alternativas.

Etapa 1 – definição dos critérios e alternativas: são representados por c_j , em que $j = 1, 2, \dots, m$, sendo m o número de critérios levantados no problema, enquanto as

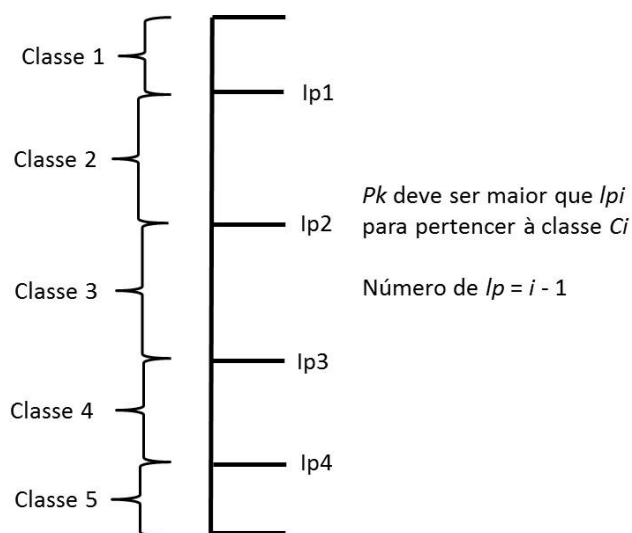
alternativas são representadas por a_k , em que $k = 1, 2, \dots, i$, sendo i o número de alternativas do problema em questão.

Etapa 2 – definição das classes: a nomenclatura das classes deve possuir rótulos para sua identificação, por exemplo: excelente, bom, médio, ruim; alto, médio, baixo; etc. As classes são representadas por C_i , em que $i = 1, 2, \dots, n$, sendo n o número de classes.

Etapa 3 - definição dos perfis de cada classe: este passo pode ser feito utilizando perfis limitantes locais lp_{ij} ou perfis centrais locais cp_{ij} que indicam o desempenho mínimo necessário em cada critério j para pertencer a uma classe C_i , ou com o perfil central local cp_{ij} , que é dado por um exemplo típico de um elemento pertencente à classe C_i no critério j . Os perfis limitantes locais lp_{ij} são os desempenhos mínimos necessários para que cada alternativa pertença a uma determinada classe. Estes perfis são as fronteiras que separam cada uma das classes em questão.

A Figura 23 exemplifica a utilização de perfis limitantes locais em um caso com cinco classes. O número de perfis limitantes locais é igual ao número de classes menos um.

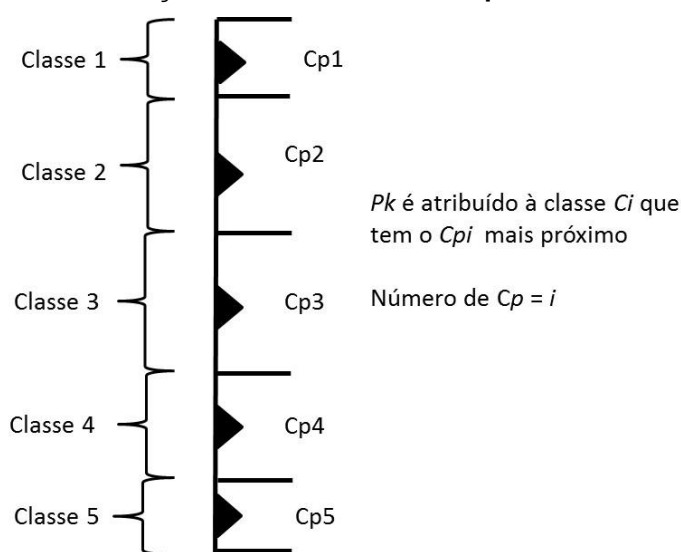
Figura 23 – Classificação utilizando perfis limitantes (lp).



Adaptado de ISHIZAKA; PEARMAN; NEMERY (2012).

Ainda na Etapa 3, são definidos os perfis centrais locais cp_{ij} que é dado por um exemplo típico de um elemento pertencente à classe C_i no critério j . Estes perfis são os pontos centrais de cada uma das classes. A Figura 24 exemplifica a utilização de perfis centrais locais em um caso com quatro classes. O número de perfis centrais locais é igual ao número de classes.

Figura 24 - Definição de classes utilizando perfis centrais locais.



Adaptado de ISHIZAKA; PEARMAN; NEMERY (2012).

(b) Segunda Fase: Avaliação dos critérios e alternativas.

Etapa 4: Com os perfis escolhidos no final da Etapa 3, a fim de definir a localização de cada alternativa dentro de uma referida classe, é realizada a comparação par a par dos critérios (c_j) para obtenção dos pesos (w_j) de cada critério e é realizada de forma idêntica ao AHP tradicional:

$$A \cdot p = \lambda \cdot p$$

Onde:

A - é a matriz de comparação,

p - é o vetor de prioridades / peso,

λ - é o autovalor máximo.

Ao final deste passo, tem-se a matriz W com o vetor prioridade dos critérios envolvidos no problema.

Etapa 5: Nesta etapa, faz-se a comparação das alternativas em relação aos limitantes: avaliação em uma matriz de comparação par a par de uma única alternativa a_k com cada perfil limitante local lp_i ou com cada perfil central local cp_i em relação a um dos critérios c_j .

Etapa 6: Nesta etapa, faz-se a determinação do vetor prioridade: a partir das matrizes de comparação, obtém-se o vetor de prioridade local ponderada pk_i de cada alternativa a_k em relação a cada perfil limitante local lp_i , ou com cada perfil central local cp_i , relativo a cada um dos critérios c_j , utilizando a equação do AHP tradicional.

(c) Terceira fase: Atribuição de classes

Etapa 7: Esta etapa tem por objetivo a alocação de cada alternativa em uma das classes de acordo com os vetores prioridades encontrados.

Para a alocação de classes utilizam-se as prioridades locais ponderadas p_{kj} de cada um dos critérios para encontrar a prioridade global da primeira alternativa a_1 e a prioridade global em relação a cada perfil lp_1 ou cp_1 . Utiliza-se para encontrar estas prioridades globais, a soma dos produtos das prioridades locais de cada critério através da equação (9):

$$pk \sum_{j=1}^m pkj.wj \quad (9)$$

onde: k é relativo à alternativa e j é relativo ao critério.

E uma prioridade global lp_i para o perfil limitante ou cp_i para os perfis centrais utilizando a equação (10):

lp_i ou $cp_i =$

$$pk \sum_{j=1}^m pij.wj \quad (10)$$

em que:

$$lp_i \text{ ou } cp_i = 1 - p_k$$

A comparação de p_k com lp_i ou cp_i é usada para atribuir a alternativa a_k a uma classe C_i .

Utilizando o perfil limitante local (lp_i), com base no perfil limitante, a_k é alocado em uma classe C_n realizando as comparações dos valores de p_k encontrados com os lp de cada classe e tem-se:

$$p_k \geq lp_1 \text{ então } a_k \in C_1$$

$$lp_2 \leq p_k < lp_1 \text{ então } a_k \in C_2$$

até:

$$p_k < lp_{n-1} \text{ então } a_k \in C_n$$

Se o decisor tiver dificuldades para definir um perfil limitante, ele pode definir um exemplo típico de uma classe: o perfil central cp_i . Os perfis limitantes são deduzidos por $(cp_i + cp_{i+1}) / 2$. Utilizando o perfil central local cp_i , a alternativa a_k é alocada em uma classe C_n , de acordo com a comparação com os valores de p_k com

c_p . No caso de distância igual entre dois perfis centrais, a visão de atribuição otimista aloca a_k para a classe alta, enquanto a visão de atribuição pessimista aloca a_k para a classe baixa. Desta forma, tem-se:

$p_k \geq cp_1$ então $a_k \in C_1$

$cp_2 \leq p_k < cp_1$ e $(cp_1 - p_k) < (cp_2 - p_k)$ então $a_k \in C_1$

$cp_2 \leq p_k < cp_1$ e $(cp_1 - p_k) = (cp_2 - p_k)$ então $a_k \in C_1$ numa visão otimista

$cp_2 \leq p_k < cp_1$ e $(cp_1 - p_k) = (cp_2 - p_k)$ então $a_k \in C_2$ numa visão pessimista

$cp_2 \leq p_k < cp_1$ e $(cp_1 - p_k) > (cp_2 - p_k)$ então $a_k \in C_2$

até:

$p_k < cp_{n-1}$ então $a_k \in C_n$

Etapa 8: Repete-se as Etapas 5 a 7 para cada uma das alternativas que se pretende classificar.

2.4.3 Métodos de Sobreclassificação

Os métodos de sobreclassificação ainda não têm uma visão uniforme e podem ser chamados de superação, prevalência ou subordinação ou síntese, enquanto que na literatura internacional tem a denominação de *outranking*. Os métodos de sobreclassificação consistem em uma das principais escolas de métodos de decisão multicritério e entre as famílias de métodos estão o ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*) e PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*), que são os mais usados (ALMEIDA, 2013).

Estes métodos são frequentemente chamados de “escola europeia de decisão multicritério” em contraste com a “escola americana” que está muito mais ligada a métodos de aditividade multiatributo, fazendo inclusive críticas aos métodos de sobreclassificação (POMEROL; BARBA-ROMERO, 1999).

Os métodos de sobreclassificação são baseados em comparações em pares. Isso significa que as opções são comparadas duas com um grau de superação ou preferência, refletindo o quanto melhor é uma opção em relação à outra (ISHISAKA; NEMERY, 2013).

No entanto, dentro da classe de métodos de sobreclassificação, geralmente são considerados todos os métodos que se baseiam na comparação de ações em

pares. Além de ELECTRE e PROMETHEE, muitos outros métodos multicritério interessantes são baseados em uma comparação de ações parecidas (FIGUEIRA; GRECO; EHGOTT, 2004).

2.4.3.1 Família de métodos ELECTRE

Os métodos da família ELECTRE são aplicados em duas fases (ALMEIDA, 2013):

- Construção da relação de sobreclassificação, onde se estabelece uma comparação par a par entre alternativas; e,
- Exploração da relação de sobreclassificação, onde se aplica um procedimento ou algoritmo para resolver o problema em função da problemática específica abordada.

A família ELECTRE é composta por vários métodos, cada um deles aplicado a uma situação diferente, conforme segue (ROY, 1999):

- ELECTRE I, para problemática de escolha, com uso de critério verdadeiro;
- ELECTRE II, para problemática de ordenação, com uso de critério verdadeiro;
- ELECTRE III, para problemática de ordenação, com uso de pseudocritério;
- ELECTRE IV, para problemática de ordenação, com uso de pseudocritério, sem uso de pesos para os critérios;
- ELECTRE TRI, para problemática de classificação, com uso de pseudocritério; e,
- ELECTRE IS, para problemática de escolha, com uso de pseudocritério.

O Quadro 12 apresenta um resumo com as primeiras referências para cada um dos métodos ELECTRE e os tipos de problemática tratados por cada um deles:

Quadro 12 - Resumo dos métodos ELECTRE.

Versão ELECTRE	Primeira Referência	Tipo de critério	Necessidade de pesos	Tipo de problema
I	Roy (1968)	simples	sim	escolha
II	Roy e Bertier (1973)	simples	sim	ordenação
III	Roy (1978)	pseudo	sim	ordenação
IV	Roy e Hugonnard (1982)	pseudo	não	ordenação

IS	Roy e Skalka (1985)	pseudo	sim	escolha
----	---------------------	--------	-----	---------

Fonte: adaptado de POMEROL e Barba-Romero (1999).

Os pesos devem ser entendidos como uma medida da importância que o decisor atribui aos critérios, e isto se aplica a todos os métodos ELECTRE, que não são tão compensadores quanto o método de ponderação padrão; no entanto, o uso de "pesos" para calcular os coeficientes de concordância e discordância envolve compensação entre critérios. O ELECTRE IV é o único método que não usa pesos, mas funciona através de um conjunto de relações, incorporadas umas às outras, que são construídas progressivamente (POMEROL; BARBA-ROMERO, 1999).

2.4.3.1.1 ELECTRE II

O ELECTRE II pode ser considerado uma extensão do método ELECTRE I, uma vez que necessita dos dois grafos produzidos pelo ELECTRE I como dados de entrada, representando uma estrutura de preferência forte e outra fraca (ROY, 1999). Este método busca ordenar um conjunto de alternativas da melhor para pior, sendo desenvolvido para resolver problemas de ordenação (MIRANDA; ALMEIDA, 2004), resultando num ranking das alternativas não dominadas, de forma a escolher aqueles sistemas que são preferidos pela maioria dos critérios e que não ultrapassem um determinado nível de descontentamento aceito pelo decisor, para nenhum dos critérios considerados.

As comparações são feitas aos pares, pelo estabelecimento de uma relação de preferência dos decisores, com o objetivo de ordenar as alternativas com o conceito de dominância. Este é um método não compensatório que requer informações dos pesos dos critérios (ROY, 1999).

Estes pesos podem vir de cálculos técnicos ou de expressões de julgamento de valor, favorecendo ações mais balanceadas, o que fica mais claro quando estruturada de forma matricial (TROJAN, 2012).

Neste método, são construídas duas relações de sobreclassificação (ALMEIDA, 2013):

- Relação de sobreclassificação forte: S^F ;
- Relação de sobreclassificação fraca: S^f .

Para uma matriz A , composta de um conjunto de alternativas, avaliada sob aspectos de C_n critérios estabelecidos pelo processo decisório, conforme ilustrado no Quadro 13:

Quadro 13 - Matriz de critérios e alternativas.

Critérios	Alternativas				
	a_1	a_2	a_3	...	a_m
C_1	g_{11}	g_{12}	g_{13}	...	g_{1m}
C_2					
.					
C_n	g_{n1}	g_{n2}	g_{n3}	...	g_{nm}

Fonte: Autoria Própria.

em que:

C_1, C_2, \dots, C_n são os critérios;

a_1, a_2, \dots, a_m são as alternativas; e,

$g_{11}, g_{12}, \dots, g_{nm}$ são as avaliações das alternativas em cada critério.

Para o método ELECTRE II, para realizar a ordenação das alternativas na matriz A , são utilizadas duas matrizes: a matriz de concordância, que testa a afirmação de que um subconjunto significativo de critérios concorda que a alternativa a sobreclassifica b ; e, a matriz de discordância, a afirmação de que o restante dos critérios discorda fortemente de que a alternativa a sobreclassifica b . Ambas as matrizes formam a matriz de credibilidade (ROY, 1999).

Para a geração da “Matriz de Concordância” ocorre uma comparação de cada alternativa com as demais, onde são estabelecidas as soluções mais atrativas e a escolha da solução que atende ao conjunto de objetivos sob a determinação dos critérios da análise na matriz de avaliação.

Para o estabelecimento da “Matriz de Discordância” no ELECTRE II é definida, inicialmente, uma escala comum a todos os critérios, onde cada critério deve ter um intervalo de escala diferente. A escala é usada para comparar o confronto causado entre o menor e o maior valor numérico para cada par de alternativas. Essa escala comum é usada para medir a discordância ao preferir a à alternativa b , considerando todos os critérios.

Definidas as matrizes de concordância e discordância, uma segunda fase de fixação de valores limites surge para o índice mínimo de concordância, denominado p

e para o índice máximo de discordância q . Os valores de p e q são fixados com base na estrutura de preferências de cada decisor, com base na sua experiência pessoal ou com uso de estatística (ROY, 1999).

Os valores de p e q variam entre 0 e 1, tanto que a alternativa a é preferível a alternativa b se e somente se:

$$C(a,b) \geq p \text{ (índice mínimo de concordância)}$$

$$D(a,b) \leq q \text{ (índice máximo de discordância)}$$

Além disso, são estabelecidos dois limiares de concordância c^+ e c^- e dois limiares de discordância d^+ e d^- , sendo $c^+ > c^-$ e $d^+ < d^-$.

Existem variações na literatura, mas a relação de sobreclassificação forte é definida conforme equação (11) (ALMEIDA, 2013):

$$aS^F b \left\{ \begin{array}{l} C(a,b) \geq c^+ \\ D(a,b) \leq d^+ \\ \sum_{i: g_i(a) > g_i(b)} p_i > \sum_{i: g_i(a) < g_i(b)} p_i \end{array} \right\} \quad (11)$$

Enquanto a relação de sobreclassificação fraca é definida na equação (12):

$$aS^f b \left\{ \begin{array}{l} C(a,b) \geq c^- \\ D(a,b) \leq d^- \\ \sum_{i: g_i(a) > g_i(b)} p_i > \sum_{i: g_i(a) < g_i(b)} p_i \end{array} \right\} \quad (12)$$

em que:

$C(a,b)$ é o índice de Concordância com a afirmativa aSb , dado pela equação (13).

$$c(a,b) = \sum_{i: g_i(a) > g_i(b)} p_i \quad \text{sendo} \quad \sum_i p_i = 1 \quad (13)$$

Este índice corresponde à soma dos pesos de todos os critérios “ i ” para os quais a alternativa “ a ” tenha vantagem sobre “ b ”, ou seja, $g_i(a) \geq g_i(b)$, ou seja, se “ a ” tiver a maioria dos pesos dos critérios a seu favor, então aSb . Este índice terá valor entre 0 e 1.

$D(a,b)$ é o índice de Discordância com a afirmativa aSb , dado pela equação (14).

$$D(a,b) = \max \left[\frac{g_j(b) - g_j(a)}{\text{escala}_i} \right]; \forall i \mid g_i(b) > g_i(a) \quad (14)$$

em que:

$$\text{Escala}_i = \max [g_i(c) - g_i(d)], \forall i, c, d.$$

Assim, $D(a,b)$ é a máxima diferença entre os valores de $g(b)$ e $g(a)$ para todos os critérios em que $g(b) > g(a)$ dividida pelo intervalo de escala do critério considerado, de modo a considerar a desvantagem da alternativa “a” em relação à alternativa “b”, para os critérios em favor de b. O valor da discordância da proposição aSb , $D(a,b)$ também será um valor entre 0 e 1.

A segunda condição com relação à sobreclassificação é relativa à soma dos pesos e equivale a ter $C(a,b) > C(b,a)$, que reduz a possibilidade de duas alternativas sobreclassificarem uma à outra simultaneamente, como ocorre no ELECTRE I (ALMEIDA, 2013).

Usando as duas relações de sobreclassificação, aplica-se um procedimento para efetuar dois *rankings* das alternativas. O primeiro *ranking* começa com as melhores alternativas, em ordem decrescente, e o segundo *ranking* começa com as piores, seguindo uma ordem crescente, de modo que ambos aplicam S^F e S^f nos procedimentos (ALMEIDA, 2013).

Almeida (2013) destaca que existem vários procedimentos para a elaboração dos dois *rankings* e descreve um desses procedimentos, composto por sete etapas, onde se têm duas pré-ordens completas.

Etapa 1 - Determinação do subconjunto de alternativas A^F de um conjunto de A alternativas, que não é fortemente sobreclassificado (S^F) por nenhuma alternativa de A ;

Etapa 2 - Determinação do subconjunto de alternativas A^f de A^F , que não é fracamente sobreclassificado (S^f) por outra alternativa dentro de A^F , formando o primeiro subconjunto da primeira classe do *ranking* decrescente;

Etapa 3 - Retirar as alternativas A^f do conjunto A . Repetir o procedimento a partir de 1 até que todas as alternativas tenham sido ordenadas. Essa ordenação corresponde à ordem decrescente;

Etapa 4 - Reiniciar o processo para todo o conjunto A completo;

Etapa 5 - Determinação do subconjunto de alternativas R^F de A, que não sobreclassifica fortemente (S^F) nenhuma outra alternativa de A;

Etapa 6 - Determinação do subconjunto de alternativas R^f e R^F , que não sobreclassifica fracamente (S^f) nenhuma outra alternativa dentro de R^F , formando o primeiro subconjunto da primeira classe do *ranking* crescente;

Etapa 7 - Retirar as alternativas em R^f do conjunto de A. Repetir o procedimento a partir de 5, até que todas as alternativas tenham sido ordenadas. Essa ordenação corresponde à ordem crescente.

Através deste procedimento, têm-se duas pré-ordens completas e um procedimento utilizado para combinação das duas pré-ordens que consiste na interseção das duas pré-ordens. Entretanto, existem outros procedimentos propostos para elaborar as duas pré-ordens para formação de uma ordem parcial (ALMEIDA, 2013).

2.4.3.2 Família de métodos PROMETHEE

O método PROMETHEE pertence à família de métodos de sobreclassificação e já foi utilizado com sucesso em muitos casos, como: gerenciamento de água, gerenciamento de energia, sistema bancário, manufatura, transporte e logística, construção, desenvolvimento urbano, segurança, engenharia entre outros (ISHISAKA; NEMERY, 2013).

Seja $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ o conjunto de ações a serem classificadas; $e, F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ o conjunto de critérios. Além disso, definindo que $f_i(a_j)$ a avaliação de ação sobre o critério f_i é um valor numérico. Para cada par de ações ordenadas (a_i, a_j) de A, o grau de preferência de critério $P_k(a_i, a_j)$ é calculado e reflete quão fortemente a ação a_i é preferida para A_j com base unicamente no critério f_k . $P_k(a_i, a_j)$ é um número entre 0 e 1, e é uma função da diferença entre as avaliações (ou seja, $f_k(a_i) - f_k(a_j)$) e quanto maior esta diferença, mais forte é o grau de preferência para aquele critério. O decisor tem assim a escolha entre três tipos diferentes de funções de preferência. Considerando a função de preferência linear com q e p como, respectivamente, a indiferença e o limite de preferência, as avaliações são realizadas conforme a equação (15) (ISHISAKA, NEMERY, 2013):

$$P_k(a_i, a_j) = \begin{cases} 0; & \text{se } f_k(a_i) - f_k(a_j) \leq q \\ \frac{f_k(a_i) - f_k(a_j) - q}{p - q} & \text{se } q < f_k(a_i) - f_k(a_j) < p \\ 1; & \text{se } f_k(a_i) - f_k(a_j) \geq p \end{cases} \quad (15)$$

Para o estabelecimento de uma relação de sobreclassificação de valor, considerando-se o conjunto dos critérios para cada par de ações, o grau de preferência global π_{ij} pode ser calculado, tendo em conta os pesos associados a cada critério w_k seja o peso associado ao critério f_k . Se os pesos respeitarem a condição $\sum_{k=1}^q w_k = 1$ é representado na equação (16) (BRANS et al., 1986):

$$\Pi(a_i, a_j) = \Pi_{ij} = \sum_{k=1}^q w_k \cdot p_{ij}^k \quad (16)$$

O grau de preferência π_{ij} expressa a preferência global de ação a_i em a_j de acordo com todos os critérios. Este grau de preferência, que fica entre 0 e 1, respeita a condição $0 \leq \pi_{ij} + \pi_{ji} \leq 1$. Observa-se que, necessariamente, $\forall i: \pi_{ii} = 0$. As definições de indiferença, incomparabilidade e preferência não são precisas, mas deixadas para a interpretação do decisor (ISHISAKA; NEMERY, 2013).

Outro conceito bastante importante diz respeito aos fluxos de sobreclassificação (BRANS; MARESCHAL, 1994; BRANS et al., 1986), os quais exercem importante papel na etapa de exploração das relações de sobreclassificação:

O fluxo de sobreclassificação de saída, conforme equação (17).

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (17)$$

Esse fluxo indica a tendência de uma alternativa a sobreclassificar fortemente as outras ações.

O fluxo de sobreclassificação de entrada, conforme equação (18).

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (18)$$

Entre os métodos da família PROMETHEE, tem-se o PROMETHEE I onde duas pré-ordens são construídas com dois indicadores (ALMEIDA, 2013).

Pré-ordem decrescente de $\phi^+(a)$; e

Pré-ordem crescente de $\phi^-(a)$

Estas duas pré-ordens são estabelecidas com base em duas relações: sobreclassificação e indiferença, sendo que o método consiste na interseção entre essas duas pré-ordens e produz uma pré-ordem parcial, a partir de três relações: preferência (P), indiferença (I) e incomparabilidade (R) (ALMEIDA, 2013).

Outro método da família PROMETHEE é o PROMETHEE II, baseado na utilização de fluxo líquido $\phi(a)$, que é obtido da seguinte forma (ALMEIDA, 2013):

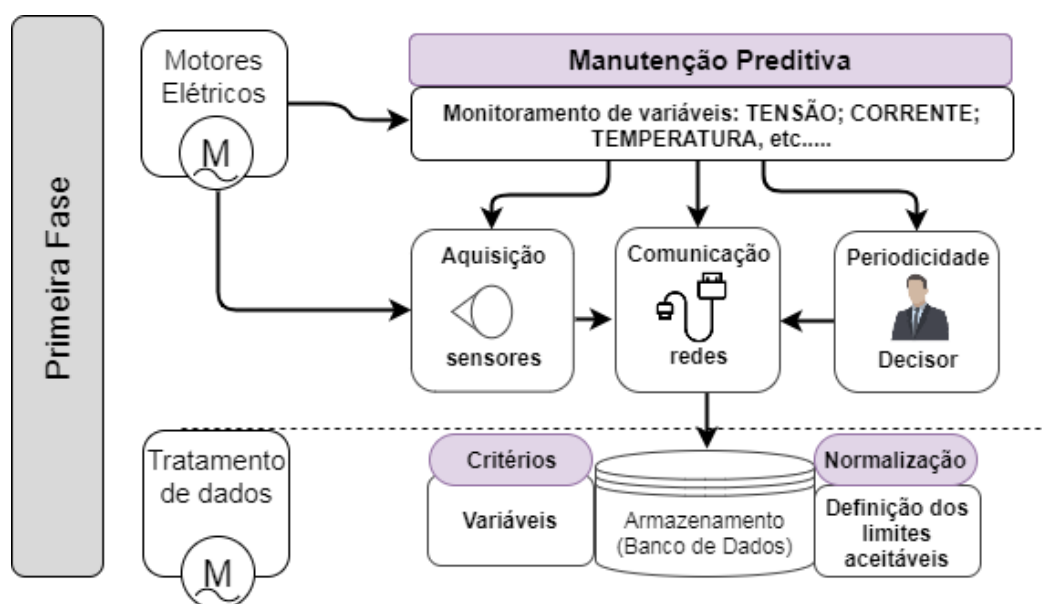
$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$. Assim, com base em $\phi(a)$, as alternativas são organizadas em ordem decrescente, estabelecendo uma pré-ordem completa entre as alternativas, de modo que a ocorrência de condição para a relação de indiferença é muito pouco provável, o que leva geralmente à consideração que o PROMETHEE II estabelece uma ordem completa. Além dos métodos PROMETHEE I e II, a família PROMETHEE inclui ainda os métodos PROMETHEE III e IV, que foram desenvolvidos para o tratamento de processos de decisão mais sofisticados, em particular de um componente estocástico; PROMETHEE V, que após a obtenção das alternativas com base no PROMETHEE II, são consideradas restrições identificadas no problema e, então, se aplica a seleção de um conjunto de alternativas, tratando da problemática de portfólio, com otimização inteira 0-1; e o PROMETHEE VI, indicado para quando o decisor não está apto ou não quer definir precisamente os pesos para os critérios, especificando intervalos de possíveis valores em lugar de um valor fixo para cada peso (ALMEIDA, 2013).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos que foram adotados, bem como as justificativas para escolha dos métodos utilizados para o desenvolvimento de cada etapa da metodologia proposta.

A metodologia proposta foi dividida em duas fases globais. A primeira fase, que trata da obtenção de dados das variáveis físicas com as informações de funcionamento para que na segunda fase possa ser realizada a análise multicritério e percepção de falha incipiente como apoio na manutenção preditiva dos motores, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Primeira Fase da Metodologia.

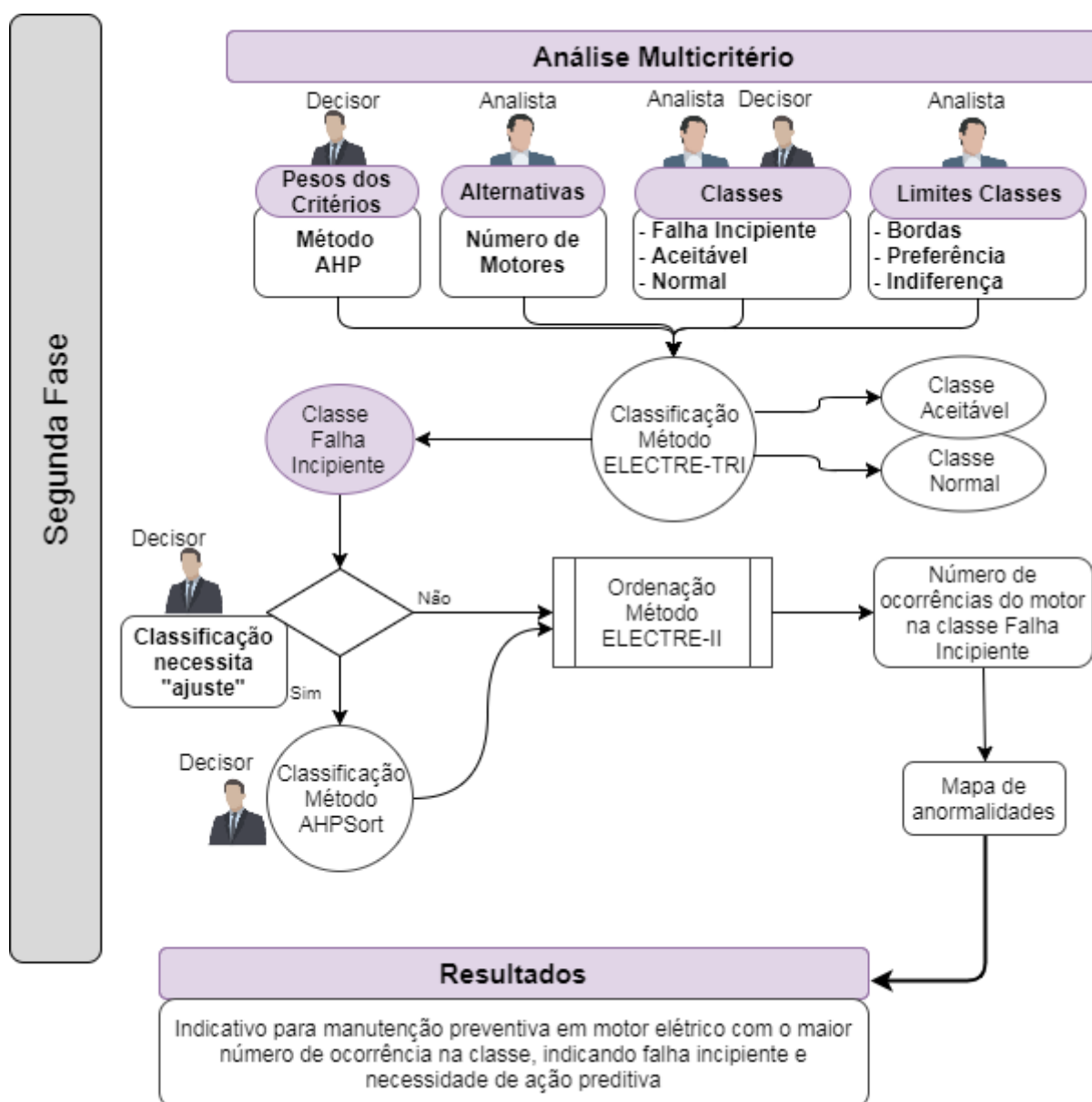


Fonte: Autoria Própria.

Esta primeira fase da metodologia é dividida em duas etapas: a primeira, de aquisição de dados, onde são definidas as variáveis físicas de funcionamento dos motores que serão utilizadas, a rede de comunicação pela qual os dados serão transmitidos e qual a periodicidade em que os dados serão coletados e, numa segunda etapa, onde os dados são tratados e armazenados, bem como são definidos os limites de cada classe.

Na segunda fase, é realizada uma estruturação com métodos multicritério de classificação e ordenação, com base nos dados adquiridos, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Segunda Fase da Metodologia.

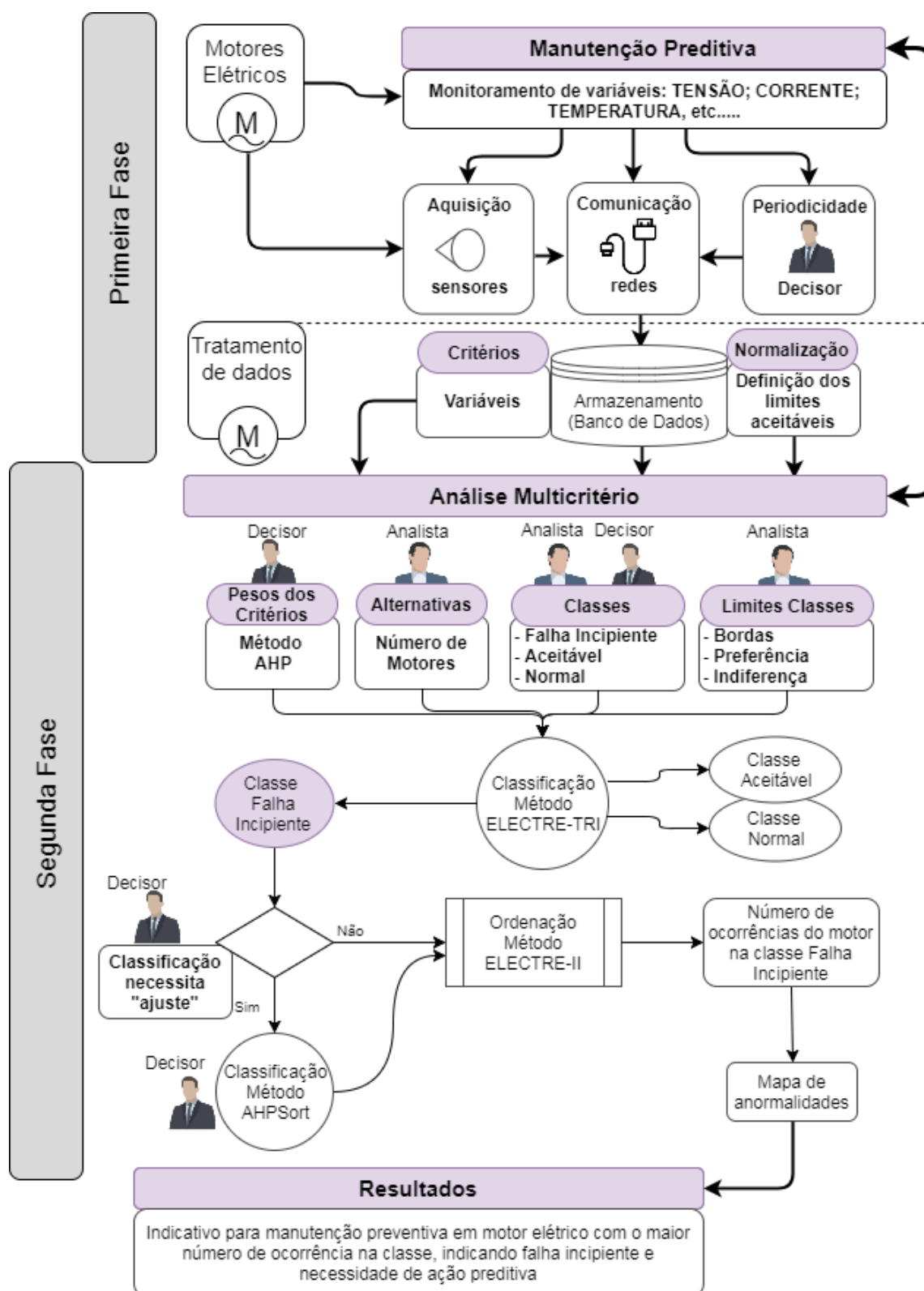


Fonte: Autoria Própria.

A segunda fase também é dividida em etapas, onde são definidas as classes e os limites de preferência e indiferença para cada uma delas, a definição de pesos para os critérios de avaliação e, ainda, classificação e ordenação quando necessárias.

A Figura 27 apresenta a estrutura metodológica completa do desenvolvimento do trabalho.

Figura 27 – Estrutura Operacional da Metodologia.



Fonte: Autoria própria.

Cada uma das etapas do procedimento metodológico possui atividades que são detalhadas nas próximas seções. As atividades foram definidas com base nos objetivos de cada fase.

3.1 DEFINIÇÃO DOS DADOS PARA A ESTRUTURAÇÃO DA METODOLOGIA

Para a construção da metodologia de manutenção preditiva de motores elétricos, a primeira etapa foi a de definição de quais condições inadequadas de funcionamento de um motor elétrico, que podem levar a uma falha incipiente e quais as formas mais adequadas de se fazer a aquisição destas informações.

Diferentemente das propostas vistas no referencial teórico, quando apenas uma variável normalmente é monitorada, neste trabalho, a metodologia propõe o monitoramento de mais de uma variável ao mesmo tempo e analisadas sob uma abordagem multicriterial.

Assim, a metodologia proposta busca monitorar, sob uma ótica mais ampla, as condições de funcionamento dos motores e, ao mesmo tempo, busca alinhar estas condições aos objetivos traçados pelos responsáveis pela manutenção, ajustando-se assim, às expectativas e preferências dos decisores.

3.1.1 Definição das Variáveis Adquiridas

Com base na pesquisa realizada, identificou-se que, para avaliação da condição do estado de um motor elétrico, as variáveis mais importantes na determinação de sua condição adequada de funcionamento são: a sua temperatura de trabalho, a sua corrente de trabalho, tendo em vista que na placa de identificação de cada motor é indicada a condição nominal para cada uma destas variáveis.

Conforme verificado, o aumento da temperatura de um motor para níveis superiores à sua temperatura nominal, leva à diminuição da vida útil do mesmo, de tal modo que a escolha de medição da temperatura de trabalho do motor foi uma das prerrogativas dessa proposta.

Da mesma forma, o aumento de corrente de um motor elétrico para níveis superiores à sua corrente nominal, indica uma sobrecarga no motor, que pode levar à diminuição de sua velocidade de trabalho, acarretando em danos à produção e ao seu

sistema de ventilação, que indiretamente também impactam no aumento de temperatura, justificando assim, o monitoramento desta condição de funcionamento.

A diminuição ou aumento da tensão nominal de um motor elétrico para níveis inferiores à sua tensão nominal indica problemas na rede elétrica de alimentação, que pode comprometer os sistemas de isolamento do motor, levando a problemas no longo prazo. Os níveis tolerados para estas variações são indicados por Normas que tratam das condições adequadas de funcionamento para motores elétricos.

Durante a pesquisa realizada, alguns autores indicaram outras variáveis que também poderiam indicar o mau funcionamento de um motor elétrico, como é o caso da vibração, que pode sinalizar problemas mecânicos nos sistemas de fixação, acoplamento ou, ainda, em sistemas de lubrificação, tendo em vista que os motores têm como principal função a movimentação de cargas nos processos industriais. Estes problemas mecânicos podem levar à quebra de um motor ou dos sistemas de acoplamento, conseqüentemente, ocasionando uma parada na produção, ou ainda acidentes. Portanto, a consideração da medição da variável vibração também foi ponderada neste estudo.

A umidade do ambiente certamente é outro indicativo de que o motor elétrico pode estar instalado em local inadequado e em contradição com o Índice de Proteção (IP) desejado.

Assim, existem muitas outras variáveis, além das existentes numa placa de identificação de um motor elétrico, as quais podem indicar anormalidade nas condições de funcionamento do motor. Entretanto, para a construção desta metodologia, foi estabelecido um mínimo de variáveis a serem adquiridas, sendo elas: a tensão, a corrente e a temperatura de funcionamento. Todas baseadas em dados fornecidos pelos fabricantes, facilitando a aplicação da metodologia inicialmente.

A partir destas três variáveis, o decisor e o analista, podem, para cada situação, incluir novas variáveis para a análise.

3.1.2 Identificação dos Limites para as Classes

Nesta etapa, foram definidos os limites das classes, ou seja, quais as condições toleradas para cada uma das variáveis monitoradas, de tal modo que não afetassem o padrão normal de funcionamento dos motores.

Assim, devem ser definidas também as condições da classe para falha incipiente, ou seja, valores adquiridos em que as variáveis apresentam-se fora de uma condição normal ou aceitável de trabalho de um motor elétrico, e que sinalizem que este motor possa apresentar problemas futuros.

Além disso, são definidos os “pesos” em um processo de elicitação com decisor, para cada uma das variáveis de funcionamento adquiridas. Esses pesos refletem as preferências do decisor especialista, que indicará características do processo que se está explorando e qual a importância de cada variável, conforme essas características. A definição de condição de manutenção baseia-se nos valores nominais de trabalho dos motores elétricos estabelecidos em suas placas de identificação para os valores de tensão, corrente e temperatura. Assim, para qualquer valor acima do valor nominal de temperatura e corrente e abaixo para tensão, o motor pode ser considerado como em condição de falha incipiente naquele momento, tendo em vista que não estava funcionando dentro das especificações estabelecidas pelo fabricante.

Para qualquer outra variável que seja incluída na análise, deverão ser definidos os valores para a sua condição normal, condição aceitável e em condição de falha incipiente.

3.1.3 Definição dos Sensores a Serem Utilizados nos Motores

Para a definição dos sensores que foram utilizados no protótipo de aquisição de dados, os critérios utilizados foram baseados nos dados necessários dos motores para a escolha dos sensores.

A escolha dos sensores foi baseada em um procedimento não intrusivo, ou seja, aqueles onde não foi necessária nenhuma alteração no motor em funcionamento, sendo os sensores instalados todos na parte externa dos equipamentos.

Outro fator que contribuiu para a escolha dos sensores foi sua compatibilidade com o Arduíno, a plataforma escolhida para o desenvolvimento do protótipo de aquisição e transmissão de dados.

Com estes requisitos definidos, os sensores utilizados foram:

Temperatura: Como sensor de temperatura será utilizado o LM-35- Sensor de temperatura de baixo custo.

As leituras se baseiam em sinal analógico que é convertido pelo Arduíno em um valor de 0 a 1023. Para obter os valores finais é feito um cálculo para retornar o valor da temperatura, através de uma constante que multiplica o valor da leitura analógica, depois é dividido por 1024, conforme equação (19).

$$Temperat. = \frac{Leitura * const.}{1.024} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (19)$$

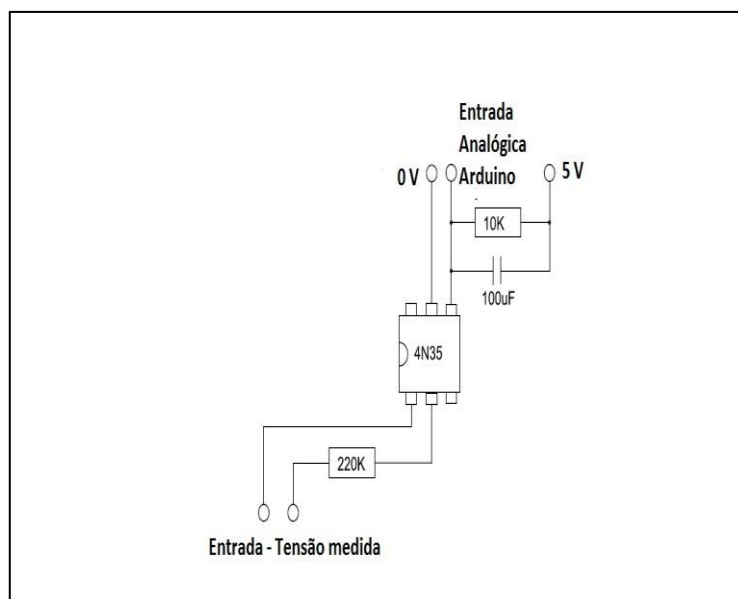
O valor da constante varia de acordo com a tensão de referência que alimenta o sensor LM35, e pode ser obtida a partir da equação (20):

$$Const. = \frac{Tensão^{Ref} * 100}{1.024} \quad (20)$$

No código, foi utilizado o valor de 0.4887 obtido para referência de 5V, porém, pode ser modificado para qualquer valor entre 0 e 5 V, conforme a alimentação necessária para o funcionamento do sensor.

Tensão: Para o sensor de tensão foi construído um divisor de tensão baseado nos limites de tensão das portas analógicas do Arduíno que é de 5V. O diagrama do divisor de tensão é apresentado na Figura 28, com a utilização de um optoacoplador 4N35 para proteção de sobretensão na entrada utilizada no microcontrolador.

Figura 28 – Divisor de tensão utilizado como sensor de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Neste circuito, após a divisão de tensão, as leituras feitas pelas portas analógicas retornam valores de 0 a 1023, e representam proporcionalmente o valor da tensão lida. Ajustes dos sensores para calibração dos valores proporcionais podem ser feitos através de software ou através de potenciômetros na porta de entrada do microcontrolador.

Mapeando o valor de referência utilizado no Arduíno como 5V, torna-se possível realizar as leituras dos sensores e aferir como resposta um valor de tensão eficaz.

Corrente: Como sensor de corrente foi utilizado o ACS-712- 30A. Sensor de corrente de baixo custo. Esse sensor de corrente funciona por efeito *hall*, em sua saída tem-se um sinal analógico de 0 a 5V que é lido pelo controlador. A conversão é realizada da mesma forma que o sensor de tensão utiliza o valor de referência de 5V do Arduíno, no código.

3.1.4 Definição da Forma de Extração dos Dados

Para a escolha da forma de extração dos dados foram considerados critérios como a compatibilidade de comunicação com a plataforma utilizada no protótipo de aquisição (Arduíno), a facilidade de extração dos dados em formato padrão (.txt), e por ser um *software* livre.

Assim, o ScadaBR mostrou-se como uma alternativa para a metodologia proposta, entretanto, existe a possibilidade de integração com qualquer outro sistema de supervisão ou *software* que permita que os dados sejam exportados no formato padrão.

O ScadaBR é um *software* supervisor desenvolvido em “*open-source*” com licença gratuita, baseado na linguagem Java, que permite aplicação, tanto em sistema operacional Windows, como Linux.

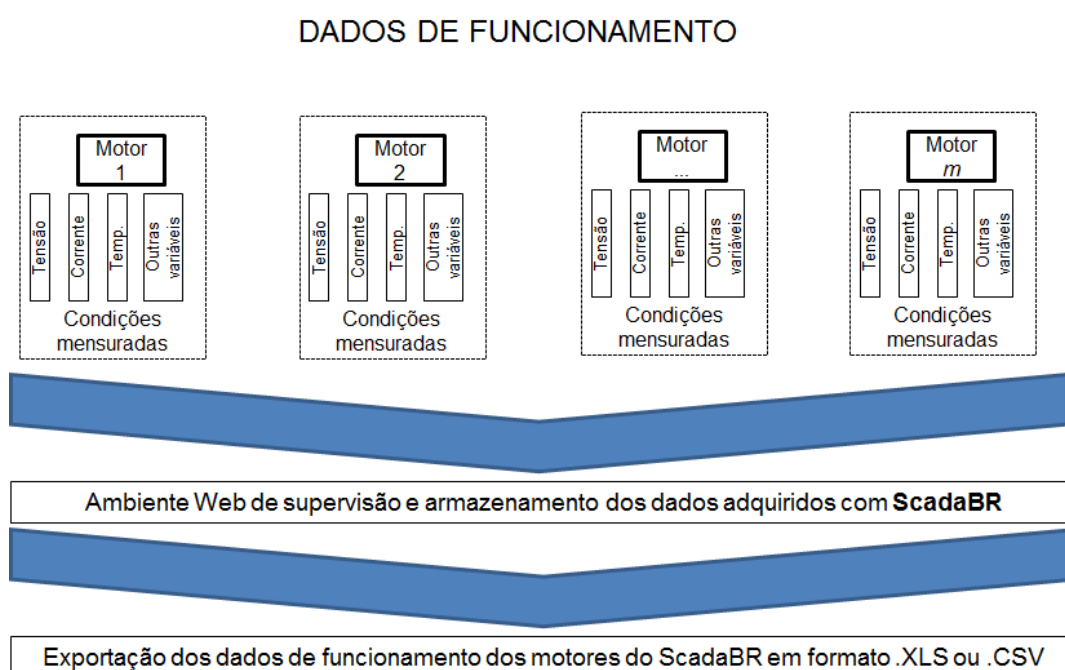
Além de ser um supervisor, o ScadaBR permite que os valores adquiridos sejam extraídos em formatos que podem ser utilizados em outros softwares.

O ScadaBR faz o registro de todas as leituras dos dados dos respectivos sensores, com a informação de data e hora, com armazenamento em arquivo, facilitando as análises posteriores.

Também permite que sejam criados alarmes, com registro dos limites de valor para cada sensor e registro apenas da condição, quando estes ultrapassam os valores pré-estabelecidos, que permitem o uso do sistema proposto como alarme de manutenção ou simples supervisão.

A Figura 29 apresenta a estruturação de como os dados foram coletados.

Figura 29 - Estrutura da coleta de dados dos sensores.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 30 apresenta a tela em que são configurados os parâmetros para exportação dos relatórios das leituras no ScadaBR para arquivo de formato texto.

Figura 30 – Geração de relatório em formato TXT.

Fonte: Autoria própria.

Através do ScadaBR, é possível identificar motor e sensor e definir o período em que se pretende gerar o relatório.

No Apêndice A, está apresentada em detalhes a programação de comunicação entre o ScadaBR e os módulos remotos, bem como a forma de exportação dos dados lidos.

É importante ressaltar que qualquer outro sistema de supervisão poderia ser utilizado ou desenvolvido para a aquisição dos dados, pois a metodologia proposta não limita a forma de aquisição, sendo flexível quanto aos diversos *softwares* que podem ser utilizados.

3.1.5 Construção do Protótipo de Aquisição de Dados

A fim de aplicar a estrutura da metodologia proposta foi realizado um experimento com um protótipo de aquisição de dados baseado na comunicação PLC e no microcontrolador Arduíno que permitiu a integração ao sistema de supervisão do ScadaBR. Para a construção dos módulos de aquisição de dados, foram utilizados modems de comunicação PLC comerciais no padrão *Homeplug*, que trazem como

vantagem a comunicação Ethernet, o que facilita a comunicação do módulo remoto com o microcontrolador Arduíno e, no módulo concentrador, a comunicação com qualquer computador com interface de rede Ethernet.

A Figura 31 ilustra os modems da marca TP-LINK, modelo TL-PA441, utilizados no trabalho.

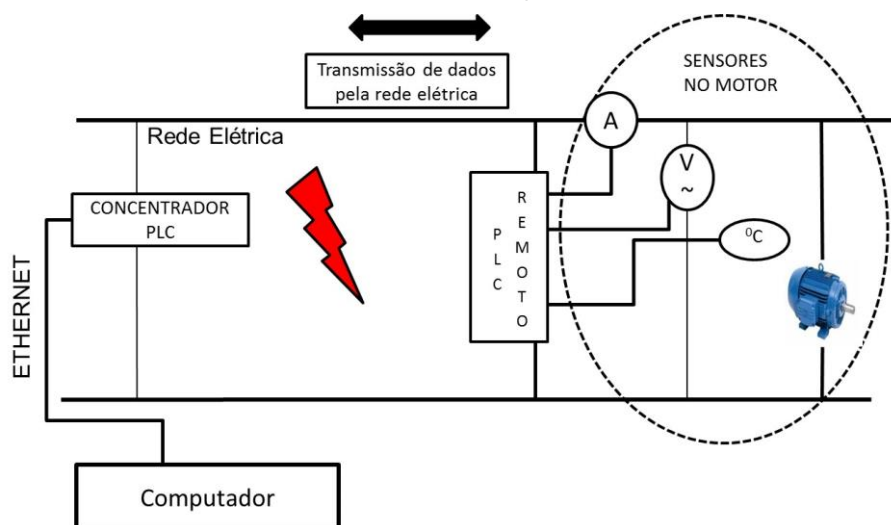
Figura 31 – Modems PLC utilizados.



Fonte – Autoria própria.

O microcontrolador Arduíno é bastante popular, de baixo custo e frequentemente utilizado em prototipagem eletrônica, além de permitir a integração com uma vasta quantidade de sensores, o que justificou sua escolha para a construção do protótipo. O sistema de aquisição de dados ao final desta etapa é representado na Figura 32:

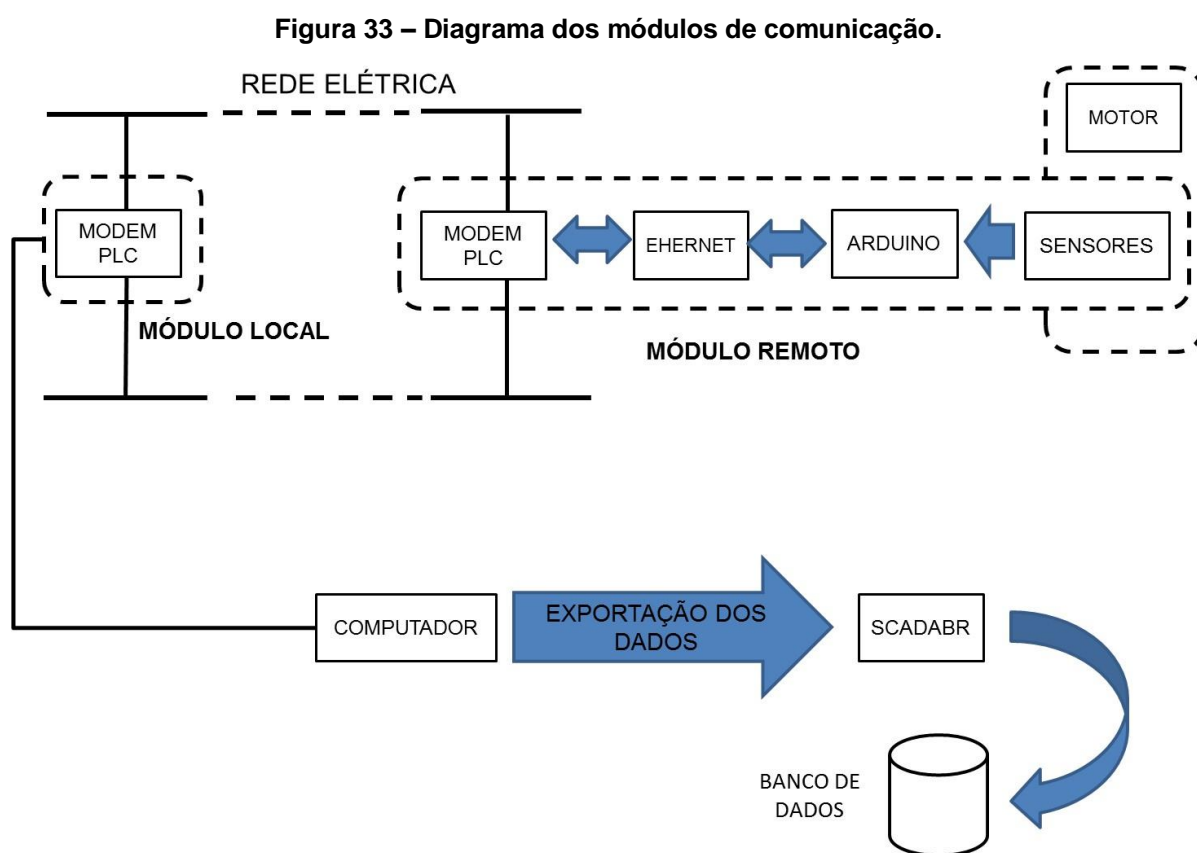
Figura 32 – Sistema de aquisição de dados PLC.



Fonte: Autoria própria.

A construção dos módulos PLC foi dividida em duas partes: o módulo remoto, que tem a finalidade de fazer a aquisição dos dados dos sensores e comunicar com o módulo local, sendo necessária a programação do microcontrolador Arduino para comunicação com os sensores e comunicação com *Shield Ethernet* e, em seguida, o acoplamento com modem PLC padrão *Homeplug*.

A configuração básica da topologia que foi utilizada para aquisição de dados e comunicação, é apresentada na Figura 33:



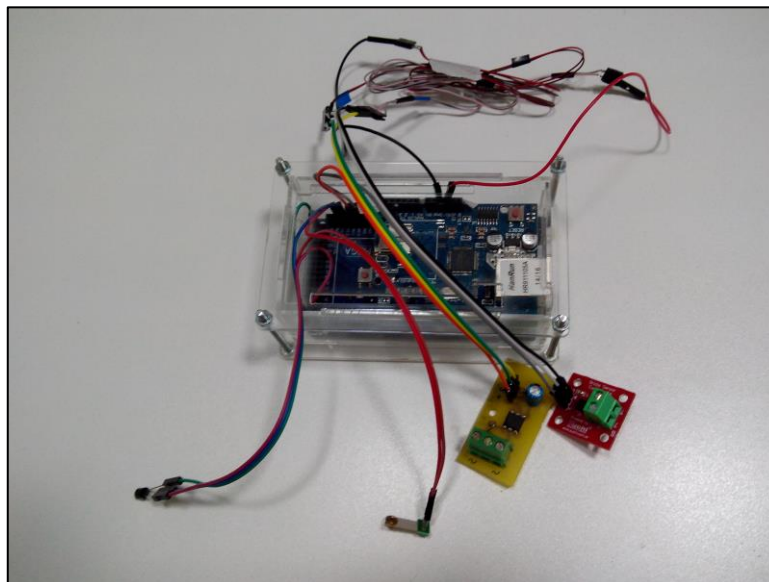
Fonte: Autoria própria.

O modem PLC utilizado opera no padrão *Homeplug 1.0*, o qual tem comunicação Ethernet de tal forma que a comunicação entre módulo local e PC segue este padrão, o que também facilita a integração.

Na programação do Arduino foi estabelecido um endereço IP (Internet Protocol) para cada módulo remoto e respectivo motor elétrico, permitindo assim, a criação de redes de módulos remotos de aquisição de dados, facilitando a sua configuração.

O aspecto do módulo transmissor com os sensores é apresentado na Figura 34:

Figura 34 – Protótipo de aquisição de dados baseado em Arduino.



Fonte: Autoria Própria.

Com a programação baseada em endereçamento IP, existe a possibilidade de criar uma rede de campo para aquisição de dados de vários módulos remotos para um único módulo concentrador, desde que estejam na mesma fase da rede elétrica. Para o sistema trifásico, com apenas três módulos concentradores é possível ter três segmentos de rede, sendo 1 para cada fase, respeitando as regras de endereçamento de rede, o que evita conflito de endereços.

Detalhes da programação do endereçamento realizado no Arduino estão disponíveis no Apêndice B.

A integração entre o protótipo de aquisição e o sistema de supervisão ScadaBR foi baseada no protocolo IP. Cada módulo de aquisição de dados foi configurado em um endereço IP, através da programação no microcontrolador Arduino. A configuração no ScadaBR foi realizada baseada nestes endereços, de tal forma que cada motor teve associado a ele um endereço IP, formando assim, uma rede de aquisição de dados.

Para a comunicação entre os módulos remotos e o módulo concentrador foram utilizados os modems PLC, permitindo que a comunicação ocorresse através da rede elétrica de alimentação dos motores.

A comunicação entre o módulo concentrador e o PC onde foi instalado o ScadaBR, foi baseada no protocolo Ethernet padrão.

3.1.6 Validação dos Dados Coletados dos Sensores

Para o uso dos dados adquiridos foi realizada inicialmente uma validação dos mesmos, com aferição de valores medidos pelos sensores e comparação com valores medidos com voltímetro, amperímetro e termômetro.

Os valores lidos e transmitidos ao sistema de supervisão devem ser os mesmos que os lidos pelos instrumentos de medida.

Para validação dos valores de tensão, corrente, temperatura adquiridos pelos sensores foi realizada a verificação dos valores reais medidos através de um multímetro modelo 266 da marca HYX.

Para validação dos valores adquiridos com o sensor de vibração foi realizado o afrouxamento de parafusos de fixação dos motores para verificação dos níveis de vibração medidos.

Só após a validação dos valores medidos pelos sensores e realização de ajustes, é possível sua utilização nas etapas posteriores.

3.2 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

Nesta segunda etapa, com os dados adquiridos sendo enviados automaticamente pela rede elétrica e com a possibilidade de geração de relatórios, é descrito como foi realizada toda a estruturação da metodologia, baseada nos métodos multicritério de classificação e ordenação.

O objetivo inicial na metodologia foi definir a classificação dos motores em condição de falha incipiente, no instante em que os dados foram coletados, ou seja, em uma determinada amostra da condição de funcionamento.

Assim, realizando a análise durante um determinado intervalo de tempo é possível contabilizar quantas vezes cada motor esteve em falha incipiente durante este período de monitoramento. As informações geradas podem ser um indicador de qual motor, dentro de uma classe, necessita de maior atenção no planejamento da manutenção, direcionando ações aos responsáveis pela gestão da manutenção.

3.2.1 Normalização dos Dados

Considerando que os motores monitorados podem ter características diferentes relativas à potência nominal, temperatura máxima aceitável, e ainda tensão e corrente nominais, há necessidade de tratamento dos valores adquiridos de tensão, corrente e temperatura de tal forma que possam ser comparadas as informações de diferentes motores.

Os dados adquiridos têm o seguinte formato:

tensão medida (V - volts)	corrente medida (A - amperes)	temperatura medida (°C – graus Celsius)
------------------------------	----------------------------------	--

Para que estes dados possam ser utilizados, foi realizada, inicialmente, a divisão entre os valores medidos pelos nominais de funcionamento de cada um dos motores, a fim de apontar a variação das medidas de temperatura, tensão e corrente inicialmente. Os valores nominais são aqueles informados nas placas de identificação dos motores.

Assim, a normalização dos dados seguiu as seguintes equações dispostas a seguir em (21):

$$\begin{array}{|l}
 \text{Tensão(índice)} = \frac{VM(\text{volts})}{VN(\text{volts})} \\
 \text{Temperat. (índice)} = \frac{VM(^{\circ}C)}{VN(^{\circ}C)}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{|l}
 \text{Corrente(índice)} = \frac{VM(\text{amperes})}{VN(\text{amperes})} \\
 \text{Variável(índice)} = \frac{VM}{VMd}
 \end{array}
 \quad (21)$$

Sendo:

VM = Valor Medido; **VN** = Valor Nominal; **VMd** = Valor Médio

Para facilitar a análise multicritério e colocar todos os valores medidos em maximização, para a Tensão foi necessário obter o inverso do valor normalizado, da seguinte forma em (22):

$$\text{Variável(Norm.)} = \frac{1}{\text{Variável(índice)}} \quad (22)$$

Esta normalização permite que motores de características diferentes possam ter suas condições de trabalho comparadas, pois em todos os casos apresentará sempre uma razão entre valor lido e valor nominal.

Considerando que no ambiente de produção existe uma grande variedade de motores, cujas características nominais de operação são conhecidas, esta normalização torna-se bastante adequada nesta metodologia.

3.2.2 Definição dos Pesos para os Critérios

A definição dos pesos para os critérios pelos quais ocorre a análise multicritério refletem em números a importância que o especialista atribui a cada um dos critérios.

Os métodos multicritério escolhidos para classificação das condições dos motores, neste trabalho, foram o ELECTRE TRI que estabelece a necessidade de estabelecimento de pesos para os critérios e o AHPSort que estabelece a necessidade de um vetor de prioridades, baseado no julgamento dos critérios.

Para que os pesos reflitam a melhor forma e a importância dada a cada um dos critérios de avaliação e para que a metodologia proposta para a definição dos pesos dos critérios seja realizada, faz-se necessária uma comparação par a par entre os critérios, conforme estabelecido no método AHP, definindo o vetor de prioridades dos AHPSort.

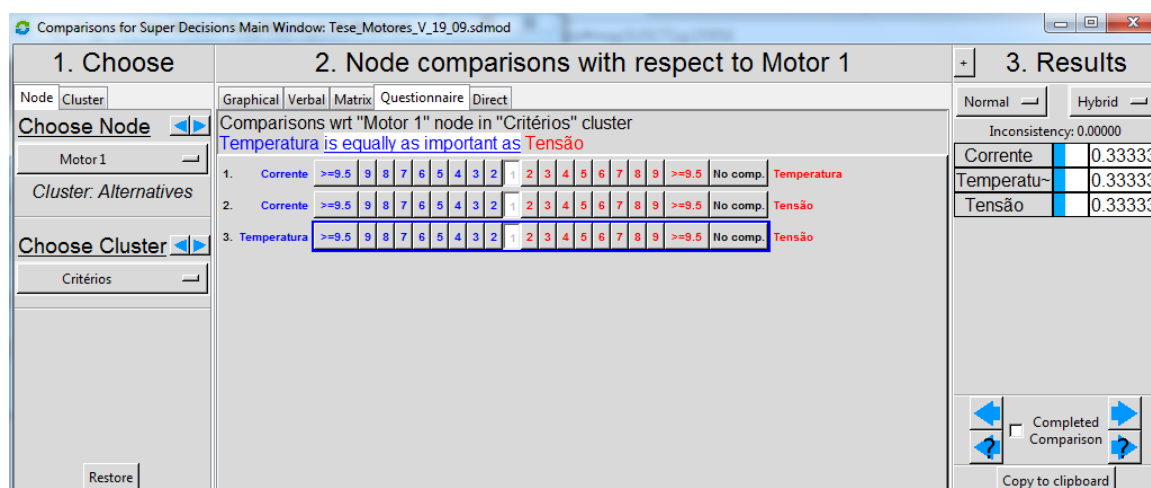
Assim, o decisor, ao julgar os critérios, declara a importância das variáveis no seu processo através do peso dos critérios que serão utilizados nas etapas seguintes.

Este julgamento busca extrair do decisor, de uma maneira mais adequada, a importância dada a cada critério, pois se este julgamento não for realizado de maneira adequada e com coerência pelo decisor, o resultado final obtido na análise poderá não ser adequado.

Para este julgamento entre os critérios, é sugerida a utilização do *software SuperDecision* versão 8.5, desenvolvido por Bill Adams e *Creative Decision Foundation*, que permite a realização do julgamento entre os critérios.

A Figura 35 apresenta o resultado dos julgamentos nesta aplicação.

Figura 35 – Apresentação para a realização dos julgamentos entre critérios.



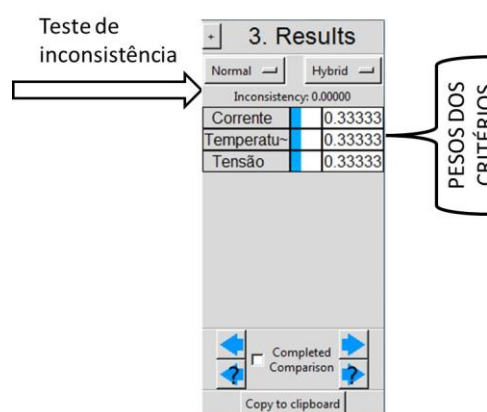
Fonte: Autoria própria.

Além dos critérios tensão, corrente e temperatura, caso haja novos critérios a serem considerados, estes deverão ser incluídos para a definição dos seus respectivos pesos.

Além da definição dos pesos, outro aspecto importante a ser observado no julgamento dos critérios é o teste de inconsistência do julgamento dos critérios, conforme estabelecido pelo método AHP.

O resultado do teste de inconsistência do julgamento realizado pelo decisor foi calculado automaticamente pelo *SuperDecisions*, conforme estabelecido pelo método AHP. O resultado do julgamento realizado e o teste de inconsistência no *SuperDecision* é apresentado na Figura 36. Os pesos atribuídos no vetor de prioridades pelo método AHP, deverá ser utilizado, também, no método ELECTRE TRI.

Figura 36 – Pesos dos critérios e teste de inconsistência AHP.



Fonte: Autoria própria.

Os valores ora estabelecidos, podem sofrer alterações de acordo com o decisor e na metodologia proposta existe a possibilidade de uso de outras modalidades de julgamento, entretanto, a inconsistência aceitável deverá ser menor que 0,1. Isso é necessário para que o julgamento seja realizado com coerência entre os critérios de decisão.

3.2.3 Definição das Classes dos Motores

Após a definição dos pesos de cada critério, a próxima etapa é a inserção dos limites entre as classes. Para o experimento proposto, foram definidas três classes:

- Classe de condição normal;
- Classe de condição aceitável;
- Classe de falha incipiente.

Cada uma das três classes tem uma relação com os valores nominais de operação de cada motor monitorado para a definição de limites, preferências e indiferenças.

Como limites entre as classes de **condição normal** para **condição aceitável**, foram definidos para as três variáveis mínimas de análise:

- Tensão: Valor nominal do motor
- Corrente: Valor nominal do motor
- Temperatura: Valor nominal do motor

Caso sejam inseridas novas variáveis, deverão ser estabelecidos os limites, preferências e indiferenças para que seja realizada a classificação.

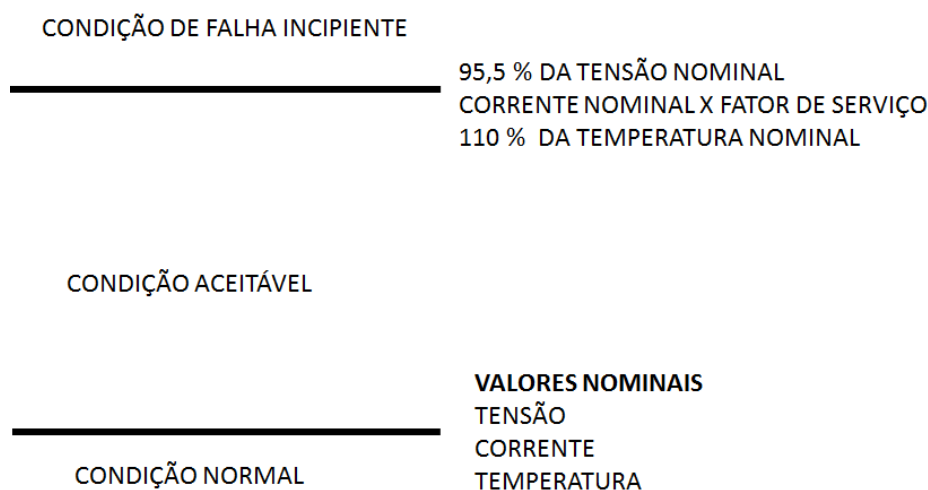
Como limites entre as classes '**condição aceitável**' para a '**condição de falha incipiente**' foram definidas para as três variáveis mínimas de análise:

- Tensão: 95,5% da tensão nominal, baseada na NBR5410 e NBR17094;
- Corrente: Valor nominal x Fator de serviço do motor; e,
- Temperatura: 110% do valor nominal.

A Figura 37 ilustra a divisão entre as classes de condição de funcionamento dos motores.

Figura 37 - Limites entre as classes de condição dos motores.

DEFINIÇÃO DAS CLASSES DA METODOLOGIA



Fonte: Autoria própria.

Os limites estabelecidos também podem sofrer alterações, dependendo do decisor, entretanto os valores propostos aqui foram baseados na pesquisa realizada com o objetivo de manter os motores dentro dos seus limites aceitáveis de trabalho estabelecidos pelos fabricantes, dentro das normas de construção e funcionamento.

3.2.4 Classificação no ELECTRE TRI

Tendo definidas as condições e as classes de funcionamento, bem como a forma com que os dados coletados devem ser tratados para a comparação e, por fim, os pesos de cada critério para cada uma das variáveis de funcionamento, a classificação dos motores se torna possível.

Um dos métodos propostos para a classificação é o ELECTRE TRI, tendo em vista as características dos critérios e a forma pela qual são disponibilizados para a análise. Para aplicação do método ELECTRE TRI, foi utilizado o *software* ELECTRE TRI, versão 2.0a, desenvolvido por *Lamsade – University Paris-Dauphine*. Para as situações onde a classificação indicar mais de um motor em condição de falha incipiente, outra etapa de ordenação é realizada onde forem encontradas estas situações. Assim, para a tensão foi considerada a maximização. Para corrente, a

proposta é utilizar a média do FS (Fator de Serviço) dos motores monitorados para estabelecimento do limite.

O Quadro 14 apresenta os limites das classes, bem como os limites de preferência e indiferença.

Quadro 14 - Limites definidos para as classes.

Classe		Critérios		
		Tensão	Corrente	Temperatura
Falha Incipiente				
	Limites	1,0472	1,2	1,10
Aceitável				
	Limites	1,00	1,00	1,00
Normal				
Pesos				
Direção das preferências		↑Max	↑Max	↑Max
Limites	Preferência (p)	0,01	0,01	0,01
	Indiferença (q)	0,001	0,001	0,001

Fonte: Autoria própria.

Os limites p e q apresentados no Quadro 14 indicam as relações de preferência e indiferença utilizadas pelo método para realização da classificação. O limite de indiferença (q) especifica a maior diferença entre o valor de uma alternativa a_k e o valor padrão de uma fronteira b_n que preserva a indiferença entre a_k e b_n ($a_k I b_n$). Da mesma forma, o limite de preferência (p) especifica a menor diferença entre o valor de uma alternativa a e o valor padrão de uma fronteira b_n que estabelece a preferência forte entre a_k e b_n ($a_k P b_n$). A relação $a_k Q b_n$ representa uma situação intermediária de hesitação entre a indiferença e a preferência, denominada preferência fraca. Contudo, apenas uma das situações pode ocorrer e estão descritas nas equações a seguir:

$$a_k I b_n \Leftrightarrow |g(a_k) - g(b_n)| \leq q_j$$

$$a_k Q b_n \Leftrightarrow g(b_n) + p_j \geq g(a_k) > g(b_n) + q_j$$

$$a_k P b_n \Leftrightarrow |g(a_k) - g(b_n)| > q_j$$

Além dos limites propostos para as classes também foi definido o nível de corte $\lambda = 0,75$, valor que confere nível de rigor intermediário à análise, tendo em vista que o valor de λ deve ficar entre 0,5 e 1,0, conforme o método ELECTRE TRI.

O nível de corte (λ) confere o rigor ao método, de tal forma que um valor abaixo de 0,75 faz com que a análise leve para as classes “Aceitável” e “Falha incipiente”

apenas quando os valores lidos dos motores estiverem bem acima do normal. Enquanto o nível de corte estiver mais próximo de 1, os motores com qualquer dos seus critérios fora das condições nominais poderá ser classificado como “Aceitável” ou “Falha incipiente”, dependendo do quanto fora das condições nominais estiverem estes valores. Assim, isso permite ao decisor alterar o nível de corte, de forma a atender melhor as suas necessidades dentro da gestão da manutenção preditiva.

O método ELECTRE TRI apresenta ainda duas atribuições quando realiza a classificação, a atribuição Pessimista e a atribuição Otimista. Neste experimento, foi considerada a classificação com atribuição Otimista, pois a visão otimista é mais severa quanto à realização da classificação.

O motor ou motores classificados como “Falha incipiente” irão compor uma tabela (com a condição de cada motor minuto a minuto de leitura), para que ao final de um determinado período de avaliação das condições dos motores, seja possível verificar qual foi o motor que mais esteve na condição de falha incipiente, conforme demonstrado no Quadro 15.

Quadro 15 – Verificação de mais de um motor em “Falha incipiente” no minuto.

Amostra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Mais de 1 motor? (s/n)
1	1						
2		1	1				s
3				1			
...							
X							

Fonte: Autoria própria.

Esta contabilização poderá indicar ao decisor qual a prioridade na manutenção dos motores elétricos. Caso em algum minuto de análise haja mais de um motor nesta condição, uma análise de ordenação através do método ELECTRE II indica o motor em pior situação naquele minuto que irá compor o quadro indicativo de possibilidade de manutenção.

Após esta classificação, caso em algum minuto da amostra o decisor entender que há necessidade de um ajuste com maior sensibilidade, sugere-se na metodologia a utilização do método AHPSort para classificação desta amostra no minuto em que há dúvida sobre os resultados.

3.2.5 Classificação com AHPSort

Para a classificação através do método AHPSort, serão utilizados os mesmos pesos definidos no AHP, criando o chamado vetor de prioridades no AHPSort.

O AHPSort realiza a classificação das alternativas através de julgamento individual par a par, para cada um dos limites definidos

Diferentemente do ELECTRE TRI, no AHPSort podem ser definidos os limites superior e inferior para cada alternativa (motor) e, portanto, o julgamento é realizado par a par, critério a critério, utilizando-se muito mais a sensibilidade e experiência do decisor.

Entretanto, este julgamento pode ser bem mais demorado do que no ELECTRE TRI. Para cada alternativa e conjunto mínimo de critérios (variáveis) estabelecidos, para cada amostra, são necessários seis julgamentos. Ou seja, numa análise de 10 motores a cada amostra, são necessários no mínimo 60 julgamentos. Caso seja incluído mais um critério (variável), seriam 80 julgamentos.

Assim, o uso do AHPSort deve ser realizado somente naquelas situações onde o resultado apresentar alguma incoerência, após validado pelo decisor.

3.2.6 Ordenação dos Motores no Método ELECTRE II

Nas amostras de classificação, onde mais de um motor figurar classificado na classe “Falha incipiente”, é necessário realizar uma ordenação, a fim de detectar o motor em pior situação naquele momento comparado aos demais.

Com isso, em cada instante de amostra, apenas um motor será contabilizado na condição de falha incipiente, ainda que se tenha todos os outros motores alocados na classe “falha incipiente”.

O método utilizado para a ordenação foi o ELECTRE II, que tem a facilidade de usar os mesmos dados normalizados que foram usados para a classificação. Além disso, o método também necessita da definição de valores de p e q , conforme visto no referencial teórico.

Desta forma, para a aplicação do método, os valores de p e q variam entre 0 e 1, tanto que a alternativa a é preferível a alternativa b se e somente se:

$$C(a,b) \geq p \text{ (índice mínimo de concordância)}$$

$D(a,b) \leq q$ (índice máximo de discordância)

O método explora ainda dois níveis de sobreclassificação, uma forte (S^f) e uma fraca (S^f) considerando os valores atribuídos para p^* e q^* na sobreclassificação forte e p^0 e q^0 na sobreclassificação fraca, sendo que $0 < p^0 < p^* < 1$ e $0 < q^0 < q^* < 1$.

Na estruturação para ordenação dos motores, foram atribuídos os seguintes valores para ordenação forte: $p^*=0,7$ e $q^*=0,6$, enquanto para a ordenação fraca os valores atribuídos foram: $p^0=0,5$ e $q^0=0,4$.

Com os resultados dos *rankings* estabelecidos nas ordenações forte e fraca é realizada a média das ordenações para obter o *ranking* do motor em pior condição para o melhor.

3.2.7 Mapeamento de Anormalidades

A cada amostra serão registados um ou mais motores classificados em “Falha incipiente” e, posteriormente ordenados, de modo que ao final da análise, apenas um motor seja contabilizado, é realizado um mapeamento de anormalidades com os dados iniciais da amostra.

O objetivo desta análise é verificar quais as variáveis apresentaram maiores variações para valores fora das condições normais, na amostra em que este foi classificado na classe “Falha incipiente”.

Assim, os dados tratados da amostra utilizados na análise multicriterial são verificados de forma a identificar quais variáveis estiveram naquela amostra fora dos valores nominais definidos para a classificação, conforme ilustrado no Quadro 16, com as informações de anormalidade.

Quadro 16 – Mapeamento das variáveis em anormalidade no minuto.

Amostra	M1	M2	M3	M4	...	M_m	Variável 1	Variável 2	...	Variável v
1	1						1			
2		1						1		
3				1			1	1		
4										
5		1					1			
6			1					1		
7	1						1			

...										
...										
...										
...										
X										

Fonte: Autoria própria.

Todas as variáveis com valor adquirido na amostra com valor tratado >1 devem ser registradas no mapa de anormalidades.

Isso permite ao decisor, ao final do intervalo de avaliação, ter a informação de qual a variável que mais esteve fora das condições nominais, auxiliando na indicação da manutenção a ser realizada.

3.2.8 Classificação dos Motores no Período de Análise

Após a aquisição dos dados e sua análise nos métodos multicritério, tem-se, ao final do método, a classificação a cada período de amostra, o registro dos motores que em algum momento entraram em condição de “Falha incipiente”, juntamente com a informação da(s) variável (eis) fora das condições normais.

A cada ocasião que algum motor ficar na condição de “Falha incipiente” pela classificação, é registrado como exemplificado no Quadro 17 e, caso mais de um motor seja classificado nesta condição, é realizada a ordenação para que apenas aquele em pior condição no momento da análise seja registrado.

Junto à informação do motor classificado em “Falha incipiente”, a informação estatística de qual ou quais variáveis estiveram fora da condição normal naquela amostra também são representadas.

Quadro 17 – Registro das falhas.

Registro dos motores em Falha Incipiente					Mapa de anormalidades			
Tempo da amostra	Motores avaliados				Variáveis fora da condição normal			
	M1	M2	...	Ma	V ₁	V ₂	...	V _v
T1	1				1			
T2		1			1			
T3								
T4								
T5								
T6				1		1		

T7								
T8		1			1	1		
T9								
T10								
T11		1				1		
...								
Tn				1				1

Fonte: Autoria própria.

Com as informações das classificações em cada amostra e variável ou variáveis em anormalidade, os Quadros 18 e 19 apresentam o resultado final encontrado.

No Quadro 18, informações relativas à quantidade de situações em que cada motor foi classificado em “Falha incipiente”.

Quadro 18 – Resultado da análise multicritério para cada motor.

Registro dos motores em Falha Incipiente						
Índice	Motores monitorados					
	M1	M2	M3	M4	...	M _m
Total T Falha Incipiente	$A = \sum_{n=1}^n T_n$	$B = \sum_{n=1}^n T_n$	$C = \sum_{n=1}^n T_n$	$D = \sum_{n=1}^n T_n$		$F = \sum_{n=1}^n T_n$
% sobre o total do período	$\frac{A}{n} (x100)$	$\frac{B}{n} (x100)$	$\frac{C}{n} (x100)$	$\frac{D}{n} (x100)$		$\frac{F}{n} (x100)$
% do total motores em falha incipiente	$\frac{A}{\sum_A} (x100)$	$\frac{B}{\sum_A} (x100)$	$\frac{C}{\sum_A} (x100)$	$\frac{D}{\sum_A} (x100)$		$\frac{F}{\sum_A} (x100)$

Fonte: Autoria própria.

No Quadro 19, informações relativas à quantidade de vezes em que cada variável esteve fora das condições normais para cada motor durante o intervalo da amostra.

Quadro 19 – Indicador de variáveis em anormalidade por motor.

	Variável 1	Variável 2	Variável n
M1	x	y			z
M2	a	b			c
...
M _m					

Fonte: Autoria própria.

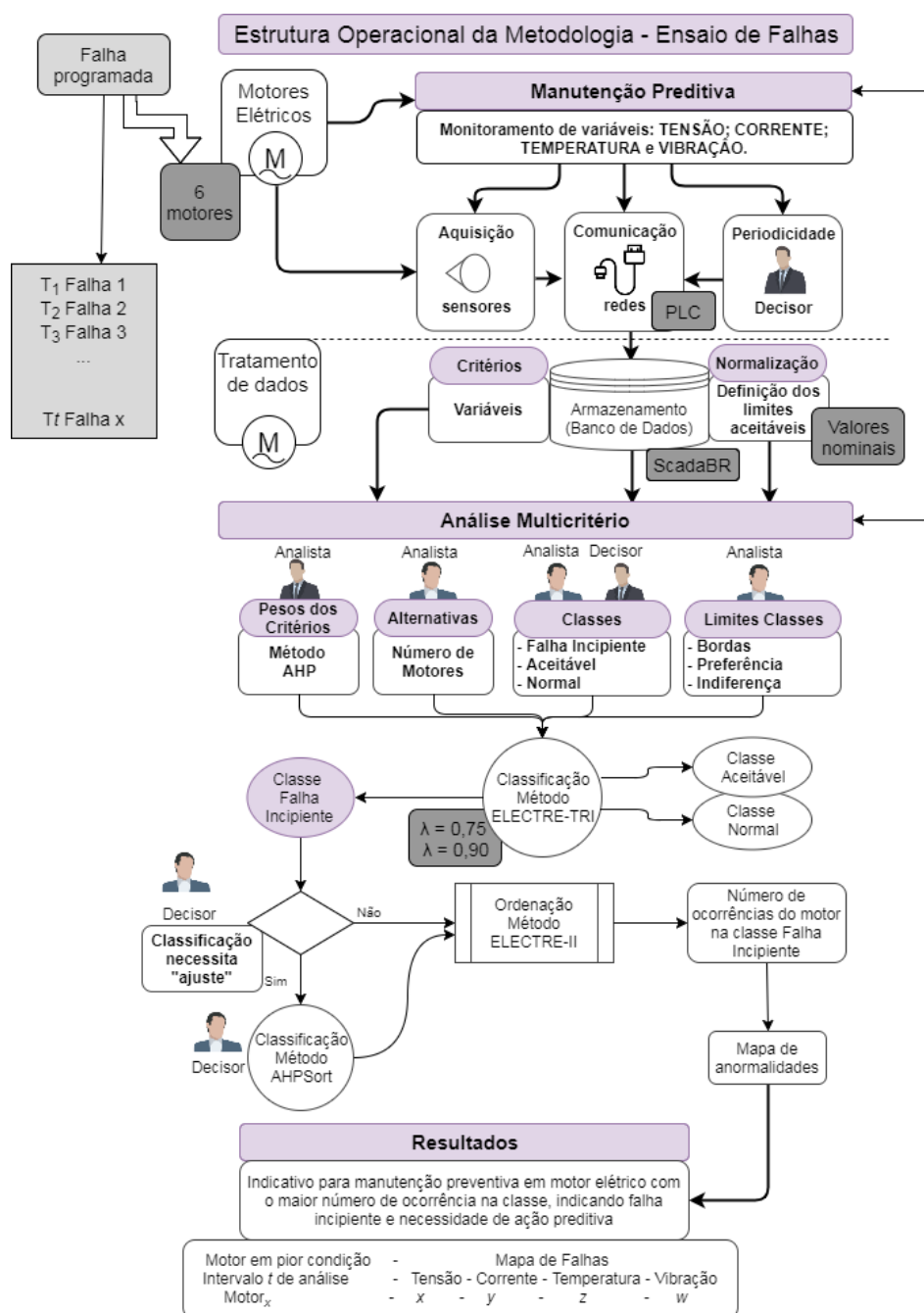
Desta forma, o indicador de variáveis em anormalidade apresenta para um período de tempo T quais motores estiveram mais vezes em condição de “Falha incipiente” e,

durante quanto tempo, no período de análise, cada variável de seu respectivo motor esteve fora das condições nominais, permitindo ao gestor de manutenção preditiva realizar um planejamento mais adequado, com base nestas informações.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Para a aplicação prática, foi realizado um ensaio de falhas programadas com o objetivo de verificar essa estruturação atende ao que foi proposto. Conforme ilustrado na Figura 38, são identificadas as técnicas utilizadas para o ensaio/experimento, em cada uma das etapas da metodologia proposta.

Figura 38 – Metodologia para o ensaio de falhas.



Fonte: Autoria própria.

Nesta avaliação, foi utilizado um conjunto de seis motores monofásicos entre 1/3CV e 1/2CV. Também foi incluída mais uma variável para a análise além dos três critérios mínimos propostos na metodologia. Assim, foi incluída a variável (critério) *vibração* para a realização da avaliação.

Para a definição do valor de referência de vibração, foi considerado o valor médio de vibração de cada motor totalmente fixo ligado.

$$\text{Vibração(índice)} = \frac{VM}{VMd}$$

Onde:

VM = valor medido

VMd = valor médio de vibração do motor fixo

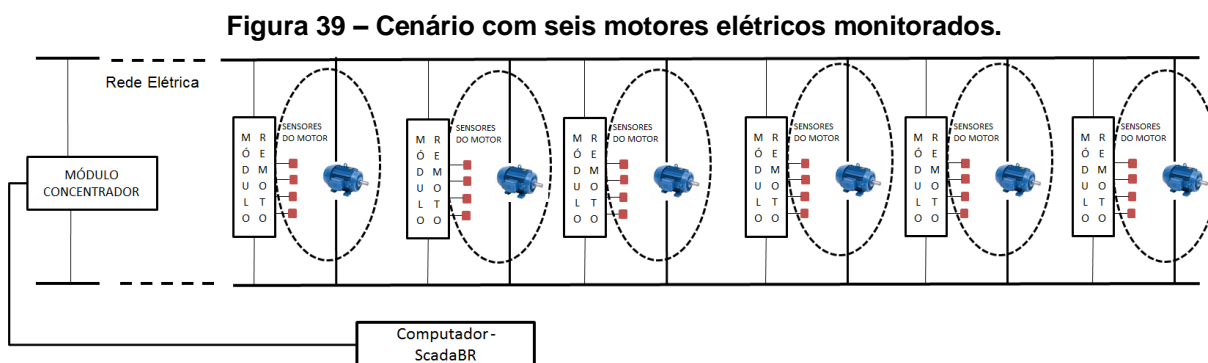
Desta forma, foi possível obter um valor de referência para utilização na aplicação, com a variável vibração.

4.1 ENSAIO DE FALHAS PROGRAMADAS

O ensaio de falhas programadas seguiu um roteiro de falhas em determinadas condições de funcionamento dos motores, com tempo de duração da falha pré-definido, a fim de avaliar a percepção da falha no método.

No cenário utilizado para a coleta dos dados, foram utilizados seis motores elétricos, com a possibilidade de alterar algumas de suas características em funcionamento, que permitisse que ensaios fossem realizados.

A Figura 39 apresenta um diagrama do cenário utilizado para aquisição de dados.



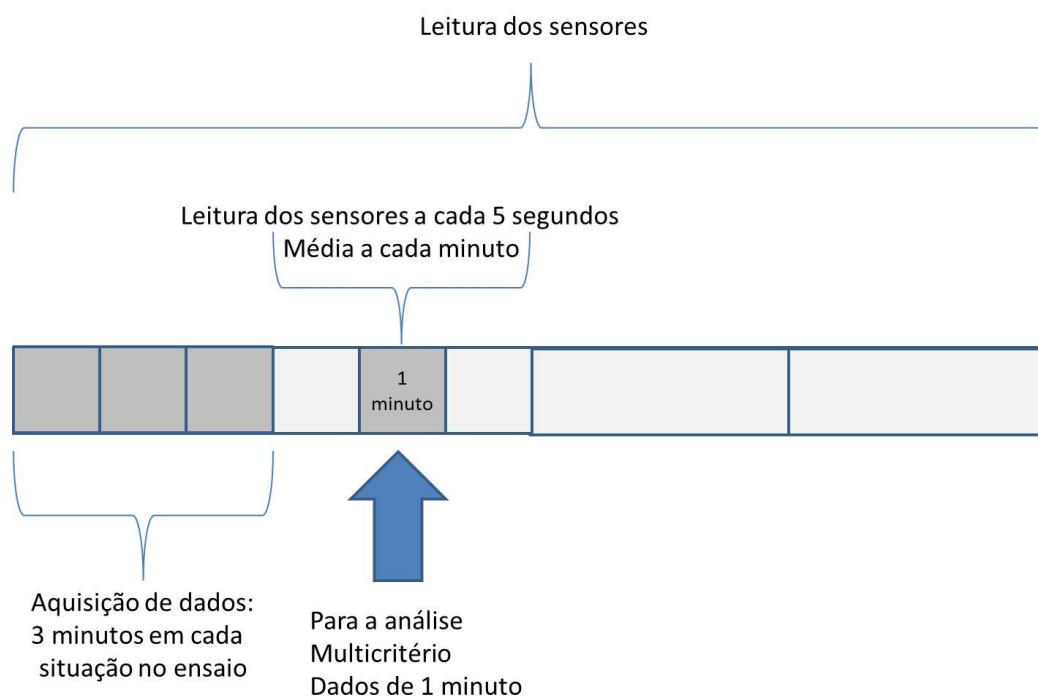
Fonte: Autoria própria.

As alterações foram feitas em *Tensão* de alimentação nominal (utilizando resistor de fio de 100R em série com a alimentação) com o objetivo de obter uma queda de tensão maior que 5%; *Temperatura* (através de bloqueio no sistema de ventilação e aquecimento de carcaça com aquecedor externo) com o objetivo de ultrapassar a Temperatura nominal de trabalho do motor e, *Vibração* (soltando os parafusos de fixação do motor) com o objetivo de aumentar a vibração na condição de falha incipiente.

Cada situação de falha programada teve uma duração de três minutos, sendo considerado o segundo minuto, conforme ilustrado na Figura 40.

A aquisição de dados pelo ScadaBR foi programada para intervalos de 5s, de tal forma que a cada minuto foram coletadas 12 amostras, das quais foi utilizada a média dos valores do minuto.

Figura 40 – Intervalo de aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria.

Para o tratamento dos dados lidos, foram utilizados os valores nominais de placa de cada um dos motores.

A Figura 41 mostra os valores de placa de cada um dos motores utilizados no ensaio.

Figura 41 – Informações dos motores utilizados.



Placa de identificação do motor 1



Placa de identificação do motor 2



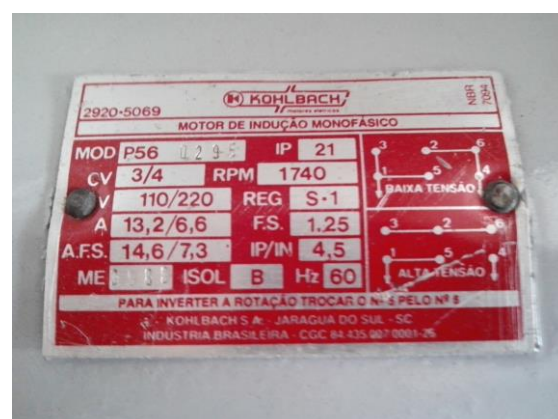
Placa de identificação do motor 3



Placa de identificação do motor 4



Placa de identificação do motor 5



Placa de identificação do motor 6

Fonte: Autoria própria.

Um resumo dos valores nominais de cada um dos motores utilizados no ensaio é apresentado no Quadro 20.

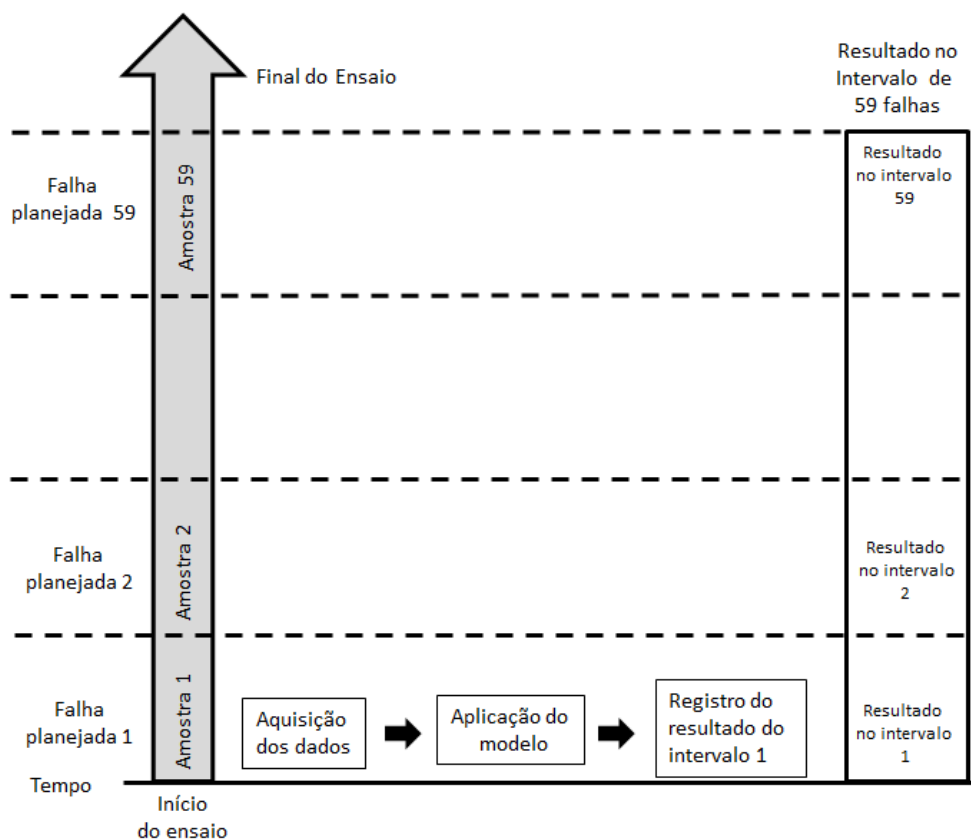
Quadro 20 – Resumo das características nominais dos motores utilizados.

Valores nominais	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Tensão	110 V	110 V	110 V	110 V	127 V	110 V
Corrente	6,4 A	6,4 A	6,0 A	8,6 A	20 A	13,2 A
Temperatura	130 °C (Classe B)	130 °C (Classe B)	130 °C (Classe B)	130 °C (Classe B)	155 °C (Classe F)	130 °C (Classe B)
Fator de Serviço	1,0	1,35	1,35	1,1	1,15	1,25

Fonte: Autoria própria.

Definidos os motores e as falhas que seriam inseridas, bem como o intervalo de duração de cada uma delas, com o ScadaBR configurado para a aquisição dos dados, o teste foi realizado, com uma duração de mais de 3 horas de amostragem, conforme ilustra a Figura 42.

Figura 42 – Ensaio de falhas planejadas.



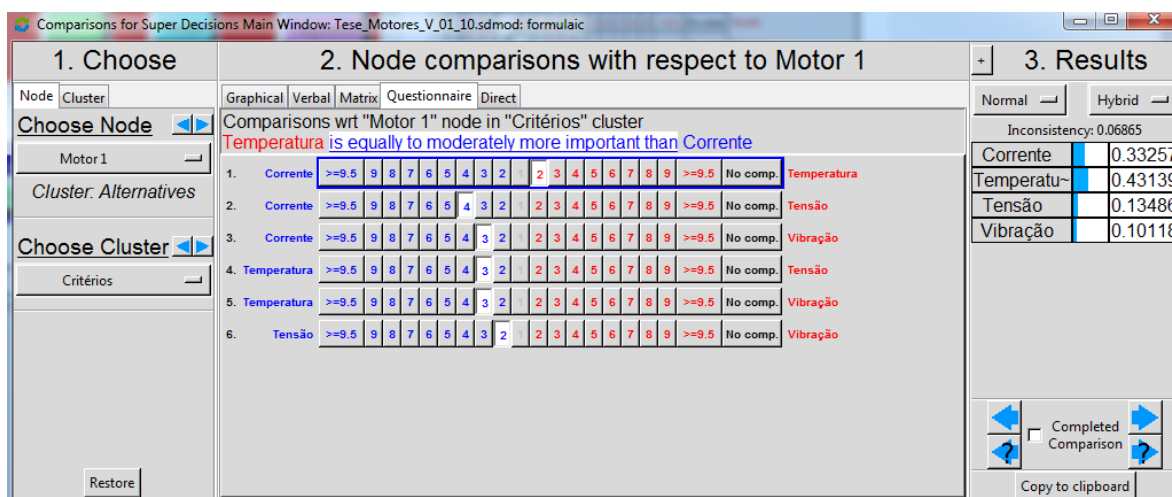
Fonte: Autoria própria.

Com os dados adquiridos, foi possível realizar um experimento, a fim de verificar as fases de aplicação da metodologia, baseado em falhas pré-definidas e controladas.

4.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Para a realização deste ensaio, foi realizado julgamento entre os critérios para a obtenção dos pesos e teste de inconsistência. O resultado do julgamento realizado e utilizado neste trabalho é apresentado na Figura 43.

Figura 43 – Resultado do julgamento realizado entre os critérios.



Fonte: Autoria própria.

Os pesos de cada critério obtidos através do julgamento par a par dos critérios foram:

Corrente: 0,33257

Temperatura: 0,43139

Tensão: 0,13486

Vibração: 0,10118

O teste de inconsistência do julgamento par a par das variáveis foi de 0,06865, menor que 0,1 conforme exigido pela metodologia proposta e, portanto, pode o resultado obtido ser utilizado nas etapas seguintes.

Estes pesos foram utilizados nas etapas seguintes da aplicação da metodologia, tanto como pesos para o ELECTRE TRI como vetor de prioridades no AHPSort.

Estes pesos podem variar, dependendo da quantidade de variáveis inseridas na metodologia, bem como o julgamento realizado pelo decisor, desde que o teste de inconsistência dos julgamentos seja menor que 0,1.

O ensaio de falhas programadas teve como objetivo simular situações próximas as do ambiente real e a sequência de como elas foram realizadas está representado no Quadro 21.

Quadro 21 – Sequência dos ensaios de falha realizados.

Situação	Número de amostras	Tempo cada amostra	Tempo na falha programada
1. Variáveis sem nenhuma alteração	1	1 minuto	3 minutos
2. Alteração de Tensão em cada um dos 6 motores, individualmente.	6	1 minuto	18 minutos
3. Alteração de Temperatura em cada um dos 6 motores, individualmente.	6	1 minuto	18 minutos
4. Alteração de Vibração em cada um dos 6 motores, individualmente.	6	1 minuto	18 minutos
5. Combinação de alteração de Tensão e Temperatura de maneira individual em cada um dos 6 motores.	6	1 minuto	18 minutos
6. Combinação de alteração de Tensão e Vibração de maneira individual em cada um dos 6 motores.	6	1 minuto	18 minutos
7. Combinação de alteração de Vibração e Temperatura de maneira individual em cada um dos 6 motores.	6	1 minuto	18 minutos
8. Combinação de alteração de Tensão e Temperatura de funcionamento em 2, 3, 4 e 5 dos 6 motores.	5	1 minuto	15 minutos
9. Combinação de alteração de Tensão e Vibração de funcionamento em 2, 3, 4 e 5 dos 6 motores	5	1 minuto	15 minutos
10. Combinação de alteração de Vibração e Temperatura de funcionamento em 2, 3, 4 e 5 dos 6 motores.	4	1 minuto	12 minutos
11. Combinação de alteração das três características de funcionamento do motor (Tensão, Temperatura e Vibração), individualmente, em cada um dos 6 motores.	6	1 minuto	18 minutos
12. Combinação de alteração das três características de funcionamento do motor (Tensão, Temperatura e Vibração) em 2, 3, 4 e 5 dos 6 motores.	4	1 minuto	12 minutos
TOTAL	59 amostras	1 minuto	177 minutos

Fonte: Autoria própria.

Os ensaios foram realizados numa bancada onde foi possível simular cada uma das falhas.

A Figura 44 ilustra a disposição dos motores e os protótipos de aquisição de dados junto aos sensores.

Figura 44 – Bancada utilizada para os ensaios.



Fonte: Autoria própria.

Para avaliação da metodologia proposta e teste de sensibilidade, a classificação no método ELECTRE TRI foi realizada com dois níveis de corte: 0,75 e 0,9.

4.2.1 Avaliação com Nível de Corte em 0,75

Com os dados coletados, tratados e prontos para a classificação, conforme a estruturação proposta foi realizada a classificação no método ELECTRE TRI com nível de corte em 0,75.

O resultado obtido após a classificação dos motores no ELECTRE TRI é apresentado no Quadro 22, utilizando os dados apenas da atribuição otimista para todo o período do ensaio, com o nível de corte em 0,75.

Quadro 22 – Classificação dos motores ($\lambda = 0,75$).

Ensaio realizado	Número da amostra	Motor(es) envolvido(s) no ensaio	Atribuição Otimista Falha incipiente					
			M1	M2	M3	M4	M5	M6
Variáveis sem nenhuma alteração	1							
Queda de Tensão em um motor	2	M1						
	3	M2						
	4	M3						
	5	M4						
	6	M5						
	7	M6						
Aumento de Temperatura em um motor	8	M1						
	9	M2		1				
	10	M3						
	11	M4				1		
	12	M5						
	13	M6						1
Aumento de Vibração em um motor	14	M1						
	15	M2						
	16	M3						
	17	M4						
	18	M5						
	19	M6						
Queda de Tensão e aumento de Temperatura em um motor	20	M1						
	21	M2		1				
	22	M3			1			
	23	M4				1		
	24	M5						
	25	M6						1
Queda de Tensão e aumento da Vibração em um motor	26	M1						
	27	M2						
	28	M3						
	29	M4						
	30	M5						
	31	M6						
Aumento da Temperatura e Vibração em um motor	32	M1	1					
	33	M2		1				
	34	M3			1			
	35	M4				1		
	36	M5						
	37	M6						1
Queda de Tensão e aumento de Temperatura em mais de um motor	38	M1 – M2	1	1				
	39	M1 – M2 – M3	1	1	1			
	40	M1 – M2 – M3 – M4	1	1	1	1		
	41	M1 – M2 – M3 – M4 – M5	1	1	1	1		
Queda de Tensão e aumento de Vibração em mais de um motor	42	M1 – M2						
	43	M1 – M2 – M3						
	44	M1 – M2 – M3 – M4						
	45	M1 – M2 – M3 – M4 – M5						

Aumento de Temperatura e Vibração em mais de um motor	46	M1 – M2	1					
	47	M1 – M2 – M3	1	1	1			
	48	M1 – M2 – M3 – M4	1	1	1			
	49	M1 – M2 – M3 – M4 – M5	1	1	1	1		
Aumento de Temperatura, Vibração e queda de Tensão em um motor	50	M1	1					
	51	M2		1				
	52	M3			1			
	53	M4				1		
	54	M5						
	55	M6						1
Aumento de Temperatura, Vibração e queda de Tensão em mais de um motor	56	M1 – M2	1	1				
	57	M1 – M2 – M3	1	1	1			
	58	M1 – M2 – M3 – M4	1	1	1	1		
	59	M1 – M2 – M3 – M4 – M5	1	1	1	1		
Quantidade de vezes em falha incipiente			14	15	12	9	0	4
Percentual do total de falhas			25,9%	27,8%	22,2%	16,6%	0%	7,4%
Percentual do total de amostras			23,7%	25,4%	20,3%	15,3%	0%	6,8%

Fonte – Autoria própria.

Em alguns dos ensaios de falhas, mais de um motor foi classificado como em “Falha incipiente”, conforme destacado no quadro, assim foi realizada a classificação com o método ELECTRE II para a ordenação com o objetivo de buscar o motor em pior situação na respectiva amostra.

Como definido, foram atribuídos os seguintes valores para ordenação forte: $p^* = 0,7$ e $q^* = 0,6$, enquanto para a ordenação fraca os valores atribuídos foram: $p^0 = 0,5$ e $q^0 = 0,4$.

Com os resultados dos *rankings* estabelecidos nas ordenações forte e fraca foi realizada a média das ordenações para obter o *ranking* do motor em pior condição para o melhor.

Assim, uma classificação final para o período de 177 minutos de ensaio foi obtida e é apresentada no Quadro 23.

Quadro 23 – Resultado da análise multicritério ($\lambda = 0,75$).

Ensaio realizado	Número da amostra	Motor(es) envolvido(s) no ensaio	Atribuição Otimista Falha incipiente					
			M1	M2	M3	M4	M5	M6
Variáveis sem nenhuma alteração	1							
	2	M1						

Queda de Tensão em um motor	3	M2						
	4	M3						
	5	M4						
	6	M5						
	7	M6						
Aumento de Temperatura em um motor	8	M1						
	9	M2		1				
	10	M3						
	11	M4				1		
	12	M5						
Aumento de Vibração em um motor	13	M6						1
	14	M1						
	15	M2						
	16	M3						
	17	M4						
Queda de Tensão e aumento de Temperatura em um motor	18	M5						
	19	M6						
	20	M1						
	21	M2		1				
	22	M3			1			
Queda de Tensão e aumento da Vibração em um motor	23	M4				1		
	24	M5						
	25	M6						1
	26	M1						
	27	M2						
Aumento da Temperatura e Vibração em um motor	28	M3						
	29	M4						
	30	M5						
	31	M6						
	32	M1	1					
Queda de Tensão e aumento de Temperatura em mais de um motor	33	M2		1				
	34	M3			1			
	35	M4				1		
	36	M5						
	37	M6						1
Queda de Tensão e aumento de Temperatura em mais de um motor	38	M1 – M2		1				
	39	M1 – M2 – M3		1				
	40	M1 – M2 – M3 – M4		1				
	41	M1 – M2 – M3 – M4 – M5	1					
Queda de Tensão e aumento de Vibração em mais de um motor	42	M1 – M2						
	43	M1 – M2 – M3						
	44	M1 – M2 – M3 – M4						
	45	M1 – M2 – M3 – M4 – M5						
Aumento de Temperatura e Vibração em mais de um motor	46	M1 – M2	1					
	47	M1 – M2 – M3		1				
	48	M1 – M2 – M3 – M4		1				

	49	M1 – M2 – M3 – M4 – M5		1				
Aumento de Temperatura, Vibração e queda de Tensão em um motor	50	M1	1					
	51	M2		1				
	52	M3			1			
	53	M4				1		
	54	M5						
	55	M6						1
Aumento de Temperatura, Vibração e queda de Tensão em mais de um motor	56	M1 – M2		1				
	57	M1 – M2 – M3			1			
	58	M1 – M2 – M3 – M4				1		
	59	M1 – M2 – M3 – M4 – M5		1				
Quantidade de vezes em falha incipiente			4	12	4	5	0	4
Percentual do total de falhas			13,8%	41,4%	13,8%	17,2%	0%	13,8%
Percentual do total de amostras			6,8%	20,4%	6,8%	8,5%	0%	6,8%

Fonte: Autoria própria.

No ensaio de falhas programadas, o motor 2 apresentou um maior número de ocorrências de situações em “Falha incipiente” e, portanto, num planejamento de manutenção preditiva, este motor deve ser priorizado.

Entretanto, esta análise não indica para os responsáveis pela manutenção, quais as variáveis que levaram a esta condição na classificação final do período de falhas.

4.2.2 Mapa de Anormalidades para Nível de Corte em 0,75

O mapa de anormalidades também proposto nesta metodologia tem como objetivo apontar para os responsáveis pela manutenção, quais as variáveis que levaram os motores para a condição de “Falha incipiente”. Este mapa de anormalidades busca nos dados tratados de cada amostra onde houve um motor classificado como em “Falha incipiente”, as variáveis onde o valor nominal foi maior do que 1 e aponta as variáveis de forma que, ao final do período analisado, tenha-se um mapa das anormalidades de cada motor.

Assim, o Quadro 24 apresenta apenas aquelas amostras onde houve motor classificado em “Falha incipiente” e quais as variáveis daquele motor estiveram fora da condição normal.

Quadro 24 – Mapa de anormalidades dos motores em “Falha incipiente” ($\lambda = 0,75$).

Registro dos motores em Falha Incipiente							Mapa de anormalidades			
Número da amostra	Motores avaliados						Variáveis fora da condição normal			
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Tensão	Corr.	Temp.	Vibr.
9		1							1	
11				1					1	
13						1			1	
21		1					1			
22			1				1		1	
23				1			1		1	
25						1	1		1	
32	1								1	1
33		1							1	1
34			1						1	1
35				1					1	1
37						1			1	1
38		1					1		1	
39		1					1		1	
40		1					1		1	
41	1						1		1	
46	1								1	1
47		1							1	1
48		1							1	1
49		1							1	1
50	1						1		1	1
51		1					1		1	1
52			1				1		1	1
53				1			1		1	1
55						1	1		1	1
56		1					1		1	1
57			1				1		1	1
58				1			1		1	1
59			1				1		1	

Fonte: Autoria própria.

Com o Mapa de anormalidades e a classificação do período de análise, é possível obter um resultado final com o motor em prioridade de manutenção, bem como as variáveis que estiveram em condição de anormalidade, quando o motor foi classificado em “Falha incipiente”.

O resultado obtido para o ensaio de falhas realizado e mostrado no Quadro 25, a seguir, com destaque para o motor 2, que na análise multicritério, após a classificação final, foi apontado como o motor em pior situação de operação.

Quadro 25 – Indicador de anormalidades dos motores.

Motor em pior condição	Anormalidades no período de análise			
	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Motor 1	2	0	4	0
Motor 2	6	0	10	6

Motor 3	4	0	5	3
Motor 4	3	0	5	3
Motor 5	0	0	0	0
Motor 6	2	0	4	2

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, os responsáveis pela manutenção, terão através do indicador de anormalidades, uma orientação no que se refere aos motivos que levaram o motor para a condição de “Falha incipiente”, indicando não só o motor que mais esteve em condição de falha pela análise multicritério, mas também com o indicativo de possíveis falhas. Assim, para o ensaio de falhas programadas realizado, o “Motor 2” foi o que mais vezes esteve em condição de “Falha incipiente” e o mapa de anormalidades indica que a “Temperatura” foi a variável que mais esteve fora das condições normais, indicando aos responsáveis pela manutenção qual a principal causa e que deve ser verificada no planejamento da manutenção. Desta forma, a metodologia proposta neste trabalho pode auxiliar os responsáveis pela manutenção indicando a situação dos motores em determinado período. Existe a possibilidade de utilização por períodos, ou seja, comparar os resultados de um período com outro, ou verificar o comportamento de tendência de cada um dos motores, predizendo que o motor poderá não operar adequadamente após um determinado período.

4.2.3 Avaliação com Nível de corte em 0,9

A fim de avaliar a metodologia proposta em relação aos métodos multicritério empregados, foi realizado um teste de sensibilidade. Para o teste de sensibilidade, os mesmos dados adquiridos no ensaio foram classificados no ELECTRE TRI com um nível de corte em 0,9, ou seja, dando maior rigidez na classificação. O resultado desta classificação é apresentado no Quadro 26.

O objetivo do teste de sensibilidade foi de avaliar se os resultados permaneceram coerentes após a variação no nível de corte no método ELECTRE TRI. Os resultados obtidos demonstraram que a metodologia proposta é adequada.

Quadro 26 – Classificação dos motores ($\lambda = 0,90$).

Ensaio realizado	Número da amostra	Motor(es) envolvido(s) no ensaio	Atribuição Otimista Falha incipiente					
			M1	M2	M3	M4	M5	M6
Variáveis sem nenhuma alteração	1							

Queda de Tensão em um motor	2	M1	1					
	3	M2		1				
	4	M3			1		1	
	5	M4				1	1	
	6	M5					1	
	7	M6					1	1
Aumento de Temperatura em um motor	8	M1					1	
	9	M2		1			1	
	10	M3			1		1	
	11	M4				1	1	
	12	M5					1	
	13	M6					1	1
Aumento de Vibração em um motor	14	M1	1				1	
	15	M2		1			1	
	16	M3			1		1	
	17	M4					1	
	18	M5					1	
	19	M6					1	
Queda de Tensão e aumento de Temperatura em um motor	20	M1	1				1	
	21	M2		1				
	22	M3			1			
	23	M4				1	1	
	24	M5					1	
	25	M6						1
Queda de Tensão e aumento da Vibração em um motor	26	M1	1				1	
	27	M2		1			1	
	28	M3			1		1	
	29	M4				1	1	
	30	M5					1	
	31	M6					1	1
Aumento da Temperatura e Vibração em um motor	32	M1	1				1	
	33	M2		1			1	
	34	M3			1		1	
	35	M4				1	1	
	36	M5					1	
	37	M6					1	1
Queda de Tensão e aumento de Temperatura em mais de um motor	38	M1 – M2	1	1			1	
	39	M1 – M2 – M3	1	1	1		1	
	40	M1 – M2 – M3 – M4	1	1	1	1	1	
	41	M1 – M2 – M3 – M4 – M5	1	1	1	1	1	
Queda de Tensão e aumento de Vibração em mais de um motor	42	M1 – M2	1	1				
	43	M1 – M2 – M3	1	1	1		1	
	44	M1 – M2 – M3 – M4	1	1	1	1		
	45	M1 – M2 – M3 – M4 – M5	1	1	1	1	1	
Aumento de Temperatura e Vibração em	46	M1 – M2	1	1			1	
	47	M1 – M2 – M3	1	1	1		1	

mais de um motor	48	M1 – M2 – M3 – M4	1	1	1	1	1	
	49	M1 – M2 – M3 – M4 – M5	1	1	1	1	1	
Aumento de Temperatura, Vibração e queda de Tensão em um motor	50	M1	1				1	
	51	M2		1			1	
	52	M3			1		1	
	53	M4				1	1	
	54	M5					1	
	55	M6					1	1
Aumento de Temperatura, Vibração e queda de Tensão em mais de um motor	56	M1 – M2	1	1			1	
	57	M1 – M2 – M3	1	1	1		1	
	58	M1 – M2 – M3 – M4	1	1	1	1	1	
	59	M1 – M2 – M3 – M4 – M5	1	1	1	1	1	
Quantidade de vezes em falha incipiente			22	23	19	14	51	6
Percentual do total de falhas			16,3%	17%	14,1%	10,4%	37,8%	4,4%
Percentual do total de amostras			37,3%	38,9%	32,2%	23,7%	86,4%	10,2%

Fonte: Autoria própria.

Assim como com o nível de corte em 0,75, em alguns dos ensaios de falhas, mais de um motor foi classificado como em “Falha incipiente”, assim foi realizada a classificação com o método ELECTRE II para a ordenação com o objetivo de buscar o motor em pior situação. Como o nível de “rigidez” na classificação foi maior, a quantidade de motores colocados em condição de “Falha incipiente” foi maior. O motor M5 aparece diversas vezes em condição de “Falha incipiente”, pois sua tensão nominal é maior que os demais, assim qualquer queda de tensão própria da rede, independentemente do ensaio realizado, já o coloca em condição de “Falha incipiente”. Como definido, foram atribuídos os seguintes valores para ordenação forte: $p^*=0,7$ e $q^*=0,6$, enquanto para a ordenação fraca os valores atribuídos foram: $p^0=0,5$ e $q^0=0,4$. Com os resultados dos *rankings* estabelecidos nas ordenações forte e fraca foi realizada a média das ordenações para obter o *ranking* do motor em pior condição para o melhor. Assim, uma classificação final para o período de 177 minutos de ensaio foi obtida e é apresentada no Quadro 27.

Quadro 27 – Classificação final dos motores ($\lambda = 0,90$).

Ensaio realizado	Número da amostra	Motor(es) envolvido(s) no ensaio	Atribuição Otimista Falha incipiente					
			M1	M2	M3	M4	M5	M6
Variáveis sem alteração	1							

Queda de Tensão em um motor	2	M1	1					
	3	M2		1				
	4	M3			1			
	5	M4				1		
	6	M5					1	
	7	M6						1
Aumento de Temperatura em um motor	8	M1					1	
	9	M2		1				
	10	M3			1			
	11	M4				1		
	12	M5					1	
	13	M6						1
Aumento de Vibração em um motor	14	M1	1					
	15	M2		1				
	16	M3			1			
	17	M4					1	
	18	M5					1	
	19	M6					1	
Queda de Tensão e aumento de Temperatura em um motor	20	M1	1					
	21	M2		1				
	22	M3			1			
	23	M4				1		
	24	M5					1	
	25	M6						1
Queda de Tensão e aumento da Vibração em um motor	26	M1	1					
	27	M2		1				
	28	M3			1			
	29	M4				1		
	30	M5					1	
	31	M6						1
Aumento da Temperatura e Vibração em um motor	32	M1	1					
	33	M2		1				
	34	M3			1			
	35	M4				1		
	36	M5					1	
	37	M6						1
Queda de Tensão e aumento de Temperatura em mais de um motor	38	M1 – M2		1				
	39	M1 – M2 – M3		1				
	40	M1 – M2 – M3 – M4		1				
	41	M1 – M2 – M3 – M4 – M5	1					
Queda de Tensão e aumento de Vibração em mais de um motor	42	M1 – M2		1				
	43	M1 – M2 – M3		1				
	44	M1 – M2 – M3 – M4		1				
	45	M1 – M2 – M3 – M4 – M5		1				
Aumento de Temperatura e Vibração em mais de um motor	46	M1 – M2	1					
	47	M1 – M2 – M3		1				
	48	M1 – M2 – M3 – M4		1				

	49	M1 – M2 – M3 – M4 – M5		1				
Aumento de Temperatura e Vibração e queda de Tensão em um motor	50	M1	1					
	51	M2		1				
	52	M3			1			
	53	M4				1		
	54	M5					1	
	55	M6						1
Aumento de Temperatura e Vibração e queda de Tensão em mais de um motor	56	M1 – M2		1				
	57	M1 – M2 – M3			1			
	58	M1 – M2 – M3 – M4				1		
	59	M1 – M2 – M3 – M4 – M5		1				
Quantidade de vezes em falha incipiente			8	19	8	7	10	6
Percentual do total de falhas			13,8%	32,8%	13,8%	12,1%	17,2%	10,3%
Percentual do total de amostras			13,6%	32,2%	13,6%	11,9%	17,0%	10,2%

Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma que com o nível de corte em 0,75, o “Motor 2” apresentou um maior número de ocorrências de situações em “Falha incipiente” e, portanto, num planejamento de manutenção preditiva, este motor deve ser priorizado.

Entretanto, com nível de corte (λ) em 0,9 tem-se uma quantidade maior de amostras classificando algum motor em “Falha incipiente”.

Um exemplo disso foi o “Motor 5” que na classificação com nível de corte em 0,75 não apareceu na classe “Falha incipiente”, aqui aparece como segundo maior percentual. Este fato deve-se à diferença no valor nominal de tensão deste motor que é de 127V, diferentemente dos demais que são de 110V. Assim, devido a maior “rigidez”, qualquer queda de tensão, independente do ensaio de falhas, levava o “Motor 5” à condição de “Falha incipiente”.

Assim, através deste teste de sensibilidade, foi possível comprovar a “robustez”, quanto ao uso dos métodos multicritério.

4.2.4 Mapa de Anormalidades para Nível de Corte em 0,9

Como para o nível de corte em 0,9 no ELECTRE TRI ocorre uma classificação mais “rígida”, também foi realizado o mapa de anormalidades proposto como o

34			1						1	1
35				1					1	1
36					1				1	1
37						1			1	1
38		1						1	1	
39		1						1	1	
40		1						1	1	
41	1							1	1	
42		1						1		1
43		1						1		1
44		1						1		1
45		1						1		1
46	1								1	1
47		1							1	
48		1							1	1
49		1							1	1
50	1							1	1	1
51		1						1	1	1
52			1					1	1	1
53				1				1	1	1
54					1			1	1	1
55						1		1	1	1
56		1						1	1	1
57			1					1	1	1
58				1				1	1	1
59		1						1	1	1

Fonte: Autoria própria.

Com o Mapa de anormalidades e a classificação do período de análise, é possível obter um resultado final com o motor em prioridade de manutenção, bem como as variáveis que estiveram em condição de anormalidade, quando o motor foi classificado em “Falha incipiente”.

Um resumo do resultado obtido para o ensaio de falhas realizado é mostrado no Quadro 29, a seguir. O “Motor 2”, que na análise multicritério, após a classificação final, foi apontado como o motor em pior situação de operação, aparece em destaque, bem como a quantidade de vezes que cada critério esteve em anormalidade. As anormalidades no período indicam a ‘variável’ ou ‘variáveis medidas’ que mais classificaram o motor na condição de “Falha incipiente”.

Quadro 29 – Indicador de anormalidades dos motores ($\lambda = 0,90$).

Motor em pior condição	Anormalidades no período de análise			
	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Motor 1	5	0	5	5
Motor 2	13	0	12	12
Motor 3	5	0	5	5
Motor 4	5	0	5	4

Motor 5	8	0	5	6
Motor 6	4	0	4	3

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, os responsáveis pela manutenção, terão através do indicador de anormalidades, uma orientação a respeito dos motivos que levaram o motor para a condição de “Falha incipiente”, indicando não só o motor que mais esteve em condição de falha, pela análise multicritério, mas também com o indicativo de possíveis falhas.

Com uma abordagem mais “rígida”, tem-se uma quantidade maior de classificação em “Falha incipiente”, que reflete diretamente no indicador de anormalidades. Entretanto, é mantida a coerência quanto à indicação do motor em condição de falha e as variáveis em falha.

4.3 USO DO AHP-SORT PARA A CLASSIFICAÇÃO

A definição dos limites das classes no ELECTRE TRI é realizada de modo a encontrar um único valor para cada um dos critérios para todas as alternativas. Assim, propõe-se o uso de média do “Fator de Serviço – FS” do grupo de motores analisados, para a definição dos limites de corrente. Também podem ocorrer diferenças entre os valores nominais de tensão dos motores analisados, que estão ligados à mesma rede elétrica.

Desta forma, caso haja uma diversidade muito grande de motores analisados, a definição dos limites de tensão e corrente, pode em algum momento da classificação colocar um motor em uma condição que não reflita exatamente a realidade, tendo em vista que para a classificação com o método ELECTRE TRI foi utilizado uma média para a definição dos limites de tensão e corrente dos motores utilizados no ensaio de falhas.

Assim, também é previsto o uso do AHPSort como método de classificação, nas situações onde o resultado apresentado pelo ELECTRE TRI não esteja adequado, ou necessite de um “filtro”, já que o AHPSort utiliza os limites individuais de cada motor para a realização da classificação.

Para exemplificar o uso do AHPSort como “filtro”, foi realizada uma classificação baseada neste método numa situação onde a diferença entre os valores

nominais de tensão do “Motor 5” dos demais motores, levou o método ELECTRE TRI com nível de corte em 0,9, a classificá-lo como em condição de “Falha incipiente”.

O Quadro 30 apresenta o resultado da classificação ELECTRE TRI com nível de corte em 0,9 para a falha programada.

Quadro 30 – Classificação ELECTRE TRI para a falha programada.

Ensaio realizado	Número da amostra	Motor(es) envolvido(s) no ensaio	Atribuição Otimista Falha incipiente					
			M1	M2	M3	M4	M5	M6
Aumento de Temperatura, Vibração e queda de Tensão em um motor	50	M1	1				1	
	51	M2		1			1	
	52	M3			1		1	
	53	M4				1	1	
	54	M5					1	
	55	M6					1	1

Fonte: Autoria própria.

Realizando esta mesma classificação com o método AHPSort, tem-se os seguintes limites individuais para o julgamento par a par, na escala de 1 a 9 a favor da alternativa ou a favor da limitante. Após os julgamentos, os valores atribuídos são adequados ao vetor prioridade, numa escala de 0 a 1, conforme previsto no método. No Quadro 31 é ilustrado o julgamento par a par para a falha programada no “Motor1” com o método, na amostra 50.

Quadro 31 – Julgamento AHPSort na amostra 50.

Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.04712	1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.125	0.75	0.66667
Valor alternativa	1.15688	0.86849	1.211538	2.1075
Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.875	0.125	0.875	0.9
Valor alternativa	1.15688	0.86849	1.211538	2.1075
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.04712	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.948958	0.895833	0.198077	1.037222
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração

Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.948958	0.895833	0.198077	1.037222
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.04712	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.945559	0.880556	0.217308	1.037222
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.945559	0.880556	0.217308	1.037222
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.04712	1.1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.948958	0.887597	0.198077	1.037222
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.948958	0.887597	0.198077	1.037222
Motor 5	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.04712	1.15	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.66667	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	1.095615	0.865833	0.166129	1.037222
Motor 5	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.125	0.125	0.66667
Valor alternativa	1.095615	0.865833	0.166129	1.037222
Motor 6	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.04712	1.25	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.948958	0.886364	0.198077	1.037222
Motor 6	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.948958	0.886364	0.198077	1.037222

Fonte: Autoria própria.

Ao final do julgamento par a par na amostra 50, baseado nos pesos obtidos no AHP, que aqui são utilizados como vetor prioridade para a classificação final no minuto, temos a classificação com o AHPSort, com a obtenção do “Score da Alternativa” e “Score Limite”. O resultado é mostrado no Quadro 32.

Quadro 32 – Classificação AHPSort na amostra 50.

Li- mi- tes	Vetor Prioridade	0.13486	0.33257	0.43139	0.10118			
	Alternativas	Tensão	Corren- te	Tempera- tura	Vibra- ção	Score Alterna- tiva	Score Limite	Classifi- cação
Superior	Motor 1	0.75	0.125	0.75	0.66667	0.53371	0.4662875	f. incipiente
	Motor 2	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.875	
	Motor 3	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.875	
	Motor 4	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.875	
	Motor 5	0.66667	0.125	0.125	0.125	0.125	0.19804	0.8019503
	Motor 6	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.875
	Alternativas	Tensão	Corren- te	Tempera- tura	Vibração	Score Alterna- tiva	Score Limite	Classifica- ção
Inferior	Motor 1	0.875	0.125	0.875	0.9	0.62810	0.371898	
	Motor 2	0.2	0.2	0.2	0.66667	0.24721	0.7527823	normal
	Motor 3	0.2	0.2	0.2	0.66667	0.24721	0.7527823	normal
	Motor 4	0.2	0.2	0.2	0.66667	0.24721	0.7527823	normal
	Motor 5	0.75	0.125	0.125	0.66667	0.26409	0.7359063	normal
	Motor 6	0.2	0.2	0.2	0.66667	0.24721	0.7527823	normal

Fonte: Autoria própria.

Após o julgamento proposto pelo AHPSort, o resultado da classificação é apresentado no Quadro 33.

Quadro 33 – Classificação AHPSort para as falhas programadas.

Ensaio realizado	Número da amostra	Motor(es) envolvido(s) no ensaio	Classificação AHPSort Falha incipiente					
			M1	M2	M3	M4	M5	M6
Aumento de Temperatura, Vibração e queda de Tensão em um motor	50	M1	1					
	51	M2		1				
	52	M3			1			
	53	M4				1		
	54	M5					1	
	55	M6						1

Fonte: Autoria própria.

Assim, com um julgamento par a par, com os limites individuais, o “Motor 5” não foi classificado na condição de “Falha incipiente” pelo método AHPSort, diferentemente do que ocorreu no método ELECTRE TRI. O “Motor 5” tem uma tensão nominal de 127V, diferentemente dos demais motores que têm tensão nominal de

110V. No julgamento AHPSort, o especialista pode não dar uma grande importância para a queda de tensão, pois leva em consideração a diferença que existe para este motor e trata-se de julgamento individual, par a par. Entretanto, para esta classificação nas seis falhas programadas entre as amostras 50 e 55, foram necessárias 288 julgamentos, o que torna a aplicação do método bastante demorada.

Além disso, quando realizada a ordenação no método ELECTRE II, com base na classificação do ELECTRE TRI, o resultado final foi o mesmo, mas de maneira mais rápida.

No apêndice C, estão todos os demais julgamentos realizados para a falha programada, que levaram à classificação do Quadro 33.

O julgamento em questão é bastante pessoal e baseado na experiência do decisor, o que permite que o resultado desta classificação possa ser diferente dependendo da experiência do decisor. Neste trabalho, o objetivo foi apenas de avaliar as etapas da metodologia.

Assim, após a classificação ELECTRE TRI, caso mais de um motor se apresente na condição “Falha incipiente”, realiza-se a ordenação com ELECTRE II para que seja considerado apenas um motor que será contabilizado como condição para provável checagem ou manutenção preventiva.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Neste estudo, foram identificadas as principais técnicas de manutenção preditiva aplicadas para motores elétricos e, em sua grande maioria, estas técnicas estão baseadas em uma única informação da condição de funcionamento. A pesquisa apontou que existe uma grande evolução nestas técnicas, aprimorando sua capacidade de identificação de falha iminente, entretanto, não havia sido abordada a análise de mais uma das condições de funcionamento sob uma análise multicritério.

Com os resultados encontrados através da classificação realizada pelo método ELECTRE-TRI na metodologia proposta, pôde-se verificar o estado de motores elétricos quando estes estão operando fora dos limites aceitáveis, concomitantemente, em múltiplas variáveis, alocados na classe de “falha incipiente”. Isso possibilita afirmar de forma preditiva que esses motores estão evoluindo para uma falha futura.

A classificação com o método ELECTRE TRI também se mostrou adequada, pois permite que os dados adquiridos pelo sistema de supervisão sejam importados de forma dinâmica e em tempo real. O ajuste no nível de corte no método também permite ao decisor realizar um teste de sensibilidade da avaliação, o que pode ser útil em alguns casos, pois permite ajustar o resultado ao que melhor reflete as condições reais de funcionamento dos motores nos diversos tipos de processos industriais.

Ainda em uma fase mais detalhada de ajuste, uma classificação que utiliza o método AHPSort pode ser realizada e permite ao decisor (especialista) um julgamento que confronta preferências para cada uma das alternativas com uma avaliação *pair wise*. Entretanto, o julgamento par a par para cada critério em cada uma das alternativas, torna o processo de classificação bastante demorado. E, ainda, que o julgamento seja realizado por um especialista, o resultado da classificação depende exclusivamente de um julgamento pessoal.

Com a ordenação realizada pelo método ELECTRE II pôde-se identificar o motor com as piores condições de funcionamento, contabilizando o percentual de vezes que ele apresentou funcionamento fora das condições nominais, e que pôde evoluir mais rapidamente para uma falha do que os demais alocados na classe.

O desenvolvimento do protótipo baseado na técnica de transmissão PLC não levou em consideração fatores como a distância da rede elétrica entre os dispositivos remotos e concentrador. Apesar da utilização de modens do padrão *Homeplug*, recomendados para uso residencial, não houve problemas de comunicação para a aquisição dos dados no ambiente do ensaio de falhas programadas.

Na estruturação da rotina de aquisição e preparação dos dados, a definição da periodicidade do monitoramento para a aquisição dos dados mostrou-se relevante, bem como sua relação com as variáveis monitoradas, pois quando a variável envolvia uma grandeza física de característica de variação lenta, o período de amostra poderia ser grande, enquanto que variáveis como a vibração ou a tensão de alimentação, que são variáveis e cuja grandeza tem características de variação rápida, o período de amostra deveria ser pequeno.

Ainda com relação à estruturação dos dados, a normalização baseada nos valores nominais dos motores mostrou-se adequada, permitindo que desta forma, motores de características diferentes pudessem ser analisados num mesmo grupo.

O acompanhamento por períodos longos de tempo permite ao gestor da manutenção manter um planejamento adequado, com base em informações oriundas de um monitoramento constante. Assim, a metodologia apresentada cumpre a sua função como uma nova técnica de manutenção preditiva que considera múltiplos critérios na sua aplicação.

O ensaio de falhas programadas teve como objetivo avaliar a metodologia proposta, desde o processo de aquisição dos dados, passando pelas etapas de tratamento dos dados e posterior análise multicritério nos métodos propostos. Na avaliação da metodologia, vários dos parâmetros dos métodos multicritério também foram observados e demonstraram total coerência nos resultados obtidos.

A abordagem multicritério adaptada para utilização como técnica de manutenção preditiva em motores elétricos pode ser considerada como uma alternativa de apoio à decisão, porém precisa ser utilizada com prudência, devido às variadas características que motores elétricos apresentam na operação de processos industriais.

Pode-se afirmar que o presente trabalho cumpriu com o objetivo de desenvolver uma metodologia estruturada, que utilizou a abordagem multicritério, explorando as

problemáticas de classificação e ordenação, com ancoragem nos dados de funcionamento de motores elétricos de um experimento, a fim de prever falhas.

Assim, este trabalho apresenta uma nova abordagem de manutenção preditiva, com uma metodologia que considera múltiplas variáveis analisadas concomitantemente, diferente dos modelos convencionais que exploram uma única variável em cada análise para chegar ao indicativo de manutenção. Dessa forma, os responsáveis pela manutenção têm em mãos informações com maior precisão a respeito do funcionamento dos motores, com possibilidade de ajustes quanto à forma de análise desejada.

Questões relativas às técnicas de manutenção convencionais de motores elétricos não foram abordadas, pois o objetivo deste estudo foi de apresentar uma nova metodologia baseada nas condições de funcionamento dos motores elétricos e nas condições nominais definidas pelos fabricantes que representam o funcionamento normal dos motores em questão.

Este estudo está alinhado com o que propõem as melhores técnicas de manutenção preditiva, bem como as questões de eficiência na gestão da produção, tendo em vista auxiliar na identificação de falhas inesperadas antes que possam comprometer o processo produtivo.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas a seguir:

- Inserção de novos critérios na fase de análise da metodologia proposta, tais como: temperatura em outros locais como no mancal; umidade do ambiente; temperatura do ambiente; fator de potência; frequência de vibração, rendimento, entre outros;
- Uso da metodologia para apoiar a gestão da manutenção em outros equipamentos na indústria de modo geral, ajustando as variáveis que indiquem a condição de falha;
- Processamento automático com as informações adquiridas e armazenadas em banco de dados e indicando a tendência de cada motor ao longo do seu período de funcionamento, de maneira automática e disponível para *smartphones*;

- Desenvolvimento de *software*, para aquisição e tratamento dos dados com classificação e ordenação automáticas, geração de alarmes a partir de condições pré-estabelecidas pelo decisor;

Em termos de generalização desse desenvolvimento, a metodologia pode ser utilizada como apoio para diversos outros segmentos, onde sejam conhecidas as condições ideais de funcionamento dos equipamentos, em que seja possível adquirir dados de maneira automática sobre as condições de funcionamento dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 17094: Máquinas Elétricas Girantes**. Rio de Janeiro, 2008.

ALMEIDA, A. T. Multicriteria Model for Selection of Preventive Maintenance Intervals. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 28, p. 585-593, 2012.

ALMEIDA, A.T. **Processo de decisão nas organizações**. Construindo modelos de decisão multicritério. 1ª ed., São Paulo: Atlas, 2013.

ALMEIDA, A.T.; CAVALCANTE, C.A.V.; ALENCAR, M.H.; FERREIRA, R.J.P.; ALMEIDA-FILHO, A.T.; GARCEZ, T.V. **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Decision Analysis Reliability and Maintenance**, 1ª ed., Suíça: Springer, 2016.

ANTONINO-DAVIU, J.A.; QUIJANO-LOPEZ, A.; FUSTER-ROIG, V.; NEVOT, C. Case stories of induction motors fault diagnosis based on current analysis. **IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Europe**, 2016.

BALLAL, M. S.; KHAN, Z. J.; SURYAWANSHI, H. M.; SONOLIKAR, R. L. Adaptive Neural Fuzzy Interference System for the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 54, n. 1, 2007.

BARROS, B.F.; BORELLI, R.; GEDRA, R.L. **Gerenciamento de Energia**. 1ª ed., São Paulo: Érica, 2010.

BELL, R.N.; O'DONNELL, P.; SINGH, C.; WELLS, S.J. Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-21, n. 4, 853-864, 1985.

BENBOUZID, M.E.H. A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 47, n. 5, p. 984-992, 2000.

BEN-DAYA, M.; KUMAR, U.; MURTHY, D.N.P. **Introduction to Maintenance Engineering**. Modeling, Optimization, and Management. 1^a ed., Hoboken: Wiley, 2016.

BRANS, J.P.; MARESCHAL, B. PROMETHEE Methods. In: **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**, Springer, 2005. Cap. 5, p. 163-189.

BRITO, J. N.; LAMIM FILHO, P. C. M.; PEDERIVA, R. Detecção de falhas em motores elétricos através da análise de fluxo magnético. **X Seminário Brasileiro de manutenção preditiva e inspeção de equipamento**. 2004.

CAMPOS, A.C.S.M.; ALMEIDA, A.T. A Multicriteria Decision Model for Classifying Management Processes. In: GUARNIERI, P. **Decision Models in Engineering and Management**. Springer, 2015, p. 109-128.

CARCELLE, X. **Power Line Communications ins practice**. Paris: Artech House, 2006.

CARNERO, M. C. Multicriteria model for maintenance benchmarking. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, p. 303-321, 2014.

CAVALCANTE, C. A.V.; LOPES, R.S. Multi-criteria model to support the definition of opportunistic maintenance policy: A study in a cogeneration system. **Energy**, v. 32, p. 32-40, 2015.

CERTA, A.; ENEA, M.; LUPO, T. ELECTRE III to dynamically support the decision maker about the periodic replacements configurations for a multi-component system. **Decision Support Systems**, v. 55, n. 1, p. 126-134, 2013.

CHAN, F. T. S.; PRAKASH, A. Maintenance policy selection in manufacturing firms using the fuzzy MCDM approach. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 32, p. 7044-7056, 2012.

CHOW, M. Guest editorial special section on motor fault detection and diagnosis. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. V. 47, n. 5, p. 982-983, 2000.

CHELBI, A.; AIT-KADI, D. Inspection and predictive maintenance strategies. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 11, n. 3, p. 226-231, 1998.

COETZEE, J.L. A holistic approach to the maintenance “problem”. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 5, n. 3, p. 276-281, 1999.

DHILLON, B.S. **Engineering maintenance: a modern approach**. 1ª ed., Flórida: CRC Press, 2002.

DUFFUAA, S.O.; RAOUF, A. **Planning and Control of Maintenance Systems. Modelling and Analysis**. 2ª ed., Suíça: Springer, 2015.

DUQUE-PEREZ, O.; GARCIA-ESCUADERO, L.A.; MORINIGO-SOTELO, D.; GARDEL, P.E.; PEREZ-ALONSO, M. **IEEE International Conference on Electrical Machines**, p. 2479-2484, 2012.

ELETROBRÀS. **Motor elétrico**. Guia básico. Brasília: IEL/NC, 2009.

EPPLE, Ulrich. **A Reference Architectural Model for Industrie 4.0 - DFKI**. Disponível em: <http://www.dfki.de/wwdata/German_Czech_Workshop_on_Industrie_4.0_Prague_11_04_16/Vortrag-Epple.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2017.

FARIAS, L.R.; BARRETO, M.F.C.; LEME, M.O.; STEVAN, S.L. Empirical Technical Feasibility and Performance Analysis of G3-PLC Standard for Monitoring in Industrial Environment. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 10, p. 4241-4228, 2016.

FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. Introduction. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. Boston: Springer, 2005. Cap. 1, p. xxi-xxxiv

FOGLIATO, F.; RIBEIRO, J. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1ª ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FLOYD, H.L. Overview. In: SANG, Y.H. **IEEE Guide for Maintenance, Operation, and Safety of Industrial and Commercial Power Systems**, USA: IEEE, 1998. Cap. 1, p. 1-2.

FUENTES, F.F.E. **Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial**. 2006. 208 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.

GALLOWAY, B.; HANCKE, B. Introduction to industrial control network. **IEEE Communications Surveys & Tutorial**. v. 15, n. 2, p. 860-880, 2013.

GARCEZ, T. V.; ALMEIDA, A. T. A risk measurement tool for an underground electricity distribution system considering the consequences and uncertainties of manhole events. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 124, p. 68-80, 2014.

GILCHRIST, A. **Industry 4.0**. The Industrial Internet of Things. 1ª ed., Califórnia: Apress, 2016.

GOLDFISHER, S.; TANABE, S. IEEE 1901 Access system: An overview of its uniqueness and motivation. **IEEE Communication Magazine**. v. 48, n 10, p. 150-157, 2010.

GOMES, L. F. A. M; GOMES, C.F.S. **Tomada de decisão gerencial**. 1ª ed., São Paulo: Atlas, 2012.

GULATI, R. **Maintenance and Reliability**. Best Practices, 2ª ed., New York: Industrial Press, 2013.

HAMMOND, J. S.; KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Smart Choices : A Practical Guide to Making Better Decisions**. 1ª ed., Boston: Harvard Business School Press, 1999.

HRASNICA, H.; HAIDINE, A.; LEHNET, R. **Broadband Powerline Communications Networks: Network Design**. John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

HAROUN, A.E.; DUFFUAA, S.O. Maintenance Organization. In: MOHAMED BEN-DAYA, M.; DUFFUAA, S. O.; RAOUF, A., KNEZEVIC, J.; AIT-KADI, D. **Handbook of Maintenance Management and Engineering**. 1ª ed. London: Springer, 2009. Cap. 1, p. 3-16.

HIBBARD, S.; LUTZ, P.; LARSEN, R.M. Sercos Bus Automation. In: ZURAWSKI, R. **Industrial Communication Technology Handbook**, 2^a ed. California: CRC Press, 2015. Cap. 13, p. 13.1-13.47.

ISERMANN, R. **Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**. 1^a ed. Berlin: Springer, 2006.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. Assigning machines to incomparable maintenance strategies with ELECTRE-SORT. **Omega**, v. 47, p. 45-59, 2014.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software**. 1^a ed., United Kingdom: Wiley, 2013.

ISHIZAKA, A.; PEARMAN, C.; NEMERY, P. AHPSort: an AHP- based method for sorting problems. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 17, p. 4767-4784, 2012.

KELJIK, J. **Electricity 4: AC/DC Motors, Controls, and Maintenance**. 10^a ed. EUA: Delmar, 2013.

KOTHAMASU, R.; HUANG, S.H.; VERDUIN, W.H. System Health Monitoring and Prognostics – A Review of Current Paradigms and Practices. In: MOHAMED BENDAYA, M.; DUFFUAA, S. O.; RAOUF, A., KNEZEVIC, J.; AIT-KADI, D. **Handbook of Maintenance Management and Engineering**. 1^a ed. London: Springer, 2009. Cap. 14, p. 337-362.

KOVAL, D.O. **IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems**, 2^a ed., EUA: IEEE, 1998.

LAMIM FILHO, P.C.M.; BRITO, J.N.. PEDERIVA, R. Detection of electrical faults in induction motors using vibration analysis. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 19, n. 4, p. 364 – 380, 2013.

LAMIM FILHO, P.C.M.; PEDERIVA, R.; BRITO, J.N. Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis. **Mechanical System and Signal Processing**, v. 42, p. 377-387, 2014.

LOISELLE, R.; XU, Z.; VOLOH, I. Essential motor health monitoring. **IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference**, p. 1-5, 2015.

LU, B.; GUNGOR, V. C. Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. v. 56, n. 11, p. 4651-4659, 2009.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MAZUR, D.C.; KAY, J.A.; MAZUR, K.D. Advancements in Vibration Monitoring for the Mining Industry. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 5, p.4321-4328, 2015.

MELIT, M.et al., Modeling of the transmission of power line communication signal trough the power electric transformer. **Institut Telecom and Springer**. Verlag. p. 447-454. 2011

MILONI, D. **Building the Internet of Things with IPv6 and MIPv6**. The Evolving World of M2M Communications. Canadá: Wiley, 2013.

MIRANDA, C. M. G.; ALMEIDA, A. T. Visão multicritério da avaliação de Programas de Pós-Graduação pela CAPES: O caso da área Engenharia III baseado nos métodos Electre II e MAUT. **Gestão & Produção**, v. 11, n.1, p. 51-64, 2004.

MLYNEK, P. et al. Measurements and evaluation of PLC modem with G3 and PRIME standards for Street Lighting Control. **IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)**, Glasgow, 30-2 Março-Abril 2014. 238-243.

MOUSSEAU, V.; FIGUEIRA, J., NAUX, J.PH. Using assignment examples to infer weights for ELECTRE TRI method: Some experimental results. **European Journal of Operational Research**, v. 130, p. 263-275, 2001.

MOUSSEAU, V.; SLOWINSKI, R. Inferring an ELECTRE TRI Model from assignment examples. **Journal of Global Optimization**, v. 12, p. 157-174, 1998.

MOYNE, J.R.; TILBURY, D.M.; ANAND, D. Networked Control Systems for Manufacturing. In: ZURAWSKI, R. **Industrial Communication Technology Handbook**, 2^a ed., California: CRC Press, 2015. Cap. 2, p. 2.1-2.42.

MULLER, A.; MARQUEZ, A.C.; IUNGA, B. On the concept of e-maintenance: Review and current research. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 93, p. 1165–1187, 2008.

MURTHY, D.N.P.; ATRENS, A.; ECCLESTON, J.A. Strategic maintenance management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 8, n. 4, p. 287-305, 2002.

NANDI, S.; TOLIYAT, H.A.; LI, X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors - A Review. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 20, n. 4, p. 719-729, 2005.

NEPOMUCENO, L.X. **Técnicas de manutenção preditiva**. 1^a ed., São Paulo: Blucher, 2014.

NARAYAN, V. **Effective Maintenance Management**. Risk and Reliability Strategies for Optimizing Performance. 2^a ed., New York: Industrial Press, 2012.

NAWROCKI, W. **Measurement Systems and Sensors**. 1^a ed., London: Artech House, 2005.

NEMA (National Electrical Manufacturers Association) **NEMA MG 1-2003 Standards Publication**: Motors and Generators: Rosslyn, 2004.

NIXON, R. et al., A case study using the ProACT-URL and BRAT frameworks for structured benefit risk assessment. **Biometrical Journal**. v 58, p. 8-27, 2016

NORESE, M.F. Decision Aid in Public Administration: From Evidence-Based Decision Making to Organizational Learning. In: **Multiple Criteria Decision Making: Applications in Management and Engineering**. ZOPOUNIDIS, C.; DOUMPOS, M. 1 ed., Suíça: Springer, 2017. Cap. 1, p. 1-30.

NUSSBAUMER, P.; WOLBANK, T.M.; VOGELSBERGER, M.A. Sensitivity Analysis of Insulation State Indicator in Dependence of Sampling Rate and Bit Resolution to

Define Hardware Requirements. **IEEE International Conference on Industrial Technology**, p. 392-397, 2013.

OKSA, P. et al. Considerations of Using Power Line Communications in the AMR system. **Power line communications and its applicatioins**, 2006. 208-2011.

ÖZTÜRK, M.; TSOUKIÀS, A.; VINCKE, P. Preference Modelling. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. Boston: Springer, 2005. Cap. 2, p. 27-72.

PCW. 2016 Global Industry 4.0 Survey. **Industry 4.0: Building the digital enterprise**. Disponível em: <[http:// www.pwc.com/industry40](http://www.pwc.com/industry40) >. Acesso em: 25 jun. 2017.

PEREZ-GONZALEZ, P.;FRAMINAN, J. M. A common framework and taxonomy for multicriteria scheduling problems with interfering and competing jobs: Multi-agent scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, v. 235, n. 1, p. 1-16, 2014.

PICAZO-RÓDENAS, M.J.; ROYO, R.; ANTONINO-DAVIU, J.; ROGER-FOLCH, J. Use of the infrared data for heating curve computation in induction motors: **Application to fault diagnosis. Engineering Failure Analysis**, v. 35, p. 178-192, 2013.

POMEROL, J.; BARBA-ROMERO, S. **Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice**. 1ª ed., New York: Springer, 2000.

PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**. Ano Base 2005. Classe industrial - Alta tensão. Relatório Brasil Completo. 2008.

RAD, M.K., TORABIZADEH, M., NOSHADI, A., Artificial Neural Network-based fault diagnostics of an electric motor using vibration monitoring. **Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE) International Conference. IEEE Conference**. p. 1512-1516, 2011.

ROY, B. Decision-Aiding Today: What Should We Expect. In: **Multicriteria decision making: advances in MCDM models, algorithms, theory, and applications**. 1ª ed., New York: Springer, 1999. Cap 1, p. 1.1-1.35.

ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. 1^a ed., Springer Science + Business Media Dordrecht, 1996.

ROY, B. Paradigms and Challenges. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. Boston: Springer, 2005. Cap. 1, p. 3-26.

SAUTER, T. Fieldbus System Fundamentals In: ZURAWSKI, R. **Industrial Communication Technology Handbook**, 2^a ed., California: CRC Press, 2015a. Cap. 1, p. 1.1-1.45.

SAUTER, T. Linking Factory Floor and the Internet. In: ZURAWSKI, R. **Industrial Communication Technology Handbook**, 2^a ed., California: CRC Press, 2015b. Cap. 22, p. 22.1-22.24.

SCADABR. **Manual do Software**. Sistema Open-Source para Supervisão e Controle. 2010.

SCOTT, D.M. **Industrial process sensors**. Boca Raton: CRC Press, 2008.

SHROUF, F.; ORDIERES, J.; MIRAGLIOTTA, G. Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**, p. 697–701, 2014.

SINGH, G.K.; KAZAZ, S.A.S.A. Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research - a survey. **Electric Power Systems Research**, v. 64, p. 145-158, 2003.

SOERGEL, S.; RASTGOUFARD, P. An Analysis of induction motor predictive maintenance techniques. **IEEE Conference Publication Proceedings of the Twenty-Eighth Southeastern Symposium on System Theory**. p. 301-305, 2006.

STONE, G. C. Condition Monitoring and Diagnostics of Motor and Stator Windings – A Review. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 20, n. 6, 2013.

TOLIYAT, H.A.; KLIMAN, G.B. **Handbook of electric motors**. 2^a ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

TOUHAMI, O.; SADOUN, R.; BELOUCHRANI, A.; HAMDANI, S.; BOUKOUCHA, A.; OUAGED, S. Remote Monitoring System of Electrical Machines via INTERNET. **IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives**, 2013, p. 23-27.

TROJAN, F. **Modelos multicritério para apoiar decisões na gestão da manutenção de redes de distribuição de água para a redução de custos e perdas**. 2012. 117 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco. 2012.

TROJAN, F.; MORAIS, D. C. Using ELECTRE TRI to support maintenance of water distribution networks. **Pesquisa Operacional**. v. 32, n2, p. 423-442, 2012

WEG. **Catálogo de motores**. Linha de produtos – Características – Especificações – Instalações – Manutenções. 2005.

WEG. **Catálogo de motores**. Guia de Especificação. 2016.

WHELAN, C.; SASSANO, E. ; KELLEY, J. Management of electric motor repair. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 12, n.3, p. 74-83, 2006.

WHITE, T.J. Maintenance strategies. In: SANG, Y.H. **IEEE Guide for Maintenance, Operation, and Safety of Industrial and Commercial Power Systems**, USA: IEEE, 1998. Cap. 5, p. 21-28.

ZATTAR, H. C, CARRIJO, G. P. Analysis, Measurement and Evaluation of Power Line Communication Network Applied for Popular Houses. **IEEE Latin America Transactions**, v. 10, n. 1, p. 1283-1287, 2012.

ZHONGMING, Y.; BIN, W. Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis. **IEEE Power Electronics and Motion Control Conference**, p. 1353-1358, 2000.

APÊNDICE A – Configuração do ScadaBR

Inicialmente, o *software* ScadaBR deverá ser instalado no microcomputador destinado ao armazenamento dos dados coletados. A primeira tarefa será configurar a leitura de uma nova variável, na opção “*Data Sources*”, em destaque na Figura 1.

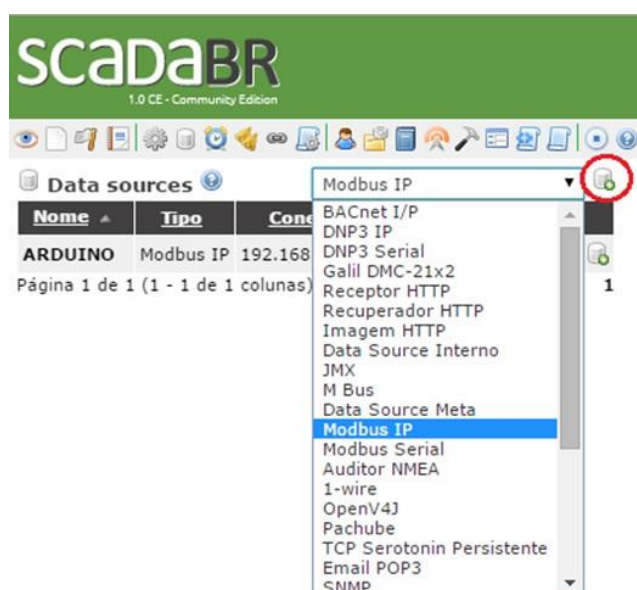
Figura 1 – Configuração de uma nova variável no ScadaBR.



Fonte: Autoria própria.

Esta opção permite que na caixa de seleção possa ser feita a escolha do protocolo de comunicação, e como o módulo remoto é baseado em comunicação através de endereço IP, a escolha é pelo protocolo Modbus IP. Em seguida, pressionar o botão “Adicionar”. Assim, fica definido o protocolo de comunicação, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Escolha do protocolo de comunicação MODBUS IP.



Fonte: Autoria própria.

Na sequência da escolha do protocolo de comunicação, uma página de configuração permite que sejam feitas as configurações do nome e IP do módulo remoto, para o fato de existir mais de um módulo remoto. A figura 3 destaca os campos com as informações a serem configuradas. Nesta etapa, também é configurado o intervalo de tempo para a leitura dos sensores.

Figura 3 – Endereçamento IP do módulo remoto.

Fonte: Autoria própria.

Na página principal da configuração do ScadaBR está visível o protocolo IP do hardware e seu *status* da leitura, conforme Figura 4.

Figura 4 – Tela do ScadaBR após endereçamento IP.

Nome	Tipo	Conexão	Status
ARDUINO	Modbus IP	192.168.0.8:502	

Página 1 de 1 (1 - 2 de 2 colunas) 1

Fonte: Autoria própria.

Para configuração das variáveis de leitura e dos respectivos sensores, utilizou-se opção “Editar” no “*Data sources*” do ScadaBR para configurar as propriedades do *hardware* monitorado, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Botão de configuração dos sensores.



Fonte: Autoria própria.

O nome do “*data point*” pode ser escolhido de forma arbitrária, a faixa do registro deve ser configurada como “*Registrador Holding*”, Tipo de dados: “Inteiro de 2 bytes, sem sinal”, isso somente em função do uso de portas analógicas no Arduíno.

O parâmetro *offset* deve ser escolhido de forma que o seu valor coincida com o valor da variável configurada na programação do Arduíno. Neste caso, para cada motor, o conjunto de sensores teve sua numeração pela seguinte regra: Motor 1: 1A,1B, 1C; Motor 2: 2A, 2B, 2C, e assim por diante.

A Figura 6 ilustra o ambiente no ScadaBR onde são configurados estes dados.

Figura 6 – Configuração dos sensores no ScadaBR.

Detalhes do data point

Nome: Sensor de temperatura

Export ID (XID): DP_358214

Id do escravo: 1

Faixa do registro: Registrador holding

Tipo de dados modbus: Inteiro de 4 bytes sem sinal

Offset (baseado em 0): 23

Bit: 0

Número de registradores: 0

Codificação de caracteres: ASCII

Configurável:

Multiplicador: 1

Aditivo: 0

Fonte: Autoria Própria.

Após a configuração de todos os módulos remotos com seus respectivos endereços IP e os sensores associados, o sistema supervisor ScadaBR passa a armazenar os dados dos módulos e sensores para possibilitar as análises.

O sistema de supervisão do ScadaBR possui uma função onde é possível exportar os dados de supervisão para arquivos em formato texto (".txt"), o que permite a portabilidade com outros programas.

A Figura 7 ilustra a utilização da função que permite gerar relatórios no ScadaBR e exportar para arquivo texto.

Figura 7 – Geração de relatório de alarmes em formato .TXT.

The screenshot shows the ScadaBR web interface at localhost:8080/ScadaBR/reports.shtm. The main header displays 'scadaBR 1.0 CE - Community Edition' and 'Informação'. Below the header, there is a 'Fila de relatórios' section with a table showing columns for 'Nome do relatório', 'Início da execução', 'Duração da execução', 'De', 'Até', 'Registros', and 'Não descartar'. Below this, the 'Modelos de relatórios' section is visible, containing a 'Critério de relatório' form. The form includes a 'Nome do relatório' field (set to '(sem nome)'), a 'Data points' dropdown (set to 'Nenhum data point foi adicionado ao relatório'), and an 'Eventos' dropdown menu which is circled in red and set to 'Apenas alarmes'. Other options include 'Comentários de usuário' (checked), 'Faixa de datas' (Relative to report time, with 'Anterior' selected), and 'Datas específicas' (with date pickers for 'De' and 'Até'). At the bottom, there are checkboxes for 'Agendar' and 'Relatório por email'.

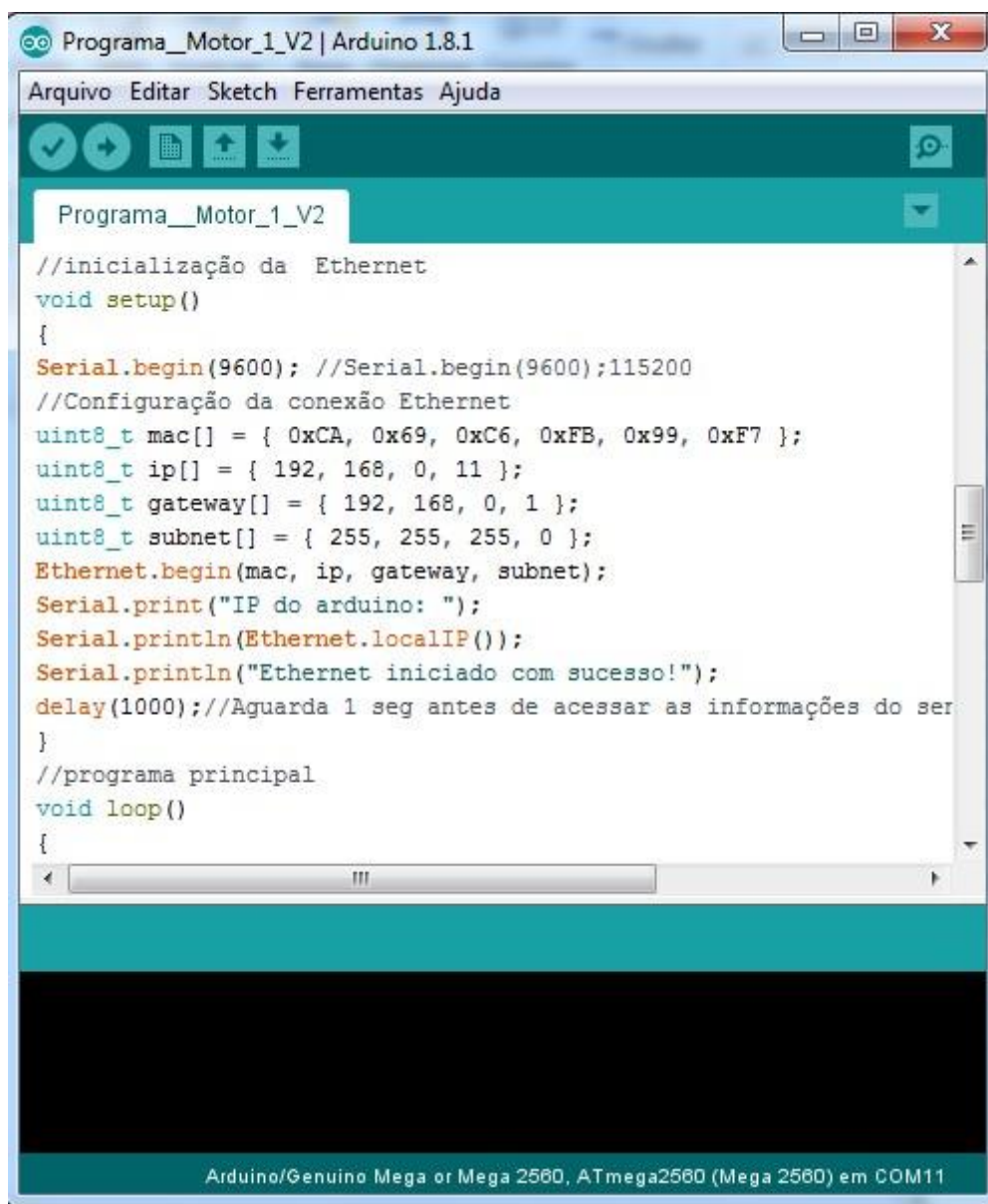
©2009-2011 Fundação Certi, MCA Sistemas, Unis Sistemas, Conetec. Todos os direitos reservados.

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – Configuração do microcontrolador Arduino

Na configuração do microcontrolador Arduino, tornou-se necessário atribuir um endereço IP individual para cada dispositivo, de modo a permitir a conexão com o ScadaBR. A tela de programação dos endereços IP é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Endereçamento IP no Arduino.



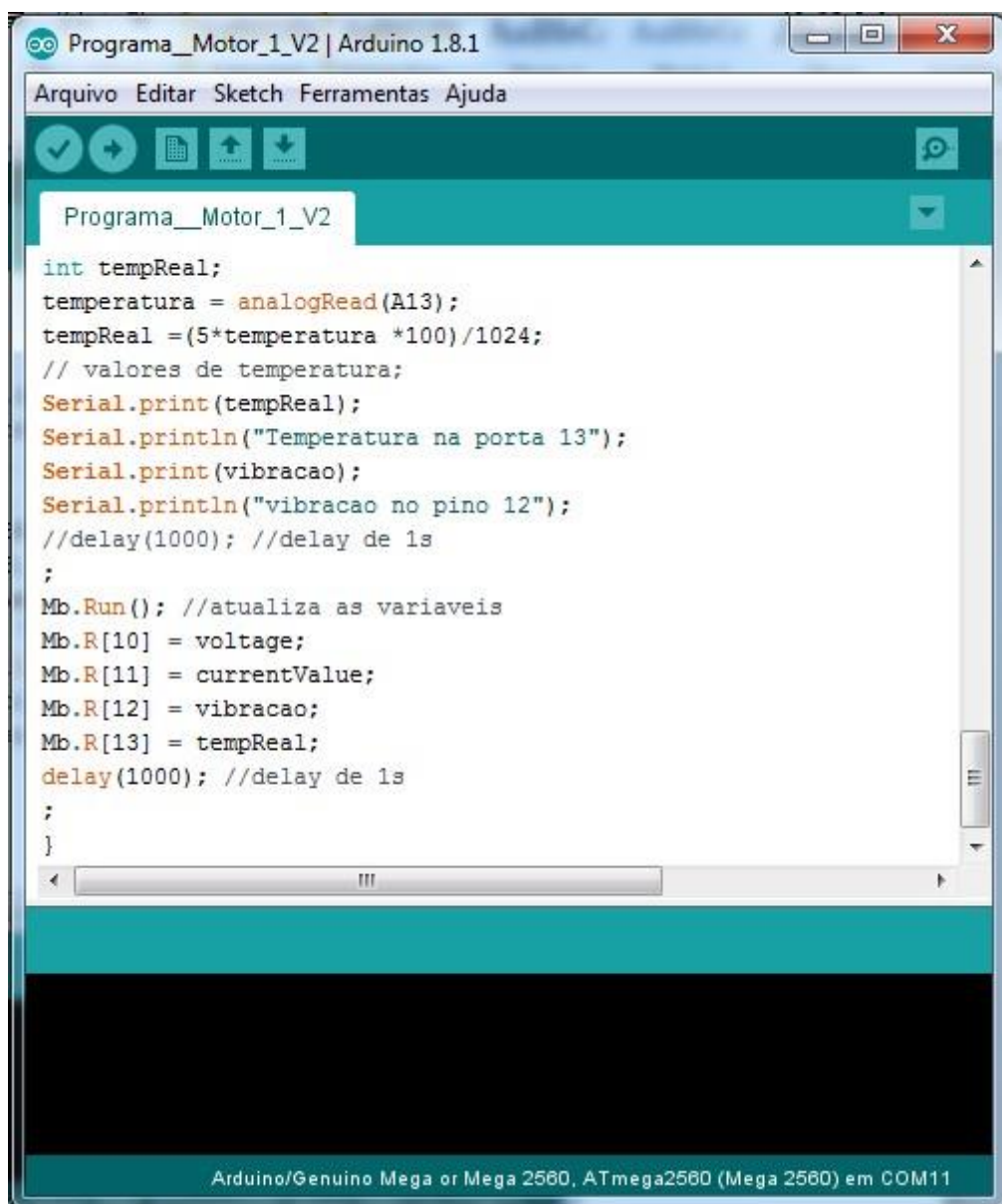
```
Programa_Motor_1_V2 | Arduino 1.8.1
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
Programa_Motor_1_V2
//inicialização da Ethernet
void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Serial.begin(9600);115200
  //Configuração da conexão Ethernet
  uint8_t mac[] = { 0xCA, 0x69, 0xC6, 0xFB, 0x99, 0xF7 };
  uint8_t ip[] = { 192, 168, 0, 11 };
  uint8_t gateway[] = { 192, 168, 0, 1 };
  uint8_t subnet[] = { 255, 255, 255, 0 };
  Ethernet.begin(mac, ip, gateway, subnet);
  Serial.print("IP do arduino: ");
  Serial.println(Ethernet.localIP());
  Serial.println("Ethernet iniciado com sucesso!");
  delay(1000); //Aguarda 1 seg antes de acessar as informações do ser
}
//programa principal
void loop()
{
  Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) em COM11
```

Fonte: Autoria própria.

Também a configuração do protocolo de comunicação entre o Arduino e o ScadaBR é apresentada na Figura 2. Esta configuração é baseada no protocolo ModbusIP com um endereço para cada porta utilizada por sensor.

A Figura 2 apresenta um detalhe de configuração Modbus IP e a associação entre a porta de comunicação utilizada para cada sensor. Esta informação é necessária na configuração do ScadaBR, para a realização das leituras dos sensores.

Figura 2 – Configuração Modbus IP no Arduino.



```
Programa_Motor_1_V2 | Arduino 1.8.1
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
Programa_Motor_1_V2
int tempReal;
temperatura = analogRead(A13);
tempReal = (5*temperatura *100)/1024;
// valores de temperatura;
Serial.print(tempReal);
Serial.println("Temperatura na porta 13");
Serial.print(vibracao);
Serial.println("vibracao no pino 12");
//delay(1000); //delay de 1s
;
Mb.Run(); //atualiza as variaveis
Mb.R[10] = voltage;
Mb.R[11] = currentValue;
Mb.R[12] = vibracao;
Mb.R[13] = tempReal;
delay(1000); //delay de 1s
;
}
Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) em COM11
```

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C – Julgamentos AHPSort

Os julgamentos realizados no método AHPSort para a falha programada “Aumento de Temperatura e Vibração e queda de Tensão em um motor” para os motores 2, 3, 4, 5 e 6 utilizados para a classificação, estão ilustrados, respectivamente, nos Quadros 1 a 5 a seguir:

Quadro 1 – Julgamentos AHPSort na amostra 51 – Falha no motor 2.

Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.948275862	0.873697917	0.189102564	1.057777778
Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.125	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.948275862	0.873697917	0.189102564	1.057777778
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.125	0.75	0.75
Valor alternativa	1.154855643	0.901041667	1.151282051	2.123611111
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.875	0.2	0.875	0.66667
Valor alternativa	1.154855643	0.901041667	1.151282051	2.123611111
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.942857143	0.883333333	0.189102564	1.023333333
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.942857143	0.883333333	0.189102564	1.023333333
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.1	1.1	2

Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.948275862	0.881782946	0.226923077	1.023333333
Motor 4				
	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.948275862	0.881782946	0.226923077	1.023333333
Motor 5				
	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.15	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.66667	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	1.094827586	0.86375	0.158602151	1.023333333
Motor 5				
	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	1.094827586	0.86375	0.158602151	1.023333333
Motor 6				
	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.25	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.948275862	0.887626263	0.189102564	1.023333333
Motor 6				
	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.948275862	0.887626263	0.189102564	1.023333333

Fonte: Autoria própria.

Quadro 2 – Julgamentos AHPSort na amostra 52 – Falha no motor 3.

Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.955137482	0.873697917	0.190384615	1.0525
Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.125	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.955137482	0.873697917	0.190384615	1.0525
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.955137482	0.899739583	0.190384615	1.102777778
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.955137482	0.899739583	0.190384615	1.102777778
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.125	0.75	0.66667
Valor alternativa	1.158911326	0.888888889	1.183333333	2.072777778
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.875	0.2	0.875	0.9
Valor alternativa	1.158911326	0.888888889	1.183333333	2.072777778
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.955137482	0.886627907	0.21025641	1.030277778
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1

Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.955137482	0.886627907	0.21025641	1.030277778
Motor 5	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.15	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.66667	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	1.102749638	0.862083333	0.166129032	1.030277778
Motor 5	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	1.102749638	0.862083333	0.166129032	1.030277778
Motor 6	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.25	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.955137482	0.88510101	0.190384615	1.030277778
Motor 6	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.955137482	0.88510101	0.190384615	1.030277778

Fonte: Autoria própria.

Quadro 3 – Julgamentos AHPSort na amostra 53 – Falha no motor 4.

Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.951694304	0.876302083	0.201923077	1.058888889
Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.125	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.951694304	0.876302083	0.201923077	1.058888889
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.951694304	0.8984375	0.201923077	1.058888889
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.951694304	0.8984375	0.201923077	1.058888889
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.948275862	0.886111111	0.201923077	1.058888889
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.948275862	0.886111111	0.201923077	1.058888889
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.125	0.75	0.66667
Valor alternativa	1.158911326	0.880813953	1.156410256	2.101388889
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1

Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.875	0.2	0.875	0.9
Valor alternativa	1.158911326	0.880813953	1.156410256	2.101388889
Motor 5				
Valor limitante superior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
	1.047120419	1.15	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.66667	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	1.098774333	0.86	0.169892473	1.058888889
Motor 5				
Valor limitante inferior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	1.098774333	0.86	0.169892473	1.058888889
Motor 6				
Valor limitante superior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
	1.047120419	1.25	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.951694304	0.886363636	0.203846154	1.058888889
Motor 6				
Valor limitante inferior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.951694304	0.886363636	0.203846154	1.058888889

Fonte: Autoria própria.

Quadro 4 – Julgamentos AHPSort na amostra 54 – Falha no motor 5.

Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.66667
Valor alternativa	0.949640288	0.873697917	0.195512821	2.119444444
Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.125	0.2	0.9
Valor alternativa	0.949640288	0.873697917	0.195512821	2.119444444
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.949640288	0.899739583	0.195512821	1.101944444
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.949640288	0.899739583	0.195512821	1.101944444
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.947595118	0.888888889	0.195512821	1.050555556
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.947595118	0.888888889	0.195512821	1.050555556
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.949640288	0.880813953	0.195512821	1.050555556
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1

Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.949640288	0.880813953	0.195512821	1.050555556
Motor 5				
Valor limitante superior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
	1.047120419	1.15	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.125	0.125	0.66667
Valor alternativa	1.333333333	0.866666667	0.96344086	2.052777778
Motor 5				
Valor limitante inferior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.875	0.2	0.2	0.9
Valor alternativa	1.333333333	0.866666667	0.96344086	2.052777778
Motor 6				
Valor limitante superior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
	1.047120419	1.25	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.949640288	0.889520202	0.203205128	1.050555556
Motor 6				
Valor limitante inferior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.949640288	0.889520202	0.203205128	1.050555556

Fonte: Autoria própria.

Quadro 5 – Julgamentos AHPSort na amostra 55 – Falha no motor 6.

Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.942857143	0.868489583	0.190384615	1.037222222
Motor 1	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.125	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.942857143	0.868489583	0.190384615	1.037222222
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.942857143	0.895833333	0.190384615	1.095555556
Motor 2	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.942857143	0.895833333	0.190384615	1.095555556
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.35	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.940841055	0.883333333	0.190384615	1.0375
Motor 3	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.940841055	0.883333333	0.190384615	1.0375
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante superior	1.047120419	1.1	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.125	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	0.942857143	0.885658915	0.190384615	1.037222222
Motor 4	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
Valor limitante inferior	1	1	1	1

Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.2	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	0.942857143	0.885658915	0.190384615	1.037222222
Motor 5				
Valor limitante superior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
1.047120419		1.15	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.66667	0.125	0.125	0.125
Valor alternativa	1.088571429	0.866666667	0.159677419	1.037222222
Motor 5				
Valor limitante inferior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
1		1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.2	0.2	0.66667
Valor alternativa	1.088571429	0.866666667	0.159677419	1.037222222
Motor 6				
Valor limitante superior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
1.047120419		1.25	1.1	2
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.75	0.125	0.75	0.66667
Valor alternativa	1.1558669	0.891414141	1.171153846	2.049444444
Motor 6				
Valor limitante inferior	Tensão	Corrente	Temperatura	Vibração
1		1	1	1
Julgamento a favor da limitante ou alternativa	0.875	0.2	0.2	0.9
Valor alternativa	1.1558669	0.891414141	1.171153846	2.049444444

Fonte: Autoria própria.