

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL

LUIZ ANTONIO CANAL

**PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA PRIORIZAÇÃO DE
INVESTIMENTO EM MONITORAMENTO INSTRUMENTADO
CONTÍNUO DE EQUIPAMENTOS DINÂMICOS APLICADO EM
PLANTA PETROQUÍMICA**

São Leopoldo

2017

Luiz Antonio Canal

**PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA PRIORIZAÇÃO DE
INVESTIMENTO EM MONITORAMENTO INSTRUMENTADO
CONTÍNUO DE EQUIPAMENTOS DINÂMICOS APLICADO EM
PLANTA PETROQUÍMICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientador: Dr. José Vicente Canto dos Santos

São Leopoldo

2017

C212p Canal, Luiz Antonio

Proposta de um método para priorização de investimento em monitoramento instrumentado contínuo de equipamentos dinâmicos aplicado em planta petroquímica / por Luiz Antonio Canal. – 2017.

73 f. : il., 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.
Orientação: Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos.

1. Análise multicritério. 2. Manutenção preventiva baseada em condição. 3. Monitoramento e proteção de equipamentos. 4. Vibração e temperaturas em mancais. 5. Análise de risco.
I. Título.

Catlogação na Fonte:

Bibliotecária Vanessa Borges Nunes - CRB 10/1556

*Por Jandira,
para Aline.*

*“Conte-me e eu esqueço. Mostre-me e eu apenas me lembro.
Envolve-me e eu compreendo”.*
Confúcio

Agradecimentos

Deixo registrado de forma destacada o agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. José Vicente Canto, não somente pela confiança a mim delegada, mas também por ser o grande motivador desta oportunidade que tenho ao escrever este trabalho - de rejuvenescer ao estudar e contribuir com a sociedade tecnológica.

Também agradeço aos colegas de empresa por participarem deste trabalho. Obrigado Adriano, Anderson, André, Bruno, Cristian, Juliana, Leonardo, Lisandra, Marcelo, Sebastian, Pedro e Vicente.

RESUMO

A busca pela maior segurança industrial em plantas petroquímicas tem sido a pauta principal deste tipo de negócio, já que a possibilidade de acidentes é potencializada pela própria natureza da operação, que envolve inventários inflamáveis, combustíveis ou tóxicos. Muitos dos iniciadores destes eventos advêm de mau funcionamento de seus equipamentos dinâmicos, como motores, bombas e compressores, com causas ligadas a manutenção, operação ou projeto. Neste contexto, é proposto neste trabalho um método para a implantação de melhorias e projetos direcionados para o monitoramento contínuo de equipamentos dinâmicos. O objetivo é de aumentar a segurança industrial e a disponibilidade dos equipamentos, já que o contínuo monitoramento dos equipamentos permite uma melhor supervisão dos mesmos, além de fortalecer a manutenção preventiva baseada em condição. Será apresentada a solução focando no monitoramento de temperatura e vibração em mancais, que normalmente são foco da maior parte das falhas em equipamentos dinâmicos. Inicia-se pela escolha do método para priorização da implantação, baseado em análise multicritério e análise de risco, passando pela proposição e definição dos critérios, culminando com a exemplificação do trabalho em uma planta petroquímica real. Como resultado tem-se uma matriz de risco para apoio na priorização de investimento em monitoramento contínuo, agregando ainda simulações de análise de sensibilidade para a tomada de decisão.

Palavras-chave: Análise multicritério. Manutenção preventiva baseada em condição. Monitoramento e proteção de equipamentos. Vibração e temperatura em mancais. Análise de risco.

ABSTRACT

The search for greater industrial safety has been the main guideline in petrochemical business, since the most of accidents are potentiated by the own nature of the operation, which involves flammable, combustible or toxic inventories. Many of the initiators of these events arise from the malfunction of their dynamic equipment, such as motors, pumps and compressors, with causes related to maintenance, operation or design. In this context, it is proposed a method for the implementation of improvements and projects directed to the continuous monitoring of dynamic equipment. The main objective is to increase the industrial safety and the availability, since the continuous monitoring allows a better supervision of the dynamic equipment, besides strengthening the application of condition based maintenance policy. The solution will be presented focusing on the monitoring of equipment temperature and vibration, which indicate of most failures or a situation of non-appropriated operation. This work starts with determining the method to prioritize the implementation, based on multicriteria and risk analysis, explain the criteria and their definition, culminating with the exemplification of the work in a real petrochemical plant. As a result, a risk matrix is presented for support in the prioritization of investment in continuous monitoring, also adding sensitivity analysis simulations for decision making.

Keywords: Multicriteria and risk analysis. Condition based maintenance. Equipment monitoring and protection. Vibration and temperature in bearings.

LISTA DE FIGURAS

2.1: Procedimento para Resolução de Um Problema de Decisão	27
2.2: Distribuição dos Estudos de MMAD em Manutenção e Confiabilidade	28
2.3: Mancal de Deslizamento	32
2.4: Mancal de Rolamento.....	32
2.5: Sistema de Lubrificação	33
2.6: Ilustração do Invólucro de um Transmissor de Temperatura com Dispositivo para Lubrificação Mancal de Rolamento	36
2.7: Invólucro Real	36
2.8: Esquema Básico de Medição de Vibração	38
2.9: Esquema de um Sensor de Proximidade	39
2.10: Representação do Sinal do Sensor de Vibração Relativo.....	39
2.11: Esboço do Transdutor Eletrodinâmico de Velocidade	40
2.12: Representação do Acelerômetro Piezoelétrico.....	40
2.13: Arranjo Típico de um MPS para Motor	43
2.14: Camadas de um Sistema de Manutenção Baseado em Condição.....	45
2.15: Representação Hierárquica para um Modelo de Decisão.....	47
3.1: Exemplo de Supervisão do Fluxo para o Sistema de Lubrificação	59
4.1: Diagrama Ilustrativo de uma Planta Petroquímica.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

2.1: Número de Artigos por Ano de MMAD e Manutenção	28
3.1: Exemplo de Matriz de Riscos	52
4.1: Distribuição da Amostra de Equipamentos Dinâmicos.....	64
4.2: Distribuição das Notas dos Especialistas (Boxplot).....	67
4.3: Matriz de Risco para Investimentos em Monitoramento e Proteção.....	69
4.4: Análise de Sensibilidade - Situação 1	70
4.5: Análise de Sensibilidade - Situação 2	71
4.6: Análise de Sensibilidade - Situação 3	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Distribuição das Falhas em Motores	20
Tabela 1.2: Distribuição de Falhas em Equipamentos Rotativos	20
Tabela 2.1: Matriz de Decisão para MMAD	27
Tabela 2.2: Benefícios e Limitações dos MMAD	29
Tabela 2.3: Parâmetros de Vibração em Manutenção Preditiva.....	42
Tabela 2.4: Diferença entre MPS e CMS	44
Tabela 2.5: Resumo dos Trabalhos Analisados.....	49
Tabela 3.1: Valores para Fluxo de Produto Interrompido	55
Tabela 3.2: Valores para Impacto em Produção.....	55
Tabela 3.3: Valores para Risco do Inventário	56
Tabela 3.4: Valores para Custo do Reparo	57
Tabela 3.5: Valores para Severidade da Aplicação	58
Tabela 3.6: Valores para Confiabilidade da Lubrificação	59
Tabela 3.7: Valores para Monitoramento Atual	60
Tabela 4.1: Notas dos Especialistas.....	66
Tabela 4.2: Resultado da Avaliação	68
Tabela 4.3: Comparação das Constantes de Escala - Situação 1	70
Tabela 4.4: Comparação das Constantes de Escala - Situação 2.....	71
Tabela 4.5: Comparação das Constantes de Escala - Situação 3.....	72

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Processo Hierárquico Analítico)
AMD	Apoio Multicritério à Decisão
API	<i>American Petroleum Institute</i> (Instituto Americano do Petróleo)
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i> (Manutenção Baseada em Condição)
CMS	<i>Condition Monitoring System</i> (Sistema de Monitoramento da Condição)
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Expressing Reality</i> (Eliminação e Escolha Espressando Realidade)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
ISA	<i>International Society of Automation</i> (Sociedade Internacional de Automação)
LCCA	<i>Life Cycle Costing Analysis</i> (Análise do Custo do Ciclo de Vida)
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i> (Transformador Diferencial Variável Linear)
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i> (Medindo a Atratividade por uma Técnica de Avaliação Baseada em Categologia)
MMAD	Métodos Multicritérios de Análise de Decisão
MAUT	<i>Multi-Attribute Utility Theory</i> (Teoria da Utilidade Multiatributo)
MPS	<i>Machine Protection System</i> (Sistema de Proteção de Máquina)
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i> (Associação Nacional de Proteção a Incêndios)
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i> (Método de Classificação por Preferências para Enriquecimento de Avaliações)
RTD	<i>Resistance Temperature Detectors</i> (Resistor Detector de Temperatura)
SMARTS	<i>Simple Multi-Attribute Rating Technique</i> (Técnica Simples de Classificação de Múltiplos Atributos)
SPH	<i>Spherilene</i> (planta de processo petroquímico para produção de polietileno de alta densidade ou baixa densidade linear)
TOPSIS	<i>Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution</i> (Técnica para Ordem de Desempenho por Similaridade à Solução Ideal)
UTA	<i>Utilité Additive</i> (Utilidade Aditivo)
WSM	<i>Weighted Sum Model</i> (Modelo de Soma Ponderada)

LISTA DE SÍMBOLOS

C_r	Custo do Reparo
C_L	Confiabilidade da Lubrificação
I_p	Impacto na Produção
k_j	Constante de escala para determinado critério “j”
l_i	Limiar inferior de veto para o critério “i”
M_a	Monitoramento Atual
R_i	Risco do Inventário
S_a	Severidade da Aplicação
u_i	Limiar superior de veto para critério “i”
$v(a)$	Função valor global do método aditivo determinístico
$v_j(a)$	Função valor para determinado critério “j”
x_0	Amplitude do deslocamento
$z_i(a)$	Função de veto para o critério “i”
Z_t	Índice de Tecnologia
Z_s	Índice de Severidade
ω	Velocidade angular ($2\pi f$)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	
1.1 Objetivo Geral	21
1.2 Objetivos Específicos	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	
2.1 Análise Multicritério	23
2.1.1 Benefícios e Restrições dos Métodos MMAD	29
2.2 Manutenção Preventiva Baseada em Condição.....	30
2.3 Conceitos Básicos sobre Mancais de Equipamentos Dinâmicos.....	31
2.4 Monitoramento Instrumentado em Mancais.....	34
2.4.1 Principais Sensores de Temperatura	34
2.4.2 Medição de Vibração.....	36
2.4.3 Análise de Vibração em Equipamentos	41
2.4.4 Sistemas de Monitoramento e Proteção	42
2.5 Trabalhos Relacionados.....	45
3. METODOLOGIA	
3.1 Modelo Proposto: Análise Multicritério e Análise de Risco	51
3.1.1 Definição do Método de Análise	52
3.2 Proposta dos Critérios.....	53
3.2.1 Fluxo de Produto Interrompido por Falha Equipamento (F_p)	54
3.2.2 Impacto na Produção por Falha do Equipamento (I_p)	55
3.2.3 Riscos à Segurança Industrial e Meio Ambiente por Perda de Inventário (R_i)	55
3.2.4 Custo do Reparo (C_r)	57
3.2.5 Severidade da Aplicação (S_a)	57
3.2.6 Confiabilidade do Sistema de Lubrificação (C_L)	58
3.2.7 Monitoramento Atual Instalado (M_a)	59
3.3 Valores das Constantes de Escala (Pesos)	60
4. TESTES E RESULTADOS	
4.1 Aplicação em Planta Petroquímica	63
4.1.1 Avaliação Individual dos Especialistas.....	64
4.1.2 Avaliação pelo Modelo Proposto.....	67
4.1.3 Contribuição Análise de Sensibilidade.....	69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	74
APÊNDICE 1	75
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

O cenário econômico altamente competitivo da indústria globalizada faz com que a sobrevivência das organizações dependa de sua habilidade em realizar melhorias contínuas em seus processos para aumento da produtividade, principalmente no processo de manutenção, responsável pela disponibilidade dos ativos industriais (OTANI; MACHADO, 2008). No setor petroquímico esta realidade não é diferente.

Dentro deste contexto, a área de manutenção deve determinar com precisão as políticas de manutenção a serem selecionadas para cada equipamento, focando na escolha que reduza seus custos de manutenção e aumente sua produtividade e segurança. Com isto ganha importância o monitoramento contínuo dos equipamentos, já que possibilita a aplicação da política de manutenção baseada em condição em sua plenitude, permitindo realizar a manutenção no melhor momento e de forma melhor planejada, conforme a real situação de cada equipamento. Isto é possível através do acompanhamento das variáveis dinâmicas de comportamento como vibração e temperatura, já que mudanças nestas variáveis denunciam situações incipientes de falhas mecânicas (SHIN, 2014).

O monitoramento contínuo dos equipamentos permite também outros ganhos, como a avaliação da influência do processo junto ao equipamento aumentando assim a segurança industrial. Com as informações disponibilizadas torna-se possível correlacionar variáveis como vibrações ou temperaturas sobre o equipamento versus as condições de processo, tornando assim possível selecionar a melhor condição de operação do equipamento e, conseqüentemente, aumentando sua vida útil e a segurança.

Estas condições podem ser limites para a produtividade do equipamento e da planta, situações conhecidas como gargalo de produção. Daí o monitoramento também é importante, pois a solução para aumento da produtividade pode passar por um novo projeto, seja por mudança no equipamento ou no processo, e o cruzamento de informações dos equipamentos e do processo torna-se fundamental para determinar a solução do problema.

Até alguns anos atrás o monitoramento contínuo era restrito a máquinas de grande porte. Atualmente, com o desenvolvimento da eletrônica e de sensores, o preço vem sofrendo queda significativa, possibilitando a aplicação em máquinas de médio ou pequeno porte. (KARDEC; NASSIF, 1998).

No entanto o tema de monitoramento de equipamentos é amplo. São muitas as tecnologias de máquinas, sensores e técnicas. Neste estudo o foco será o monitoramento de mancais de equipamentos dinâmicos, basicamente os rotativos como motores elétricos, bombas, agitadores, compressores e extrusoras, amplamente usados na indústria petroquímica.

Importante ressaltar que neste trabalho considera-se o monitoramento contínuo como sendo um monitoramento eletrônico e automatizado, cujos dados estejam disponibilizados e tratados com a mesma confiabilidade dos sistemas de controle do processo industrial. Isto é de suma importância para garantir as mesmas interfaces e base temporal dos dados, a fim de transformar os dados em informação através da imediata avaliação do comportamento e tendência das variáveis envolvidas.

A importância do monitoramento de mancais de motores dá-se por ser o ponto mais suscetível a falhas. Conforme Thorsen (1995) os mancais respondem por 51% das falhas em motores elétricos. Sua pesquisa foi de 1637 amostras, contendo motores de indução aplicados na indústria de petróleo e petroquímica. A distribuição das falhas é dada conforme a Tabela 1.1.

Este trabalho apurou uma pesquisa semelhante em uma empresa petroquímica de grande porte, onde se considerou todos os equipamentos mecânicos dinâmicos de uma de suas plantas, como bombas, compressores, agitadores e extrusoras. Foram analisados os dados dos últimos 11 anos, histórico de 2005 a 2015, de seu departamento de manutenção, especificadamente junto ao setor de inspeção de equipamentos dinâmicos. Este setor é responsável pela avaliação dos equipamentos durante a operação, monitorando pontualmente vibrações e temperaturas, além da inspeção sensitiva para avaliação das condições gerais do equipamento, como degradações e ruídos. Mais de 35% das falhas estão ligadas a mancais, detalhes podem ser vistos na Tabela 1.2.

Tabela 1.1. Distribuição de falhas em motores

Componente	Número de Falhas	Percentual
Mancais	836	51,07
Estator	258	15,76
Rotor	77	4,70
Eixo/Acoplamento	40	2,44
Externo	255	15,58
Outros	171	10,45
Total	1637	100,00

Fonte: THORSEN, 1995.

Tabela 1.2. Distribuição de falhas em equipamentos rotativos

Falha detectada	Número de Falhas	Percentual
Desbalanceamento	115	20,68
Desalinhamento	37	6,65
Mancais	199	35,79
Folga / Roçamento	45	8,09
Engrenamento	39	7,01
Revisão Geral	9	1,62
Problema Elétrico	5	0,90
Cabo/Sensor	4	0,72
Vazamentos/Viscosidade	32	5,76
Acoplamento	16	2,88
Polias / Correias	18	3,24
Rigidez/Tensão/Base	18	3,24
Abertura/ Ruído	17	3,06
Eixo Empenado	2	0,36
Total	556	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Mas sendo o monitoramento contínuo de equipamentos importante para a produtividade e segurança, como implementá-lo em uma planta petroquímica? Esta é a pergunta que este

trabalho visa responder, com foco no método de priorização para investimentos, passando pelas tecnologias de monitoramento básico de temperatura e vibração.

Para o método de priorização discursaremos sobre a análise multicritério, método amplamente usado em situações onde a formulação do problema consiste em definir a estrutura do problema podendo ser dada através de discussões técnicas de diversas áreas, e dessa forma definir um conjunto de ações que possam atender o problema posicionado (MEIRELLES; GOMES, 2009). A análise de risco será agregada ao modelo proposto.

As tecnologias de monitoramento básico em manuais que serão apresentadas são as disponíveis para medição de vibração e temperatura, variáveis importantes que denunciam falhas oriundas de desgastes mecânicos, sejam desgastes considerados normais por final de vida útil ou desgastes acelerados devido a condições não adequadas de operação. O foco maior estará no comportamento da vibração, já que a análise de seu comportamento no espectro de frequências permite a identificação de defeitos mecânicos.

Na definição do modelo de decisão será incorporada a análise de risco, com a apresentação dos conceitos de cada critério, bem como sua importância no problema de priorização proposto.

Por fim, será desenvolvido todo este caminho em uma planta petroquímica real, tendo como resultado um sólido método para avaliação e priorização de investimentos de monitoramento contínuo em equipamentos dinâmicos.

1.1 Objetivo Geral

Através de um método multicritério de apoio a decisão e análise de risco, determinar um método para priorizar investimentos em monitoramento e proteção contínua de equipamentos em plantas industriais petroquímicas.

1.2 Objetivos Específicos

Destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Propor o método de priorização baseado em análise multicritério e análise de risco.
- Apresentar as características e vantagens da estratégia de manutenção CBM (*Condition Based Maintenance*).
- Implantar o processo proposto em uma planta petroquímica, através da elaboração de uma matriz de risco para análise de investimentos em monitoramento contínuo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo trata da pesquisa para embasamento teórico. Está dividido em cinco tópicos: análise multicritério, manutenção preventiva baseada em condição, conceitos sobre manuais de equipamentos dinâmicos e monitoramento e proteção de equipamentos. Por último serão apresentados alguns trabalhos relacionados com o objetivo fim deste trabalho.

2.1 Análise Multicritério

Quando falamos em priorização está subentendido o processo decisório, de decidir entre um caminho ou outro, ou ainda entre um dentre outros caminhos possíveis. Pode ser também a lista de caminhos que devem ser seguidos. Ou seja, decidir conforme o cenário dentre as possibilidades de resolver o problema. Neste contexto os Métodos Multicritérios de Análise de Decisão (MMAD) aparecem como uma opção para a consecução desse propósito. Eles promovem um maior entendimento do contexto multidisciplinar do processo decisório (GOMES apud VILAS BOAS, 2004).

Sobre os métodos multicritérios de análise de decisão, afirma Almeida (2013, p. 17),

Este tema tem interessado a uma quantidade significativa de estudiosos no assunto, cujo número é crescente, notadamente quando a demanda abrange problemas de decisão das organizações, envolvendo múltiplos objetivos. O assunto está inserido na área de Ciência da Gestão e Pesquisa Operacional, de onde surgiu o campo que envolve os métodos multicritério de apoio à decisão. Esses métodos são aplicados na análise de problemas de decisão onde existem vários objetivos, muitas vezes conflitantes, para os atores envolvidos no processo decisório.

A análise para a avaliação de multicritérios se desenvolve por etapas através da formulação do problema, definição de um conjunto de ações, preparação de um conjunto de critérios, avaliação dos critérios, delimitação e descrição de valores aos critérios e agregação dos mesmos (ALMEIDA; LUGO; SANTOS, 2015).

A formulação do problema consiste em definir a estrutura do problema podendo ser dada através de discussões técnicas de diversas áreas, e dessa forma definir um conjunto de ações que possam atender o problema posicionado (MEIRELLES; GOMES, 2009).

Os critérios podem ser determinados através de parâmetros e indicadores como elementos de estrutura, são avaliados através de uma matriz de avaliação onde as linhas correspondem aos itens a avaliar, e as colunas os critérios de avaliação (HALAMA, 2014).

As delimitações dos critérios são avaliadas através de uma escala de ponderação que indicam numericamente a importância para cada critério. A agregação do valor do critério consiste em associar um julgamento relativo a cada ação (ENSSLIN et al. 2012).

São diversos os métodos de análise multicritério disponíveis na literatura, segundo Leite e Freitas (2012), a seleção do modelo a ser aplicado depende inicialmente das características do problema, da preferência do decisor e do tipo de resultado que ele deseja.

De acordo com Junior et al. (2014), “problemas de decisão podem ser discretos, quando se trata de um número finito de alternativas, ou contínuos, quando tal número pode ser pensado como infinitamente grande”.

Dentre os métodos multicritério discretos, as principais linhas de estudo são a Escola Americana e a Escola Francesa, representadas pelos métodos de sobreposição *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, *Elimination and Choice Expressing Reality (ELECTRE)* e *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)* (LEITE; FREITAS, 2012).

Segundo Almeida (2013, p. 15), a classificação mais comum encontrada na literatura para os métodos MMAD, considera três tipos principais de métodos:

- Métodos de critério único de síntese, pois agregam os critérios em um único critério de síntese;
- Métodos de sobreclassificação (*outranking*) – superação, prevalência ou subordinação;
- Métodos interativos.

Almeida (2013, p. 15) enfatiza que, dentre os métodos acima, os dois primeiros grupos são os principais, que representam a maioria dos métodos discretos. No primeiro grupo destacam-se os modelos baseados no modelo aditivo determinístico, que é o mais utilizado na literatura. Dentre estes temos os seguintes métodos: modelo agregação aditivo, SMARTS (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*), Elicitação Flexível, *Even Swaps*, MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), AHP (*Analytic Hierarchy Process*), Método de Entropia, UTA (*Utilité Additive*) e TOPSIS (*Technique for Order Performance bu Similarity to Ideal Solution*).

No segundo grupo, os dos métodos de sobreclassificação, destacam-se a família de métodos ELECTRE e PROMETHEE, assim como também se destacam no grupo de métodos multicritério discretos.

Almeida (2013, p.15 e 16) também destaca a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT – *Multi-Attribute Utilily Theory*) como importante método de critério único de síntese. MAUT foi derivada da Teoria da Utilidade (KEENEY; RAIFFA apud ALMEIDA, 2013) e incorpora da Teoria da Utilidade a questão do tratamento de problemas com múltiplos objetivos.

Os métodos também podem ser compensatórios ou não compensatórios. Segundo Almeida (2013, p.40),

Uma importante característica em métodos multicritério, relevante para a escolha de métodos, está relacionada à compensação que pode existir entre os critérios no modelo de agregação. Em função disso, os métodos podem ser classificados em compensatórios ou não compensatórios. Nos métodos compensatórios existe a ideia de compensar um menor desempenho de uma alternativa em um dado critério por meio de um melhor desempenho em outro critério.

AHP é uma das abordagens que pode ser escolhida quando o tomador de decisão utiliza seu julgamento e conhecimento para fazer uma avaliação entre critérios restritivos ou não para uma determinada situação (LEITE; FREITAS, 2012).

O AHP é baseado na comparação paritária dos critérios, buscando responder duas perguntas principais: Quais são os critérios de maior importância? Qual a proporção dessa importância? (GOMES apud LEITE; FREITAS, 2012).

Para as respostas os decisores devem atribuir pesos numa escala de 1 a 9 para cada critério, comparando-os par a par (LEITE; FREITAS apud BERZINS, 2012).

A literatura apresenta uma família de métodos ELECTRE, como o ELECTRE I, IS, II, III, IV e TRI. Todos são aplicados em duas fases segundo Almeida (2013): na construção da relação de sobreclassificação, onde se estabelece uma comparação par a par entre as alternativas, e na exploração da relação de sobreclassificação, onde se aplica um procedimento ou algoritmo para resolver o problema em função da problemática específica abordada.

Assim como o ELECTRE, o PROMETHEE também possui diversos vertentes. Almeida (2013, p. 132) cita os métodos PROMETHEE I, II, III, IV, V e VI.

Semelhante ao AHP, o PROMETHEE também compara as alternativas em relação par a par indicando o desempenho de cada uma para um determinado critério (BRANS; MARESCHAL apud LEITE; FREITAS, 2012).

Nos métodos de critério único de síntese a classificação das ações é realizada de forma direta pela preferência de seus decisores, sendo a avaliação realizada por modelos aditivos e multiplicativos (GARTNER apud VILAS BOAS, 2006). Entre esses métodos, destacam-se a soma ponderada, o produto ponderado e a soma ponderada modificada (SOARES apud VILAS BOAS, 2004). O produto ponderado ameniza a compensação entre critérios, efeito presente na soma ponderada. Uma atribuição do valor zero para a avaliação de uma alternativa em relação a um dos critérios representa a intenção deliberada de exclusão da alternativa (SOARES apud HALAMA, 2014).

As operações, de soma ou produto, são entre as notas para o critério (c_1, c_2, \dots, c_n) e os pesos dos critérios (p_1, p_2, \dots, p_n). Abaixo as equações para o produto e soma ponderada:

$$\text{Soma Ponderada} = \frac{(c_1.p_1+c_2.p_2+\dots+c_n.p_n)}{(p_1+p_2+\dots+p_n)} \quad (2.1)$$

$$\text{Produto Ponderado} = \frac{(c_1.p_1 \times c_2.p_2 \times \dots \times c_n.p_n)}{(p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n)} \quad (2.2)$$

Encontram-se outros nomes na literatura para o método soma ponderada, como agregação aditivo determinístico ou WSM (*Weighted Sum Model*). Para Almeida (2013, p.45), o mais típico método de critério único de síntese é o de agregação aditivo determinístico, onde se obtém um vetor de consequências “x” para cada alternativa “a”. Portanto, se utiliza para a avaliação intracritério a função valor “ $v_j(a)$ ” para cada critério “j”. Conforme Almeida (2013, p.45), para a obtenção da função valor global “ $v(a)$ ” tem-se:

$$v(a) = \sum_{j=1}^n k_j \cdot v_j(a) \quad (2.3)$$

Onde, “ k_j ” representa a constante de escala para o critério “j” e é normalizado, conforme equação abaixo:

$$\sum_{j=1}^n k_j = 1 \quad (2.4)$$

Almeida (2013, p. 45) enfatiza que a solução de um problema, no contexto de escolha, consiste na seleção da alternativa que tenha o máximo valor global “ $v(a)$ ” para o método de agregação de aditivo.

Os métodos de agregação por meio de critério único de síntese distinguem fortemente em algumas características dos métodos de sobreclassificação, sendo estes últimos baseados na comparação par a par entre as alternativas (ALMEIDA, p. 109, 2013).

É proposto por Almeida (2013, p. 146) um método aditivo com veto, onde o decisor não aceita que uma determinada alternativa, que tenha um desempenho muito baixo em algum critério, seja selecionada. Ou seja, o valor global da alternativa pode ser alto, pois o valor no critério com baixo desempenho pode ser compensado pelo seu bom desempenho em outros critérios.

A implementação do veto é desenvolvida por meio da integração da função veto ao modelo aditivo.

Segundo Almeida (2013, p. 146), a função veto $z_i(a)$, para o critério i , é dada por

$$z_i = \begin{cases} 0, & \text{if } v_i(a) \leq l_i \\ 1, & \text{if } v_i(a) \geq u_i \\ \frac{v_i(a) - l_i}{u_i - l_i}, & \text{if } u_i < v_i(a) < l_i \end{cases} \quad (2.5)$$

Onde:

$v_i(a)$ é a função valor para o critério i .

l_i é o limiar inferior de veto para o critério i .

u_i é o limiar superior de veto para o critério i .

A integração da função veto ao modelo aditivo é proposta por Almeida (2013, p. 147) conforme abaixo:

$$v(a) = \sum_{j=1}^n k_j \cdot v_j(a) \prod_{i=1}^n z_i(a) \quad (2.6)$$

O autor ainda comenta que o modelo aditivo com a função veto permite ao decisor especificar situações desempenho que são inaceitáveis para cada critério e evitar, assim, a seleção das alternativas que estejam nessa condição.

Gartner (apud Vilas Boas, 2006) propõe o levantamento do conjunto de alternativas \underline{A} ($A = \{a_1 \dots a_j \dots a_n\}$) e do conjunto de critérios \underline{F} ($F = \{g_1 \dots g_j \dots g_m\}$). As alternativas do conjunto \underline{A} são comparados entre si considerando seus desempenhos nos critérios do conjunto \underline{F} . A partir daí o autor propõe a criação da matriz de decisão, conforme tabela 2.1.

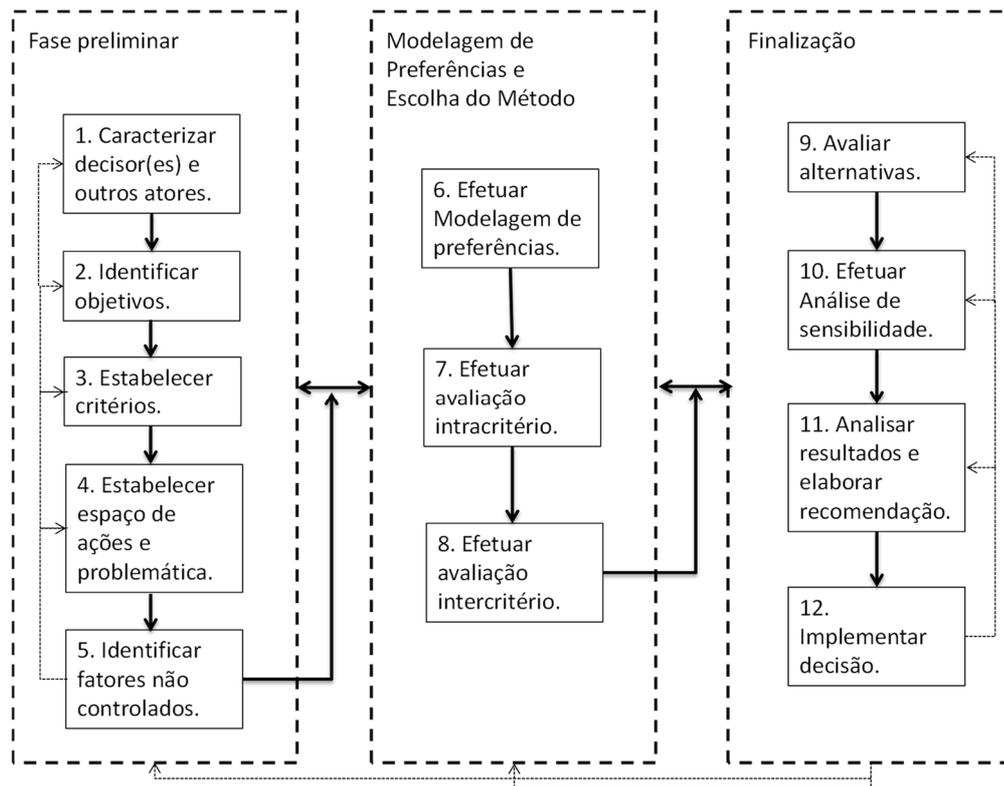
Tabela 2.1. Matriz de Decisão para MMAD

	g_1	g_i	g_m
a_1	$g_1(a_1)$	$g_j(a_1)$	$g_m(a_1)$
..
..
a_j	$g_1(a_j)$	$g_j(a_j)$	$g_m(a_j)$
..
..
a_n	$g_1(a_n)$	$g_j(a_n)$	$g_m(a_n)$

Fonte: adaptado de Vilas Boas (2006)

Almeida (2013, p. 165) propõe um procedimento para resolver um problema de decisão, conforme ilustrado na figura 2.1.

Figura 2.1. Procedimento para resolução de um problema de decisão



Fonte: Adaptado de Almeida (2013).

A análise de sensibilidade, recomendada no passo 10 do procedimento ilustrado na Figura 2.1, é realizada através da variação, tanto para menos como para mais, do peso do critério em análise. Smith e Orsoni (2007) enfatizam que a análise de sensibilidade traz robustez ao modelo de decisão.

2.1.1 Benefícios e Dificuldades dos Métodos MMAD

Halama (2014) cita como principal vantagem dos MMAD a sua habilidade em refletir situações reais, onde frequentemente múltiplos aspectos estão envolvidos. Cada alternativa deve ser interpretada como um acordo entre objetivos em conflito, pois raramente será encontrada uma situação em que exista uma alternativa superior às restantes sobre todos os pontos de vista.

Ainda de acordo com Halama (2014), uma limitação das técnicas econômicas tradicionais, como a análise Custo Benefício, é que elas não representam adequadamente benefícios que não podem ser quantificados em termos monetários.

O autor coloca também que muitos problemas são mal definidos e conseqüentemente mal estruturados nas empresas. As metodologias propostas para os MMAD requerem que o problema seja bem estudado, o que minimiza essa questão (CANCER; MULEY apud HALAMA, 2014).

Dentre as dificuldades da aplicação dos MMAD, destacam-se por Fernandes (apud HALAMA, 2014) as seguintes: presença de fatores intangíveis; horizonte de longo prazo; risco e incerteza; natureza interdisciplinar dos impactos; dificuldade na escolha do método de agregação apropriado para cada caso específico; a possibilidade de os tomadores de decisão indicarem analistas deliberadamente e controlarem as premissas consideradas de forma a utilizar os MMAD para justificar decisões pré-estabelecidas. A tabela 2.1 lista a síntese dos benefícios e limitações dos MMAD.

Tabela 2.2. Benefícios e Limitações dos MMAD

Benefícios	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Refletem situações reais, as quais possuem múltiplos aspectos (SOARES, 20114; VILAS BOAS, 2006); • Reconciliam objetivos conflitantes (SOARES, 2004; VILAS BOAS, 2006); • Possibilitam a inserção de benefícios que não podem ser medidos diretamente em unidades monetárias (HAJKOWICZ e COLLINS, 2007); • Favorecem a consideração de questões de equidade (HAJKOWICZ e COLLINS, 2007); • Promovem a definição e a estruturação dos problemas avaliados (CANCER e MULEJ, 2013); • Fornecem clareza e transparência ao processo (GOMES e MOREIRA, 1998; DUNNING, ROSS e MERKHOFFER, 2000), favorecendo tomadas de decisão efetivas e defensáveis (BELTON E STEWART, 2002); • Estimulam a reflexão a respeito do problema estudado e dos aspectos envolvidos na análise (BELTON e STEWART, 2002); • Promovem o diálogo entre analistas e decisores (DIAKOULAKI e MAVROTAS, 2004); • Possibilitam a incorporação de incertezas (DIAKOULAKI e MAVROTAS, 2004); 	<ul style="list-style-type: none"> • Não garantem o atendimento da eficiência econômica (SOARES, 2004; VILAS BOAS, 2006); • A participação humana insere subjetividade na análise (CANCER e MULEJ, 2013); • Normalmente há dificuldade na obtenção das informações necessárias para a avaliação das alternativas (VILAS BOAS, 2006); • A estruturação de algumas técnicas dificulta a visualização da interdependência entre os critérios e escalas utilizadas para a sua mensuração, o que pode resultar na atribuição de valores inadequados (CANCER e MULEJ, 2013; LIN, 2013); • Muitas vezes estão presentes fatores intangíveis (FERNANDES, 1996); • Os impactos são interdisciplinares (FERNANDES, 1996); • Há dificuldade na seleção do método de agregação apropriado para cada caso específico; • O resultado da análise não pode ser generalizado para outras situações (SOARES, 2004; VILAS BOAS, 2006); • Se não forem bem aplicados, os MMAD podem ser utilizados com fins justificacionistas.

Fonte: adaptado de Halama (2006).

2.2 Manutenção Preventiva Baseada em Condição

As Estratégias de manutenção podem ser divididas em três categorias (BEN-DAYA et al, p. 142, 2009):

- **Manutenção corretiva:** presume a substituição ou reparo somente após a falha. Pode ser a estratégia adequada nos casos não críticos, onde a falha não representa consequência significativa em custos e segurança.
- **Manutenção preventiva:** realizada conforme intervalo de tempo, tempo este determinado pelas recomendações do fabricante e engenharia da planta, que tem a experiência do equipamento instalado. Pode envolver substituição ou reparo, ou ambos.
- **Manutenção baseada em condição (ou manutenção preditiva):** onde as decisões de manutenção são baseadas nas atuais informações de degradação e desempenho do equipamento. Podem-se acompanhar as variáveis como análise do óleo, análise de vibração e outros (temperaturas, pressões, rendimentos, etc).

Quando se compara a manutenção corretiva com a manutenção preditiva, essa apresenta muitas vantagens, econômicas em especial, e vem se tornando a estratégias em manutenção mais recomendadas para sistemas que necessitam de um alto grau de confiabilidade (GONÇALVES apud NETO et al, 2012). A manutenção preditiva é vista como a técnica mais inovadora entre as citadas, pois possibilita o monitoramento e acompanhamento de desempenho do equipamento através de instrumentos que fornecem dados quantitativos dos componentes (NETO et al., 2012).

De acordo com Otani e Machado (2008), a manutenção preditiva é um conjunto de atividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros que indicam o desempenho dos equipamentos, de modo sistemático, visando definir a necessidade ou não de intervenção.

A norma ABNT (NBR 5462-1994) diz que a manutenção preditiva permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem para reduzir a um mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

Conforme Shin e Jun (2014) “não há dúvidas de que a manutenção baseada em condição será uma importante ferramenta na era da informação”. Isto principalmente por permitir o gerenciamento das ações de manutenção conforme a real situação de cada equipamento.

Em relação às vantagens da manutenção preditiva baseada em condição, Shin e Jun (2014) afirmam que,

Há muitas vantagens da CBM (Condition Based Maintenance) reportadas em trabalhos anteriores relacionados às indústrias. Entre elas, em primeiro lugar, a CBM nos dá aviso prévio de falha iminente aumentando a precisão na previsão de falhas. Assim, pode-se reduzir eficazmente o erro na produção em comparação com outras abordagens. Do ponto de vista da gestão da segurança da produção, a CBM é útil para os tipos de indústrias em que a segurança é considerada crítica, uma vez que pode aumentar a segurança ao detectar problemas com antecedência antes que ocorram danos de maior gravidade.

Existem diversas normas internacionais relacionadas com a manutenção baseada em condição, Shin e Jun (2015) destacaram:

- IEEE 1451: *Smart transducer interface for sensors and actuators.*
- ISO 13372: *Condition monitoring and diagnostics of machines – Vocabulary.*
- ISO 13373-1: *Condition monitoring and diagnostics of machines – Vibration condition monitoring – Part 1. General procedures.*
- ISO 13373-2: *Condition monitoring and diagnostics of machines – Vibration condition monitoring - Part 2. Processing, analysis and presentation of vibration data.*
- ISO 13374: *MIMOSA OSA-CBM formats and methods for communicating, presenting and displaying relevant information and data.*
- ISO 13380: *Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines on using performance parameters.*
- ISO 13381-1: *Condition monitoring and diagnostics of machines – Prognostics, general guidelines.*
- ISO 14224: *Petroleum, petrochemical and natural gas industries – collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.*
- ISO 17359: *Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines.*
- ISO 18435: *MIMOSA OSA-EAI diagnostic and maintenance applications integration.*
- ISO 55000: *Asset management.*

Há também a ISO 10816 (*Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*) e a API 670 (*Machinery Protection Systems*).

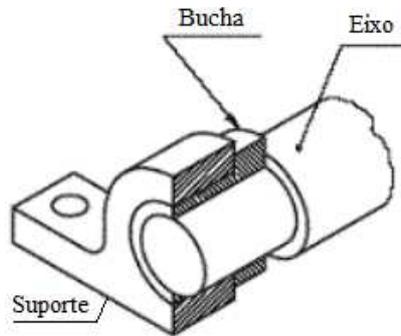
2.3 Conceitos Básicos sobre Mancais de Equipamentos Dinâmicos

Matos e Falco (1998, p. 263) definem mancais como elementos de máquina que têm por função manter o correto alinhamento do conjunto rotativo em relação as partes estacionárias, sob a ação de cargas radiais e axiais.

Já Norton (2011, p.623) cita também mancal plano como significado de mancal de deslizamento. Enfatiza que sempre que duas partes têm movimento relativo elas constituem um mancal, sem levar em conta sua forma ou configuração. Os mancais podem rolar, escorregar ou fazer ambos os movimentos simultaneamente.

Os mancais de deslizamento têm como principal função servir de apoio e guiar eixos girantes. Apresentam um coeficiente de atrito sensivelmente mais elevado, necessitando de uma película de lubrificante para reduzir o atrito eixo x mancal o que pode ocasionar um maior consumo de lubrificante (FRANCESCHI; ANTONELLO, 2014).

A figura 2.3 apresenta a constituição de um mancal de deslizamento.

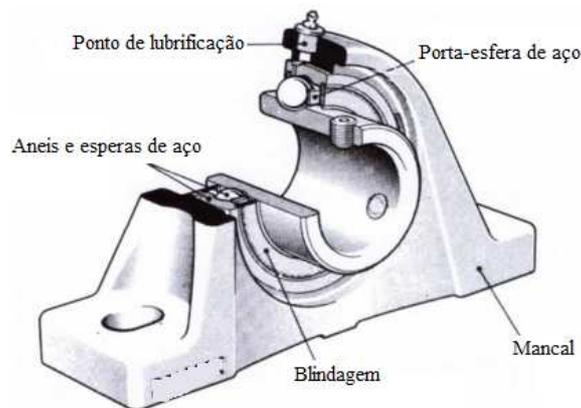
Figura 2.3. Mancal de deslizamento

Fonte: adaptado pelo autor.

Mancais de rolamentos apresentam um coeficiente de atrito menor do que os mancais de deslizamento. Os rolamentos são classificados em rolamentos de esferas ou rolamentos de rolos e são montados em suportes específicos (NORTON, 2011 p. 653).

Alguns fatores como espaço disponível, cargas de esforços, velocidade, nível de ruído, rigidez, deslocamento axial e facilidade de montagem e desmontagem se tornam fundamentais para a escolha e utilização de mancais de rolamentos em máquinas (MELCONIAN, 2008).

A figura 2.4 apresenta a constituição de um mancal de deslizamento.

Figura 2.4. Mancal de rolamento

Fonte: adaptado de Rolmax, 2015.

Os mancais podem estar a diversas aplicações e diferentes condições de severidade para transmissões mecânicas. Conectado a eixos móveis transmitem potência por meio de movimentos de rotação e podem apresentar dois tipos de defeito como quebra ou desgaste (SHIGLEY, 1984).

Norton (2013, p.653 e 654) afirma que os mancais de rolamento têm diversas vantagens sobre os mancais de deslizamento, e vice versa.

Vantagens dos mancais de rolamento:

- Atrito baixo na partida e durante a operação;
- Pode suportar cargas combinadas axial e radial;
- Menos sensível às interrupções de lubrificação;
- Sem instabilidades auto excitadas;
- Partida boa em baixas temperaturas;
- Pode selar lubrificante dentro do mancal e ser “lubrificado por vida útil”;
- Geralmente requer menos espaço na direção axial.

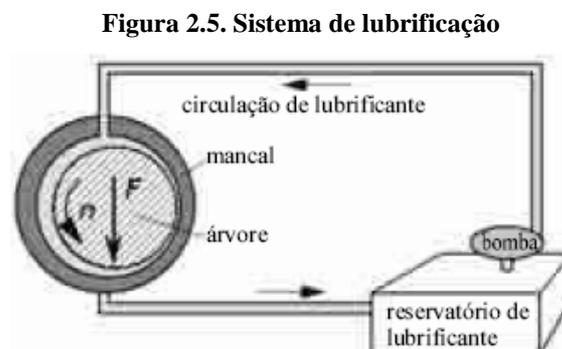
Desvantagens dos mancais de rolamento:

- Mancais de rolamento podem vir a falhar por fadiga;
- Requerem mais espaço na direção radial;
- Pobre capacidade de amortecimento;
- Nível mais elevado de ruído;
- Alguns têm requisitos de alinhamento mais severos;
- Em geral apresentam custos mais elevados.

Em mancais de rolamento a lubrificação objetiva reduzir o atrito, auxiliar na dissipação do calor gerado, fornecer proteção anticorrosiva e dificultar a entrada de partículas estranhas (MATTOS; FALCO, p.265, 1998).

Já em mancais de deslizamento, além das funções tradicionais, a lubrificação permite a formação de um filme de óleo entre o munhão e o mancal, devido à distribuição de pressão gerada pelo efeito do bombeamento, resultante da rotação do eixo, eliminando o contato metálico (MATTOS; FALCO, p. 269, 1998).

A figura 2.5 apresenta um modelo de sistema de lubrificação. (CARRETEIRO; MOURA, 1998).



Fonte: Adaptado de CARRETEIRO; MOURA, 1998, p.410.

2.4 Monitoramento Instrumentado de Mancais

A temperatura e a vibração são as principais variáveis a serem monitoradas em mancais de equipamentos dinâmicos. O acompanhamento da variação destas medições permite constatar alteração na condição do equipamento, componentes e do próprio processo produtivo (OTANI; MACHADO, 2008).

Em motores o controle da temperatura do mancal é fundamental para a manutenção, tendo o mancal condições específicas de lubrificação para cada motor dado a aplicação do mesmo. Desgastes aos mancais podem provocar desbalanceamento ao eixo na distribuição de massas de inércia ocasionando vibrações e baixo rendimento em motores elétricos (WEIDLICH, 2009).

A instalação dos sensores e instrumentos deve levar em conta a possibilidade da formação de atmosfera explosiva, segundo Cohn e Bulgarelli (2006, p. 311) “locais que apresentam riscos de explosão devido à presença de materiais inflamáveis ou explosivos”.

As técnicas construtivas para a fabricação de equipamentos elétricos ou eletrônicos para instalação em atmosferas explosivas podem ser agrupadas em cinco categorias gerais: contenção, segregação, limitação de energia, segurança aumentada e especiais (COHN e BULGARELLI, 2006, p.333).

2.4.1 Principais Sensores de Temperatura

Segundo Cohn (p. 209, 2006), os principais fatores técnicos a serem considerados na especificação do sistema para medição de temperatura são:

- Faixa de temperatura: na prática industrial a temperatura pode ser medida em uma gama muito extensa, desde temperaturas criogênicas abaixo de -200°C até alguns milhares de graus.
- Precisão e repetibilidade: variam conforme o sensor e devem atender às necessidades da aplicação. Porém a escolha de um sensor que exceda em muito os requisitos encarece desnecessariamente o custo.
- Proteção: de forma geral, os sensores de temperatura são mecanicamente delicados e incapazes de resistir quando expostos diretamente as condições agressivas de muitos processos. Por este motivo proteções mecânicas, como tubos ou poços confeccionados com uso de ligas metálicas, são necessários.
- Tempo de resposta: é o tempo que o sensor leva para reagir a uma variação de temperatura do meio que está sendo medido, entrando em equilíbrio com a nova temperatura deste.

São dois os principais sensores para medição de temperatura mais utilizados na indústria: os RTD (*Resistance Temperature Detectors*) e os termopares (COHN, p.217 e 222, 2006).

Na família dos sensores RTD, ou termoresistores, especificadamente o tipo Pt 100, assim chamado por possuir elemento de platina e resistência padronizada de $100\ \Omega$ a 0°C , é o termoresistor mais empregado em todo o mundo, devido à sua estabilidade, repetibilidade, precisão e ampla faixa de operação (COHN, 2006, p. 217).

A platina é o melhor metal para a construção de RTD, basicamente por três motivos: dentro de uma faixa, a relação resistência/temperatura é bastante linear; essa faixa é muito repetitiva; sua faixa de linearidade é a maior entre os metais (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010, p. 282).

Balbinot e Brusamarello (2010, p. 282) também afirmam que a precisão de um RTD é significativamente maior que um termopar quando utilizado dentro da faixa de -184 a $648,88^{\circ}\text{C}$.

Apesar da crescente aplicação do Pt 100 nas medições de temperatura, os termopares continuam sendo os sensores mais empregados nas aplicações industriais. Sua confiabilidade, baixo custo e padronização, aliadas à precisão, estabilidade e repetibilidade satisfatórias, na maioria dos casos, justifica esta preferência. Além disto, abrangem uma grande faixa de temperaturas (COHN, 2006, p. 222).

Os sensores termopares ou termoelétricos estão baseados principalmente em dois efeitos reversíveis: Seebeck e Thonson (BALBINO e BRUSAMARELLO, p. 294, 2010).

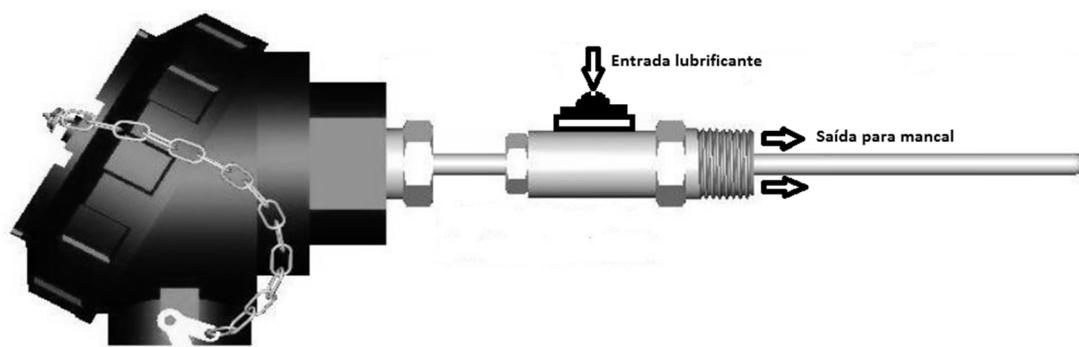
Balbinot e Brusamarello (p.294 e 295, 2010), listam os principais tipos de termopares comerciais conforme padrão ANSI (*American National Standarts Institute*):

- Termopar tipo J (ferro-constantã): versáteis e de baixo custo, não são indicados para ambientes oxidantes devido à presença de ferro. Faixa de operação de 184 a 760°C .
- Termopar tipo K (cromel-alumel): boa resistência mecânica a altas temperaturas. Faixa de operação de -184 a 1260°C .
- Termopar tipo T (cobre-constantã): resistentes a corrosão em ambientes úmidos. Faixa de operação de -184 a 400°C .
- Termopar tipo E (cromel-constantã): alta sensibilidade com resistência a ambientes corrosivos e oxidantes. Faixa de operação de 0 a 972°C .
- Termopar tipo N (nicrosil-nisil): resistente a corrosão e estável a altas temperaturas. Faixa de operação de -270 a 1300°C .
- Termopares tipo B, R e S: baseados em metais nobres, ligas de platina e ródio com composições conforme o tipo. São altamente resistentes à corrosão. Faixas de operação: B, de 38 a 1800°C ; R, de 0 a 1593°C ; S, de 0 a 1538°C .

No mercado encontram-se soluções práticas para a instalação de campo. Um bom exemplo está no uso de um invólucro para o transmissor de temperatura que contém o pino graxeiro, dispositivo este que permite a lubrificação interna do mancal.

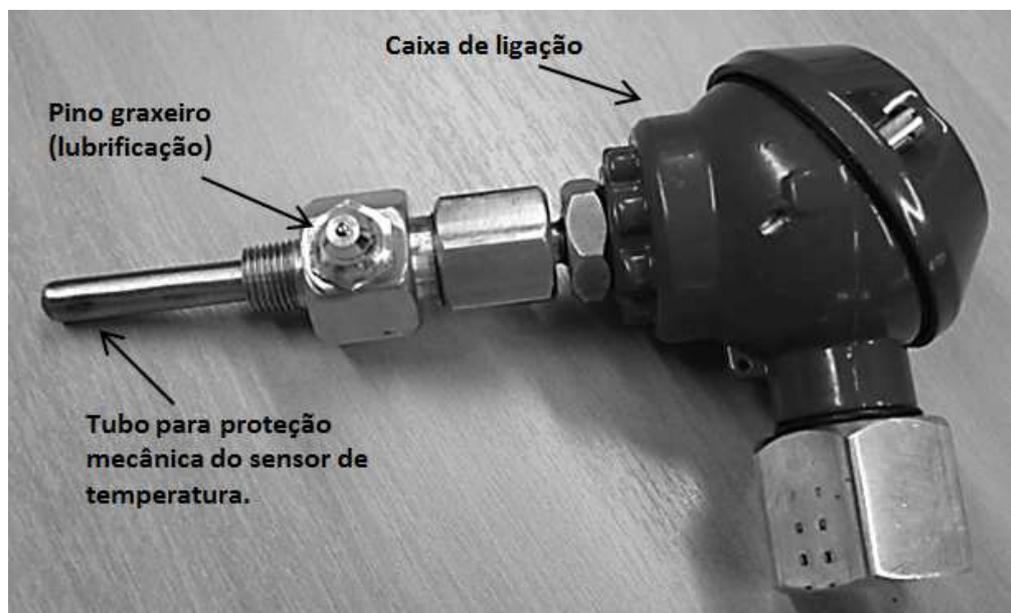
As figuras 2.6 e 2.7 ilustram esta situação. Nesta instalação aproveita-se o furo designado para lubrificação para efetuar a medição de temperatura, evitando assim custos adicionais na instalação referentes as modificações mecânicas para prover a medição. Outro ponto relevante está no fato de que, em algumas situações, um novo furo no mancal não é permitido devido a características mecânicas construtivas da máquina.

Figura 2.6. Ilustração do invólucro de um transmissor de temperatura com dispositivo para lubrificação.



Fonte: adaptado pelo autor.

Figura 2.7. Invólucro real.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

2.4.2 Medição de Vibração

Segundo Neto et al. (2012) “os parâmetros para quantificação de vibração podem ser medidos em deslocamento (unidades de distância do sistema internacional, como m, mm e nm); em velocidade (m/s, mm/s); e aceleração (m/s² ou G, considerando 1G=9,81m/s²).”

O deslocamento evidencia as energias de vibração que ocorrem em baixa frequência (até 10Hz). O deslocamento é utilizado para a identificação de desbalanceamento em partes de máquinas rotativas com amplitudes elevadas na frequência de rotação de um eixo (NETO et al., 2012).

Conforme Neto et al. (2012),

A velocidade de vibração é o parâmetro menos influenciado por ruídos de baixa ou alta frequência, sendo, por isso, o parâmetro normalmente escolhido para avaliação da severidade de vibração entre 10 e 1000 Hz dos seguintes problemas: falta de rigidez mecânica, desbalanceamento, desalinhamento, empenamento, folgas, desgastes em acoplamentos, passagem de pás e problemas elétricos (ex: escorregamento).

Sobre a aceleração da vibração, Neto et al. (2012) afirma,

A aceleração de vibração é o parâmetro que representa melhor os componentes de alta frequência, ou seja, é a rapidez que a velocidade de um corpo varia. Como a própria velocidade é uma rapidez, pode-se dizer que é a velocidade da velocidade. Sua aplicação é recomendada na monitoração de frequências entre 1000 e 10.000 Hz para identificar os seguintes problemas: engrenamento, falhas de rolamento, cavitação, problemas elétricos (ex: frequências de ranhuras).

Sobre os tipos de sensores, Crawford (p. 228, 1992) comenta,

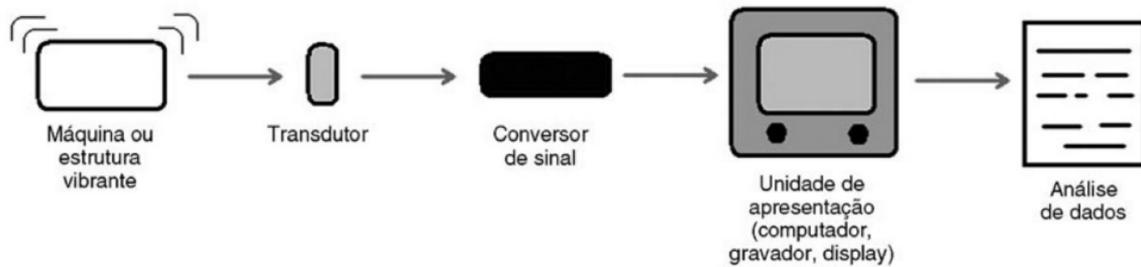
Os transdutores de deslocamento, tais como o sensor de corrente de Foucault ou o LVDT (*linear variable differential transformer*) transformam o movimento mecânico em um sinal analógico que é proporcional ao deslocamento (o espaço ocupado pelo sistema de vibração). Transdutores de velocidade sísmica produzem um sinal analógico proporcional à velocidade do movimento, enquanto um acelerômetro produz um sinal de saída que representa a variação da velocidade (aceleração) do movimento.

Para Neto et al. (2012), “os sensores de vibração são dispositivos que fazem a codificação de um sinal mecânico em um sinal elétrico representativo. Existem basicamente dois tipos de sensores: absoluto e relativo”.

O esquema básico de medição de vibração está representado na Figura 2.8. Para Balbinot e Brusamarello (2010),

O processo de medição inicia-se na identificação de um determinado fenômeno vibratório, passando pela introdução de um transdutor (que tem como função converter o sinal mecânico em sinal elétrico), a amplificação do sinal e a apresentação desse sinal, que pode ser armazenado ou não, possibilitando-se assim a posterior análise. Os principais sensores para medição de vibrações são: sensores de deslocamentos; sensores de velocidade; sensores de aceleração (acelerômetros); sensores de fase e de frequência.

Figura 2.8. Esquema Básico de Medição de Vibração



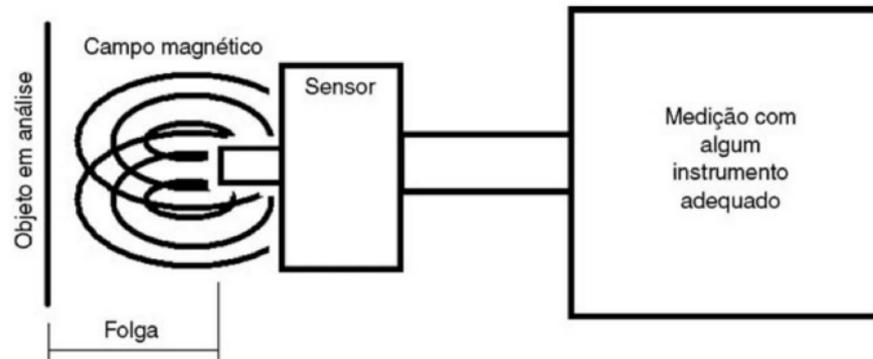
Fonte: Balbinot e Brusamarello (v.2, 2010, p.224).

Segundo Balbinot e Brusamarello (2010, v2, p. 224 e 225), para a escolha do sensor devem-se destacar os seguintes aspectos:

- Faixa de frequência e a amplitude: vibrômetros são indicados para baixas frequências, acelerômetros indicados para altas frequências e sensores de velocidade para aplicações genéricas, já que apresentam um desempenho razoável em altas e baixas frequências.
- Tamanho e a massa da máquina ou estrutura: o tamanho e a massa do equipamento ou estrutura a ser medida são fatores importantes, porque, uma vez que a vibração depende da massa do sistema.
- Condições de operação: equipamentos que operam em condições de funcionamento adversas, tais como em ambientes úmidos, radioativos, corrosivos ou abrasivos, tendem a limitar o uso da grande maioria dos sensores.
- Tipo de análise dos dados: a maneira como os dados obtidos são analisados é um fator importante na escolha do sensor, o qual muitas vezes, é determinado pelo modo de apresentar os dados para a análise pretendida.

Os sensores de proximidade, indutivos ou capacitivos, (Figura 2.9) geram um campo magnético dependente das propriedades magnéticas da peça a ser medida. A variação do campo magnético é proporcional à saída em tensão elétrica. A variação do campo magnético é proporcional ao deslocamento existente entre o sensor e a peça que se movimenta, e por isso é um transdutor de deslocamento. Entre as vantagens operacionais, pode-se citar que o sensor não possui partes móveis e trabalha com corrente contínua. A principal desvantagem é que o sensor pode ser afetado pelas propriedades magnéticas do eixo. Normalmente, esse tipo de sensor é utilizado no monitoramento permanente, sendo instalado em máquinas que apresentam um deslocamento máximo de 2 mm e com frequências variando até 200 Hz (BALBINOT; BRUSSAMARELLO, 2010, p. 225).

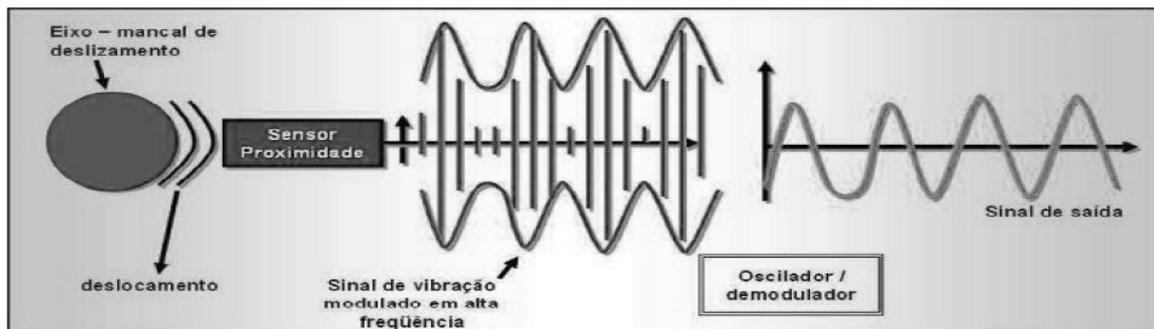
Figura 2.9. Esquema de um Sensor de Proximidade.



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2010, v.2, p.225).

Segundo Neto et al. (2012) “o sensor relativo, chamado de probe de deslocamento sem contato, é o sensor de maior aceitação para monitoração contínua de máquinas rotativas. O sistema consiste de um probe, um cabo de extensão e um oscilador-demulador conhecido no Brasil como *proximeter*. Consiste em bobina montada em plástico ou cerâmica não condutor, e fica alojado num corpo roscado”. A Figura 2.10 exemplifica.

Figura 2.10. Representação do Sinal do Sensor de Vibração Relativo

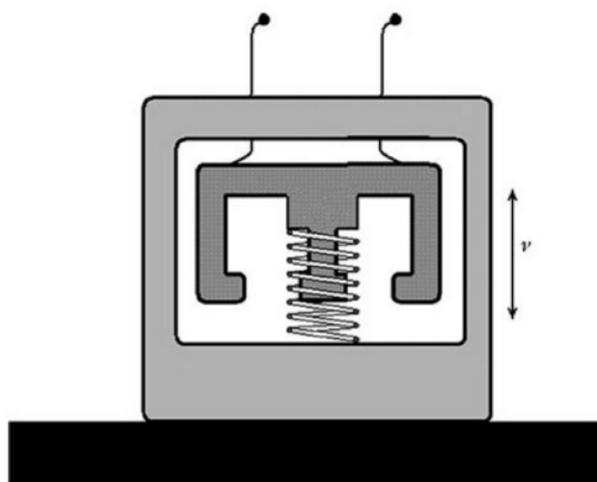


Fonte: Neto et al. (2012).

Sobre os transdutores eletrodinâmicos de velocidade, esboçados na Figura 2.11, Balbinot e Brusamarello (p. 226, 2010) afirmam que,

Normalmente são constituídos por uma bobina, imersa em um campo magnético e fixada por suportes flexíveis. Posicionado sobre uma superfície vibratória, o aparelho gera uma tensão elétrica proporcional à velocidade de vibração para determinada faixa de frequências. As principais vantagens desse tipo de transdutor são: baixo custo, baixa manutenção, robustez, baixa impedância (gera pouco ruído) e medição da velocidade absoluta. Entretanto, esse tipo de sensor tem como desvantagem o fato de ser não linear a baixas frequências. Sendo assim, é indicado para medição de velocidades a partir de uma frequência de cerca de 10 Hz. Além disso, possui muitas partes móveis, tamanho relativamente grande e é sensível à orientação e a campos magnéticos.

Figura 2.11. Esboço Transdutor Eletrodinâmico de Velocidade.



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2010, v.2, p.226).

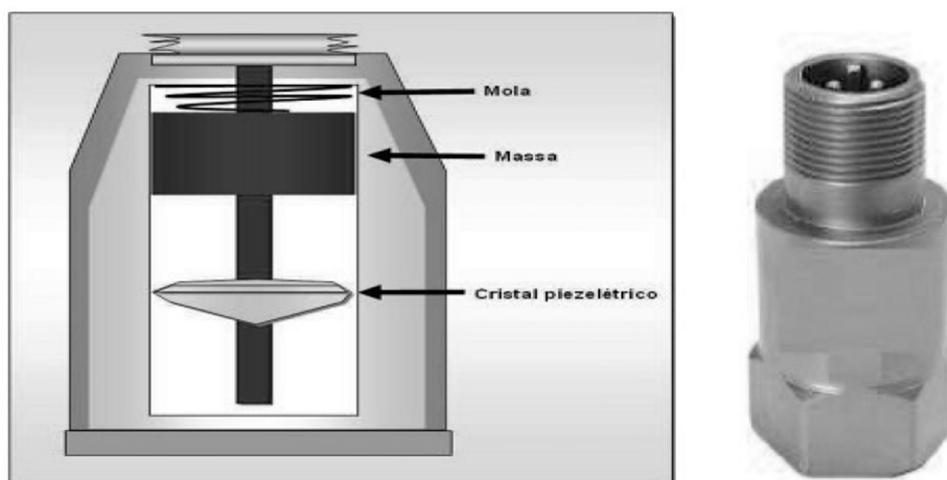
Os sensores absolutos utilizados na indústria, chamados também de acelerômetros piezoelétricos são aqueles que utilizam materiais com propriedades piezoelétricas que, por sua vez, geram um sinal elétrico quando submetidos a uma força.

De maneira resumida, um acelerômetro piezoelétrico possui uma pequena massa que é pressionada contra um cristal piezoelétrico por meio de uma mola. Quando a base vibra, a carga exercida pela massa sobre o cristal varia com a aceleração e, portanto, a tensão elétrica de saída gerada pelo cristal é proporcional à aceleração (BALBINOT; BRUSSAMARELLO, 2010, v2, p. 226 e 227).

Segundo Neto et al. (2012), “em muitas situações de monitoração tornam-se necessárias medições de frequência bem acima de 1.000 HZ, combinadas com amplitudes de vibração extremamente elevadas, o acelerômetro piezoelétrico é a única escolha”.

Na Figura 2.12 ilustramos o transdutor piezoelétrico.

Figura 2.12. Representação do Acelerômetro Piezoelétrico.



Fonte: NETO et al. (2012).

Os acelerômetros piezoelétricos são compactos, resistentes, apresentam alta sensibilidade e podem ser utilizados a altas faixas de frequência. São amplamente utilizados em medições de vibrações industriais (BALBINOT; BRUSSAMARELLO, 2010, v2, p. 227).

Uma das vantagens da medição da aceleração é que a velocidade e o deslocamento podem ser obtidos por integração, o que é computacionalmente fácil. Devido à sua construção, a frequência natural do instrumento deve ser muito maior em comparação com a frequência que deve ser medida. Dessa maneira, os acelerômetros devem possuir massa pequena e grande rigidez, o que possibilita a construção de instrumentos compactos, resistentes e de alta sensibilidade. Na prática, os acelerômetros piezoelétricos são os melhores instrumentos para se medirem vibrações, tendo como desvantagem o custo, quando comparado com outros instrumentos mais simples. As principais vantagens desses acelerômetros são o fato de que não possuem partes móveis, são compactos e pequenos, possuem uma grande estabilidade e podem ser montados em qualquer orientação, além de possuírem uma sensibilidade transversal da ordem de 3%. Como desvantagem desse tipo de dispositivo pode ser citada a sua alta impedância, que gera ruído elétrico e exige cabos blindados. Em consequência, para acelerômetros pequenos os cabos são muito delicados. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010, v. 2, p.227).

2.4.3 Análise de Vibração em Equipamentos

As máquinas são elementos mecânicos complexos, articulados. As peças que sofrem excitação podem oscilar e as oscilações transmitem-se pelas articulações aos demais elementos acoplados. O resultado é um complexo de frequências que caracteriza o sistema (MARÇAL; SUSIN, 2005).

De acordo com Menna (2007), todo equipamento rotativo apresenta determinados níveis de ruído e vibração quando em funcionamento. Uma parcela destas vibrações é ocasionada por defeitos mecânicos. Menna (2007) enfatiza ainda que um criterioso monitoramento das vibrações de um equipamento rotativo poderá indicar as principais causas de desvios no comportamento dinâmico, constituindo a base das técnicas de manutenção preditiva.

Condições como instabilidade, desbalanceamento, desalinhamentos, mudanças no ajuste, desgaste e até mesmo fadiga em seus componentes, geram vibrações específicas e características (MARÇAL; SUSIN, 2005).

Na análise de vibração de equipamentos rotativos a visualização do espectro de frequências é de grande valia, uma vez que possibilita associar as componentes de frequência e suas respectivas amplitudes aos componentes mecânicos do equipamento, criando subsídio para o diagnóstico das causas da vibração (MENNA, 2007).

Sobre a análise espectral, conforme Marçal e Susin (2005),

O método de análise de frequências, baseado no teorema de Fourier, estabelece que qualquer função periódica possa ser decomposta por uma série de ondas sinusoidais puras com frequências distintas e múltiplas harmônicas da frequência fundamental. Estas componentes constituem o espectro de frequência de vibração. Ao se utilizar transdutores sensores (acelerômetros) para a aquisição de tal parâmetro e posterior análise, o espectro de vibração de um sistema pode ser levantado. Observando-se a amplitude dos picos em determinadas frequências e relacionando-se as amplitudes observadas com as da frequência fundamental do sistema (rotativo), pode-se chegar a um diagnóstico do estado de funcionamento ou alterabilidade em curso do sistema.

Menna (2007) complementa que uma vez que a relação entre deslocamento, velocidade e aceleração, para uma composição de senoides, é similar a de uma senoide simples, pode-se escrever:

$$\begin{aligned}x(t) &= x_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \\ \frac{dx(t)}{dt} &= \omega \cdot x_0 \cdot \text{cos}(\omega t) \\ \frac{d^2x(t)}{dt^2} &= -\omega^2 \cdot x_0 \cdot \text{sen}(\omega t)\end{aligned}\tag{2.7}$$

Onde: x_0 é a amplitude do deslocamento.

Estes parâmetros têm diferentes utilidades na análise dinâmica de equipamentos rotativos. A medida de deslocamento é utilizada no monitoramento do excesso de desbalanceamento, de empenamentos do eixo e da progressão de folgas mecânicas. A medida de velocidade é o indicador do nível de energia envolvido no movimento, sendo ela a medida utilizada na identificação da maioria das falhas que provocam vibração. Já a aceleração da vibração é aplicada na identificação de problemas que se manifestam em altas frequências como, por exemplo, as falhas em pistas de rolamentos (MENNA, 2007).

A natureza da falha, ou defeito de um equipamento dinâmico, versus o parâmetro de vibração pode ser resumido conforme apresentado na tabela 2.3.

Tabela 2.3. Parâmetros de Vibração em Manutenção Preditiva

Parâmetro a ser medido	Natureza da falha ou defeito a ser detectado
Amplitude do deslocamento de vibração.	Desbalanceamento, falta de alinhamento, folgas, má fixação, mal acoplamento, correias frouxas, eixo torto, ...
Amplitude da velocidade da vibração.	Mancais ou rolamentos defeituosos.
Amplitude da aceleração da vibração.	Estados dos rolamentos, fricção excessiva entre componentes, falta de lubrificação nos mancais.
Frequência de vibração	Dados complementares para monitoramento de qualquer característica de vibração essencial na determinação de qualquer problema detectado.

Fonte: adaptado pelo autor (YA' CUBSOHN apud MARÇAL, 2005).

2.4.4 Sistemas de Monitoramento e Proteção

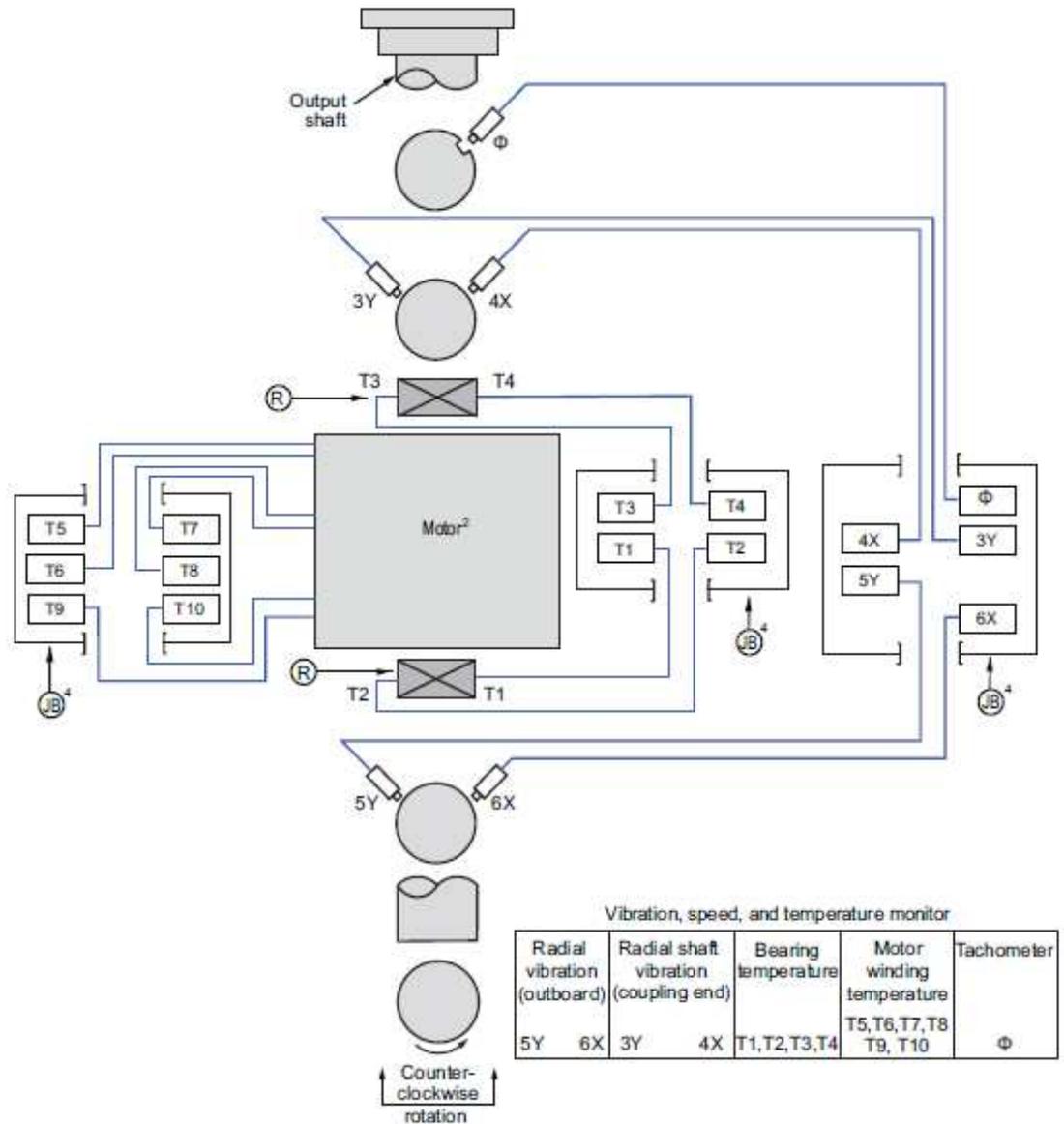
Uma das principais associações normativas do mundo, a API (*American Petroleum Institute*), propõe uma norma como base para sistemas de monitoramento e proteção de equipamentos - a API Standard 670, intitulada *Machinery Protection Systems (MPS)*, em sua quinta edição de Novembro de 2014.

A norma apresenta os requisitos mínimos para um sistema de proteção de máquinas (MPS – *Machine Protection System*), como medições de vibrações radiais, posições axiais de eixo, rotação de eixo, quebra de haste/pistão, excesso de velocidade, temperaturas críticas de

mancais e temperaturas críticas de enrolamentos de motores. Seu escopo inclui os requisitos de hardware (transdutores e sistemas de monitoramento), instalação, documentação e testes.

A figura 2.13 exemplifica a instalação proposta pela API 670 para um motor elétrico com mancais de deslizamento. Adicionalmente as proteções de mancais, este exemplo adiciona proteções para temperaturas do enrolamento do motor (T5 a T10).

Figura 2.13. Arranjo Típico de um MPS para Motor



Fonte: adaptado pelo autor (API 670).

A API 670 também esclarece a diferença entre um MPS e um CMS (*Condition Monitoring System*). Porém reitera que a implementação de um CMS não deve de forma alguma comprometer ou interferir no MPS, sendo o MPS o sistema principal.

A tabela 2.4 resume as características entre estes dois sistemas.

Tabela 2.4. Diferenças entre MPS e CMS

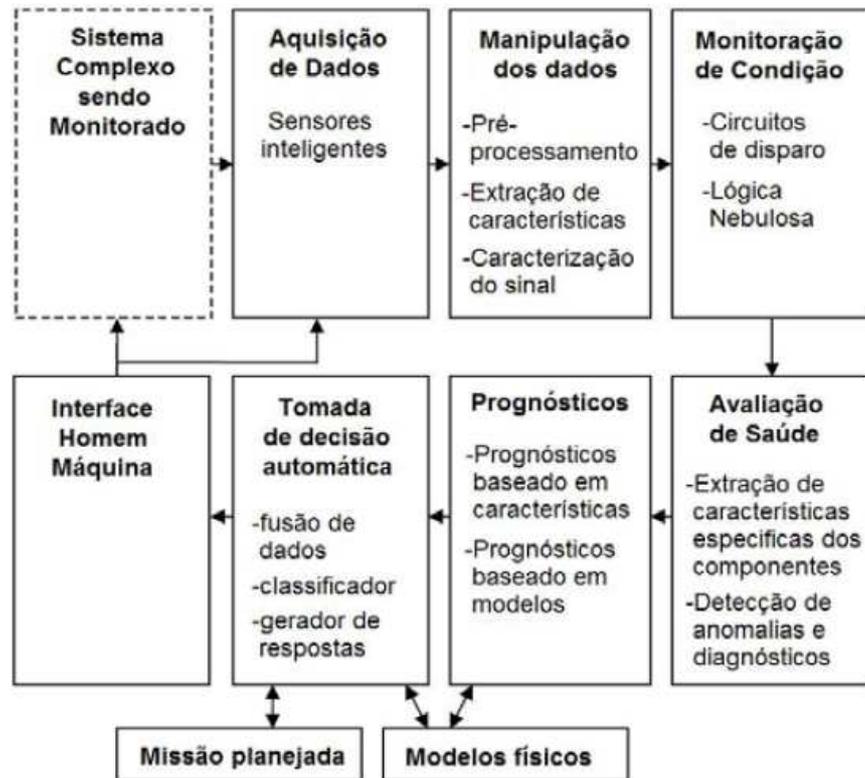
	MPS (Machine Protection System)	CMS (Condition Monitoring System)
Proposta	<p>Detecta, mede, monitora e exhibe os parâmetros da máquina indicativos da sua condição de operação. Quando um parâmetro excede os limites predefinidos, indicando uma condição anormal, o sistema comunicará o evento aos operadores e / ou a um sistema de desligamento.</p>	<p>As medidas e as tendências especificam os parâmetros da máquina e do processo. Fornece ferramentas alarmantes, de apresentação e de análise para a detecção e identificação de falhas em desenvolvimento. Permite o acompanhamento contínuo de uma falha detectada para determinar sua propagação e gravidade. Também pode ser usado para gerenciar as condições de operação da máquina para reduzir o estresse de uma falha em desenvolvimento. Pode, em alguns casos, reduzir a taxa em que uma falha se propaga para minimizar danos adicionais, assim, prolongar o tempo antes dos reparos necessários.</p>
Objetivo	<p>O objetivo deste sistema é evitar acidentes pessoais e prejuízos ao meio ambiente, reduzindo de forma significativa danos ao equipamento.</p>	<p>Maximizar a disponibilidade, obtendo uma visão das condições de operação do equipamento monitorado, podendo prever melhor quando o equipamento precisará ser reparado ou substituído e, finalmente, otimizando os horários de reparo e turno.</p>

Fonte: adaptado pelo autor (API 670).

Bengtsson (apud SIMEÓN, 2008) descreve que um sistema de manutenção baseada em condição pode ser definido como: “Um sistema que usa a manutenção baseada em condição para determinar e programar ações de manutenção preditiva automática ou em interação com outros sistemas ou operadores”.

A Figura 2.14 ilustra as camadas de um sistema de manutenção baseado em condição.

Figura 2.14. Camadas de um Sistema de Manutenção Baseado em Condição



Fonte: adaptado pelo autor (LEBOLD et al apud SIMEÓN, 2008).

2.5 Trabalhos Relacionados

Não foram encontrados estudos com relação direta ao objetivo fim deste trabalho, de determinar a ordem prioritizada para investimentos em monitoramento contínuo de equipamentos dinâmicos em plantas industriais petroquímicas. No entanto, no campo da engenharia há diversos trabalhos na área de alocação de recursos e priorização.

Magalhães (2016), em sua dissertação apresentou uma aplicação de um modelo computacional baseado em análise multicritério para alocação de recursos. Seu estudo teve como foco a distribuição de recursos públicos para as 211 comunidades ribeirinhas da cidade de Coari-AM.

O Autor utilizou o método TOPSIS (*Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution*). Trata-se de um método de análise multicritério de apoio a decisão no qual os únicos parâmetros subjetivos são os pesos associados a cada critério imposto na comparação de alternativas. Os critérios utilizados foram:

- Total de famílias. Objetivo: maximizar.
- Total de pessoas. Objetivo: maximizar.
- Distância da cidade: Objetivo: maximizar.
- Total de famílias atingidas na última enchente. Objetivo: maximizar.
- Total do último recurso aplicado. Objetivo: minimizar.
- Dias transcorridos desde a aplicação do último recurso. Objetivo: maximizar.

Para atribuir os pesos foram realizadas entrevistas em reuniões com os principais responsáveis pelo processo de decisão, no caso os gestores da Secretaria de Infraestrutura Rural do município e equipe técnica.

Em sua conclusão Magalhães (2016) reitera que o método se mostrou compreensível aos decisores, contribuindo assim pela receptividade e utilização de seu trabalho.

No trabalho de Chin et al. (1991) é demonstrado o uso da técnica de decisão multicritério *Q-Analysis* (através da ferramenta MCQAI) e Electre I para solucionar um problema de seleção de projetos de automação dentro de uma empresa de montagem de circuitos eletrônicos impressos.

Os projetos concentraram-se em 12 alternativas de processos a serem automatizados, sendo que os critérios utilizados foram:

- Taxa de retorno interno. Objetivo: maximizar.
- Risco do investimento. Objetivo: minimizar.
- Competitividade. Objetivo: maximizar.
- Melhoria da qualidade. Objetivo: maximizar.
- Maior flexibilidade industrial. Objetivo: maximizar.
- Possibilidade de aplicação em outras áreas. Objetivo: maximizar.
- Curva de aprendizado em meses. Objetivo: minimizar.
- Comprometimento gerencial. Objetivo: maximizar.

Nestes critérios somente a taxa de retorno interno e a curva de aprendizado são numéricos. Nos demais critérios utilizou-se de 5 escalas, sendo: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. Estas são inferidas pelas preferências dos decisores.

Smith e Orsoni (2007) apresentam um método de decisão que dá suporte aos projetos de reengenharia em plantas industriais. Aplicaram o método multicritério através de modelos multi-atributos para a seleção de fontes de energia em caso de falha no fornecimento de gás natural, assunto importante para a indústria Britânica na época.

A perfeita alternativa a ser escolhida deveria atender a dois requisitos, maior viabilidade econômica e que oferecesse menor risco de interrupção no fornecimento de energia. Cenário improvável de acontecer segundo o autor, um cenário típico seria encontrar um ponto ótimo entre estas duas requisições.

Para o benefício financeiro, de viabilidade econômica, o autor definiu critérios em linha com o conceito de custo baseado na análise do ciclo de vida do empreendimento, LCCA (*Life Cycle Costing Analysis*), todos com a função objetivo de minimização. São eles:

- Custos de implementação.
- Custos do suprimento do combustível.
- Custos operacionais do empreendimento.
- Custos de Manutenção.
- Custos de descomissionamento e desativação do empreendimento.
- Risco de interrupção de suprimento.

Almeida et al. (2015) explorou um problema de decisão multicritério por critério único de síntese para compra de um aparelho celular, já que trata-se de um problema compensatório. O enfoque foi dado na compra de tecnologia pelo usuário final, segundo o autor característica difícil de encontrar na literatura atual.

Os critérios definidos foram:

- Duração da bateria em repouso. Objetivo: maximizar.
- Sistema Operacional. Objetivo: maximizar.
- Espessura. Objetivo: minimizar.
- Memória interna. Objetivo: maximizar.
- Preço. Objetivo: minimizar.

As alternativas estão restritas a cinco modelos de celulares: Iphone 5S, Samsung Galaxy S5, Iphone 6 plus, Motorola Moto Maxx e Iphone 6.

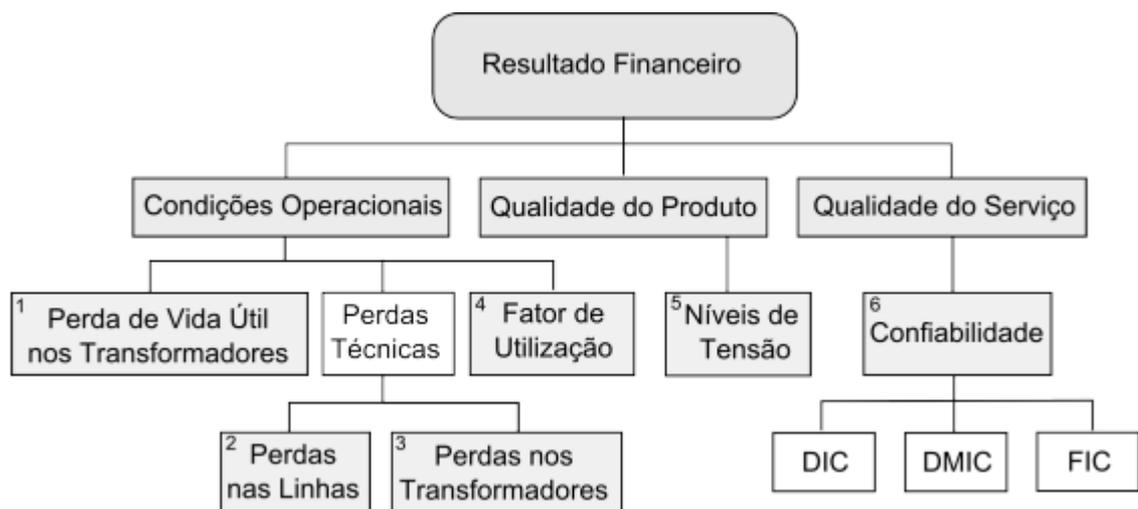
Já Busatto (2015), em sua dissertação de mestrado, propõe um método multicritério para priorização de investimentos no planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Conforme o autor enfatiza, a análise técnica e econômica de investimentos em redes de distribuição é dificultada pelo elevado número de variáveis envolvidas, já que as redes estão localizadas em áreas urbanas e rurais, tendo diferentes topologias e são compostas por elevado número de equipamentos.

O método multicritério aplicado foi o AHP (*Analytical Hierarchical Process*), sendo um método útil quando equipes tratam de problemas complexos, que necessitam de percepção humana e cuja resolução terá repercussão de longo-prazo.

Os critérios definidos por Busatto (2015) estão representados na diagrama hierárquico para o modelo de decisão conforme figura 2.15.

Figura 2.15. Representação Hierárquica para um Modelo de Decisão



Fonte. Busatto (2015)

Já Thormann (2013) realizou um estudo com o objetivo de responder como as empresas utilizam a análise multicriterial na avaliação de projetos de investimentos industriais no estado do Rio Grande do Sul. O autor realizou entrevistas em diversos meios industriais, inclusive indústria petroquímica.

Thorman (2013) destaca que as empresas utilizam critérios próprios para hierarquização dos fatores mais relevantes para definição de investimentos, e que a maior parte ainda não faz uso dos métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD).

É sugerido pelo autor, como trabalhos futuros, um aprofundamento do estudo das contribuições da análise multicriterial na avaliação de investimentos industriais através de pesquisas quantitativas, considerando um universo maior de empresas. Sugere ainda uma comparação de processos de tomada de decisão em investimentos industriais com e sem os métodos AMD.

A tabela 2.5 apresenta um resumo dos trabalhos relacionados analisados. Vários pontos serão utilizados neste trabalho.

Tabela 2.5. Resumo dos Trabalhos Analisados

Referência	Título	Abordagem e Método
Magalhães (2016) (Dissertação Mestrado Unisinos)	Um Modelo Computacional Baseado em Análise de Decisão Multicritério para Priorização na Alocação de Recursos	Aplicação. Priorização alocação de recursos. Método Topsis.
Chin et al. (1991) (Artigo publicação Elsevier)	Seleção de Projetos de Automação Utilizando Método Multicritério Q-Analysis.	Aplicação. Priorização de projetos. Métodos Q-Analysis e Electre I.
Smith e Orsoni (2007) (Artigo publicação IEEE)	Decisão Multicritério como Suporte para Reengenharia Industrial.	Aplicação. Avaliação de alternativas. Método Multi-atributo.
Almeida et al. (2015) (Artigo publicação XXXV Encontro Nacional de Eng ^a de Produção)	Decisão Multicritério por Critério Único de Síntese: Aplicação a Uma Compra de Tecnologia	Aplicação. Avaliação de alternativas. Método por Critério Único de Síntese
Busatto (2015) (Dissertação Mestrado UFRGS)	Metodologia Multicritério para Priorização de Investimentos na Priorização no Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	Aplicação. Priorização de projetos. Método AHP.
Thormann (2013) (Dissertação Mestrado Unisinos)	Análise Multicriterial na Avaliação de Projetos de Investimentos Industriais. Estudo de Múltiplos Casos no Estado do RS	Estudo. Pesquisa através de entrevistas com decisores analisadas pela técnica de análise de conteúdo.

3 METODOLOGIA

A metodologia proposta está basicamente dividida em três etapas. A primeira trata do método e modelo para auxílio na tomada de decisão para a priorização de investimentos em monitoramento e proteção contínua dos equipamentos. Este modelo está proposto com base em análise multicritério e análise de risco. Na segunda etapa estão apresentados os critérios que compõem o modelo, bem como a importância de cada critério e suas especificidades. A terceira etapa apresenta o método utilizado para valoração das constantes de escalas que serão aplicadas aos critérios.

No capítulo 4, Testes e Resultados, este método é aplicado em uma planta petroquímica real.

3.1 Modelo Proposto: Análise Multicritério e Análise de Risco

Viabilizar qualquer melhoria industrial depende de recursos como materiais, serviços e tempo, logo a priorização torna-se fundamental, não somente por estar fazendo na ordem correta, mas também se estamos investindo os recursos da forma adequada – podemos ter equipamentos em que o monitoramento não seja tão importante como em outros, daí a necessidade de avaliar sobre diversos critérios, uma vez que os equipamentos como motores, bombas, compressores, agitadores e extrusoras possuem características e funções diferentes.

As características estão relacionadas ao equipamento em si, a sua tecnologia e construção. Já a função está relacionada ao processo onde o mesmo está inserido. Em uma avaliação de importância deve-se avaliar tanto as características como a função, mas é na função que se tem um grau maior de dificuldade na avaliação de importância.

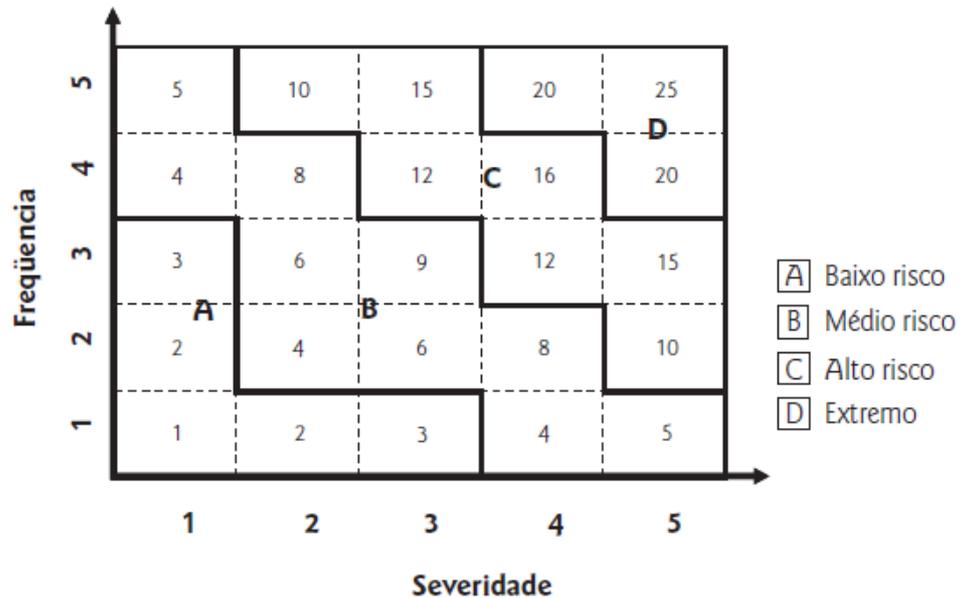
Esta dificuldade pode ser exemplificada com a seguinte situação: a comparação entre uma pequena bomba de água em relação a um grande compressor alternativo de gás combustível, ambos instalados em uma planta petroquímica. À primeira vista o compressor, por ser uma máquina maior e por inventariar um produto perigoso, é mais importante. No entanto, a pequena bomba pode estar em função de bombeamento de água para refrigeração de um reator, onde o controle da temperatura é importantíssimo para o processo químico. Outro ponto, a pequena bomba pode estar trabalhando com os esforços maiores do que o grande compressor. Enfim, notadamente o uso da análise multicritério funcionará bem nestes casos, onde a consequência da perda de função do equipamento e a possibilidade disto acontecer estão ligadas a conhecimentos multidisciplinares, ou seja, envolvendo profissionais de disciplinas diferentes. No caso da indústria petroquímica, estes seriam os profissionais de projeto, manutenção, processo e produção, com formações acadêmicas ou técnicas em mecânica, elétrica, automação, instrumentação e química.

Sobre a análise de risco, segundo Carvalho (2007), “o risco é entendido como uma combinação da probabilidade e das consequências da ocorrência de um determinado acontecimento perigoso”.

Esta combinação pode ser mensurada através de uma matriz, em que o nível de risco é definido pela composição das variáveis ligadas a probabilidade e a severidade das perdas inerentes ao processo avaliado. A matriz de riscos é uma ferramenta que pode ser empregada na análise de riscos de processos de várias naturezas (PAULO et al., 2007).

Um exemplo desta matriz está no Gráfico 3.1.

Gráfico 3.1. Exemplo de Matriz de Riscos



Fonte: PAULO et al. (2007)

O mapa de risco, que identifica se o risco é baixo, médio, alto ou extremo, deve ser adaptado para cada situação, evidenciado assim o risco tolerável estratégico. A seguinte situação exemplifica: suponha que em uma determinada instituição ou empresa não se admite a possibilidade de eventos com alta severidade, mesmo tendo probabilidade baixa. Neste caso a posição com Severidade igual a 5 e Frequência igual a 1 pode ser considerada como risco extremo, apesar do Gráfico 3.1 exemplificar como risco médio.

Por fim, sugere-se neste estudo que o profissional de manutenção lidere esta avaliação, a fim de determinar também se o monitoramento contínuo permitirá, através da ampliação da política de manutenção preditiva, a exclusão ou minimização dos planos preventivos base tempo para cada equipamento.

3.1.1 Definição do Modelo de Análise

O modelo combina a análise de riscos e a análise multicritério. A análise de riscos no tocante a avaliação combinada da probabilidade, ligada à tecnologia ou projeto, e da severidade das consequências, estas inerente ao processo avaliado. A avaliação multicriterial contribui na avaliação do *score*, tanto na dimensão probabilidade quanto na dimensão severidade.

Entre os tipos de análise MMAD apresentados no capítulo 2, item 2.1, neste trabalho é utilizado um dos métodos do tipo critério único de síntese.

Exluímos os métodos de sobreclassificação devido ao principal motivo de, em geral, não oferecerem um *score* entre as alternativas e não apresentarem avaliações compensatórias.

Conforme Almeida (2013, p. 110),

Em geral, os métodos de sobreclassificação não realizam uma agregação analítica para estabelecer um *score* para cada alternativa, e, assim, facilitar a completa comparação entre essas alternativas, como no caso dos métodos de agregação através de critério único de síntese.

Para facilitar a interpretação das dimensões e dos critérios, propõem-se dois índices agregadores - um ligado a tecnologia (Z_t) e outro representando a severidade (Z_s). Reforçando que em uma análise de risco a tecnologia está relacionada com a probabilidade. Já a severidade está relacionada com as consequências que, no caso da petroquímica, estão associadas a perdas em segurança, meio ambiente, custos ou continuidade operacional.

Ambos os índices serão determinados pela técnica de soma ponderada, também chamada de agregação aditivo determinístico ou WSM (*Weighted Sum Model*), conforme já relatado no capítulo 2. Trata-se de uma técnica de fácil compreensão e lógica para agregação multicriterial das avaliações.

Para a avaliação da tecnologia, tem-se:

$$Z_t = \frac{(c_1.p_1+c_2.p_2+\dots+c_n.p_n)}{(p_1+p_2+\dots+p_n)} \quad (3.1)$$

Na avaliação da severidade, tem-se:

$$Z_s = \frac{(c_1.p_1+c_2.p_2+\dots+c_n.p_n)}{(p_1+p_2+\dots+p_n)} \quad (3.2)$$

Onde “c” é a nota para cada critério e “P” o peso, ou constante de escala.

As equações acima podem ser descritas conforme demonstrado no capítulo 2, equação 2.3, onde se consideram os pesos normalizados.

As avaliações, ou notas, dos critérios serão realizadas na escala Likert (1932). Trata-se de uma escala bipolar em cinco níveis (1, 2, 3, 4, 5), medindo desempenho superior ou inferior em relação a um valor ou posição central ou intermediária. Esta escala também trará o aspecto de cardinalidade, para isso as notas serão delimitadas em grades de avaliação numéricas dentro de intervalos de valores definidos (ALMEIDA, 2013, p. 35 e 36).

Uma escala de quatro níveis, também pode ser utilizada, pois nem sempre apresenta o valor intermediário, forçando o avaliador a se posicionar acima ou abaixo da posição central (ALMEIDA, 2013, p.37).

3.2 Proposta dos Critérios

A etapa de escolha e identificação de critérios está inserida na fase preliminar de um modelo de decisão, conforme o item 2.1. Portanto sua importância é de alta relevância na qualidade das demais etapas e, conseqüentemente, da análise como um todo.

Nos próximos tópicos os critérios serão apresentados, bem como seu objetivo na direção de preferência, se maximizado ou minimizado.

Para cada critério haverá uma sugestão de grade de valoração, neste caso a mesma está sugerida para o contexto do polo petroquímico do Rio Grande do Sul. Para outros casos os valores da escala podem não ser adequados, portanto sugere-se reavaliar esta valoração para outras aplicações.

3.2.1 Fluxo de Produto Interrompido por Falha Equipamento (F_p)

Critério que deve ser maximizado para a decisão de investimento em monitoramento contínuo - quanto maior o fluxo de produto interrompido por falha do equipamento, maior a importância de aumento de disponibilidade e segurança no sistema.

Há outro aspecto que ressalta a importância desta variável – a interferência da perda do fluxo em sistemas a montante ou jusante do equipamento. Como esta aplicação é para uma planta de processo contínuo, no caso da petroquímica, pode-se observar a planta como uma rede, onde os equipamentos e sistemas estão interligados. Em grandes complexos, principalmente com primeira e segunda geração¹ integradas, todas as plantas estão interligadas pelo circuito de matérias primas (eteno, propeno, etc.) e utilidades, como água, vapor e nitrogênio.

Na teoria de grafos a planta se assemelha a um dígrafo (grafo orientado), onde as arestas possuem direção associada, no caso o fluxo de produto. E um equipamento, onde sua falha interrompe a rede, pode ser chamado de ponto de articulação, ou vértice de corte - sua remoção desliga o grafo.

Este critério fará parte da avaliação do índice de severidade (Z_s), por estar na dimensão de consequências dentro de uma análise de risco. A tabela 3.1 sintetiza a avaliação de valor. Esta proposta já contempla um cenário de valor para a planta onde aplicaremos o método, com mais detalhes no capítulo 4. A valoração da grade pode e deve ser alterada para contextos de outras plantas.

Tabela 3.1: Tabela de valores para Fluxo de Produto Interrompido (F_p)

Fluxo Prod. Interrompido (F_p):	1	Abaixo de 5 ton/h
	2	Entre 5 e 20 ton/h
	3	Entre 20 e 30 ton/h
	4	Entre 30 e 40 ton/h
	5	Acima de 40 ton/h

Fonte: elaborado pelo autor.

¹ Indústrias de Primeira Geração utilizam as matérias-primas (nafta, gás natural, GLP, gás de xisto, etc.) para gerar produtos ou matérias primas básicas (eteno, propeno, butadieno, benzeno, etc.). As indústrias de Segunda Geração são aquelas que, a partir das matérias-primas básicas, produzem intermediários (polietileno, polipropileno, poliestireno, butadienos, etc.) que serão matérias primas para outras indústrias.

3.2.2 Impacto na Produção por Falha do Equipamento (I_p)

Este critério também deve ser maximizado para a decisão de investimento em monitoramento contínuo – quanto maior a indisponibilidade com consequência em perdas de produção, maior a necessidade de monitoramento contínuo.

Os valores da grade de valor estão alinhados com procedimento interno de uma grande empresa petroquímica, que contempla diversas plantas de primeira e segunda geração no complexo industrial no Polo Petroquímico do Rio Grande do Sul. Estes detalhes serão apresentados no capítulo referente a testes e resultados.

Este procedimento interno trata da avaliação de criticidade para todos os equipamentos de uma planta petroquímica, como vasos, tanques, bombas, compressores, instrumentos, painéis elétricos, etc.

Portanto, pode-se dizer que os valores propostos estão alinhados para uma avaliação dentro das plantas desta grande empresa, em seus respectivos complexos industriais.

Este critério fará parte da avaliação do índice de severidade (Z_s), por estar na dimensão de consequências dentro de uma análise de risco. A tabela 3.2 exhibe a classificação de valor.

Tabela 3.2: Tabela de valores para Impacto em Produção (I_p)

Impacto Prod. (I_p):	1	Nenhum impacto
	2	Impactos até US\$ 200M
	3	Impactos até US\$ 500M
	4	Impactos até US\$ 1 MM
	5	Impactos > US\$ 1 MM

Fonte: elaborado pelo autor, onde M=mil e MM=milhão.

3.2.3 Riscos à Segurança Industrial e Meio Ambiente por Perda de Inventário (R_i)

Trata-se de um critério que deve ser maximizado na decisão de investimento em monitoramento contínuo – quanto maior o risco de vazamento de produto perigoso, maior a importância do monitoramento contínuo.

O critério observa a periculosidade do inventário, não somente se a substância é inflamável ou combustível, mas também se os produtos têm propriedades ligadas à toxicidade e/ou reatividade. Outro fator a ser ponderado está na pressão do sistema, quanto maior a pressão maior o perigo, maior será a área afetada pelo vazamento.

Importante atentar que somente a situação em que uma falha em manuais possa evoluir para a perda de inventário perigoso seja valorada com valor superior a “1” (ver tabela 3.3).

Com relação aos líquidos inflamáveis e combustíveis, a NFPA² 30 define e classifica os mesmos conforme abaixo:

- a) Líquidos inflamáveis: qualquer líquido com ponto de fulgor³ abaixo de 37,8°C. Com a seguinte subclassificação:

² NFPA: *National Fire Protection Association*. NFPA 30: *Flammable and Combustible Liquids Code*.

³ Ponto de fulgor (*Flash Point*): a temperatura mínima em que um combustível libera vapor em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável no ar. (NFPA 30, 2015)

- a. Classe IA: qualquer líquido com ponto de fulgor abaixo de 22,8°C e ponto de ebulição⁴ abaixo de 37,8°C.
 - b. Classe IB: qualquer líquido com ponto de fulgor abaixo de 22,8°C e ponto de ebulição igual ou maior a 37,8°C.
 - c. Classe IC: qualquer líquido com ponto de fulgor entre 22,8°C e 37,8°C.
- b) Líquidos combustíveis: qualquer líquido com ponto de fulgor acima de 37,8°C.
- a. Classe II: qualquer líquido com ponto de fulgor entre 37,8°C e 60°C.
 - b. Classe III: qualquer líquido com ponto de fulgor igual ou maior de 60°C.

Este critério, R_i , fará parte da avaliação do índice de severidade (Z_s), por estar na dimensão de consequências dentro de uma análise de risco. A tabela 3.3 sintetiza a classificação de valor.

Na avaliação de valor, propõe-se somar 1 para o caso dos líquidos inflamáveis classe IA e IB, até o valor máximo de 5.

Tabela 3.3: Tabela de valores para Risco do Inventário (R_i)

*Para líquidos inflamáveis classes IA e IB, adicionar +1 ao valor, mantendo o máximo em cinco.

Risco Invent. (R_i):	1	Nenhum impacto significativo
	2	Gás ou líquido combustível, ou inflamável, ou tóxico ou reativo a baixa pressão (≤ 10 kgf/cm ²).
	3	Gás ou líquido combustível, ou inflamável ou tóxico ou reativo a média pressão (entre 10 a 20 kgf/cm ²).
	4	Gás ou líquido combustível, ou inflamável, ou tóxico ou reativo a alta pressão (entre 20 a 40kgf/cm ²).
	5	Gás ou líquido combustível, ou inflamável, ou tóxico ou reativo a pressão superior (≥ 40 kgf/cm ²).

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.4 Custo do Reparo (C_r)

Critério que deve ser maximizado para a decisão de investimento em monitoramento contínuo – quanto maior o custo de reparo de um equipamento em caso de falha, maior a necessidade de monitoramento contínuo.

Este critério, assim como o critério de impacto na produção (I_p), os valores da grade de valor estão alinhados com o procedimento interno de uma empresa de grande porte localizada no Polo Petroquímico do Rio Grande do Sul, complexo que contempla empresas de primeira e segunda geração.

⁴ Ponto de ebulição (*Boiling Point*): temperatura na qual a pressão de vapor do líquido iguala-se a pressão atmosférica a qual encontra-se submetido. (NFPA 30, 2015)

Em relação à dimensão deste critério, também fará parte da avaliação do índice de severidade (Z_s), já que faz parte das consequências. A tabela 3.4 apresenta a grade de valor, classificados em quatro níveis.

Tabela 3.4: Tabela de valores para Custo do Reparo (C_r)

Custo Reparo (C_r):	1	Custos \leq US\$ 5M
	2	Custos entre US\$ 5M e US\$ 30M
	3	Custos entre US\$ 30M e US\$ 100M
	4	Custos \geq US\$ 100M

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.5 Severidade da Aplicação (S_a)

Critério que deve ser maximizado para a decisão de investimento em monitoramento contínuo – quanto maior a severidade na aplicação, maior a necessidade de investimento em monitoramento contínuo.

Ideal que na avaliação deste critério sejam analisados todos os aspectos da aplicação que podem tornar a mesma severa. Incluem-se os dados de projeto do equipamento e do processo em que o mesmo está inserido. Aspectos como histórico de falhas e velocidades rotacionais devem ser contabilizados, assim como os esforços ocasionados por situações não desejadas por instabilidade no processo, como excesso de condensado na sucção de um compressor (calço hidráulico) ou uma situação de cavitação⁵ em uma bomba centrífuga. Situações de excesso em partidas/paradas também devem ser consideradas.

A fim de objetivar esta avaliação, a valoração da grade de valor está resumida conforme apresentado na Tabela 3.5. A classificação principal está no histórico do equipamento, já que objetiva-se um avanço na política de manutenção baseada em condição através do monitoramento contínuo.

A eventual instabilidade do processo somará um ponto na avaliação, até o máximo de cinco. Já a rotação poderá somar até dois pontos, sendo um ponto para altas rotações (entre 2000 e 3600 rpm), e dois pontos para altíssimas rotações (maiores que 3600 rpm), mantendo o máximo também em cinco.

Este critério está relacionado ao índice agregador de tecnologia (Z_t), já que faz parte da dimensão das probabilidades em uma análise de risco. A tabela 3.5 apresenta a grade de valor.

⁵ Cavitação: fenômeno que ocorre quando há formação de bolhas de vapor e posterior implosão junto à superfície das pás do rotor/impelidor/impulsor.

Tabela 3.5: Tabela de valores para Severidade da Aplicação (S_a)

* Somar 1 ponto para altas rotações (>2000 rpm) ou 2 para altíssimas (>3600 rpm)

* Somar 1 ponto para situações de eventual instabilidade no processo.

Sever. Aplic. (S _a):	1	Não há histórico de falhas nos mancais.
	2	Há pequeno histórico de falhas nos mancais (frequência > 5 anos)
	3	Há histórico de falha em mancais (frequência > 3 e ≤ 5 anos).
	4	Há histórico frequente de falha em mancais (frequência ≤ 3 anos).
	5	Combinação com altas rotações ou instabilidade processo *.

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.6 Confiabilidade do Sistema de Lubrificação (C_L)

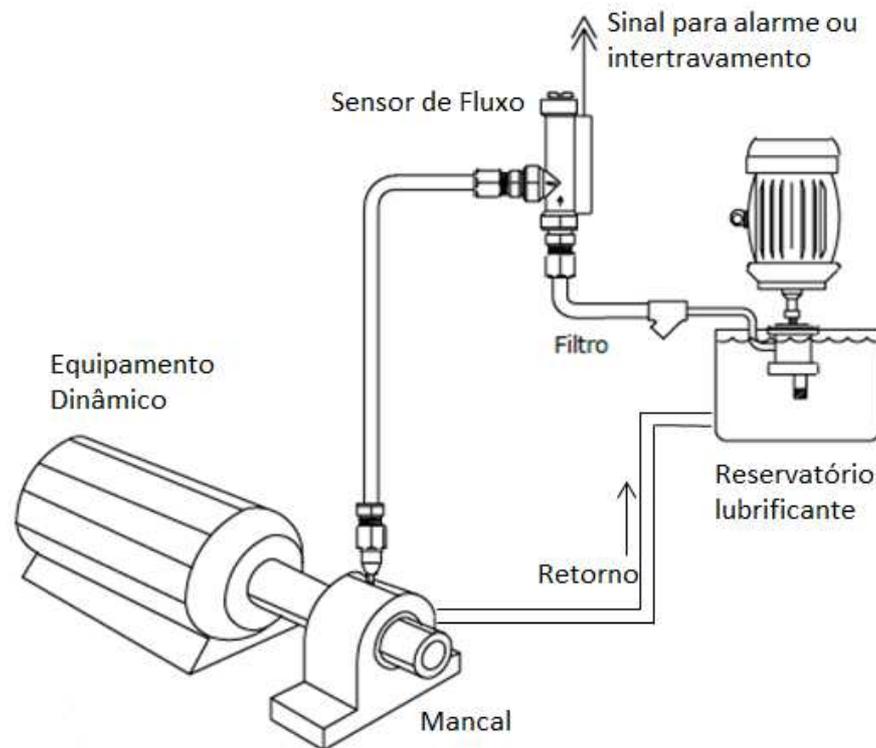
Ao contrário dos critérios já apresentados, este deverá ser minimizado para a decisão de investimento em monitoramento contínuo – quanto maior a confiabilidade do sistema de lubrificação, menor a necessidade de investimento em monitoramento contínuo.

Neste critério avalia-se a garantia do circuito de lubrificação, ou seja, se o fluxo do lubrificante está garantido junto aos mancais (Figura 2.5). Para tal, supervisionar o sistema através de variáveis como fluxo e/ou pressão torna-se vital. Outras variáveis também podem ser monitoradas, por exemplo, as de qualidades químicas, como a presença de umidade ou acidez. No entanto, neste critério avaliaremos somente se há uma supervisão do circuito lubrificante no tocante ao fluxo, pressão ou temperatura, que protejam de forma automática o equipamento no caso de não conformidade no sistema.

Uma confiabilidade muito baixa é atribuída a sistemas que não possuem nenhum tipo de monitoramento ou supervisão local, já uma alta confiabilidade é designada para sistemas que possuem pelo menos uma variável monitorada com proteção automática do equipamento, desligando o mesmo no caso de um alarme crítico (intertravamento).

Na figura 3.1 é apresentado um exemplo de supervisão através de um sensor de fluxo para o sistema.

Figura 3.1 Exemplo de Supervisão do Fluxo para o Sistema de Lubrificação.



Fonte: adaptado pelo autor.

A dimensão deste critério está relacionada ao índice agregador de tecnologia (Z_t), já que faz parte das probabilidades no tocante de uma análise de risco. A tabela 3.6 apresenta a grade de valor, classificados em quatro níveis.

Importante salientar que, na aplicação do modelo aditivo determinístico, este valor terá valor negativo na equação final, já que deve ser minimizado na direção de preferência para a decisão: quanto maior a confiabilidade da lubrificação, menor será a necessidade de investimento em monitoramento contínuo.

Tabela 3.6: Tabela de valores para Confiabilidade da Lubrificação (C_L)

Conf. Lub. (C_L):	1	Sem monitoramento.
	2	Monitoramento local ou remoto sem alarmes.
	3	Monitoramento local ou remoto com alarmes.
	4	Local ou remoto com alarmes e proteção (intertravamento).

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.7 Monitoramento Atual Instalado (M_a)

Critério que deverá ser minimizado para a decisão de investimento em monitoramento contínuo – quanto melhor o monitoramento atual, menor a necessidade de investimento em monitoramento contínuo. Logo também terá valor negativo na equação final, a exemplo do descrito no item 3.2.6.

Importante salientar que este critério leva em conta o nível de monitoramento e proteção instalados no equipamento. Monitoramentos tipo “*off-line*”, como inspeção ou coleta de vibração, não se enquadram neste critério.

A grade de valor é proposta conforme o nível do sistema de monitoramento instalado, sendo a nota mínima para nenhum monitoramento e a nota máxima para um monitoramento conforme a API⁶ 670.

Tabela 3.7: Tabela de valores para Monitoramento Atual (M_a)

Monit. Atual (M _a):	1	Sem monitoramento.
	2	Monitoramento local ou remoto sem alarmes.
	3	Monitoramento local ou remoto com alarmes.
	4	Local ou remoto com alarmes e proteção (intertravamento).
	5	Monitorado e protegido conforme requisitos API 670.

Fonte: elaborado pelo autor.

Cabe uma ressalva neste critério, os equipamentos com classificação 5 não deverão fazer parte da avaliação deste trabalho. Isto porque já estão no padrão proposto pelo objetivo fim deste estudo.

Para resolver esta questão utiliza-se o modelo aditivo com veto, conforme discutido no capítulo 2.

$$v'_{Ma}(a) = \begin{cases} 0, & \text{if } v_i(a) = l_s \\ 1, & \text{if } v_i(a) \neq l_s \end{cases} \quad (3.3)$$

Onde $l_s = 5$, padrão máximo de monitoramento instrumentado.

Este veto altera a fórmula para o cálculo do índice de tecnologia global $Z_t(a)$ e do índice de severidade $Z_s(a)$, conforme abaixo:

$$Z_{t,s}(a) = \sum_{j=1}^n k_j \cdot v_j(a) \cdot v'_{Ma}(a) \quad (3.4)$$

Onde k é a constante de escala normalizada para cada critério.

3.3 Valores das Constantes de Escala (Pesos)

Os valores dos pesos para cada critério serão estabelecidos pelo método *swing*, que tem sua origem atrelada a um analista desconhecido vinculado a uma empresa de consultoria na década de 70 (EDWARDS; BARRON apud ALMEIDA, 2013, p. 67). Este procedimento foi incorporado ao método SMARTS e SMARTER.

⁶ API: American Petroleum Institute. API 670: Standards Machinery Protection System.

O método consiste basicamente em realizar perguntas para os decisores, primeiramente questiona-se qual o mais importante dentre os critérios existentes. Na sequência se repete a pergunta, porém excluindo o critério já selecionado como mais importante. Deste método se obtém a ordem de importância dos critérios.

O processo continua para valoração final das constantes de escala, atribui-se nota máxima para o critério mais importante (exemplo 10 ou 100), e pergunta-se qual a nota para o critério em segundo lugar na importância, e assim repete-se sucessivamente até valorar todas as constantes de escala para todos os critérios.

De posse destes valores aplica-se um procedimento de normalização, dividindo os valores pelo valor máximo. Este método indica a distância para a alternativa líder. A equação abaixo (3.5) ilustra o procedimento matemático (ALMEIDA, 2013, p.38).

$$v'_j(a) = \frac{v_j(a_i)}{[Max v_j(a_i)]} \quad (3.5)$$

Onde v'_j é o valor normalizado para o critério 'a'.

4 TESTES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em uma planta petroquímica real. Está dividido em três tópicos: avaliação individual por especialistas da planta, avaliação pelo modelo proposto e exemplificará a contribuição da análise de sensibilidade.

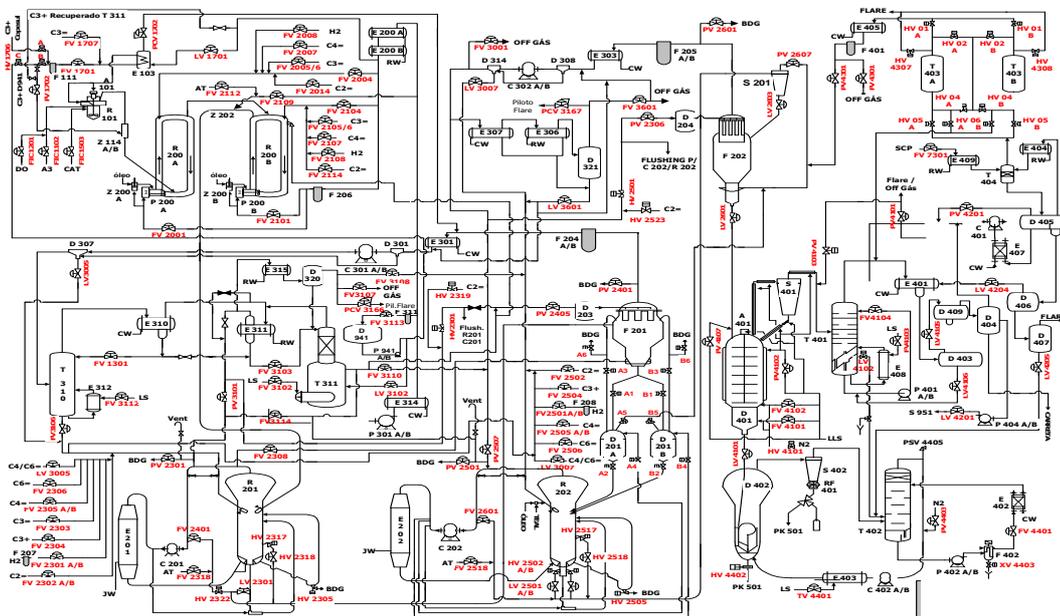
4.1 Aplicação em Planta Petroquímica

A planta designada para o teste está localizada no polo petroquímico do Rio Grande do Sul, a mesma produz polietileno de alta densidade e de baixa densidade linear, PEAD e PEBDL⁷ respectivamente. É chamada de Spherilene (Sph) em função de sua tecnologia química. A capacidade média de produção é em torno de 40 ton/h, com distribuição para mercado interno e para exportação.

Esta unidade tem um papel estratégico dentro do complexo industrial do polo petroquímico do Rio Grande do Sul. Sua produção é a mais alta dentre as plantas de segunda geração. É responsável por processar praticamente 30% do eteno produzido nas plantas de primeira geração. Sua indisponibilidade sensibiliza facilmente a produção na primeira geração, afetando a produção de outros petroquímicos, como propeno, butadieno e benzeno. Estes são consumidos em outras unidades de segunda-geração do polo. Logo, a planta em que aplicaremos o método proposto neste trabalho é tida como a mais importante, no quesito produção, da segunda geração no polo petroquímico do RS.

A Figura 4.1 representa um diagrama esquemático da mesma.

Figura 4.1. Diagrama Ilustrativo Planta Petroquímica - Sph

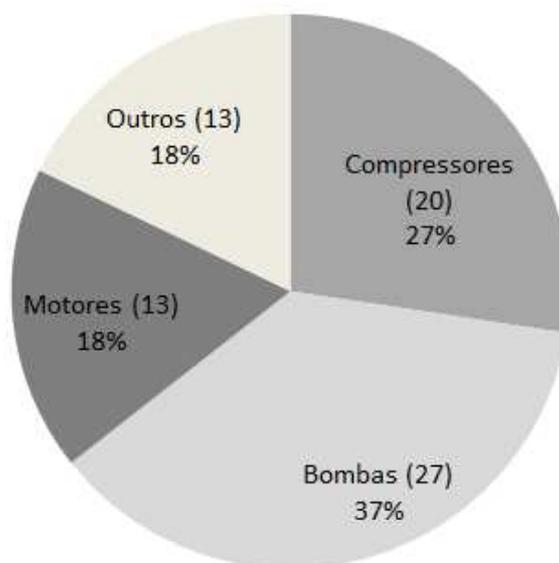


⁷ PEAD ou HDPE (*High-density Polyethylene*) e PEBDL ou LLPDE (*Linear low-density Polyethylene*): tipo de plástico utilizado em diferentes segmentos da indústria de transformação de plásticos.

A planta é composta por diversos equipamentos dinâmicos, contudo para este teste selecionamos como amostragem 73 equipamentos dinâmicos principais, entre bombas, compressores, agitadores, extrusoras e motores.

A distribuição desta amostra pode ser observada no gráfico 4.1.

Gráfico 4.1. Distribuição da Amostra de Equipamentos Dinâmicos



Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.1 Avaliação Individual pelos Especialistas

Um ponto de início do trabalho foi de realizar uma pesquisa qualitativa baseada no conhecimento subjetivo dos profissionais especialistas na planta em questão. Agrupar as respostas de como cada especialista da planta investiria em monitoramento instrumentado contínuo serve como comparação para o método proposto, além de poder sintetizar o teste para o modelo, avaliando no teste somente os principais equipamentos elencados pela pesquisa.

Nesta etapa foram selecionados oito profissionais especialistas das áreas de produção, manutenção, engenharia e processo. Trata-se do corpo técnico responsável pela planta. Suas experiências estão listadas abaixo.

Especialista A: Engenheiro Eletricista, área Instrumentação e Controle. 7 anos de experiência na planta Sph.

Especialista B: Engenheiro Mecânico, área Dinâmicos. 13 anos de experiência na planta Sph.

Especialista C: Técnico Mecânico Especialista, área Dinâmicos (preditiva). 16 anos de experiência na planta Sph.

Especialista D: Engenheiro Mecânico, área Dinâmicos. 10 anos de experiência na planta Sph.

Especialista E: Engenheiro Mecânico, área Engenharia de Confiabilidade. 7 anos de experiência na planta Sph.

Especialista F: Engenheiro Eletrônico, área Instrumentação e Controle. 6 anos de experiência na planta Sph.

Especialista G: Engenheira Química, área Engenharia de Processo. 12 anos de experiência na planta Sph.

Especialista H: Engenheira Química, área Produção. 11 anos de experiência na planta Sph.

Individualmente a seguinte pergunta foi respondida: “Tratando-se de investimento para monitoramento contínuo de equipamentos, atribuíam um valor de zero a dez para os equipamentos da planta Sph. Considere dez como o mais prioritário e zero como o menos prioritário para a implantação”.

O modelo deste questionário está apresentado no Apêndice 1.

A Tabela 4.1 demonstra o resultado. Importante observar se são 42 classificações, já que temos algumas posições com equipamentos redundantes, caso dos *tags* finalizados com “A/B”.

Equipamento↓	Especialistas								Ordenação	
	A	B	C	D	E	F	G	H	Σ	Normalizado
SMC201	10	10	8	8	10	10	10	10	76	1,00
SMC202	10	10	8	8	10	10	10	10	76	1,00
EX601A/B	8	9	10	9	10	10	8	9	73	0,96
SP600A/B	8	9	10	8	10	10	7	9	71	0,93
MEX601A/B	8	9	10	6	10	10	8	9	70	0,92
SC201	10	10	8	10	10	2	10	10	70	0,92
SC202	10	10	8	10	10	2	10	10	70	0,92
SMP600A/B	8	9	10	6	10	10	7	9	69	0,91
SP200A/B	2	8	10	8	9	8	8	10	63	0,83
SA101	0	9	9	3	10	10	8	10	59	0,78
SC301A/B	6	7	8	6	8	6	9	8	58	0,76
SC302A/B	6	7	8	6	8	6	9	8	58	0,76
MC301A/B	6	7	6	4	8	10	9	8	58	0,76
MC302A/B	6	7	6	4	8	10	9	8	58	0,76
C501A/B/C	4	7	9	7	7	8	6	8	56	0,74
SC701	9	6	7	4	5	8	6	8	53	0,70
SA401	0	9	10	1	9	6	8	10	53	0,70
SMC701	9	6	7	2	5	8	6	8	51	0,67
SY1101A/B/C	4	7	7	5	6	8	5	7	49	0,64
SC700A/B	3	6	7	4	5	8	6	7	46	0,61
SP1101A/B/C	3	7	7	3	6	8	5	7	46	0,61
SC401	0	5	7	5	4	7	8	10	46	0,61
MC700A/B	3	6	7	2	5	8	6	7	44	0,58
M501	2	6	3	6	1	6	6	10	40	0,53
M502	2	6	3	6	1	6	6	10	40	0,53
SC1201A/B	2	6	0	2	6	10	5	8	39	0,51
SP301A/B	0	6	3	7	4	5	7	6	38	0,50
SP201	0	6	0	1	4	7	6	9	33	0,43
SP202	0	6	0	1	4	7	6	9	33	0,43
SC702	6	2	0	0	1	8	5	9	31	0,41
SS601A/B	0	4	0	2	1	7	5	8	27	0,36
SC402A/B	0	3	0	3	1	7	6	6	26	0,34
SP921A/B	0	4	3	0	1	5	6	6	25	0,33
SP931A/B	0	4	3	0	1	5	6	6	25	0,33
SP941A/B	0	4	3	0	1	5	6	6	25	0,33
SP404A/B	0	3	0	0	1	3	8	10	25	0,33
SP951A/B	0	4	3	0	1	5	5	6	24	0,32
SC901A/B	0	3	0	0	1	7	6	7	24	0,32
SS602A/B	0	2	0	0	1	6	5	8	22	0,29
Z502A/B	0	2	0	0	1	6	5	7	21	0,28
SP402A/B	0	3	0	0	1	3	4	5	16	0,21
SP401A/B	0	3	0	0	1	3	4	5	16	0,21

Fonte: elaborado pelo Autor.

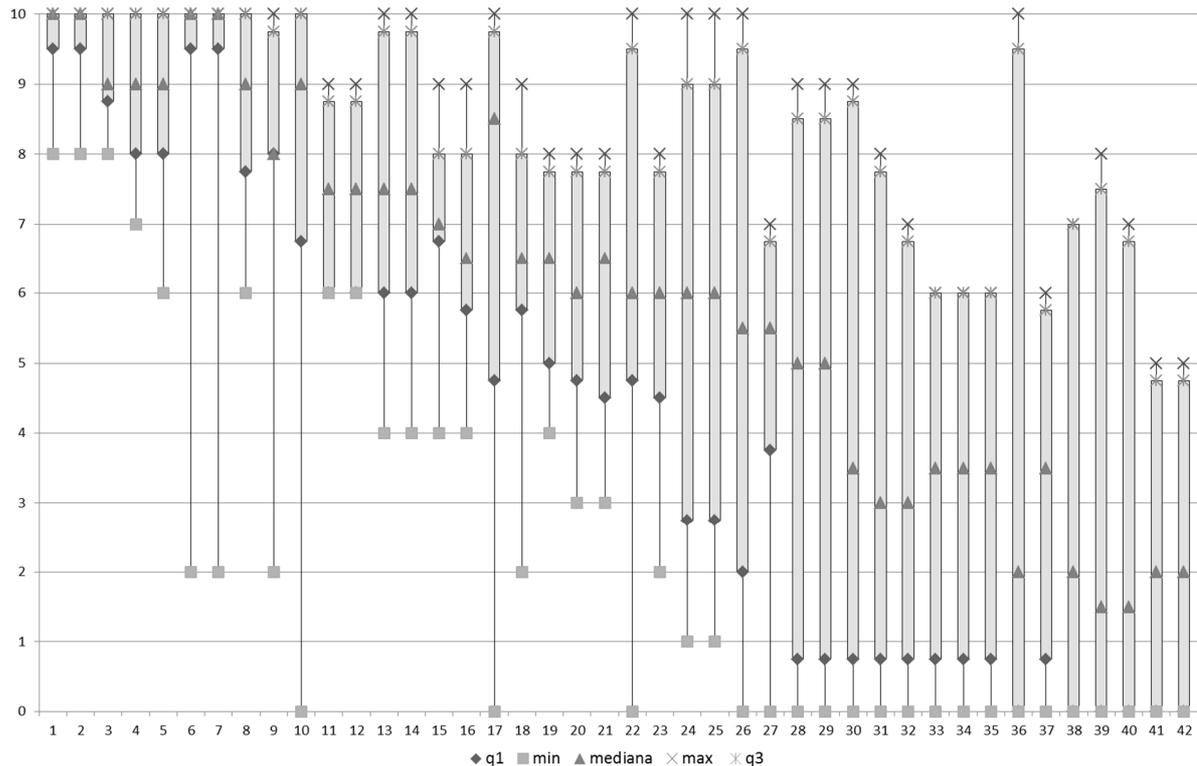
Nesta pesquisa chama a atenção que até a décima posição no *score*, temos mais de uma nota dez para cada equipamento.

Outro ponto, as duas últimas colunas são dos especialistas G e H, da área de processo e produção, e diferem na avaliação de importância em alguns pontos com relação aos demais especialistas de mecânica e instrumentação. O equipamento SP404A é um bom exemplo, pelo valor global da pesquisa está entre as dez últimas posições, mas se fosse somente avaliado pelos especialistas G e H estaria entre os dez primeiros.

O gráfico 4.2, do tipo “boxplot”⁸ ilustra a distribuição das notas dos especialistas de forma ordenada, onde a posição 1 no eixo das abscissas equivale ao equipamento “SMC201” e a posição 42 ao “SP401A/B”.

Observa-se que entre os sete primeiros há possibilidade de dúvida, já que os equipamentos que estão na sexta e sétima posição tiveram apenas uma opinião muito baixa, se este dado for considerado como “outlier”⁹ estes equipamentos estariam empatados em primeiro lugar.

Gráfico 4.2. Distribuição das Notas dos Especialistas (Boxplot)



Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.2 Avaliação pelo Modelo Proposto

O índice tecnológico (Z_t) e o de severidade (Z_s) foram avaliados através dos critérios já citados no capítulo 3.

As constantes de escala foram estabelecidas por outros dois especialistas da empresa em questão, no entanto estes não conhecem profundamente a planta Sph, diferentemente dos que participaram na pesquisa demonstrada no item 4.1.1.

Estes dois especialistas conhecem profundamente sistemas de monitoramento instrumentado contínuo aplicáveis em equipamentos de plantas petroquímicas, devido a sua experiência na definição e condução de projetos sobre este tema.

⁸ *Boxplot*: ou diagrama de caixa, diagrama de quartis, gráfico estatístico que representa a distribuição dos dados por meio de quartis.

⁹ *Outlier*: valor atípico em uma amostragem, inconsistente aos demais dados.

A avaliação final está na tabela 4.2, que segue:

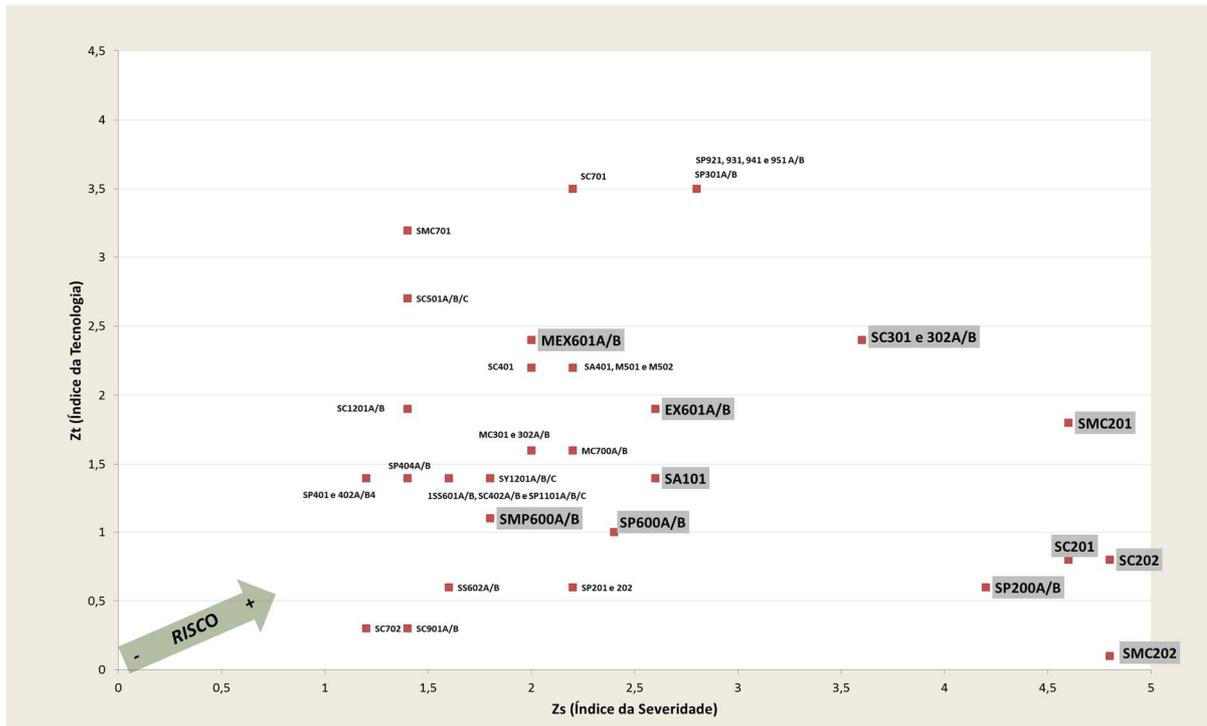
Tabela 4.2. Resultado da Avaliação

Equipamentos ↓	Tecnologia do Projeto (Z_T)						Severidade (Z_s)								Z_s	
	Conf.Sist.Lub.		Monit. Atual		Sev. Aplicação		Z_T	Fluxo Prod. Int.		Impacto Prod.		Riscos Inv.		Custo Reparo		
	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso		Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota		Peso
SMC201	3	0,3	3	0,3	3	2,4	1,8	5	1	5	1	5	2	3	0,6	4,6
SMC202	4	0,4	3	0,3	1	0,8	0,1	5	1	5	1	5	2	4	0,8	4,8
EX601A/B	4	0,4	1	0,1	4	3,2	2,7	2	0,4	5	1	1	0,4	4	0,8	2,6
SP600A/B	4	0,4	2	0,2	2	1,6	1	2	0,4	5	1	1	0,4	3	0,6	2,4
MEX601A/B	4	0,4	4	0,4	4	3,2	2,4	2	0,4	3	0,6	1	0,4	3	0,6	2
SC201	4	0,4	4	0,4	2	1,6	0,8	5	1	5	1	5	2	3	0,6	4,6
SC202	4	0,4	4	0,4	2	1,6	0,8	5	1	5	1	5	2	4	0,8	4,8
SMP600A/B	1	0,1	4	0,4	2	1,6	1,1	2	0,4	2	0,4	1	0,4	3	0,6	1,8
SP200A/B	1	0,1	1	0,1	1	0,8	0,6	5	1	4	0,8	5	2	2	0,4	4,2
SA101	1	0,1	1	0,1	2	1,6	1,4	5	1	5	1	1	0,4	1	0,2	2,6
SC301A/B	4	0,4	4	0,4	4	3,2	2,4	2	0,4	3	0,6	5	2	3	0,6	3,6
SC302A/B	4	0,4	4	0,4	4	3,2	2,4	2	0,4	3	0,6	5	2	3	0,6	3,6
MC301A/B	4	0,4	4	0,4	3	2,4	1,6	2	0,4	3	0,6	1	0,4	3	0,6	2
MC302A/B	4	0,4	4	0,4	3	2,4	1,6	2	0,4	3	0,6	1	0,4	3	0,6	2
SC501A/B/C	4	0,4	1	0,1	4	3,2	2,7	1	0,2	1	0,2	1	0,4	3	0,6	1,4
SC701	4	0,4	1	0,1	5	4	3,5	1	0,2	1	0,2	3	1,2	3	0,6	2,2
SA401	1	0,1	1	0,1	3	2,4	2,2	5	1	2	0,4	1	0,4	2	0,4	2,2
SMC701	4	0,4	4	0,4	5	4	3,2	1	0,2	1	0,2	1	0,4	3	0,6	1,4
SY1101A/B/C	1	0,1	1	0,1	2	1,6	1,4	2	0,4	2	0,4	1	0,4	3	0,6	1,8
SC700A/B	4	0,4	1	0,1	5	4	3,5	1	0,2	1	0,2	3	1,2	3	0,6	2,2
SP1101A/B/C	1	0,1	1	0,1	2	1,6	1,4	1	0,2	2	0,4	1	0,4	3	0,6	1,6
SC401	1	0,1	1	0,1	3	2,4	2,2	1	0,2	2	0,4	2	0,8	3	0,6	2
MC700A/B	4	0,4	4	0,4	3	2,4	1,6	1	0,2	1	0,2	3	1,2	3	0,6	2,2
M501	1	0,1	1	0,1	3	2,4	2,2	5	1	2	0,4	1	0,4	2	0,4	2,2
M502	1	0,1	1	0,1	3	2,4	2,2	5	1	2	0,4	1	0,4	2	0,4	2,2
SC1201A/B	4	0,4	1	0,1	3	2,4	1,9	1	0,2	1	0,2	1	0,4	3	0,6	1,4
SP301A/B	4	0,4	1	0,1	5	4	3,5	1	0,2	1	0,2	5	2	2	0,4	2,8
SP201	1	0,1	1	0,1	1	0,8	0,6	5	1	2	0,4	1	0,4	2	0,4	2,2
SP202	1	0,1	1	0,1	1	0,8	0,6	5	1	2	0,4	1	0,4	2	0,4	2,2
SC702	4	0,4	1	0,1	1	0,8	0,3	1	0,2	1	0,2	1	0,4	2	0,4	1,2
SS601A/B	1	0,1	1	0,1	2	1,6	1,4	2	0,4	2	0,4	1	0,4	2	0,4	1,6
SC402A/B	1	0,1	1	0,1	2	1,6	1,4	2	0,4	1	0,2	1	0,4	3	0,6	1,6
SP921A/B	4	0,4	1	0,1	5	4	3,5	1	0,2	1	0,2	5	2	2	0,4	2,8
SP931A/B	4	0,4	1	0,1	5	4	3,5	1	0,2	1	0,2	5	2	2	0,4	2,8
SP941A/B	4	0,4	1	0,1	5	4	3,5	1	0,2	1	0,2	5	2	2	0,4	2,8
SP404A/B	1	0,1	1	0,1	2	1,6	1,4	1	0,2	1	0,2	2	0,8	1	0,2	1,4
SP951A/B	4	0,4	1	0,1	5	4	3,5	1	0,2	1	0,2	5	2	2	0,4	2,8
SC901A/B	4	0,4	1	0,1	1	0,8	0,3	1	0,2	1	0,2	1	0,4	3	0,6	1,4
SS602A/B	1	0,1	1	0,1	1	0,8	0,6	2	0,4	2	0,4	1	0,4	2	0,4	1,6
Z502A/B	1	0,1	1	0,1	2	1,6	1,4	2	0,4	2	0,4	1	0,4	3	0,6	1,8
SP402A/B	1	0,1	1	0,1	2	1,6	1,4	1	0,2	1	0,2	1	0,4	2	0,4	1,2
SP401A/B	1	0,1	1	0,1	2	1,6	1,4	1	0,2	1	0,2	1	0,4	2	0,4	1,2

Fonte: elaborado pelo autor.

A ordem da tabela 4.2 está mantida conforme avaliação individual dos especialistas. No gráfico 4.3 podemos observar o resultado em uma matriz de risco.

Gráfico 4.3. Matriz de Risco para Investimento em Monitoramento e Proteção



Fonte: elaborado pelo autor.

No gráfico 4.3 os equipamentos com identificação destacada são os doze primeiros da lista da pesquisa inicial, conforme item 4.1.1.

Uma avaliação pela matriz de risco sugere a priorização de investimento em monitoramento para o equipamento SMC201. Há uma maior probabilidade de acontecer o evento de falha se comparado aos demais equipamentos do grupo de alta severidade (valor maior que quatro).

Para os demais investimentos, o decisor poderá utilizar a análise de custo para complementar sua tomada de decisão de monitoramento e proteção de equipamentos, ou ainda fazer valer a análise de sensibilidade como será exemplificado no próximo subcapítulo.

4.1.3 Contribuição da Análise de Sensibilidade

Conforme descrito no capítulo 2, a análise de sensibilidade é realizada através da variação, tanto para menos como para mais, do peso do critério em análise. Smith e Orsoni (2007) enfatizam que a análise de sensibilidade traz robustez ao modelo de decisão.

Três situações serão utilizadas para exemplificar o uso da análise de sensibilidade, uma variando o peso de um critério de tecnologia (Z_t), outra variando o peso de um critério ligado à severidade (Z_s) e a última variando critérios para um cenário em que o decisor valorize a produtividade.

Situação 1: supondo que o decisor decida que o critério de M_a (monitoramento atual) tenha seu peso elevado pelo raciocínio de investir primeiro nos equipamentos com menor nível de monitoramento, daí o peso de M_a pode ser alterado de 0,1 para 0,4. A tabela 4.3 compara o valor dos pesos da situação inicial. Importante observar que os pesos, ou as constantes de escala,

são normalizadas, logo ao alterar o peso de um critério automaticamente outros serão afetados. Neste caso reduziu-se o peso para S_a (severidade da aplicação).

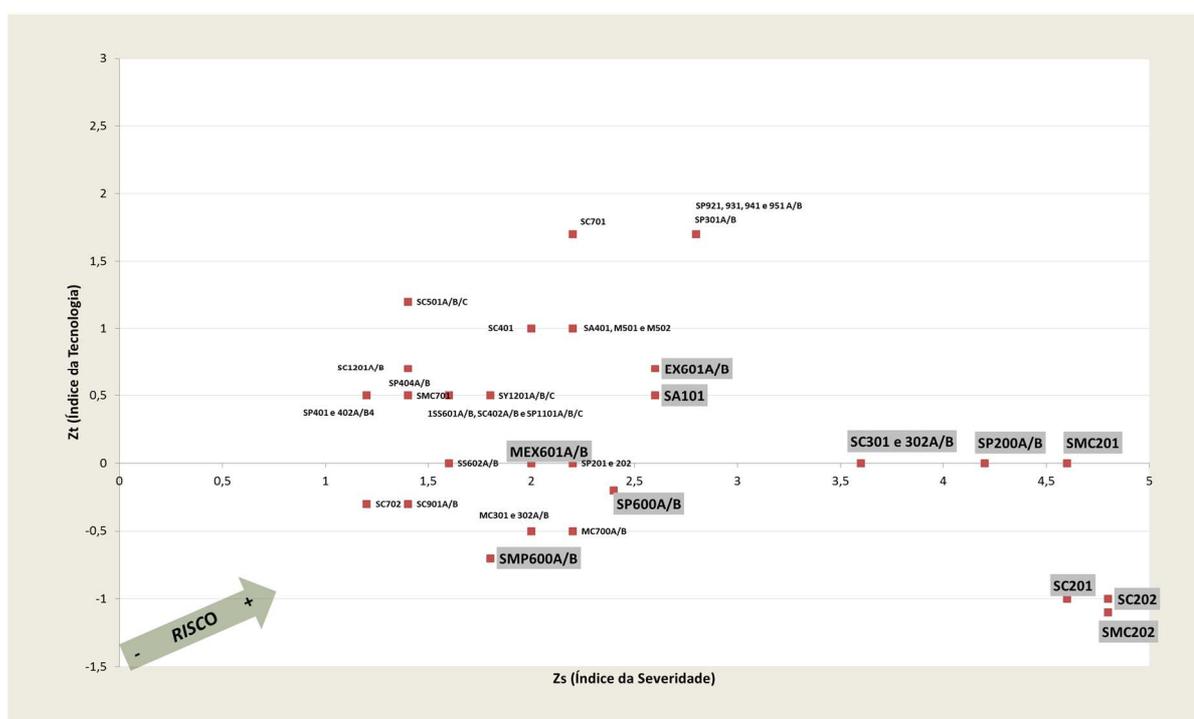
O resultado é apresentado no gráfico 4.4.

Tabela 4.3. Comparação Constantes de Escala – Situação 1

	M_a	C_L	A_s
Pesos Originais	0,1	0,1	0,8
Situação 1	0,4	0,1	0,5

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4.4 Análise de Sensibilidade - Situação 1



Fonte: elaborado pelo autor.

Mais ainda destaca-se a importância de investir primeiramente no equipamento SMC201. Já os equipamentos SC301 e 302A/B tiveram sua importância reduzida. São equipamentos que já possuem um bom grau de proteção por vibração ou temperatura em mancais.

Já o equipamento SP200A/B teve seu risco elevado, ocupando posição de maior destaque com relação à importância de receber investimentos em monitoramento.

Situação 2: nesta simulação o decisor decide por alterar os pesos dos critérios atrelados ao índice de severidade, aumentando a importância do custo de reparo do equipamento em detrimento ao risco de perda do inventário. A tabela 4.4 ilustra a alteração.

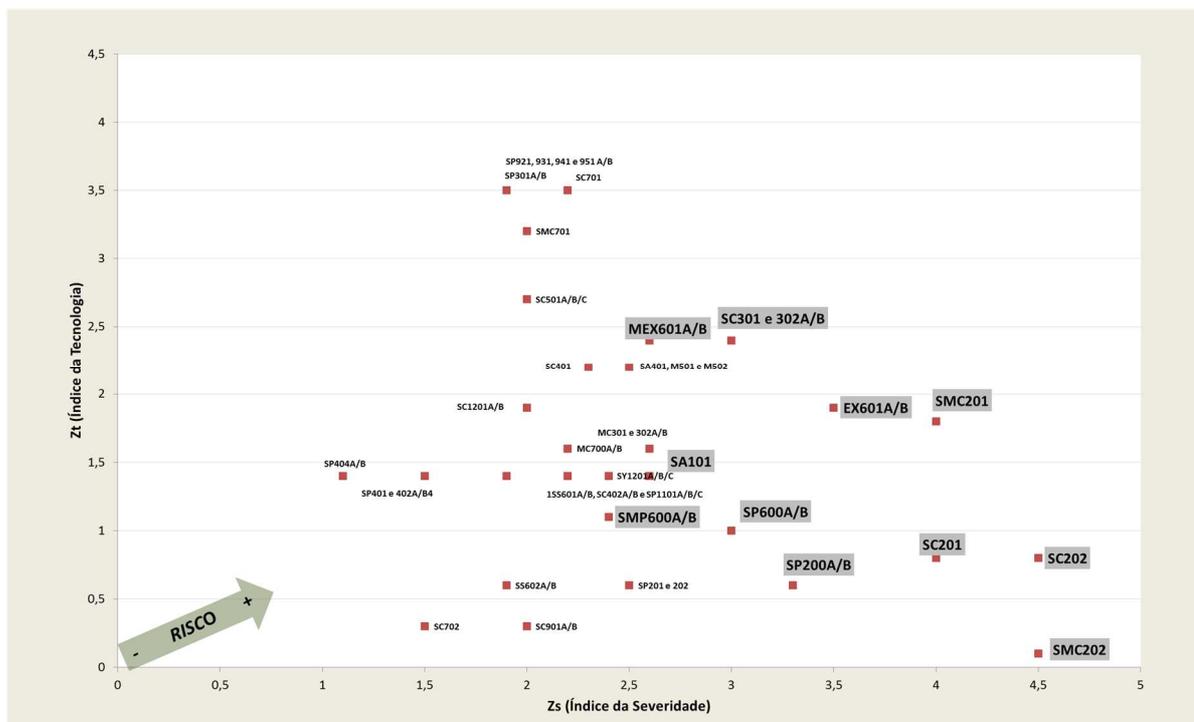
O gráfico 4.5 apresenta o resultado da simulação para a situação 2, com os pesos modificados conforme a tabela 4.4.

Tabela 4.4. Comparação Constantes de Escala – Situação 2

	F_p	I_p	R_i	C_r
Pesos Originais	0,2	0,2	0,4	0,2
Situação 2	0,2	0,2	0,1	0,5

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4.5. Análise de Sensibilidade - Situação 2



Nesta situação o equipamento SC202 teve uma maior importância em relação ao risco. A fim de complementar a decisão de prioridade no investimento entre os equipamentos SMC201 e SC202, sugere-se uma análise de custo que contemple não somente o investimento inicial da instalação do sistema de monitoramento, mas também os ganhos relacionados ao uso da política de manutenção preventiva baseada em condição (preditiva) versus a preventiva base tempo.

Os equipamentos SP921/931/941/951A/B e SP301A/B reduziram sua importância em relação ao risco.

Situação 3: aqui o decisor opta por investimento que aumente a produtividade, por priorizar alternativas que tenham como consequência o aumento a produção da planta, sem preocupação com o inventário do equipamento e com influência da parada da unidade para as demais plantas interligadas, e com redução dos custos de manutenção.

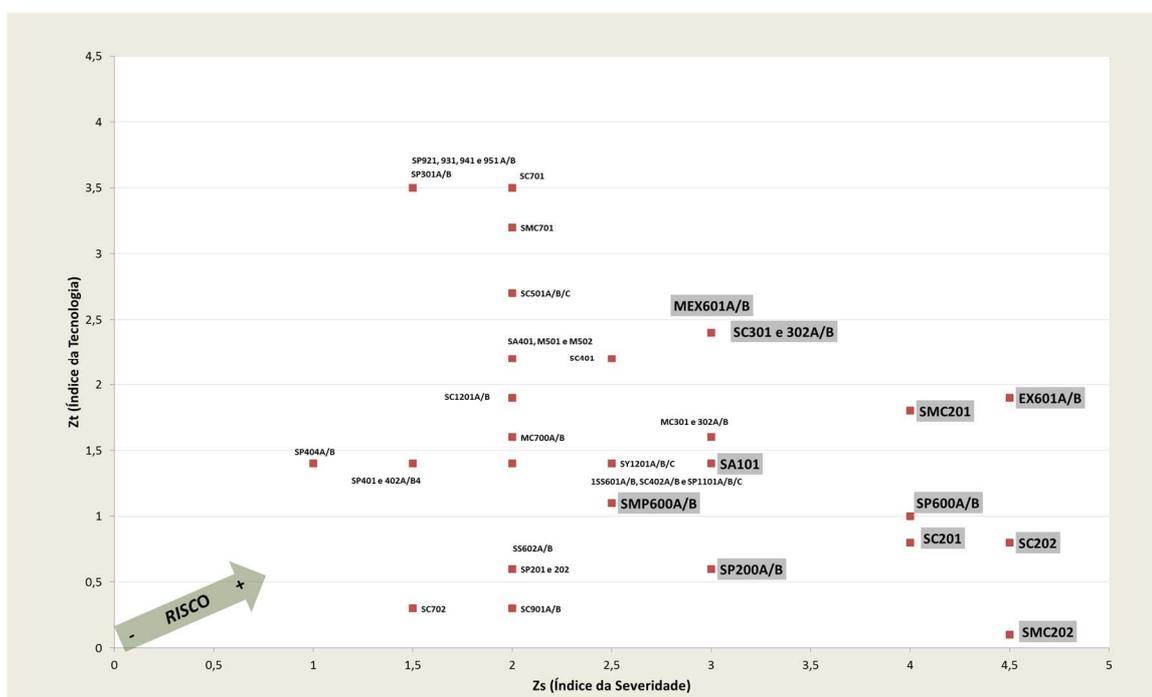
O gráfico 4.6 apresenta o resultado simulado para a situação 3, com os pesos modificados conforme a tabela 4.5.

Tabela 4.5. Comparação Constantes de Escala – Situação 3

	F_p	I_p	R_i	C_r
Pesos Originais	0,2	0,2	0,4	0,2
Situação 3	0	0,5	0	0,5

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4.6. Análise de Sensibilidade - Situação 3



Fonte: elaborado pelo autor.

Esta situação apresenta um mapa semelhante ao resultado da pesquisa inicial junto aos especialistas da planta.

O equipamento EX601A/B, que estava em posição intermediária de risco na situação inicial, passou a ser prioritário para investimentos em monitoramento instrumentado a partir desta análise de sensibilidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta por este trabalho pode ser utilizada para priorizar investimentos em monitoramento e proteção de equipamentos em indústria petroquímica. Com o uso deste método engenheiros, com conhecimentos de equipamentos e sistemas, podem determinar com bom grau de precisão a priorização do investimento mesmo em plantas que não possuem experiência.

A matriz de decisão apresentada pode ter áreas de tolerância definidas conforme a estratégia de negócio da empresa. No caso da planta teste, a título de exemplo, uma alta consequência (ou severidade) não é admitida, mesmo tendo uma baixa probabilidade. Em resumo, a construção deste “mapa de tolerância” parte de uma decisão estratégica, e é determinado na combinação da consequência e da probabilidade, ou seja, o risco.

Um aspecto importante que deve ser ressaltado neste trabalho é a valorização do uso de um método estruturado para a tomada de decisão. Os métodos de apoio da decisão (MAD ou MMAD) podem contribuir de forma muito positiva em cenários de decisões complexas, muito presentes no dia-a-dia da engenharia.

Nos métodos MMAD a análise de sensibilidade tem papel de suma importância, é um momento onde os analistas ou decisores “exercitam” a tomada de decisão, simulando resultados através da alteração das constantes de escala (pesos). Este passo torna o resultado robusto para os analistas, com um melhor entendimento do processo decisório.

A pesquisa individual qualitativa realizada com os especialistas apresentou um resultado com foco em produtividade e redução de custos, ou seja, foco na otimização básica. No entanto, o método propõe uma reflexão mais aprofundada, considerando fatores como risco de perda de inventário e aspectos ligados à tecnologia do equipamento e monitoramento instrumentado já existente.

Este modelo também pode ser ampliado na avaliação de um complexo petroquímico, alterando a problemática para a seguinte questão: “quais são as plantas que devem receber um maior recurso para investimentos em monitoramento e proteção de equipamentos?”.

Com relação ao monitoramento de equipamentos, com certeza este tema será ainda mais valorizado nos próximos anos na busca de melhor performance para as indústrias petroquímicas. Um exemplo deste cenário está na recente aquisição da empresa Mtell pela Aspentech. A primeira é tida como pioneira no campo da manutenção prescritiva¹⁰, já a segunda é líder no desenvolvimento de softwares de análise e simulação de processos para empresas de processo contínuo.

Esta junção, dos dados de processo com os dados do equipamento, atrelados a um sistema de reconhecimento de padrões e aprendizado, tende a nortear boa parte dos investimentos futuros ligados a performance em plantas petroquímicas. Porém, estas iniciativas de vanguarda passam primeiramente pelo monitoramento dos equipamentos.

¹⁰ Manutenção prescritiva: sistema que prescreve o que deve ser feito antes da falha ocorrer (<http://mtell.com/>).

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

No avanço deste trabalho um aprofundamento maior nos critérios pode trazer um resultado mais exato, podendo conter aspectos ligados à localização dos equipamentos, quantidade de inventário total que pode vazar para a atmosfera, custos de instalação do sistema e as necessidades de atualização dos sistemas de monitoramento e proteção já existentes.

Sugere-se ainda, para trabalhos futuros, a continuidade da aplicação dos métodos multicritério de apoio à decisão em outros processos industriais e de manutenção. Processos estes que não estejam somente ligados à iniciativas de projeto, mas sim ligados ao cotidiano, como a análise dos planos de manutenção e a seleção de fornecedores de materiais, equipamentos ou serviços.

Apêndice 1 – Carta Convite e Explicativa da Pesquisa

Caro profissional,

Você está convidado para participar da elaboração de um novo método de priorização para investimentos em monitoramento de equipamentos.

A planta SPH da PE4 foi escolhida como piloto, não somente pela diversidade de equipamentos, mas também pela importância da mesma no contexto do polo petroquímico de Triunfo (maior capacidade de produção e maior inventário de produto na segunda geração).

Neste primeiro momento convido-o (a) para preencher a tabela abaixo, após reflexão do seguinte contexto:

“Tratando-se de investimento para monitoramento contínuo de equipamentos, atribua um valor de 0 a 10 para os equipamentos da planta SPH PE4.

Considere 10 como mais prioritário e 0 como o menos prioritário para a implantação.”

<u>Tag</u>	<u>Nota</u>	<u>Tag</u>	<u>Nota</u>	<u>Tag</u>	<u>Nota</u>	<u>Tag</u>	<u>Nota</u>
SA101		SP301A/B		SC700A/B		M501	
SP201		SC401		SMC701		M502	
SP202		SP402A/B		MC700A/B		Z502A/B	
SP200A/B		SP401A/B		SC901A/B		SS602A/B	
SC201		SC402A/B		SP921A/B		SS601A/B	
SC202		SP404A/B		SP931A/B		EX601A/B	
SC301A/B		SA401		SP941A/B		MEX601A/B	
SC302A/B		C501A/B/C		SP951A/B		SP1101A/B/C	
MC301A/B		SC702		SP600A/B		SY1101A/B/C	
MC302A/B		SC701		SMP600A/B		SC1201A/B	
SMC201		SMC202					

Para nossa pesquisa, favor responder as seguintes questões:

Formação: _____

Experiência de trabalho na planta SPH: _____

Áreas que atuou ou atua: _____

Cargo atual: _____

Muito obrigado pela sua participação,

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. T. **Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério**, 1a Edição. Ed. Atlas. ISBN: 978-85-224-8011-1. São Paulo, 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, Reliability and Maintenance Decision Analysis*, Vol 231, *International Series in Operations Research & Management Science*. Ed. Springer. ISBN 978-3-319-17968-1. 2015.

ALMEIDA, A. T.; LUGO, S. D. R.; SANTOS, V. A. P. A. **Decisão Multicritério Único de Síntese: Aplicação a Uma Compra de Tecnologia**. ENEGEP – XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção – Fortaleza CE, 2015. Disponível em <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_211_251_26676.pdf>. Acesso em: 04 novembro 2015.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO. V.J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Ed. 2. Vol 1. Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. ISBN: 9788521619215 Rio de Janeiro, 2010.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO. V.J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Ed. 2. Vol 2. Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. ISBN: 9788521621300 Rio de Janeiro, 2011.

BEGA, E. A.; DELMÉE, G. J.; COHN, P. E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V. S. **Instrumentação Industrial**. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP. Ed. Interciência. ISBN 85-7193-137-2. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

BEM-DAYA, M.; DUFFUAA, S.O.; RAOUF, A.; KNEZEVIC, J.; AIT-KADI, D. *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Springer-Verlag, London, 2009.

BENGTSSON, M. *Condition Based Maintenance Systems – An Investigation of Technical Constituents and Organizational Aspects*. Licentiate Thesis, Malardalen University, Eskilstuna, Sweden.

BERZINS, L.J. **Avaliação de Desempenho pelo AHP, Através do Superdecisions; Caso Inmetro**. Rio de Janeiro: Faculdades Ibmecc. Dissertação de Mestrado Profissionalizante apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração das Faculdades Ibmecc, 2009.

BRANS, J.; MARESCHAL, B. *Promethee Methods*. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. *Operations Research Management Science*. 2005. p. 163-195.

BUSATTO, T. **Metodologia Multicritério Para Priorização de Investimentos no Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFRGS. Porto Alegre, RS.

- CANCER, V.; MULEJ, M. *Multi-criteria Decision Making in Creative Problem Solving*. Kybernetes, v. 42, n. 1, p.67-81, 2013. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/03684921311295484>>. Acesso em: 24 fev. 2016.
- CARRETEIRO, R. P.; MOURA, C. R. S. **Lubrificantes e Lubrificação**. Makron Books – São Paulo SP, 2008.
- CARVALHO, F. C. V. S. P. M. **Avaliação de Risco – Estudo Comparativo Entre Diferentes Métodos de Avaliação de Risco em Situação Real de Trabalho**. 2007. Dissertação (Mestrado em Segurança do Trabalho). Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- CHIN, C.; DUCKSTEIN, L.; WYMORE, M.L. *Factory Automation Project Selection Using Multicriterion Q-Analysis*. Department of Systems and Industrial Engineering. University of Arizona. 1991. Tucson, Arizona. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/009630039190019J>>. Acesso em: 15 abril 2016.
- CRAWFORD, A.R. *The Simplified Handbook of Vibration Analysis*. Vol. 2. Computational Systems, Incorporated (CSI). Library of Congress Catalog Card Number: 92-72682. United States of America, 1992.
- EDWARDS, W.; BARRON, F.H. *SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement*. Organizational Behaviour and Human Decision Processes, V. 60, p. 306-325, 1994. Elsevier, 1994.
- ENSSLIN, L.; ROLIM, S.E.; ZAMCOPE, F.C. **Construção de um Modelo Para Avaliação da Sustentabilidade Corporativa: Um Estudo de Caso na Indústria Têxtil**. V. 19, n. 2, p. 303-321, Florianópolis SC, 2012. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v19n2/v19n2a06>>. Acesso em 04 novembro 2015.
- FRANCESCHI, A.; ANTONELLO, M. G. **Elementos de Máquinas**. UFSM – Universidade de Santa Maria. Santa Maria RS. 2014. Disponível em <http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos_mecanica/primeira_etapa/elementos_maquina.pdf>. Acesso em 30 outubro 2015.
- GARTNER, I.R. **Avaliação Ambiental de Projetos em Bancos de Desenvolvimento Nacionais e Multilaterais: Evidências e Propostas**. Brasília: Editora Universa, 2001.
- GOMES, L.F.M.; MOREIRA, A.M.M. **Da Informação à Tomada de Decisão: Agregando Valor Através dos Métodos Multicritério**. RECITEC, Recife, v. 2, n. 2, p. 117-139, 1998.
- GOMES, L.F.M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisão em cenários complexos**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2009.
- GONÇALVES, L.F. **Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Inteligente Embarcado**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, RS. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/32591/000786806.pdf?sequence=1>>. Acesso em 12 novembro 2015.

HALAMA, B. N. M. **Método Multicritério de Análise de Decisão: Simulação da Seleção de Estratégia de Abastecimento de Água em Indústrias de Petróleo**. UnB – Universidade de Brasília DF, 2014. Disponível em <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/17382>>. Acesso em: 04 novembro 2015.

FERNANDES, C. H. **Priorização de Projetos Hidrelétricos sob a Ótica Social – Um Estudo de Caso Utilizando Análise Custo/Benefício e Uma Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão – “MACBETH”**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, SC.

JUNIOR, A.M.S.; IRBER, F.M.V.F; LAVOR, O.P.; BARBOSA, A.C.L. **Utilização de Métodos Multicritérios para Escolha da Técnica de Recuperação Secundária de Reservatório de Petróleo**. XXXIV Encontro Nacional da Engenharia de Produção, 2014. Curitiba, PR. Disponível em http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2014_TN_STP_200_132_24926.pdf. Acesso em 05 novembro 2015.

KARDEC, A.; NASSIF, J. **Manutenção – Função Estratégica**. Ed. QualityMark. ISBN 8573033231, 9788573033236. Rio de Janeiro, 1998.

KEENEY, R.L.; RAIFFA, H. *Decision with Multipli Objectives: Preferences and Value Trade-offs*. New York, John Wiley, 1976.

LEITE, I. M. S.; FREITAS, F.F.T. **Análise Comparativa dos Métodos de Apoio Multicritério a Decisão: AHP, ELECTRE e PROMETHEE**. XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Bento Gonçalves, RS. Outubro, 2012. Disponível em <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2012_TN_STP_162_944_20906.pdf>. Acesso em 04 novembro 2015.

LEBOLD, M.; REICHARD, K.; BOYLAN, D. *Utilizing DCOM in an Open System Architecture Framework for Machinery Monitoring and Diagnostics*. 2003. IEEE, DOI: 10.1109/AERO.2003.1235237. *Aerospace Conference, pages 1227-1236. Irwine, USA.*

MAGALHÃES, E. S. **Um Modelo Computacional Baseado em Análise de Decisão Multicritério para Priorização na Alocação de Recursos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Unisinos, São Leopoldo-RS.

MARÇAL, R.F.M.; SUSIN, A.A. **Detectando Falhas Incipientes em Máquinas Rotativas**. 2005. Revista Gestão Industrial. V.01, n. 021: pp.083-092, 2005. ISSN 1808-0448. D.O.I.: 10.3895/S1808-04482005000200007.

MATTOS, E. E.; FALCO, R. **Bombas Industriais**. 2. Ed, Editora Interciência. ISBN: 85-7193-004-X. Rio de Janeiro, 1998.

MEIRELLES, C. L. A.; GOMES, L. F. A. M. **O Apoio Multicritério à Decisão Como Instrumento de Gestão do Conhecimento: Uma Aplicação à Indústria de Refino de Petróleo**. Vol.29 no.2 Rio de Janeiro May/Aug. 2009. ISSN 1678-5142. Disponível em <http://scielo.br/scielo.php?pid=S0101-74382009000200011&script=sci_arttext>. Acesso em 3 novembro 2015.

MELCONIAN, S. **Elementos de Máquinas**. 9ª ed. Revisada – Érica. São Paulo SP, 2008.

- MENNA, A. R. **Detecção de Falhas em Mancais de Rolamento por Análise de Vibrações em Banda Larga: Um Caso Prático de Aplicação em uma População de Equipamentos Rotativos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - PROMEC), UFRGS, Porto Alegre-RS.
- NETO, W. G.; GAMA, E. J.; PEREIRA, H. J. S.; MACHADO, E.C. **Manutenção Preditiva Através de Análises em Equipamentos Rotativos Monitorado por Sensores de Vibração**. Laboratório de Instalações Elétricas, Depto. Engenharia de Controle e Automação, Instituto de Estudos Superiores da Amazônia, 2012. Disponível em <http://www3.iesampa.edu.br/ojs/index.php/controle_auto/article/viewFile/960/644>. Acesso em 11 nov. 2015.
- NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas – Uma Abordagem Integrada**. 4. Ed. Bookman. ISBN: 979-85-8260-022-1. Porto Alegre, 2011.
- OTANI, M.; MACHADO, W. V. **A Proposta de Desenvolvimento de Gestão da Manutenção Industrial na Busca da Excelência ou Classe Mundial**. Universidade Federal do Paraná, v.04 n.02. ISSN 1804-0448. Campus Ponta Grossa, Paraná, 2008. Disponível em <<http://www.mantenimentomundial.com/sites/mm/notas/proposta.pdf>>. Acesso em: 03 outubro 2015.
- PAULO, W. L.; FERNANDES, F. C., RODRIGUES, L. G. B., EIDT, J. **Riscos e Controles Internos: Uma Metodologia de Mensuração dos Níveis de Controle de Riscos Empresariais**. 6º Congresso USP de Controladoria e Contabilidade, São Paulo, SP, 2007. Disponível em <www.scielo.br/pdf/rcf/v18n43/a05v1843>. Acesso em: 8 julho 2016.
- SHIGLEY, J. E. **Elementos de Máquinas**. LTC 3rd. ed – Rio de Janeiro RJ, 1984.
- SHIN, J.; JUN, H. **On Condition Based Maintenance Policy**. Journal of Computational Design and Engineering, ELSEVIER, January, 2015. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2288430014000141>>. Acesso em: 3 novembro 2015.
- SIMEÓN, E.J.A. **Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial no Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Baseada em Condição**. 2008. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Universidade de Brasília, DF.
- SMITH, S.; ORSONI, A. **Multicriteria Decision Support for Industrial Plant Re-Engineering**. 2007. IEEE. Disponível em <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4295503&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4295503>. Acesso em: 10 abril 2016.
- SOARES, Sebastião Roberto. **Análise Multicritério como Instrumento de Gestão Ambiental**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- THORMANN, F.M. **Análise Multicriterial na Avaliação de Projetos de Investimentos Industriais. Estudo de Múltiplos Casos no Estado do RS**. 2013. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Negócios) – Unisinos. São Leopoldo, RS.

THORSEN, O. V. *A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminal, and Oil Refineries*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 5. September/October 1995.

VILAS BOAS, C.L. **Análise da Aplicação de Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MMAD) na Gestão de Recursos Hídricos**. UnB/FACH – Universidade de Brasília DF, 2004. Disponível em <<http://www.cprm.gov.br/rehi/simposio/go/Analise%20da%20Aplicacao%20de%20Metodos%20Multicriterios%20de%20Apoio%20a%20Decisao%20na%20Gestao%20de%20Recursos%20Hidricos.pdf>>. Acesso em: 12 novembro 2015.

VILAS BOAS, C.L. **Modelo Multicritérios de Apoio à Decisão Aplicado ao Uso Múltiplo de Reservatórios: Estudo da Barragem do Ribeirão João Leite**. 2006. Dissertação (Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente) – Universidade de Brasília (UNB), Brasília-DF. Disponível em <<http://www.ceemaunb.com/dissertacoes2015/079.pdf>>. Acesso em: 14 setembro 2016.

WEIDLISCH, F. **Avaliação da Lubrificação de Rolamentos de Motores Elétricos Por Ultrassom**. UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre RS, 2009. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17638/000721771.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 04 novembro 2015.

YA'CUBSOHN, R. V. *El Diagnostico de Fallas por Análisis Vibratorio*. Die Techik Ltda. São Paulo, 1983.