

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM GERÊNCIA DE MANUTENÇÃO**

FELIPE DE LIMA FELCAR

**APLICAÇÃO DA LÓGICA *FUZZY* NA AVALIAÇÃO DA
CONFIABILIDADE HUMANA EM ENSAIOS DE ANÁLISE
VIBRACIONAL**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2018

FELIPE DE LIMA FELCAR

**APLICAÇÃO DA LÓGICA *FUZZY* NA AVALIAÇÃO DA
CONFIABILIDADE HUMANA EM ENSAIOS DE ANÁLISE
VIBRACIONAL**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gerência de Manutenção, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

CURITIBA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Especialização em Gerência de Manutenção



TERMO DE APROVAÇÃO

APLICAÇÃO DA LÓGICA *FUZZY* NA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE HUMANA EM ENSAIOS DE ANÁLISE VIBRACIONAL

por

FELIPE DE LIMA FELCAR

Esta monografia foi apresentada em 10 de agosto de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Gerência de Manutenção, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Carlos Henrique Karan Salata,
Eng.
Membro Titular da Banca - UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Trabalho dedicado aos meus pais, Sandra Maria de Lima Martins Felcar e Cristovam Martins Felcar, pelo suporte sempre presente em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares pelo incentivo e apoio incondicional.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Rodrigues, pelo apoio, orientação e ensino dado durante a especialização, e realização deste estudo.

A empresa RPM Sul e seus especialistas pela colaboração necessária para execução deste trabalho, em especial ao Rodney Luis Vissoci Junior.

Aos meus amigos pelo companheirismo nesta caminhada durante minha formação.

RESUMO

FELCAR, Felipe de Lima. **APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE HUMANA EM ENSAIOS DE ANÁLISE VIBRACIONAL**. 2018. 82p. Monografia (Especialização em Gerência de Manutenção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O presente trabalho aplica uma metodologia baseada em lógica *fuzzy* para a mensuração da confiabilidade humana em ensaios de análise vibracional. A partir da avaliação de 53 diferentes fatores de performance humana por parte de especialistas na área, foi possível estabelecer um padrão de qualidade para o ensaio. A partir do padrão de qualidade, foi possível estimar o nível de confiabilidade de cinco inspetores em seus respectivos ambientes de trabalho. Uma árvore de falhas foi construída para o procedimento de coleta, identificando a probabilidade de erro humano e interdependência das tarefas. A metodologia avaliada mostrou-se eficaz, adaptável e de fácil reprodutibilidade para a mensuração da confiabilidade humana sob diversos aspectos.

Palavras-chave: Confiabilidade humana. Análise vibracional. Lógica *Fuzzy*.

ABSTRACT

FELCAR, Felipe de Lima. **A FUZZY APPROACH TO EVALUATION THE HUMAN RELIABILITY IN THE VIBRATION ANALYSIS TEST.** 2018. 82p. Monograph (Specialization in Maintenance Management) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The present study applies a methodology based on *fuzzy* logic for the measurement of human reliability in vibrational analysis tests. From the evaluation of 53 different factors of human performance by experts in the field, it was possible to establish a quality standard for the test. From the quality standard, it was possible to estimate the reliability level of five inspectors in their respective work environments. A fault tree was constructed for the collection procedure, identifying the probability of human error and interdependence of tasks. The methodology evaluated was effective, adaptable and easily reproducible for the measurement of human reliability in several aspects.

Key-words: Human reliability. Vibration analysis. *Fuzzy* logic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Movimento harmônico simples	22
Figura 2 – Exemplo do uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT)	23
Figura 3 – Resposta em função do tipo de fixação	26
Figura 4 – Método ATHEANA	35
Figura 5 – Método CREAM	36
Figura 6 – Exemplo de universo de discurso <i>Fuzzy</i>	39
Figura 7 – Exemplo de união <i>Fuzzy</i>	40
Figura 8 – Exemplo de interseção <i>Fuzzy</i>	41
<i>Figura 9 – Exemplo de defuzzificação por centro de gravidade</i>	42
Figura 10 – Representação dos pesos de cada especialista	50
Figura 11 – Correlação entre variáveis linguísticas, fator de desempenho humano – FDH e confiabilidade humana	52
Figura 12 – Representação da função de pertinência do atributo 2.4	57
Figura 13 – Função de pertinência para a variáveis “probabilidade de falha” e “nível de dependência da tarefa e sua precedente imediata”	70
Figura 14 – Função de pertinência para a variável “grau de transtorno nas tarefas subsequentes”.	71
Gráfico 1 – Grau de inclusão do inspetor 1 no padrão de qualidade.	64
Gráfico 2 – Grau de inclusão do inspetor 2 no padrão de qualidade.	64
Gráfico 3 – Grau de inclusão do inspetor 3 no padrão de qualidade.	65
Gráfico 4 – Grau de inclusão do inspetor 4 no padrão de qualidade.	66
Gráfico 5 – Grau de inclusão do inspetor 5 no padrão de qualidade.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conjunto de fatores de desempenho humano – FDH.....	46
Tabela 2 – Matriz de classificação do especialista	48
Tabela 3 – Cálculo do peso do especialista	50
Tabela 4– Termos linguísticos e respectivos números <i>fuzzy</i>	51
Tabela 5 – Matriz de interseção das opiniões <i>fuzzy</i>	53
Tabela 6 – Matriz de união das opiniões <i>fuzzy</i>	53
Tabela 7 – Opiniões dos especialistas para o atributo 2.4	54
Tabela 8 – Matriz de interseção das opiniões <i>fuzzy</i> para o atributo 2.4	54
Tabela 9 – Matriz de união das opiniões <i>fuzzy</i> para o atributo 2.4	55
Tabela 10 – Matriz de concordância das opiniões <i>fuzzy</i> para o atributo 2.4.....	55
Tabela 11– Concordância relativa – CR, grau de concordância relativa – GCR e coeficiente de consenso – CCE	56
Tabela 12 – Coeficiente de consenso – CCE, opiniões e número <i>fuzzy</i> resultante ..	57
Tabela 13– Representação <i>fuzzy</i> dos atributos de confiabilidade humana	58
Tabela 14 – Normalização e classificação dos atributos de confiabilidade humana .	60
Tabela 15 – Termos linguísticos e respectivos graus de pertinência.....	62
Tabela 16 – Avaliação dos ambientes por parte dos inspetores.....	62
Tabela 17 – Grau de desempenho e inclusão do padrão de qualidade	67
Tabela 18– Procedimento de análise de vibração	68
Tabela 19 – Termos linguísticos e respectivos números <i>fuzzy</i> para a variáveis “probabilidade de falha” e “nível de dependência da tarefa e sua precedente imediate”	69
Tabela 20 – Termos linguísticos e respectivos números <i>fuzzy</i> para a variável “grau de transtorno nas tarefas subsequentes”.	70
Tabela 21– Avaliação do especialista quanto à “probabilidade de falha” e “nível de dependência da tarefa e sua precedente imediata”	71
Tabela 22 – Representação <i>fuzzy</i> da “probabilidade de falha”	72
Tabela 23 – Representação <i>fuzzy</i> do “nível de dependência da tarefa e sua precedente imediata”	73
Tabela 24 – Matriz <i>fuzzy</i> referente ao grau de transtorno nos itens subsequentes.	74
Tabela 25 – Representação das árvores de falhas para as atividades.....	75
Tabela 26 – Representação <i>fuzzy</i> da probabilidade de erro do inspetor	77

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ASEP	Accident Sequence Evaluation Program HRA Procedure
ATHEANA	A Technique for Human Event Analysis
CREAM	Cognitive Reliability and Error Analysis Method
FDH	Fator de Desempenho Humano
FFT	Transformada Rápida de Fourier
SLIM	Succes Likelihood Index Methodology
THERP	Technique for Human Error Prediction

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	JUSTIFICATIVA	17
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2.	ANÁLISE VIBRACIONAL	21
2.1	FREQUÊNCIA E AMPLITUDE	22
2.2	DOMÍNIO DO TEMPO E FREQUÊNCIA	23
2.3	DESLOCAMENTO, VELOCIDADE E ACELERAÇÃO	24
2.4	TRANSDUTORES.....	24
2.4.1	Medidores de deslocamento sem contato	25
2.4.2	Sensores de velocidade	25
2.4.3	Acelerômetros	25
2.4.4	Fixação e pontos de medição.....	26
2.4.5	Certificação profissional	26
2.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	27
3.	CONFIABILIDADE HUMANA	29
3.1	ERRO HUMANO	29
3.2	FATORES DE DESEMPENHO HUMANO.....	30
3.3	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA	31
3.3.1	Technique for Human Error Prediction (THERP)	32
3.3.2	Accident Sequence Evaluation Program HRA Procedure (ASEP)	33
3.3.3	Success Likelihood Index Methodology (SLIM)	33
3.3.4	A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA)	34
3.3.5	Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)	35
3.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	36
4.	LÓGICA FUZZY	38
4.1	CONJUNTOS FUZZY.....	39
4.2	VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS.....	39
4.3	OPERAÇÕES.....	40
4.3.1	União.....	40
4.3.2	Interseção	41
4.4	DEFUZZIFICAÇÃO	41
4.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	42
5.	METODOLOGIA DA TÉCNICA APLICADA	43
5.1	LOCAL DE APLICAÇÃO	43
5.2	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	44

6.	DESENVOLVIMENTO	45
6.1	AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE HUMANA	45
6.1.1	Identificação dos fatores de desempenho humano.....	46
6.1.2	Escolha dos especialistas	48
6.1.3	Grau de importância do especialista.....	48
6.1.4	Escolha dos termos linguísticos	50
6.1.5	Escolha do intervalo numérico.....	51
6.1.6	Aplicação dos questionários	52
6.1.7	Tratamento dos dados coletados	53
6.1.8	Padrão de qualidade do ensaio	57
6.1.9	Cálculo do grau de atendimento.....	62
6.1.10	Grau de inclusão no conjunto <i>fuzzy</i>	67
6.2	ESTUDO DO PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	68
6.2.1	Construção do procedimento.....	68
6.2.2	Escolha dos termos linguísticos	69
6.2.3	Escolha do intervalo numérico.....	70
6.2.4	Aplicação dos questionários	71
6.2.5	Tratamento dos dados.....	72
6.2.6	Construção da matriz <i>fuzzy</i> dos graus de transtorno	74
6.2.7	Construção da árvore de falha	75
6.2.8	Cálculo da probabilidade de falha	76
6.3	ANÁLISE GERAL	78
7.	CONCLUSÃO	80
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
	REFERÊNCIAS	82

1. INTRODUÇÃO

Em virtude da elevada automatização e complexidade das instalações fabris atuais (Xenos, 1998) e da constante exigência por volumes de produção e qualidade assegurada, a função da manutenção é indispensável à produção e corresponde a um dos pilares da atividade industrial.

Pequenas interrupções no sistema produtivo, segundo Xenos (1998), podem gerar grandes prejuízos financeiros. Desta forma, a manutenção assume uma função estratégica dentro da empresa, pois é responsável por manter a disponibilidade dos ativos.

De acordo com a NBR 5462-1994, a definição de manutenção corresponde à “combinação de ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

Desta forma, a gestão da manutenção deve utilizar de todos os artifícios disponíveis para minimizar os prejuízos financeiros, em segurança ou meio ambiente; decorrentes de paradas não planejadas. Para tal, deve-se prevenir a ocorrência da falha.

No caso de equipamentos onde a ocorrência de falhas é independente do tempo de operação, ou seja, são aleatórias; a abordagem mais indicada é a manutenção preditiva ou baseada na condição.

A manutenção preditiva consiste na monitoração, por inspeção e medições, das condições do equipamento até que sejam atingidos limites de deterioração predeterminados, o que poderá determinar a desmontagem para reforma ou troca de peças e componentes. Estas ações levam em conta que a maioria das falhas apresenta algum tipo de sinal que indica o provável instante da sua ocorrência. A detecção prematura destes sinais contribui para evitar falhas inesperadas, pois se torna possível prever o momento mais oportuno de trocar ou reformar as peças ou componentes deteriorados. Isto resulta na otimização dos custos de manutenção. (XENOS, 1998, p. 143).

Moubray (1997) descreve as técnicas de monitoramento de condições como versões altamente sensíveis dos sentidos humanos, projetadas para detectar sintomas específicos ou potenciais efeitos da falha, como: temperatura, vibração, etc.

No caso da vibração em equipamentos mecânicos, que contém partes móveis, o monitoramento é realizado através da análise vibracional. Neste

procedimento, segundo Moubray (2007), um técnico ou inspetor é responsável por definir quais características da vibração serão mensuradas, quais dispositivos de medição devem ser utilizados e a técnica adequada para interpretação do sinal coletado.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA

Moré (2004) cita que a tecnologia moderna criou a tendência de produzir equipamentos cada vez mais caros, sofisticados, complexos e de maior capacidade. Desta forma, o comportamento não confiável destas máquinas tornou-se cada vez mais crítico, levando à crescente busca por maiores níveis de confiabilidade.

Uma das técnicas de aumento da confiabilidade de equipamentos é a correta prática da gestão da manutenção. Sobretudo, a execução de medidas proativas, como a manutenção preditiva. Contudo, deve-se observar que no ensaio preditivo se faz necessária a atuação de um inspetor devidamente qualificado para a realização da tarefa. Desta forma, ao determinar a confiabilidade do ensaio em questão, é necessário ponderar a confiabilidade intrínseca do equipamento de monitoramento e a confiabilidade humana do operador.

A fim de melhorar a confiabilidade destes processos é imprescindível fazer um estudo da confiabilidade humana. Historicamente o fator humano tem sido um item importante nos acidentes tecnológicos devido a falhas durante o projeto de equipamentos, durante a calibração, execução e/ou interpretação de procedimentos orais ou escritos, fatores organizacionais e, ainda, outras falhas. Mesmo assim, quando a questão é aumento de rendimentos e de elevação do fator operacional, geralmente as estratégias de gestão priorizam a aplicação de recursos em estudos de confiabilidade de equipamentos e de otimização de processos através da automação em tempo real. De forma geral são desenvolvidas estas linhas para depois se adaptar o homem ao processo quando na realidade dever-se-ia pesquisar a confiabilidade humana para, na medida do possível adaptar o equipamento e o meio – ambiente ao homem. (MORE, 2004, p. 14)

Muitas causas de falha, de acordo com Xenos (1998), são decorrentes de atitudes e habilidades de pessoas ao não cumprir procedimentos padrão de operação e manutenção. Desta forma, ao afetar a confiabilidade e segurança dos equipamentos, o conceito de confiabilidade humana deve ser objeto de estudo.

A ocorrência do erro humano, segundo Szwarcman (2009), é decorrente, principalmente, da complexidade da tarefa a ser realizada e situações que favorecem o erro. Desta forma, tarefas que requisitam aspectos que superam as limitações humanas de percepção, atenção, memória estão sujeitas ao erro. Da mesma forma, situações como espaço de trabalho inadequado, treinamento insuficiente, e supervisão falha também acarretam ao erro. Além disso, fatores individuais, como stress ou inexperiência, também aumentam a possibilidade da ocorrência da falha humana.

Assim sendo, pode-se caracterizar o erro humano como um fenômeno de difícil compreensão e complexa predição. Apesar da exigência de treinamento e certificação do inspetor de análise vibracional, a ocorrência de erros é ainda frequente. Por que o inspetor erra? Quão confiável é a parcela humana durante a inspeção? Quais fatores influenciam o desempenho humano durante o ensaio?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estudo de confiabilidade humana baseado na Lógica *Fuzzy* em atividades de manutenção preditiva, em específico, análise vibracional.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para a concretização do objetivo geral, o trabalho deve atender os seguintes objetivos específicos, baseados no trabalho de Moré (2009):

- Determinar o conjunto de Fatores de Desempenho Humano – FDH que influenciam a confiabilidade humana em ensaios de análise vibracional;
- Selecionar comitê de especialistas, com elevada experiência, para avaliação dos FDH;
- Estabelecer a relevância hierárquica a respeito da opinião de cada especialista, baseado em sua experiência profissional, formação teórica, etc;

- Escolher os valores linguísticos para avaliação dos FDH associados à conjuntos *FUZZY*;
- Determinar graus de influência de cada FDH com base na opinião dos especialistas;
- Determinar o grau de atendimento de cada FDH a partir do julgamento dos operadores;
- Obter o índice de qualidade para cada FDH a partir da combinação da opinião de importância do FDH, relevância do especialista e consenso do especialista;
- Determinar o grau de atendimento do FDH para cada operador;
- Determinar o índice de confiabilidade humana global para cada operador.

1.3 JUSTIFICATIVA

Moubray (1997) cita a rápida conscientização da extensão dos prejuízos causados por uma falha de um equipamento nas questões de segurança, meio ambiente e qualidade do produto. Também é citada a crescente pressão pelo aumento da disponibilidade da planta e contenção de custos.

O aumento da disponibilidade está diretamente relacionado ao número de intervenções realizadas no equipamento. Desta forma, realizar a manutenção de um ativo em momento inadequado, pode acarretar em lucros cessantes para a produção além dos custos de mão de obra e sobressalentes dispendidos.

A manutenção preditiva tem como objetivo a otimização do intervalo entre paradas do equipamento através do monitoramento das condições do equipamento. Contudo, para atingir este objetivo, as informações fornecidas sobre o diagnóstico do equipamento devem ser precisas.

Para garantir a acurácia do resultado da inspeção, deve-se focar esforços na confiabilidade humana do inspetor. Uma vez que este é responsável pela definição, execução e análise do processo de inspeção. O presente estudo busca determinar a influência de diferentes parâmetros na confiabilidade do ensaio, como: qualificação, ergonomia, ambiente, aspectos psicológicos, tarefa, etc.

Uma vez identificados os fatores, tarefas proativas podem ser realizadas visando a resolução dos problemas identificados e otimização do processo como um

todo. Desta forma, garantindo a confiabilidade das informações para tomada de decisão o que resultaria em uma gestão mais assertiva propiciando melhores resultados operacionais e financeiros.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

De acordo com Silva e Menezes (2005), a natureza da pesquisa pode ser classificada como aplicada. Ou seja, objetiva gerar conhecimentos de aplicação prática e solução de problemas específicos. A aplicação prática é dada pela mensuração da confiabilidade humana nos ensaios de análise vibracional. O problema específico corresponde ao diagnóstico dos principais fatores de performance que influenciam o resultado da confiabilidade do operador no ensaio analisado.

A forma de abordagem da pesquisa, segundo Silva e Menezes (2005), é quantitativa. Desta forma, busca traduzir em números informações e opiniões com o objetivo de classificá-las e analisá-las. O diagnóstico da confiabilidade será obtido através da lógica *FUZZY*. Esta permite o tratamento de informações coletadas de caráter impreciso, vaga ou em linguagem natural e tratá-las para ser obtido um resultado numérico, confiabilidade humana, neste caso.

O objetivo da pesquisa, segundo Gil (1991 apud Silva e Menezes, 2005), é de caráter descritivo. O trabalho visa descrever a confiabilidade humana em termos de características e variáveis que influenciam este fenômeno. Ou seja, identificar os fatores de performance e classificá-los de acordo com sua relevância baseada na opinião de especialistas.

Os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho, baseado em Gil (1991 apud Silva e Menezes, 2005) são: pesquisa bibliográfica, levantamento, estudo de caso, pesquisa-ação e pesquisa participante.

Primeiramente, o referencial teórico será apresentado abordando as temáticas de manutenção preditiva, confiabilidade humana, análise vibracional, e lógica *fuzzy*. Em seguida, um questionário abordando os principais fatores de desempenho identificados na literatura disponível sobre sistemas rotativos, procedimento de inspeção, normas e confiabilidade humana.

Este questionário será primeiramente avaliado por um grupo de especialistas visando assegurar a relevância dos questionamentos e sua influência na

confiabilidade humana, baseado na experiência profissional e teórica do especialista. A validação do questionário será realizada a partir de discussões referentes à preparação, execução, ambiente e qualificação durante a realização do ensaio em campo.

Posteriormente, o questionário revisado será respondido por um grupo de especialistas. As respostas serão processadas de acordo com o grau de importância de cada especialista, ou seja, baseado em sua experiência profissional, formação, etc.; e, então serão atribuídos níveis de importância para cada atributo avaliado na confiabilidade humana.

Finalmente, o questionário poderá ser aplicado em uma indústria na região de Curitiba para verificação prática da metodologia desenvolvida. Esta etapa é opcional, pois depende da disponibilidade de interessados para aplicação do estudo em campo.

Por ser um estudo teórico, não existe necessidade de um local específico para realização. As dificuldades envolvem a aplicação da lógica *FUZZY*, colaboração de um grupo de especialistas e encontrar uma empresa interessada para realização de um estudo de caso.

Os resultados esperados são a comprovação da influência da confiabilidade humana na confiabilidade do processo de inspeção. Isto é relevante visto que grandes investimentos são realizados em novas tecnologias e instrumentos, enquanto a qualificação ou condições de trabalho do inspetor são negligenciadas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia é constituída de mais quatro capítulos, sendo abordados os conteúdos descritos a seguir.

Nos capítulos 2, 3 e 4 são realizadas revisões bibliográficas a respeito dos seguintes temas: confiabilidade humana, análise vibracional e lógica *FUZZY*. Com base nestes conceitos será apresentada a metodologia proposta para a execução do trabalho.

No capítulo 5 será abordada a metodologia aplicada no trabalho, detalhando a integração das diferentes áreas de conhecimento abordadas nas revisões bibliográficas.

No capítulo 6 será apresentado o desenvolvimento do estudo com base no referencial apresentado nos capítulos anteriores. Nesta seção está contido o desenvolvimento do questionário, sua validação por especialistas, determinação de grau de importância dos fatores de performance, aplicação em campo, desenvolvimento do processamento através da lógica *FUZZY* e resultados obtidos.

No capítulo 7 o trabalho é concluído. É apresentada uma síntese dos resultados e conclusões obtidas. Além disso, são enumeradas as dificuldades encontradas no decorrer do processo de pesquisa e também sugestões de trabalhos futuros sobre a mesma temática.

2. ANÁLISE VIBRACIONAL

Neste capítulo será realizada a fundamentação teórica dos tópicos que envolvem a análise vibracional. Serão abordados conceitos como a definição de vibração, a instrumentação necessária para coleta de dados e certificações existentes na área. Através destes conceitos, será possível definir posteriormente os fatores que impactam a performance do inspetor e construção do procedimento de coleta de dados.

De acordo com Scheffer (2004), a análise vibracional é amplamente utilizada para determinar as condições físicas e de operação de um equipamento. Sendo uma das vantagens desta abordagem a identificação precoce de problemas, evitando assim uma parada não planejada. Outra possível abordagem da análise vibracional é na aceitação de serviços de manutenção. Ou seja, torna-se possível verificar se a instalação de rolamentos, engrenagens, alinhamento ou balanceamento de eixos foram realizados de forma satisfatória.

Marçal (2000) define máquinas, em geral, como elementos mecânicos complexos. Os componentes ao sofrerem excitação podem oscilar, e, esta oscilação é transmitida aos demais componentes do sistema. Como resultado é gerado um complexo sistema de frequências característico de cada equipamento, ou, assinatura de vibração.

Segundo Moubrey (2007), ao alterar as características de um componente, seja por desgaste ou trinca, uma nova característica de vibração é adicionada ao sistema. A essência da análise de vibração é detectar e analisar estes novos modos de vibração a partir da análise espectral da vibração do equipamento como um todo. Este procedimento que permite identificar a frequência de vibração de cada componente individualmente.

Scheffer (2004) cita as principais causas de excesso de vibração em equipamentos mecânicos:

- Desbalanceamento de peças rotativas
- Desalinhamento de acoplamentos e rolamentos
- Eixos deformados
- Engrenagens e rolamentos gastos ou danificados
- Correias e correntes danificadas
- Variações de torque

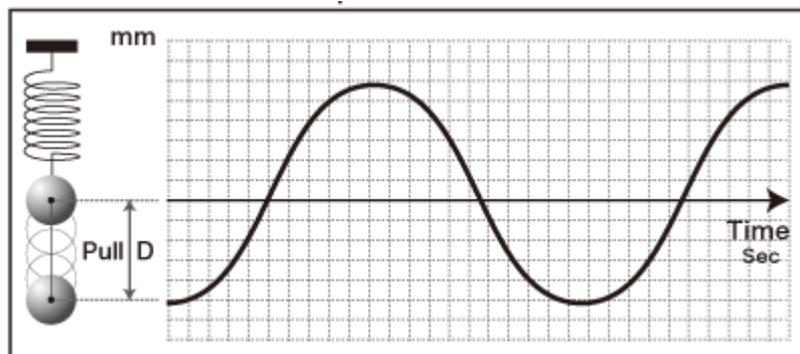
- Forças eletromagnéticas
- Forças aerodinâmicos
- Falta de rigidez;
- Atrito
- Ressonância

Marçal (2000) descreve que em condições normais de funcionamento a amplitude máxima da vibração é determinada e conhecida. Então, ao realizar a medição no equipamento é possível identificar o componente e o tipo de defeito gerado. Desta forma, a condição ou estado de um equipamento pode ser mensurado.

2.1 FREQUÊNCIA E AMPLITUDE

Scheffer (2004) define vibração como o movimento da máquina ou componente integrante para frente ou trás em relação de uma posição de repouso. O exemplo clássico para caracterizar este movimento é a aplicação de uma força em um sistema massa mola, como o demonstrado na figura 1. A massa suspensa oscilará em torno da posição inicial, descrevendo uma trajetória em relação ao tempo na forma de uma função senoidal. Este movimento é chamado de harmônico e periódico.

Figura 1 – Movimento harmônico simples



Fonte: adaptado de IMV CORPORATION (2018).

A frequência do movimento corresponde ao inverso do período do ciclo descrito pela onda. Ou seja, descreve o número de repetições do movimento em uma determinada unidade de tempo. A notação utilizada no sistema internacional corresponde ao Hertz, ou, ciclos por segundo.

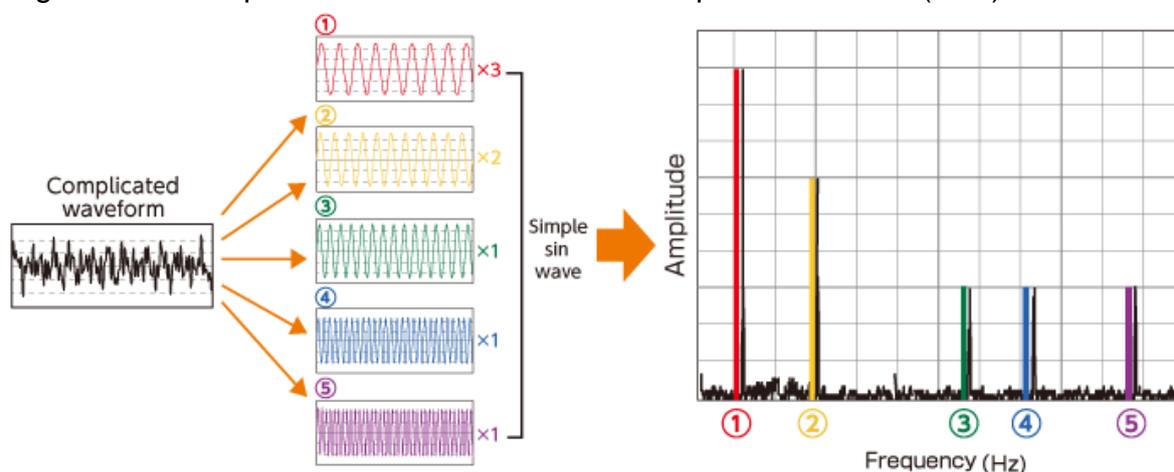
A amplitude corresponde ao deslocamento da massa em relação à linha referencial, ou, posição de equilíbrio. A mensuração da amplitude é uma boa indicação

da energia contida na onda, ou seja, é proporcional à severidade da vibração analisada.

2.2 DOMÍNIO DO TEMPO E FREQUÊNCIA

Segundo Vissoci (2016), a forma de onda corresponde à representação do sinal da vibração no domínio do tempo, ou seja, representa a oscilação do sistema em função do tempo. Em razão de existirem inúmeros componentes em uma máquina, o sinal capturado é resultante da combinação de diferentes ondas. Desta forma, analisar a forma de onda é um processo complexo e muitas vezes inviáveis. Uma das exceções é a identificação de eventos singulares, como impactos.

Figura 2 – Exemplo do uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT)



Fonte: adaptado de IMV CORPORATION (2018).

Utilizando-se da Transformada Rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform) é possível exibir o sinal de vibração no domínio da frequência, exibindo bandas espectrais. Este tratamento é necessário em vista da excessiva quantidade de informação exibida no domínio do tempo. Através da mudança de domínio, é possível filtrar o sinal capturado de modo a evitar a superposição e repetições de amplitudes no sinal. Na figura 2, é possível compreender o funcionamento da FFT, a esquerda temos o sinal complexo em função do tempo, ao centro a decomposição do sinal em ondas de diferentes frequências e a direita o espectro de frequência resultante da FFT.

2.3 DESLOCAMENTO, VELOCIDADE E ACELERAÇÃO

Moubray (2007) caracteriza a vibração a partir de três grandezas que passíveis de serem mensuradas, são elas: deslocamento, velocidade e aceleração. Um importante processo na análise vibracional é a escolha da grandeza a ser medida e o instrumento a ser utilizado.

Marçal (2000) define deslocamento como a distância de afastamento, em metros, de uma massa em função de sua posição de repouso. O movimento de vibração de um elemento pode ser descrito como uma função senoidal em função do tempo, também conhecido como movimento harmônico puro. Esta é a forma mais básica de definir uma vibração em função do tempo.

Velocidade, mensurada em metros por segundo, é definida como a taxa de variação do deslocamento em função do tempo, ou seja, é obtida a partir da derivada da função que descreve o deslocamento. Da mesma forma, a aceleração corresponde a taxa de variação da velocidade em função do tempo, e pode ser obtida a partir da derivada segunda do deslocamento no tempo.

Scheffer (2004) correlaciona a grandeza a ser mensurada em função da frequência do equipamento a ser analisada a condição. Em geral, a medição do deslocamento é mais sensível para baixas frequências, abaixo de 10 Hz. Em frequências intermediárias, entre 10 e 1000 Hz, a velocidade oferece uma melhor indicação da severidade da vibração. Por fim, para frequências elevadas, acima de 1000 Hz, a aceleração se torna o único indicador confiável para avaliação da condição do equipamento.

2.4 TRANSDUTORES

Scheffer (2004) define transdutor como um dispositivo que converte um tipo de energia, neste caso vibração, em um diferente tipo de energia, comumente uma corrente elétrica ou voltagem. Cada tipo de transdutor possui uma aplicação específica devido à suas limitações. Desta forma, a correta escolha do equipamento é uma importante consideração durante o processo de análise vibracional.

2.4.1 Medidores de deslocamento sem contato

Marçal (2000) descreve o medidor de deslocamento como um sistema compreendido de um transdutor, um cabo de extensão e um oscilador/demulador. O transdutor é excitado à uma frequência em torno de 1500 Hz, e ao ser posicionado próximo a um material condutor acarreta na geração de correntes de *eddy* na superfície do material. Essa transmissão de energia altera a modulação do sinal, desta forma é possível analisar este sinal e mensurar a vibração do componente mecânico. É importante ressaltar que este método é sensível a variações na superfície do eixo (crateras ou excentricidade), distância de montagem e interferência lateral devido a outros sensores.

2.4.2 Sensores de velocidade

Marçal (2000) distingue os sensores de velocidade em duas diferentes categorias: os mecânicos e os piezoelétricos. O sensor mecânico corresponde a um sistema massa mola constituído de uma bobina de cobre e um ímã permanente. A oscilação do sistema um campo magnético que é convertido em tensão. Este tipo de transdutor possui limitações quanto a temperatura, frequência de aplicação, confiabilidade mecânica e orientação de montagem.

Já os sensores piezoelétricos correspondem a acelerômetros, no qual o sinal gerado é integrado por um circuito a fim de obter dados referentes à velocidade. Desta forma estes possuem maior confiabilidade, estabilidade e maior faixa de aplicação.

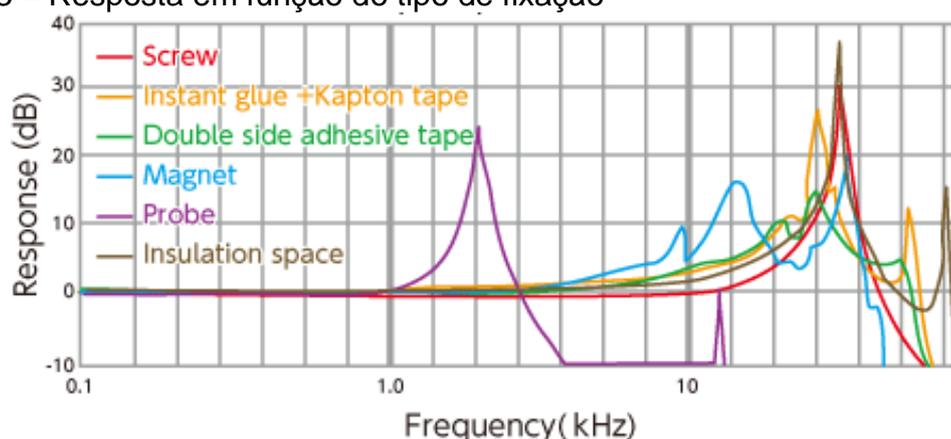
2.4.3 Acelerômetros

De acordo com Marçal (2000), os acelerômetros correspondem ao principal transdutor utilizado para avaliação de vibração devido à sua ampla disponibilidade e variabilidade de especificações. As vantagens de se utilizar este equipamento são: elevada frequência de resposta, fidelidade na leitura de forças e choques, e, possibilidade de obtenção do deslocamento ou velocidade através da integração.

2.4.4 Fixação e pontos de medição

IMV CORPORATION (2018) cita o método de fixação do transdutor como dependente da frequência a ser coletada. Caso selecionado incorretamente, o método de fixação pode ocasionar leitura incorreta e dados dispersos. Na figura 3 são enumerados os principais tipos de fixação de transdutores: parafuso, cola instantânea, fita dupla face, magnético e aproximação do probe.

Figura 3 – Resposta em função do tipo de fixação



Fonte: adaptado de IMV CORPORATION (2018).

Ainda nesta figura, estão exibidas as frequências de ressonância para cada tipo de fixação e a resposta do sinal coletado. Idealmente, a frequência a ser analisada deve estar na faixa de um terço da frequência de ressonância do tipo de fixação selecionado.

De acordo com a ISO 13373:2016 (2016 apud IMV CORPORATION, 2018) a escolha dos pontos de coleta em um maquinário deve ser realizada considerando aspectos como: facilidade de acesso, impacto de condições externas, sensibilidade, atenuação do sinal e confiabilidade da medição. Ainda na norma, são exemplificados diagramas contendo os pontos indicados para diferentes tipos de equipamento.

2.4.5 Certificação profissional

No Brasil, profissionais que realizam ensaios de análise vibracional devem possuir certificação de acordo com a norma ISO 18436-2. Nesta norma, os inspetores são classificados em quatro diferentes níveis de acordo com seu nível de

conhecimento teórico e experiência comprovada na área. Duas entidades oferecem a certificação em território nacional: a ABENDI (Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção) e a FUPAI (Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria).

De acordo com o *Vibration Institute*, um profissional certificado na categoria I é capaz de: executar monitoramento e diagnóstico de vibração em canal único em rotas pré-determinadas ou ensaios estacionários via comparação com parâmetros de alerta.

Já para a categoria II, o profissional é qualificado para realizar ensaios básicos de análise vibracional em canal único de acordo com procedimentos, setup de instrumentos e manter uma base de dados de resultados. Todas estas atribuições somam-se as da categoria I.

Na categoria III, o profissional está habilitado a estabelecer, direcionar ou executar programas de monitoramento de condições e diagnóstico de máquinas. Dentre as ferramentas a serem utilizadas estão a análise espectral, de forma de onda e de órbita. Além disso, o inspetor é capaz de realizar pequenas ações corretivas, tais como: ODS (*Operating Deflection Shape*), balanceamento em plano único e testes de diagnóstico.

Por fim, a categoria IV certifica que o indivíduo compreende a teoria de vibrações mecânicas, técnicas avançadas de análise vibracional e processamento de sinais. Desta forma, sendo capazes de dirigir programas de monitoramento de condições, realizar ou recomendar ações corretivas ou modificações de projeto.

É importante ressaltar que a certificação para analista de vibração tem um caráter bastante teórico. Nas certificações para os níveis I, II e III a avaliação aplicada contém apenas questões teóricas, sendo: 50, 100 e 100 questões para cada categoria, respectivamente. A exceção é a certificação de nível IV, onde além do questionário de 80 questões, são realizadas 20 avaliações práticas. Em todos os níveis de certificação a taxa de acerto exigida é de setenta por cento.

2.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a fundamentação teórica a respeito da técnica de ensaios análise de vibração. Foram apresentados os fundamentos teóricos a

respeito da vibração mecânica, as principais ferramentas para coleta e análise da vibração e a certificação necessária para atuação na área.

Analisando o procedimento de análise vibracional, observa-se que a formação do inspetor de vibração é vasta em conhecimentos teóricos. Desta forma, as falhas que decorrem do processo de inspeção, em tese, não são correlacionadas a falta de informação ou experiência profissional. Fatores que envolvem o ser humano e sua confiabilidade devem então ser analisados.

A importância do método de análise de vibração corresponde em prever modos de falha, reduzir custos decorrentes de paradas inesperadas, maximizar a vida útil do componente e reduzir o número de intervenções. Desta forma, o correto emprego da técnica e acompanhamento contínuo possibilitam grandes vantagens operacionais.

No capítulo seguinte, será abordada a confiabilidade humana. Em decorrência do processo de inspeção ser uma operação realizada por um ser humano, esta é passível de erros. Desta forma, o estudo da interação homem-máquina é de grande importância na confiabilidade do processo como um todo.

3. CONFIABILIDADE HUMANA

No presente capítulo, os conceitos de erro humano e confiabilidade humana serão definidos, assim como os métodos de análise da confiabilidade humana presentes na bibliografia serão explanados. Através dos estudos predecessores será possível a compilação dos fatores de desempenho humano que afetam a confiabilidade humana para elaboração dos questionários.

De acordo com Assis (2004), ao se referir a um sistema de produção, é necessário considerar a interatividade entre homem e máquina. A confiabilidade do sistema é dependente desta interação. Como a confiabilidade humana é reduzida por perturbações, como ambiente ou estresse, esta se torna de difícil predição e quantificação.

A *American Petroleum Institute* (2001) por meio da API 770 define confiabilidade humana como a probabilidade de uma ação, tarefa ou trabalho humano sobre um sistema seja concluída com sucesso no tempo requerido. Assim como, a probabilidade de nenhuma ação nociva ao sistema seja executada.

A fim de minimizar a ocorrência do erro humano, a gerência deve se certificar que a interface homem-máquina, com o meio ambiente ou outros colaboradores não supere a capacidade, limitação ou necessidades de cada trabalhador.

3.1 ERRO HUMANO

Erro humano é definido por Assis (2004) como a falha em executar um objetivo proposto ou desvio em relação a uma norma existente. Outra definição é a incapacidade de tratamento da informação necessária para evitar o erro. Ou seja, a informação foi transmitida de forma incompleta, em excesso ou sofreu interferências, impossibilitando o correto processamento cognitivo e posterior execução correta da tarefa.

Blanchard et al (1995 *apud* MOUBRAY, 2007) classifica o erro humano em quatro diferentes áreas de influência: fatores antropométricos, fatores sensoriais, fatores fisiológicos e fatores psicológicos.

Fatores antropométricos são relativos à capacidade física do operador quanto a sua força ou dimensões físicas. Erros podem ser ocasionados simplesmente por não ser capaz de mover um objeto ou não alcançar um mecanismo.

Fatores sensoriais utilizam-se dos sentidos humanos, como: visão, audição, olfato e tato. Em geral, falhas na leitura ou operação de instrumentos são erros decorrentes destes fatores.

Fatores fisiológicos abordam o estresse em função do meio ambiente no qual o funcionário está inserido. Situações que envolvem altas temperaturas, elevado ruído ou jornadas exaustivas acarretam em estresse ao humano. Em situações como as descritas, não se pode responsabilizar o humano como causa raiz do problema, mas sim o mau projeto dos instrumentos, equipamentos ou instalação.

Por fim, fatores psicológicos podem ser classificados como intencionais ou não. Dentre as ações não intencionais pode-se incluir os lapsos e deslizes. O primeiro corresponde ao esquecimento de um passo na execução de uma tarefa, enquanto no segundo a execução é realizada na sequência incorreta. A intenção é caracterizada por erros de resposta inapropriada a situações ou violações de rotina e até mesmo sabotagem.

3.2 FATORES DE DESEMPENHO HUMANO

Na API 770, o conceito de fatores de desempenho humano é definido como quaisquer fatores que influenciam na performance humana. Estes podem incluir desde características intrínsecas ao indivíduo, como personalidade, e situações relativas ao ambiente de trabalho, como ergonomia. Estes fatores podem ser classificados em três diferentes classes: interno, externo e estressor.

Fatores internos são pertencentes ao indivíduo, ou seja, as características que o trabalhador traz com si ao trabalho. Alguns exemplos desta categoria são: experiência, expertise, conhecimento, personalidade, inteligência, saúde, formação familiar ou cultura. Observa-se que alguns fatores podem ser desenvolvidos através de treinamentos específicos, melhorando sua performance.

Fatores externos são relativos ao ambiente na qual a tarefa é realizada, podendo ser fatores situacionais ou específicos da tarefa ou procedimento a ser executado. Dentre os fatores situacionais encontram-se condições ambientais

(temperatura, humidade, iluminação, etc), turnos de trabalho, equipamentos e ferramentas, normas e regulamentos da planta. Já os fatores relativos à tarefa incluem os procedimentos orais ou escritos, comunicação da equipe, memória, feedback, criticidade da tarefa e estímulo.

A simples disponibilização de instruções de trabalho e descrição do cargo possuem grande impacto na performance humana. A ênfase em manter uma comunicação clara e assertiva por parte da gerência já pode reduzir drasticamente as falhas humanas.

Por fim, os estressores afetam o psicológico do colaborador, tendo como principal resultado o aumento do estresse. Exigências como elevada demanda, ameaças de demissão, fadiga, dor e desconforto, repetição e trabalho monótono são exemplos.

3.3 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA

Segundo a NUREG-1842 (2006 *apud* NASCIMENTO, 2010) os métodos utilizados para avaliar a confiabilidade humana são denominados Análise de confiabilidade humana (ACH). Como resultado da ACH, são obtidas informações de cunho qualitativo e quantitativo viabilizando a melhora do desempenho humano na aplicação estudada.

AICHe (1994 *apud* NASCIMENTO, 2010) define informações qualitativas como a identificação das ações errôneas que culminam na degradação do sistema, situações de erro provável e fatores que induzem ao erro. Por outro lado, o lado quantitativo estima numericamente a probabilidade de um procedimento ou tarefa ser realizado incorretamente ou que ocorram ações indesejadas.

Sales Filho (2008) descreve o objeto de estudo dos métodos de ACH como a obtenção do melhor modo de um humano interagir em um determinado sistema sob influência de suas limitações e fatores que limitam seu desempenho. Para tal efeito, a aplicação da ACH requer a identificação das tarefas relevantes para um processo, e, todas as etapas que apresentam probabilidade significativa de erro.

Murari (2012) cita que os principais métodos de ACH são originários do setor nuclear, sendo adaptados ao uso por diversos outros setores. Pode-se classificar os métodos em duas diferentes gerações. De acordo com Moré (2004), a primeira

geração tem influência do enfoque em análise probabilística de segurança. Ou seja, possuem enfoque na comparação do desempenho humano com o de um sistema, associando probabilidades ao sucesso ou erro do operador. Em contrapartida, a segunda geração possui uma abordagem cognitiva. Nesta são considerados níveis de decisão, processos diagnósticos, destreza, conhecimento e fatores organizacionais.

Dentre as metodologias de destaque e que serão detalhadas neste estudo estão: *Success Likelihood Index Methodology (SLIM)*, *Technique for Human Error Prediction (THERP)*, *Accident Sequence Evaluation Program HRA Procedure (ASEP)*, *A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA)* e *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*.

3.3.1 *Technique for Human Error Prediction (THERP)*

Swain (1964) define a THERP como um método para prever as probabilidades de erro humano e avaliar a degradação de um sistema homem-máquina como consequência do erro humano em si, ou, em decorrência de sua conexão com o funcionamento do equipamento, procedimentos operacionais ou outra característica que tem influência no sistema.

A base do THERP corresponde no estudo de confiabilidade tradicional, porém substituindo o fator máquina pelo fator humano. Na norma, estão dispostas tabelas estimando a probabilidade de erro humano em sistemas. Sua abordagem é realizada no seguinte processo iterativo:

1. Definir as falhas do sistema de interesse que possam ser afetadas por erros humanos.
2. Listar e analisar as operações humanas.
3. Estimar a probabilidade de erro.
4. Estimar os efeitos da falha humana nos eventos de falha do sistema.
5. Recomendar modificações e recalcular as probabilidades de falha.

Assis (2004) cita uma ferramenta básica presente na THERP, a árvore de acontecimentos. Para cada atividade estudada existe uma saída binária, avaliando a realização correta ou incorreta da ação. Cada ramo representa uma atividade

combinada com os fatores que possuem influência em sua realização. No diagrama estão dispostos para cada nó as respectivas probabilidades de sucesso ou não para falhas técnicas e humanas.

3.3.2 *Accident Sequence Evaluation Program HRA Procedure (ASEP)*

Swain (1987) caracteriza a ASEP como uma simplificação da THERP. O principal objetivo da ASEP é se apresentar como um método mais econômico, contudo, mantendo a identificação das principais fontes de risco. As simplificações adotadas culminaram em um procedimento que requer menor utilização de recursos humanos para aplicação. Além de não possuir exigências quanto ao treinamento ou experiência dos analistas em comportamento humano.

Se comparados com a THERP, os resultados obtidos através da ASEP são mais conservadores, ou seja, mais pessimistas. A razão desta ocorrência é devido às simplificações adotadas no procedimento e requisitos para aplicação. Vale lembrar que a principal vantagem desta metodologia é a redução do custo e tempo para execução do estudo.

3.3.3 *Success Likelihood Index Methodology (SLIM)*

Embrey (1986) descreve a SLIM como uma técnica de vasta aplicação no cálculo da confiabilidade humana em procedimentos e tarefas cognitivas. A técnica admite como entrada a opinião de especialistas para avaliar a importância dos Fatores de Desempenho Humano – FDH e determinar a probabilidade de erro para as situações avaliadas. Esta opinião é também utilizada para ponderar os FDH entre si. A combinação da probabilidade de erro e o ponderado do FDH corresponde ao índice de provável sucesso (SLI). Posteriormente, é possível ser calculada a probabilidade de erro a partir do SLI.

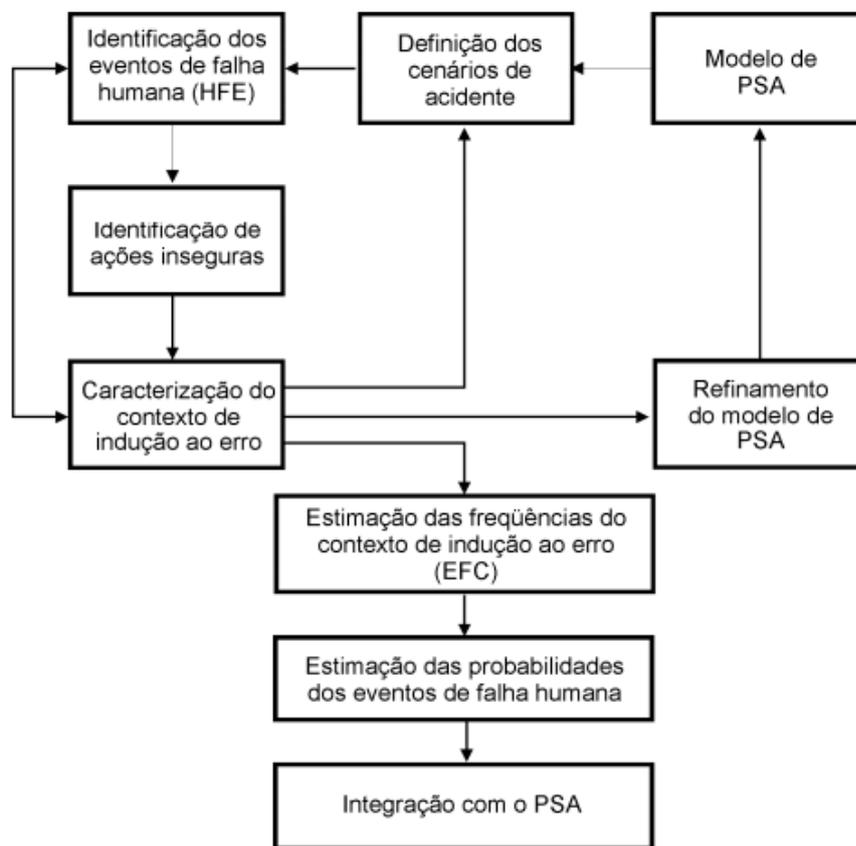
Kletz (2001 *apud* NASCIMENTO, 2010) cita as limitações do método SLIM. Dentre as críticas estão não consideração da interação entre os FDH no processo de ponderação, a dependência exclusiva do conhecimento e experiência dos especialistas e inabilidade de lidar com problemas de níveis gerenciais,

3.3.4 *A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA)*

US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (2000) apresenta o método ATHEANA através da norma NUREG-1624. A metodologia pode ser avaliada através de três diferentes objetivos: determinação de riscos ainda não identificados, identificar condições favoráveis aos eventos de falha humana e gerenciamento de risco.

A gestão do risco deve ser realizada a partir dos contextos identificados durante a aplicação da ACH. Como resultado do gerenciamento de riscos é possível realizar modificações visando reduzir o risco, custo ou ambos. Estas modificações podem abordar: alterações na planta, equipamentos ou instrumentos, em processos operacionais, abordagem de manutenção ou treinamento. Todas as modificações propostas devem ser avaliadas com base em indicadores de risco e custo. Desta forma, a solução mais custo-efetiva deve ser escolhida. Uma última opção, caso as propostas não se apresentem viáveis, é manter o *status quo*.

Figura 4 – Método ATHEANA



Fonte: Moré (2009)

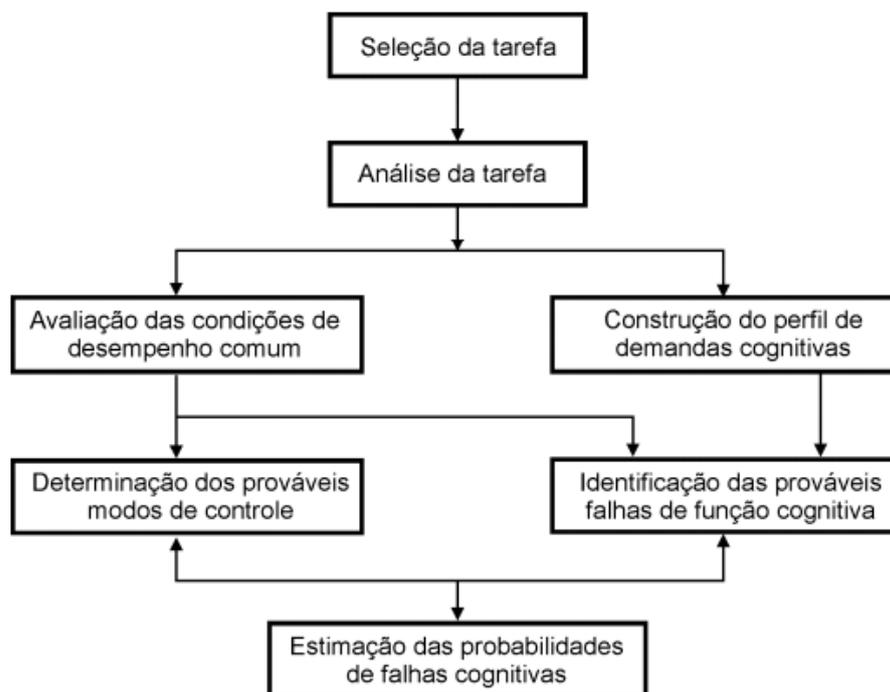
Hollnagel (1998) descreve o método ATHEANA por meio do fluxograma adaptado por Moré (2009) na figura 4. A abordagem baseia-se, primeiramente, na identificação de eventos de falhas humanas, a suas respectivas causas. Estas são abordadas analisadas com base na execução de uma ação insegura e contexto indutor ao erro (fatores de desempenho humano e condições da planta). Posteriormente, o cálculo das probabilidades de falha é realizado com base na taxa de ocorrência do contexto, ação insegura e não recuperação do evento de falha. Todos os resultados devem ser integrados ao modelo atual de análise probabilística de segurança (PSA).

3.3.5 Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)

O método CREAM descrito por Hollnagel (1998) corresponde a um método bidirecional, combinando análises prospectivas e retrospectivas do desempenho humano em função das causas e predição dos efeitos. Ou seja, uma abordagem

avaliará o desempenho humano desde as causas até os efeitos (prospectiva), enquanto a análise retrospectiva realiza o caminho inverso.

Figura 5 – Método CREAM



Fonte: Moré (2009)

Moré (2009) enumera as características e tarefas intrínsecas ao CREAM, disponíveis na figura 5. Como características, têm-se: a identificação das tarefas dependentes de conhecimento e experiência humanas, condições nas quais a confiabilidade humana pode ser reduzida, avaliação das consequências do desempenho humano em segurança e risco, além de desenvolver e especificar melhorias para aumento da confiabilidade cognitiva.

3.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

No capítulo atual foi apresentada a definição e o histórico da análise de confiabilidade humana. A origem desta remete ao setor nuclear e tem sido objeto de estudo há pelo menos 70 anos. As principais técnicas abordam o estudo de fatores de desempenho humano baseado nas experiências de especialistas. Como resultado do processo é obtido uma probabilidade da ocorrência ou não do erro como função da atividade humana.

A confiabilidade humana visa garantir a não ocorrência de erros ou falhas humanas. Seu objeto de estudo é o ambiente de trabalho, processos, máquinas, aspectos humanos, dentre outros. A partir deste estudo, abordagens visando mitigar ou minimizar riscos e consequências das falhas podem ser tomadas.

Na análise da confiabilidade humana, principalmente pelo fato das informações coletadas a partir de humanos são de caráter impreciso devido à linguagem natural, se faz necessária a utilização de um ferramental específico. Desta forma, a utilização da lógica *fuzzy* para tratamento de dados busca viabilizar a obtenção de um índice de confiabilidade humana para o objeto de estudo. Este tópico será abordado no capítulo seguinte.

4. LÓGICA FUZZY

A lógica *fuzzy* será objeto de estudo deste capítulo. Esta modelagem matemática possibilitará a elaboração de questionários e processamento das respostas de especialistas através de uma linguagem natural. Desta forma, a aquisição de dados será fiel suficiente e evitará a ambiguidade na expressão da opinião por parte do entrevistado.

Moré (2009) define a linguagem natural, em geral, como ambígua e repleta de duplos sentidos. Adjetivos utilizados para caracterizar objetos ou situações podem não ser claros o suficiente, uma vez que estes possuem uma grande variedade de possíveis significados.

As ferramentas de modelagem utilizadas na computação são classificadas como *crisp*, ou seja, o valor de um parâmetro é definido precisamente. No âmbito da computação, existem dois possíveis resultados para uma afirmação: verdadeiro ou falso. A dicotomia do sistema não permite a obtenção de valores que não sejam totalmente dentro dos conjuntos verdadeiro e falso.

O conceito de conjunto *fuzzy*, foi introduzido em 1965 por L. A. Zadeh que observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de atividade industrial, biológica ou química que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica booleana. Procurando solucionar o problema do tratamento de informações de caráter impreciso ou vago forneceu um ferramental matemático que deu origem aos sistemas *fuzzy*. (MORÉ, 2009, p. 47).

Rigoni (2009) classifica a lógica *fuzzy* como uma ferramenta utilizada para representar termos linguisticamente imprecisos. Em oposição à lógica da computação tradicional, um elemento possui um grau de pertinência a um conjunto. Este grau de pertinência é mensurado no intervalo $\{0,1\}$.

Moré (2009) cita que os sistemas *fuzzy* se consolidaram no tratamento de imperfeições de informação. Objetivamente, este tipo de sistema é capaz de capturar informações imprecisas, vagas e em linguagem natural, processá-las e ter como saída um resultado numérico de fácil compreensão. Com isso, é possível processar a experiência humana em sistemas computacionais, possibilitando ferramentas de tomada de decisão em sistemas complexos.

4.1 CONJUNTOS FUZZY

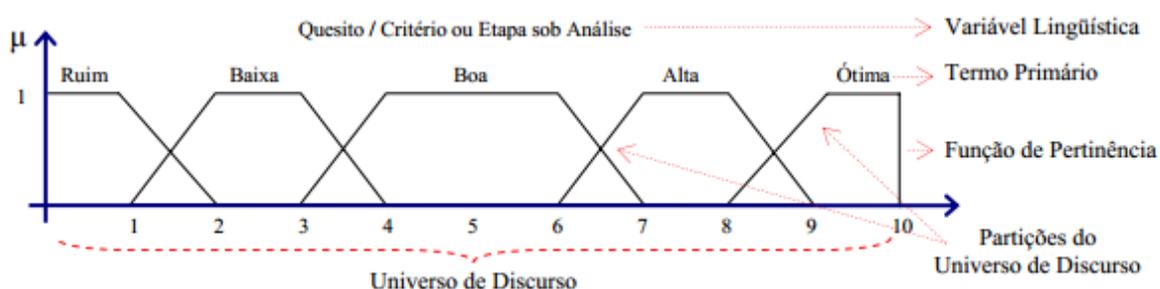
Como mencionado, uma variável do tipo *fuzzy* possui um grau de pertinência à um conjunto específico. Moré (2009) exemplifica este conceito a partir da análise da temperatura, variável T , da água em um recipiente. Pela lógica tradicional, a água é classificada como quente dentro do intervalo definido, $\{50,90\}$. Caso a temperatura da água seja ligeiramente inferior à 50°C , pela lógica booleana a água estará fria. Aplicando conceitos de grau de pertinência, esta temperatura poderá possuir uma pertinência ao conjunto quente.

4.2 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Rigoni (2009) define a variável linguística como o nome dado ao conjunto *fuzzy*. Desta forma, representam a variável de entrada em um sistema a ser estudado, lembrando que sua composição é puramente linguística. A variável linguística também pode estar incluída em um universo de discurso, ou seja, mais de uma variável linguística pode definir uma variável base.

Um possível exemplo, citado por Moré (2009), envolvendo variáveis linguística e universo de discurso é a definição da idade de um indivíduo. Neste caso o universo de discurso é a variável estudada, neste caso, a IDADE. Os conjuntos *fuzzy* possíveis para esta situação são $\{\text{Jovem, Adulto, Velho}\}$, estes estarão presentes no questionário realizado. O universo de discurso, considerando os graus de pertinência, é exemplificado na figura 6.

Figura 6 – Exemplo de universo de discurso *Fuzzy*



Fonte: Rigoni (2009).

Ainda, cada conjunto *fuzzy* pode ser alterado por meio de modificadores. O exemplo citado, o conjunto de modificadores é {Muito, Pouco, Razoavelmente}. Desta forma, um termo linguístico de maior complexidade é gerado, por exemplo, a expressão “Muito Velho”.

4.3 OPERAÇÕES

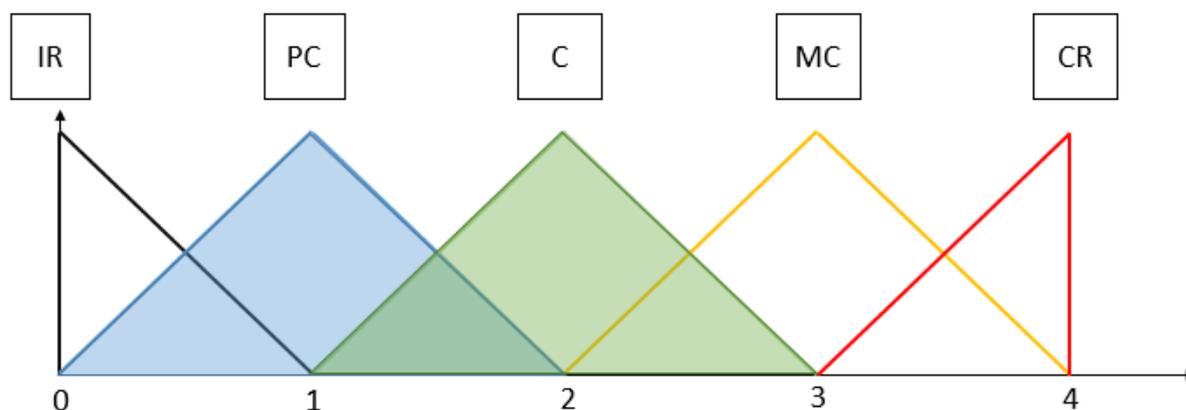
De acordo com Moré (2004) existem três operações básicas na teoria de conjuntos *fuzzy*: complemento, união e interseção. Estas são baseadas nos conceitos de pertinência ou não de elementos a um conjunto.

4.3.1 União

A operação de união é regida pela equação 1 Na figura 7 é possível ver a representação da área de união entre duas opiniões: Pouco condicionante – PC e Condicionante – C.

$$AT = \int_x (\max \{ \mu_{\tilde{a}_i}(x), \mu_{\tilde{a}_j}(x) \}) dx \quad (1)$$

Figura 7 – Exemplo de união *Fuzzy*.



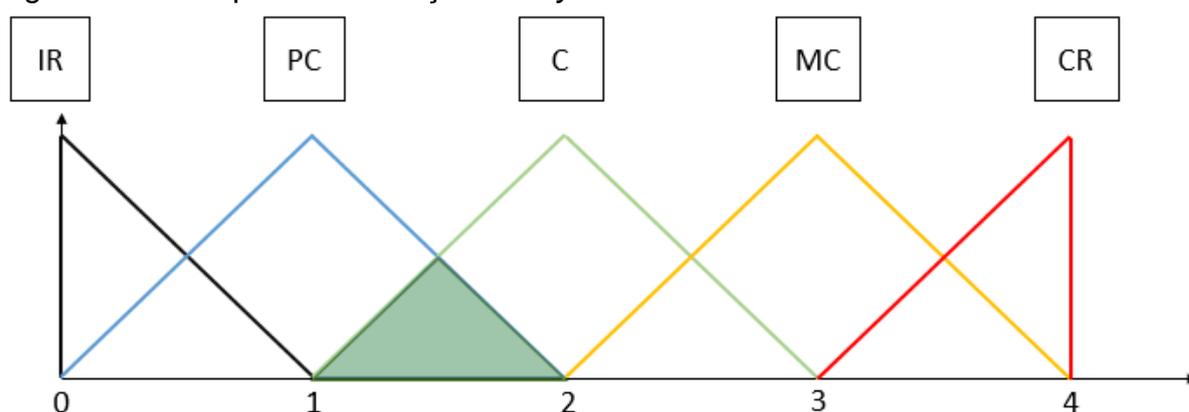
Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Interseção

A operação de interseção é regida pela equação 2 Na figura 8 é possível ver a representação da área de união entre duas opiniões: Pouco condicionante – PC e Condicionante – C.

$$AI = \int_x (\min \{ \mu_{\tilde{a}_i}(x), \mu_{\tilde{a}_j}(x) \}) dx \quad (2)$$

Figura 8 – Exemplo de interseção *Fuzzy*.

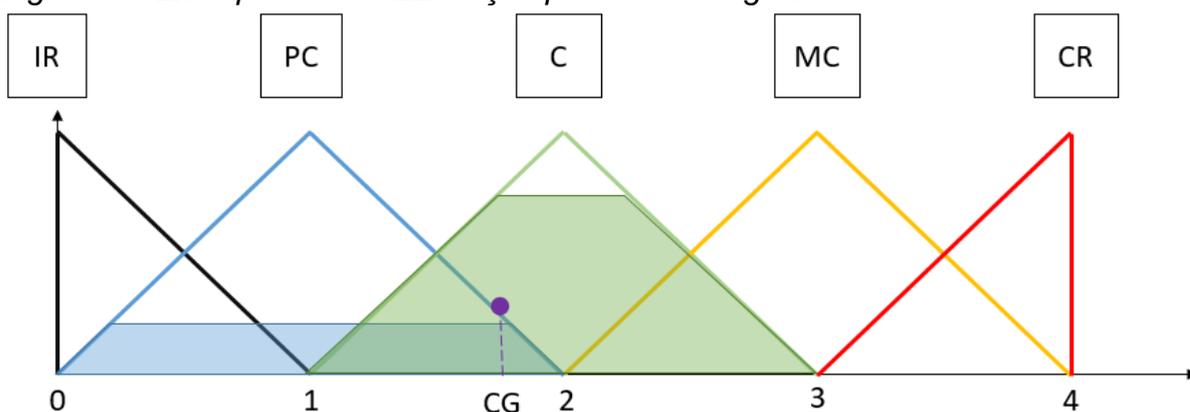


Fonte: Autoria própria.

4.4 DEFUZZIFICAÇÃO

Moré (2009) define a defuzzificação como uma função que associa um valor de outro conjunto adjacente a cada conjunto *fuzzy*. Em outras palavras, corresponde a um valor esperado considerando a pertinência dos conjuntos. Uma das metodologias utilizadas é a determinação do baricentro do gráfico da função pertinência.

Figura 9 – Exemplo de defuzzificação por centro de gravidade



Fonte: Autoria própria.

Na figura 9, é possível visualizar a aplicação da defuzzificação a partir da determinação do baricentro, ou, centro de gravidade (CG) do gráfico das funções de pertinência. Nesta abordagem, é obtida uma variável numérica como saída do processo..

4.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

A lógica *fuzzy* tem por objetivo a utilização de entradas imprecisas, ambíguas e nebulosas em função de sua origem humana em dados numéricos e de fácil compreensão. Esta conversão é realizada com base no método descrito que envolve conjuntos *fuzzy*, variáveis linguísticas, ferramenta computacional e, por fim, a defuzzificação.

A abordagem *fuzzy* é de essencial importância neste trabalho em função de seu objeto de estudo, análise de confiabilidade humana. A partir do uso desta ferramenta será possível converter as informações obtidas a partir de questionário, respondidos em linguagem natural, em um indicador numérico de confiabilidade do sistema homem-máquina.

No próximo capítulo será abordada a metodologia empregada no desenvolvimento do presente trabalho. Será discutida a integração dos assuntos dispostos nos três últimos capítulos: análise de vibração, confiabilidade humana e lógica *fuzzy*.

5. METODOLOGIA DA TÉCNICA APLICADA

Neste capítulo será abordada a metodologia aplicada no presente estudo. Para tal, serão correlacionados os tópicos de análise vibracional, confiabilidade humana e lógica *fuzzy* com o desenvolvimento do trabalho. Ainda neste capítulo, será delimitado o local de aplicação do presente estudo.

O cálculo da confiabilidade humana em ensaios de vibração será realizado com ênfase nos tópicos abordados anteriormente. Aspectos técnicos a respeito do procedimento de análise de vibração serão abordados, assim com as metodologias de avaliação de confiabilidade humana. Por fim, o resultado tangível será obtido através da utilização da lógica *fuzzy* para determinação de um resultado numérico para fins de indicador.

Os objetivos específicos do trabalho foram abordados no Capítulo 1. Dentre os objetivos, destacam-se nas áreas de conhecimento de análise vibracional e confiabilidade humana a determinação e avaliação dos Fatores de Desempenho Humano – FDH. Isto é decorrência da necessidade do conhecimento teórico do processo de inspeção, no que diz respeito às tarefas, para determinar a os fatores que podem influenciar na confiabilidade humana durante sua execução.

A aplicação da lógica *fuzzy* será utilizada em quase a totalidade restante do trabalho. Uma vez levantados os FDH, o questionário revisado pelo especialista será aplicado a um grupo de inspetores. Neste momento, as respostas são obtidas em função de variáveis linguísticas, necessitando da lógica *fuzzy* para processamento e posterior decomposição em resultados numéricos.

5.1 LOCAL DE APLICAÇÃO

O presente trabalho será realizado em colaboração com uma empresa especializada em solução de manutenção preditiva. Esta possui grande atuação no cenário na região sul do país, além de atender pontualmente alguns clientes internacionais.

Por ser uma empresa de serviços, não existe um local específico para a realização dos ensaios de vibração, podendo haver coletas realizadas em diferentes

clientes. A resolução dos questionários será realizada pelo corpo técnico da empresa, nas categorias de especialistas e inspetores.

5.2 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O conhecimento elucidado na revisão bibliográfica a respeito da análise vibracional, confiabilidade humana e lógica *fuzzy* possibilitarão a replicação da metodologia elaborada por Moré (2004). Uma vez construídos os questionários utilizando os conhecimentos específicos de análise vibracional, fatores de desempenho humano em função das variáveis linguísticas, estas serão processadas através da modelagem matemática *fuzzy*.

No próximo capítulo, a aplicação da metodologia proposta será detalhada utilizando as etapas definidas por Moré (2004). A opinião dos especialistas será tratada e processada pelo modelo matemático proposto para a obtenção de um número *fuzzy* correspondente à confiabilidade do inspetor e probabilidade de erro na execução das tarefas do procedimento.

6. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão abordadas duas diferentes metodologias para avaliação do ensaio de análise de vibração. A primeira consiste em determinar um padrão de qualidade para a execução do ensaio sob a perspectiva de fatores que influenciam no desempenho humano. Posteriormente, as atividades do procedimento de inspeção serão determinadas, sua árvore de falha construída e a possibilidade da ocorrência do erro avaliada.

A metodologia aplicada no presente trabalho foi extraída do trabalho de Moré (2009). Neste, o objeto de estudo foi a confiabilidade humana em ensaios de ultrassom. Desta forma, foram realizadas adaptações necessárias para o emprego do método para avaliação de ensaios de vibração.

As considerações adotadas no trabalho são as mesmas utilizadas por Moré (2009):

1. Apenas erros humanos são considerados. Outros componentes do sistema atuam satisfatoriamente.
2. A falha no sistema é decorrente de um erro humano. Defeitos inerentes ao sistema não são considerados.

Desta forma, infere-se que o fator humano é o único responsável pela ocorrência de falhas no sistema ou erros humanos. Estas considerações têm por objetivo delimitar a aplicação do modelo matemático no estudo, simplificando assim sua aplicação.

6.1 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE HUMANA

Nesta etapa, a metodologia proposta por Moré (2004) consiste em dez diferentes etapas que envolvem desde a determinação dos fatores de desempenho humano, escolha e avaliação dos especialistas, construção e aplicação dos questionários, tratamento dos dados coletados e, finalmente, o cálculo da confiabilidade humana através da lógica *fuzzy*.

6.1.1 Identificação dos fatores de desempenho humano

O objetivo desta etapa é levantar os Fatores de Desempenho Humano – FDH cuja relevância será avaliada pelos especialistas. A listagem foi construída com base nos FDH identificados por Swain & Gutman (1983 *apud* SALES FILHO, 2008) e questionários desenvolvidos por Moré (2004) e Nascimento (2008). Os FDH selecionados são listados na tabela 1.

Tabela 1 – Conjunto de fatores de desempenho humano – FDH

Fator	
Fatores externos	
1.1	Características arquitetônicas do local de ensaio.
1.2	Características ambientais no local de ensaio.
1.3	Temperatura no local.
1.4	Umidade no local.
1.5	Qualidade do ar no local
1.6	Iluminação no local
1.7	Ruído no local
1.8	Vibrações
1.9	Grau de limpeza em geral
1.10	Relação horário de trabalho/ horário de descanso
1.11	Disponibilidade e adequação do equipamento, ferramentas e fornecimentos gerais
1.12	Organização de plantões e o número de inspetores
1.13	Estrutura da instituição, autoridade, responsabilidades, e canais de comunicação
1.14	Ações dos supervisores, companheiros de trabalho e outro pessoal
1.15	Nível de cultura de segurança
1.16	Recompensas, reconhecimentos, estímulos e salário
1.17	Requerimentos de movimentos, velocidade e precisão.
1.18	Relações controle/display
1.19	Necessidade de interpretação que se requer durante o ensaio
1.20	Necessidade de tomada de decisões.
1.21	Frequência e repetitividade (monotonia) do ensaio.

Fator	
Fatores externos	
1.22	Complexidade do ensaio
1.23	Necessidade de memória a curta ou longo prazo
1.24	Comunicação e estrutura da equipe de trabalho
1.25	Condição de visualização no display do coletor
1.26	Condição de manuseio do coletor
1.27	Ferramentas
1.28	Uso dos procedimentos escritos
1.29	Comunicações orais ou escritas
1.30	Métodos de trabalho
1.31	Cuidados e advertências
Fatores internos	
2.1	Nível de experiência e preparação anterior
2.2	Prática atual ou treinamento
2.3	Capacidade analítica
2.4	Estado de motivação ou atitude
2.5	Estado emocional
2.6	Influência dos problemas familiares na atitude do inspetor
2.7	Identificação com o grupo de trabalho
Fatores psicológicos	
3.1	Aparecimento de causas repentinas de tensão
3.2	Duração da tensão
3.3	Velocidade de trabalho
3.4	Carga de trabalho
3.5	Risco de trabalho
3.6	Ameaça de falhar ou de perder o trabalho
3.7	Monotonia do trabalho
3.8	Distrações devido a ruídos, luminosidade ou movimento
3.9	Duração do estresse
3.10	Fadiga
3.11	Dor ou desconforto
3.12	Fome ou sede
3.13	Repetição de movimentos
3.14	Constricção de movimentos durante o ensaio
3.15	Falta de exercício físico

Fonte: Adaptado de Swain & Gutman (1983), Moré (2004) e Nascimento (2010)

A caracterização dos FDH pode ser realizada como fatores internos ou externos. Ou seja, fatores externos são aqueles que independem do inspetor como as características ambientais, equipe de trabalho e instruções de trabalho, orais ou

escritas. Já os fatores internos, representam características inerentes ao estado fisiológico e psicológico do inspetor. Fatores como o desconforto, motivação, experiência e estresse são enquadrados nessa categoria.

6.1.2 Escolha dos especialistas

O modelo proposto é baseado na opinião de especialistas. Apesar de ser possível aplicar o modelo a partir da opinião de um único especialista, a inclusão de outras opiniões refinaria a precisão do modelo. Isto é válido, é claro, considerando especialistas com a mesma hierarquia, ou seja, com formação, conhecimento e experiência relevantes na área de estudo.

Neste estudo, foram aplicados questionários aos especialistas de uma única empresa. Os entrevistados possuem, em sua maioria, certificação em análise de vibração nível II, formação em nível de especialização e mais de 10 anos de experiência na área.

6.1.3 Grau de importância do especialista

Em virtude da heterogeneidade no perfil dos especialistas, a relevância de suas opiniões deve ser proporcional à carga de formação, conhecimento e experiências individuais. Empregando um modelo de média ponderada, é possível determinar o peso da opinião de cada especialista.

Tabela 2 – Matriz de classificação do especialista

Questão	Itens	Peso
Marque sua experiência na área de análise de vibração.	Especialista de nível III ou IV	1
	Especialista de nível II	0,9
	Especialista de nível I	0,7
	Professor (universitário) na área de análise de vibração.	0,8
	Professor (técnico)	0,5
	Pesquisador	0,7

Questão	Itens	Peso
Já participou de eventos ou congressos? De quantos?	Nenhum Entre 1 e 2 Entre 3 e 7 Maior que 7 _____	0 0,3 0,75 1
Como você classificaria seu entendimento sobre o ensaio de análise vibracional?	Excelente Bom Médio Baixo Nenhum	1 0,9 0,6 0,3 0
Marque a opção que melhor classifica seu grau de escolaridade	Inspetor com doutorado ou livre docência Inspetor com mestrado Inspetor com especialização Inspetor com 3º grau Inspetor com 2º grau Especialista	1 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5
Tem ministrado cursos? Quantos?	Nenhum Entre 1 e 2 Entre 3 e 7 Maior que 7 _____	0 0,5 0,9 1
Quantos anos de experiência como inspetor?	Nenhum Entre 1 e 5 Entre 5 e 10 Entre 10 e 15 Mais de 15 _____	0 0,3 0,7 0,9 1

Fonte: Adaptado de Moré (2004).

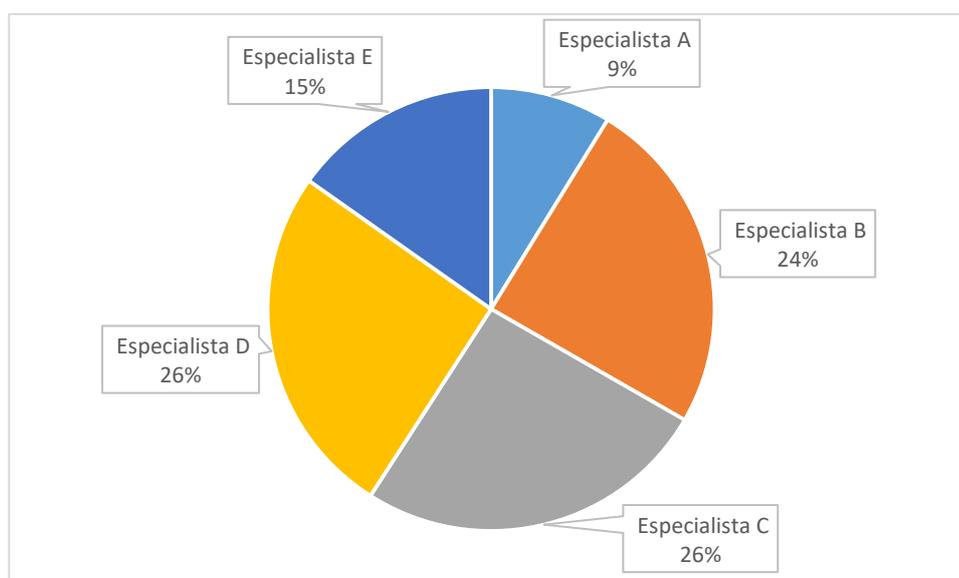
No questionário aplicado, tabela 2, foram levantadas informações referentes a certificações na área, participação em eventos e congressos, grau de entendimento sobre o ensaio, escolaridade, instrução em cursos e anos de experiência. O peso adotado a cada um dos atributos foi o mesmo. Cada atributo foi avaliado em uma escala de zero à um a partir de notas preestabelecidas para cada atributo atendido. O resultado do questionário e cálculo do peso dos especialistas está presente na tabela 3.

Tabela 3 – Cálculo do peso do especialista

Especialista	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4	Item 5	Item 6	Peso Especialista
A	0,7	0	0,3	0,6	0	0,3	0,087356322
B	0,9	0,75	0,9	0,8	1	1	0,245977011
C	0,9	1	1	0,8	1	0,9	0,257471264
D	0,9	1	1	0,8	1	0,9	0,257471264
E	0,7	1	0,6	0,7	0	0,3	0,151724138

Fonte: Autoria própria.

Figura 10 – Representação dos pesos de cada especialista



Fonte: Autoria própria.

A distribuição dos pesos entre os especialistas está ilustrada na figura 10. Dentre os cinco especialistas avaliados, os três que demonstraram maior experiência e formação na área obtiverem os maiores pesos. Este resultado demonstra a efetividade do método escolhido.

6.1.4 Escolha dos termos linguísticos

Os termos linguísticos têm a função de expressar a opinião do entrevistado em diferentes níveis de incerteza. Os termos adotados neste estudo foram: Irrelevante (não possuem influência na confiabilidade humana), pouco condicionantes (possuem

pouca influência na confiabilidade humana), condicionantes (possuem influência na confiabilidade humana), muito condicionantes (possuem grande influência na confiabilidade humana) e críticos (possuem extrema influência na confiabilidade humana).

6.1.5 Escolha do intervalo numérico

Na teoria dos conjuntos *fuzzy*, cada atributo de confiabilidade humana pode ser caracterizado como uma variável linguística. Esta é determinada pela combinação dos termos linguísticos obtidos através de opiniões de especialistas. Cada um desses termos linguísticos pode ser representado por um número *fuzzy* de acordo com seu grau de importância. Desta forma, a variável linguística pode ser representada em função de um intervalo e funções de pertinência.

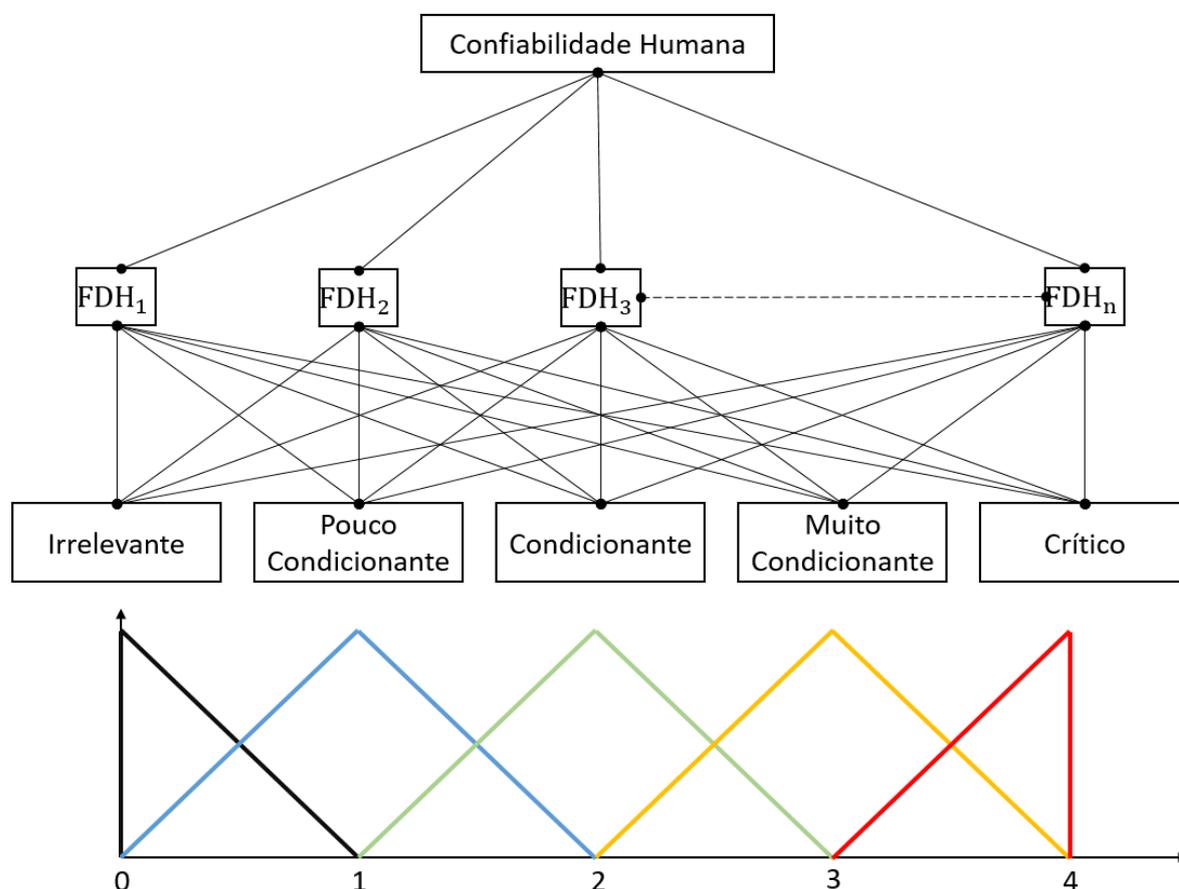
Tabela 4– Termos linguísticos e respectivos números *fuzzy*

Grau de importância	Simbologia	Termo linguístico	Número <i>fuzzy</i>
0	IR	Irrelevante	N = (0,0,1)
1	PC	Pouco Condicionante	N = (0,1,2)
2	C	Condicionante	N = (1,2,3)
3	MC	Muito Condicionante	N = (2,3,4)
4	CR	Crítico	N = (3,4,4)

Fonte: Adaptado de Moré (2004).

Cada termo linguístico foi representado por um número *fuzzy* triangular positivo, do tipo L-R, de acordo com a tabela 4. Na mesma tabela, estão correlacionados os termos linguísticos ao seu respectivo grau de importância e simbologia adotada.

Figura 11 – Correlação entre variáveis linguísticas, fator de desempenho humano – FDH e confiabilidade humana



Fonte: Adaptado de Moré (2004).

Na figura 11 estão exemplificadas as dependências entre variáveis humanas, fatores de desempenho humana, confiabilidade humana e o intervalo *fuzzy* resultante da agregação dos termos linguísticos.

6.1.6 Aplicação dos questionários

Os questionários foram aplicados ao grupo de especialistas selecionado. É importante ressaltar a importância de compromisso dos especialistas com o resultado

final do estudo. Caso não sejam respondidos adequadamente, a confiabilidade dos resultados obtidos será reduzida.

6.1.7 Tratamento dos dados coletados

O tratamento das informações coletadas foi realizado individualmente para cada atributo de confiabilidade. O processamento consiste na construção de matrizes de interseção, união e concordância das opiniões, cálculo do coeficiente de concordância relativa – CR, grau de concordância relativa – GCR e coeficiente de consenso – CCE, para então obter a pertinência de cada atributo.

Tabela 5 – Matriz de interseção das opiniões *fuzzy*

Opinião	IR	PC	C	MC	CR
IR	1	0,25	0	0	0
PC	0,25	1	0,25	0	0
C	0	0,25	1	0,25	0
MC	0	0	0,25	1	0,25
CR	0	0	0	0,25	1

Onde IR, PC, C, MC e CR representam irrelevante, pouco condicionante, condicionante, muito condicionante e crítico, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Moré (2004).

Nas tabelas 5 e 6 estão representadas as matrizes de interseção e união entre as opiniões *fuzzy*. Estas foram obtidas a partir das equações 1 e 2, demonstradas no capítulo 4.

Tabela 6 – Matriz de união das opiniões *fuzzy*

Opinião	IR	PC	C	MC	CR
IR	1	1,25	1,5	1,5	0
PC	1,25	1	1,75	2	1,5
C	1,5	1,75	1	1,75	1,5
MC	1,5	2	1,75	1	1,25
CR	1	1,5	1,5	1,25	1

Onde IR, PC, C, MC e CR representam irrelevante, pouco condicionante, condicionante, muito condicionante e crítico, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Moré (2004).

A fim de exemplificação da metodologia executada, o cálculo da pertinência do atributo 2.4 (Estado de motivação ou atitude) será detalhado. Na tabela 7 estão contidas as opiniões dos especialistas para o atributo em função de termos linguísticos.

Tabela 7 – Opiniões dos especialistas para o atributo 2.4

Atributo	Esp. A	Esp. B	Esp. C	Esp. D	Esp. E
2.4 - Estado de motivação ou atitude	MC	CR	MC	CR	MC

Onde IR, PC, C, MC e CR representam irrelevante, pouco condicionante, condicionante, muito condicionante e crítico, respectivamente.

Fonte: Autoria própria.

A construção das matrizes de união e interseção foram então realizadas com o auxílio das tabelas 5 e 6. Para cada combinação possível entre o conjunto de especialistas foi atribuído um valor já estabelecido, evitando o retrabalho no cálculo das áreas.

Tabela 8 – Matriz de interseção das opiniões *fuzzy* para o atributo 2.4

Opinião	MC	CR	MC	CR	MC
MC	1	0,25	0,25	0,25	0,25
CR	0,25	1	0	0	1
MC	0,25	0	1	0,25	0,25
CR	0,25	0	0,25	1	1
MC	0,25	1	0,25	1	1

Onde IR, PC, C, MC e CR representam irrelevante, pouco condicionante, condicionante, muito condicionante e crítico, respectivamente.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Matriz de união das opiniões *fuzzy* para o atributo 2.4

Opinião	MC	CR	MC	CR	MC
MC	1	1,25	1,75	1,25	1,25
CR	1,25	1	1,5	1,5	1
MC	1,75	1,5	1	1,75	1,25
CR	1,75	1,5	1,75	1	1
MC	1,25	1	1,25	1	1

Onde IR, PC, C, MC e CR representam irrelevante, pouco condicionante, condicionante, muito condicionante e crítico, respectivamente.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos para as matrizes de união (A_t) e interseção (A_i) estão contidos nas tabelas 8 e 9, respectivamente. A matriz de concordância, tabela 10, é calculada através da razão entre as áreas de interseção e união das opiniões *fuzzy* de acordo com a equação 3.

$$MC = \frac{AI}{AT} = \frac{\int_x (\min \{ \mu_{\tilde{a}_i}(x), \mu_{\tilde{a}_j}(x) \}) dx}{\int_x (\max \{ \mu_{\tilde{a}_i}(x), \mu_{\tilde{a}_j}(x) \}) dx} \quad (3)$$

Tabela 10 – Matriz de concordância das opiniões *fuzzy* para o atributo 2.4

Opinião	MC	CR	MC	CR	MC
MC	1	0,2	0,142857	0,2	0,2
CR	0,2	1	0	0	1
MC	0,142857	0	1	0,142857	0,2
CR	0,142857	0	0,142857	1	1
MC	0,2	1	0,2	1	1

Onde IR, PC, C, MC e CR representam irrelevante, pouco condicionante, condicionante, muito condicionante e crítico, respectivamente.

Fonte: Autoria própria.

O coeficiente de concordância relativa foi então calculado a partir da equação 4. Este corresponde à média quadrática dos graus de concordância, obtidos na matriz de concordância, para cada especialista (E_i).

$$CR_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} * [(A_i/A_t)^2_{i1} + (A_i/A_t)^2_{i2} + (A_i/A_t)^2_{i3} + \dots + (A_i/A_t)^2_{in}] } \quad (4)$$

Já o grau de concordância relativa corresponde à média ponderada, equação 5, dos coeficientes de concordância relativa (CR_k) dos especialistas para o atributo.

$$GCR_k = \frac{CR_k}{\sum_{i=1}^n CR_i} \quad (5)$$

Por fim, o coeficiente de consenso, equação 6, corresponde à média ponderada dos produtos entre grau de concordância relativa (GCR_k) e peso do especialista (PE_i). Os resultados obtidos estão disponíveis na tabela 11.

$$CCE_A = \frac{GCR_k * PE_k}{\sum_{i=1}^n (GCR_i * PE_i)} \quad (6)$$

Tabela 11– Concordância relativa – CR, grau de concordância relativa – GCR e coeficiente de consenso – CCE

Especialista	CR	GCR	PESO	CCE
A	0,533949	0,158928	0,087356	0,123142
B	0,714143	0,212562	0,245977	0,22927
C	0,519812	0,15472	0,257471	0,206096
D	0,714286	0,212605	0,257471	0,235038
E	0,877496	0,261184	0,151724	0,206454

Fonte: Autoria própria.

Uma vez determinados os coeficientes de consenso, o número *fuzzy* que representa a função de pertinência do atributo é calculado através da equação 7. Nesta, o número *fuzzy* (Ñ) corresponde ao somatório do produto entre os coeficientes de consenso e número *fuzzy* (ñ = (a, m, b)) da opinião do respectivo especialista.

$$\tilde{N} = \sum_{i=1}^n (CCE_i * \tilde{n}_i) \quad (7)$$

Tabela 12 – Coeficiente de consenso – CCE, opiniões e número *fuzzy* resultante

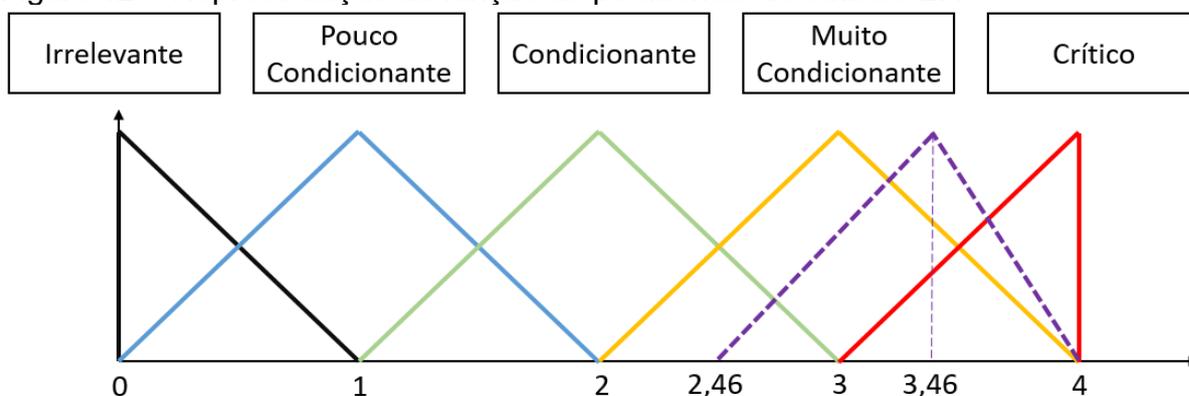
Especialista	Opinião	CCE	a	m	b
A	MC	0,123142	2	3	4
B	CR	0,22927	3	4	4
C	MC	0,206096	2	3	4
D	CR	0,235038	3	4	4
E	MC	0,206454	2	3	4
Numero <i>Fuzzy</i> (\tilde{N})			2,464	3,464	4

Onde IR, PC, C, MC e CR representam irrelevante, pouco condicionante, condicionante, muito condicionante e crítico, respectivamente.

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 12 está disponível o resultado obtido para o atributo 2.4. O número *fuzzy* que representa a pertinência do atributo é $\tilde{N} = (2,46; 3,46; 4)$. Este número é corresponde a opinião ponderada dos especialistas sobre o atributo 2.4.

Figura 12 – Representação da função de pertinência do atributo 2.4



Fonte: Autoria própria.

Na tabela 12 está disponível o resultado obtido para o atributo 2.4. O número *fuzzy* que representa a pertinência do atributo é $\tilde{N} = (2,46; 3,46; 4)$. Na figura 3 a função de pertinência do atributo é representada.

6.1.8 Padrão de qualidade do ensaio

O padrão de qualidade do ensaio é obtido a partir da normalização do grau de importância dos atributos avaliados. Ou seja, a partir da defuzzificação de $\tilde{N} = (a; m; b)$ é obtido um peso com valor igual à m , que corresponde ao grau de pertinência máxima. A normalização é então realizada de acordo com as fórmulas 8 e 9.

$$w_i = m_i \quad (8)$$

$$W_i = \frac{w_i}{\max(m_i)} \quad (9)$$

Uma vez obtidos realizada a normalização, o padrão de qualidade do ensaio é estabelecido através do vetor W , que é o conjunto de todos os valores normalizados dos atributos de confiabilidade. Desta forma, temos os valores ideais para cada variável em um ensaio de vibração afim de garantir a confiabilidade humana. Os resultados para a relevância de cada atributo – W estão distribuídos na tabela 13.

Tabela 13– Representação *fuzzy* dos atributos de confiabilidade humana

Fator		a	m	b	W
1.1	Características arquitetônicas do local de ensaio.	1,41	2,41	3,26	0,66
1.2	Características ambientais no local de ensaio.	1,25	2,25	3,08	0,62
1.3	Temperatura no local.	1,51	2,51	3,33	0,69
1.4	Umidade no local.	1,51	2,51	3,37	0,69
1.5	Qualidade do ar no local	1,74	2,74	3,56	0,75
1.6	Iluminação no local	1,74	2,52	3,34	0,69
1.7	Ruído no local	0,62	1,42	2,27	0,39
1.8	Vibrações	1,5	2,5	3,35	0,69
1.9	Grau de limpeza em geral	0,8	1,8	2,8	0,5
1.10	Relação horário de trabalho/ horário de descanso	1,74	2,52	3,34	0,69
1.11	Disponibilidade e adequação do equipamento, ferramentas e fornecimentos gerais	2	3	4	0,82
1.12	Organização de plantões e o número de inspetores	2,23	3,23	4	0,89
1.13	Estrutura da instituição, autoridade, responsabilidades, e canais de	1,85	2,85	3,85	0,78
1.14	Ações dos supervisores, companheiros de trabalho e outro pessoal	2	3	4	0,82
1.15	Nível de cultura de segurança	2	3	4	0,82
1.16	Recompensas, reconhecimentos, estímulos e salário	1,97	2,97	3,79	0,82
1.17	Requerimentos de movimentos, velocidade e precisão.	2,22	3,22	3,8	0,88
1.18	Relações controle/display	2,6	3,6	4	0,99
1.19	Necessidade de interpretação que se requer durante o ensaio	2,24	3,24	4	0,89
1.20	Necessidade de tomada de decisões.	2,24	3,24	4	0,89

Fator		a	m	b	W
1.21	Frequência e repetitividade (monotonia) do ensaio.	1,38	2,38	3,38	0,65
1.22	Complexidade do ensaio	1,26	2,26	3,26	0,62
1.23	Necessidade de memória a curta ou longo prazo	2,26	3,26	3,86	0,89
1.24	Comunicação e estrutura da equipe de trabalho	2,64	3,64	4	1
1.25	Condição de visualização no display do coletor	1,87	2,87	3,4	0,79
1.26	Condição de manuseio do coletor	1,87	2,87	3,4	0,79
1.27	Ferramentas	2,06	3,06	3,58	0,84
1.28	Uso dos procedimentos escritos	1,59	2,59	3,59	0,71
1.29	Comunicações orais ou escritas	1,59	2,59	3,59	0,71
1.30	Métodos de trabalho	2	3	4	0,82
1.31	Cuidados e advertências	2,18	3,18	4	0,87
2.1	Nível de experiência e preparação anterior	1,45	2,45	3,22	0,67
2.2	Prática atual ou treinamento	2,08	3,08	3,86	0,85
2.3	Capacidade analítica	1,62	2,62	3,4	0,72
2.4	Estado de motivação ou atitude	2,46	3,46	4	0,95
2.5	Estado emocional	1,99	2,99	3,77	0,82
2.6	Influência dos problemas familiares na atitude do inspetor	2,05	3,05	3,59	0,84
2.7	Identificação com o grupo de trabalho	2,42	3,42	3,81	0,94
3.1	Aparecimento de causas repentinas de tensão	1,04	2,04	2,88	0,56
3.2	Duração da tensão	0,8	1,8	2,8	0,49
3.3	Velocidade de trabalho	0,56	1,56	2,56	0,43
3.4	Carga de trabalho	1,76	2,76	3,53	0,76
3.5	Risco de trabalho	1,7	2,7	3,29	0,74
3.6	Ameaça de falhar ou de perder o trabalho	1,34	2,34	3,11	0,64
3.7	Monotonia do trabalho	1,19	2,19	3,03	0,6
3.8	Distrações devido a ruídos, luminosidade ou movimento	0,43	1,43	2,43	0,39
3.9	Duração do estresse	0,8	1,34	2,34	0,37
3.10	Fadiga	0,8	1,57	2,57	0,43
3.11	Dor ou desconforto	1,13	1,57	2,32	0,43
3.12	Fome ou sede	0,41	0,81	1,81	0,22
3.13	Repetição de movimentos	0	1	2	0,27
3.14	Construção de movimentos durante o ensaio	0	0,57	1,57	0,16
3.15	Falta de exercício físico	0,54	1,54	2,54	0,42

Fonte: Autoria própria.

Em virtude da elevada quantidade de atributos analisados, é complexa a identificação dos FDH que possuem maior relevância para a confiabilidade humana.

Para auxiliar nessa identificação, todos os valores de relevância foram ranqueados e classificados de forma decrescente pela sua relevância na tabela 14.

Tabela 14 – Normalização e classificação dos atributos de confiabilidade humana

	Fator	m	W	Rank	ABC
1.24	Comunicação e estrutura da equipe de trabalho	3,64	1,00	1	A
1.18	Relações controle/display	3,60	0,99	2	A
2.4	Estado de motivação ou atitude	3,46	0,95	3	A
2.7	Identificação com o grupo de trabalho	3,42	0,94	4	A
1.23	Necessidade de memória a curta ou longo prazo	3,26	0,89	5	A
1.19	Necessidade de interpretação que se requer durante o ensaio	3,24	0,89	6	A
1.20	Necessidade de tomada de decisões.	3,24	0,89	6	A
1.12	Organização de plantões e o número de inspetores	3,23	0,89	8	A
1.17	Requerimentos de movimentos, velocidade e precisão.	3,22	0,88	9	A
1.31	Cuidados e advertências	3,18	0,87	10	A
2.2	Prática atual ou treinamento	3,08	0,85	11	B
1.27	Ferramentas	3,06	0,84	12	B
2.6	Influência dos problemas familiares na atitude do inspetor	3,05	0,84	13	B
1.11	Disponibilidade e adequação do equipamento, ferramentas e fornecimentos gerais	3,00	0,82	14	B
1.14	Ações dos supervisores, companheiros de trabalho e outro pessoal	3,00	0,82	14	B
1.15	Nível de cultura de segurança	3,00	0,82	14	B
1.30	Métodos de trabalho	3,00	0,82	14	B
2.5	Estado emocional	2,99	0,82	18	B
1.16	Recompensas, reconhecimentos, estímulos e salário	2,97	0,82	19	B
1.25	Condição de visualização no display do coletor	2,87	0,79	20	B
1.26	Condição de manuseio do coletor	2,87	0,79	20	B
1.13	Estrutura da instituição, autoridade, responsabilidades, e canais de	2,85	0,78	22	B
3.4	Carga de trabalho	2,76	0,76	23	B
1.5	Qualidade do ar no local	2,74	0,75	24	B
3.5	Risco de trabalho	2,70	0,74	25	B
2.3	Capacidade analítica	2,62	0,72	26	B
1.28	Uso dos procedimentos escritos	2,59	0,71	27	C
1.29	Comunicações orais ou escritas	2,59	0,71	27	C
1.6	Iluminação no local	2,52	0,69	29	C

Fator		m	W	Rank	ABC
1.10	Relação horário de trabalho/ horário de descanso	2,52	0,69	29	C
1.4	Umidade no local.	2,51	0,69	31	C
1.3	Temperatura no local.	2,51	0,69	32	C
1.8	Vibrações	2,50	0,69	33	C
2.1	Nível de experiência e preparação anterior	2,45	0,67	34	C
1.1	Características arquitetônicas do local de ensaio.	2,41	0,66	35	C
1.21	Frequência e repetitividade (monotonia) do ensaio.	2,38	0,65	36	C
3.6	Ameaça de falhar ou de perder o trabalho	2,34	0,64	37	C
1.22	Complexidade do ensaio	2,26	0,62	38	C
1.2	Características ambientais no local de ensaio.	2,25	0,62	39	C
3.7	Monotonia do trabalho	2,19	0,60	40	C
3.1	Aparecimento de causas repentinas de tensão	2,04	0,56	41	C
1.9	Grau de limpeza em geral	1,80	0,50	42	C
3.2	Duração da tensão	1,80	0,49	43	C
3.10	Fadiga	1,57	0,43	44	C
3.11	Dor ou desconforto	1,57	0,43	45	C
3.3	Velocidade de trabalho	1,56	0,43	46	C
3.15	Falta de exercício físico	1,54	0,42	47	C
3.8	Distrações devido a ruídos, luminosidade ou movimento	1,43	0,39	48	C
1.7	Ruído no local	1,42	0,39	49	C
3.9	Duração do estresse	1,34	0,37	50	C
3.13	Repetição de movimentos	1,00	0,27	51	C
3.12	Fome ou sede	0,81	0,22	52	C
3.14	Constricção de movimentos durante o ensaio	0,57	0,16	53	C

Fonte: Autoria própria.

Aplicando a metodologia de curva ABC, que corresponde a uma variação do princípio de Pareto, é possível identificar os FDH que necessitam maior prioridade na execução do ensaio. Vale lembrar que de acordo com o princípio de Pareto, 20% das causas correspondem à 80% dos problemas. Analogamente, os FDH que possuem classificação A possuem maior peso na confiabilidade humana.

6.1.9 Cálculo do grau de atendimento

A partir do padrão de qualidade levantado anteriormente, é possível avaliar a performance de inspetores e ambientes diferentes de aplicação do ensaio. Para tal análise, foram aplicados questionários à cinco diferentes inspetores. A qualidade do ambiente foi avaliada através de cinco diferentes termos linguísticos: péssimo, ruim, regular, bom e ótimo. Para cada termo foi atribuído um grau de pertinência já normalizado. Os graus de pertinência e as respostas obtidas estão disponíveis nas tabelas 15 e 16

Tabela 15 – Termos linguísticos e respectivos graus de pertinência

Grau de pertinência	Termo linguístico
0,2	Irrelevante
0,4	Pouco Condicionante
0,6	Condicionante
0,8	Muito Condicionante
1,0	Crítico

Fonte: Adaptado de Moré (2004)

Tabela 16 – Avaliação dos ambientes por parte dos inspetores

Fator	Padrão de qualidade	Inspetor 1	Inspetor 2	Inspetor 3	Inspetor 4	Inspetor 5
1.1	0,66	0,8	0,6	0,6	0,6	0,2
1.2	0,62	0,8	0,6	0,6	0,6	0,4
1.3	0,69	0,8	0,8	0,8	0,6	0,4
1.4	0,69	0,6	0,8	0,8	0,6	0,4
1.5	0,75	0,8	0,6	0,8	0,8	0,4
1.6	0,69	0,8	0,6	0,8	0,8	0,6
1.7	0,39	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4
1.8	0,69	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
1.9	0,50	0,8	0,6	0,4	0,4	0,6
1.10	0,69	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6
1.11	0,82	0,8	0,8	0,8	0,8	1
1.12	0,89	0,8	0,8	1	0,8	0,8
1.13	0,78	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8
1.14	0,82	0,8	1	0,8	0,8	0,8
1.15	0,82	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
1.16	0,82	1	0,8	0,8	0,6	0,8
1.17	0,88	1	0,8	0,8	0,6	0,8
1.18	0,99	1	1	1	1	1
1.19	0,89	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

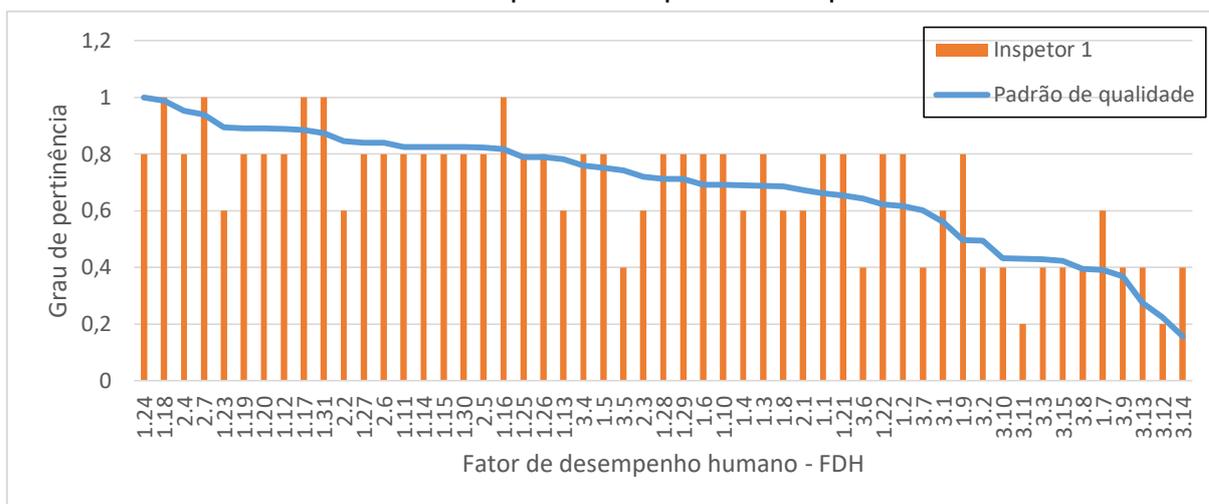
Fator	Padrão de qualidade	Inspetor 1	Inspetor 2	Inspetor 3	Inspetor 4	Inspetor 5
1.20	0,89	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
1.21	0,65	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6
1.22	0,62	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6
1.23	0,89	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8
1.24	1,00	0,8	0,8	1	1	1
1.25	0,79	0,8	1	1	1	1
1.26	0,79	0,8	1	1	1	1
1.27	0,84	0,8	1	1	1	1
1.28	0,71	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
1.29	0,71	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
1.30	0,82	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
1.31	0,87	1	0,8	0,8	0,8	0,8
2.1	0,67	0,6	0,8	0,8	0,4	0,8
2.2	0,85	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8
2.3	0,72	0,6	0,8	0,8	0,4	0,8
2.4	0,95	0,8	0,8	0,8	1	0,6
2.5	0,82	0,8	0,8	0,6	0,8	0,6
2.6	0,84	0,8	0,8	1	0,6	0,8
2.7	0,94	1	0,8	1	0,6	1
3.1	0,56	0,6	0,6	0,4	0,4	0,6
3.2	0,49	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6
3.3	0,43	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6
3.4	0,76	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6
3.5	0,74	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
3.6	0,64	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
3.7	0,60	0,4	0,4	0,4	0,8	0,4
3.8	0,39	0,4	0,4	0,4	0,8	0,6
3.9	0,37	0,4	0,2	0,2	0,2	0,6
3.10	0,43	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4
3.11	0,43	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6
3.12	0,22	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6
3.13	0,27	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6
3.14	0,16	0,4	0,2	0,2	0,2	0,6
3.15	0,42	0,4	0,4	0,4	0,6	0,2

Fonte: Autoria própria.

Nos gráficos 1 à 5 é possível analisar graficamente a inclusão ou não dos inspetores no padrão de qualidade de ensaio definido anteriormente. Para tal, foram plotados os valores de resposta do inspetor para cada FDH e seu padrão de qualidade. Desta forma, caso ocorra a intersecção entre o grau de pertinência no atributo e seu padrão de qualidade, este padrão foi alcançado.

No gráfico 1 está representado o desempenho obtido pelo inspetor 1 em relação ao padrão de qualidade. Observa-se dentre os dez fatores de maior importância, o padrão de qualidade foi atendido apenas para os fatores 1.18, 2.7, 1.17 e 1.31. O fator 3.5 foi o que apresentou a maior diferença em relação ao padrão definido.

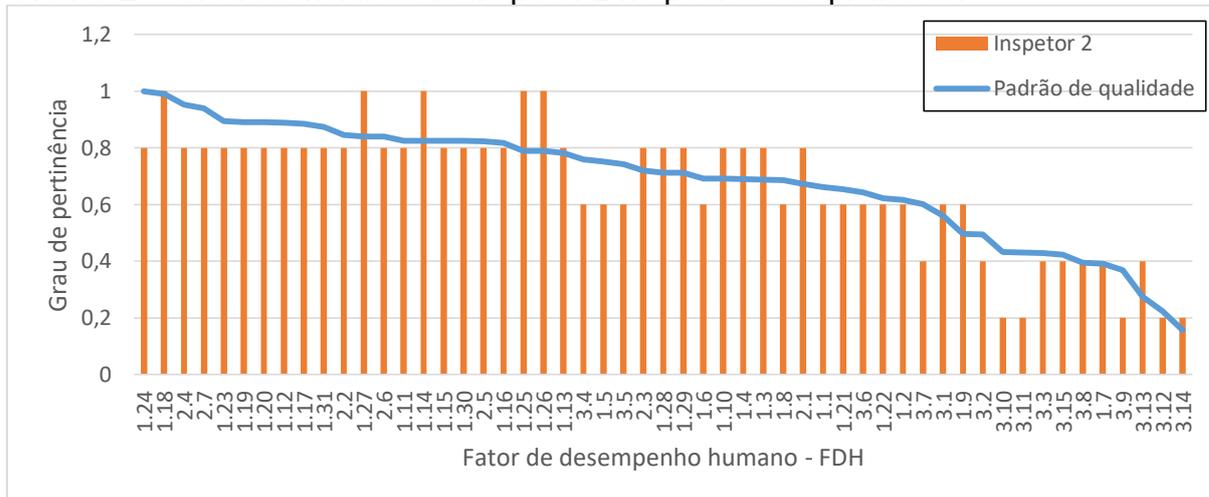
Gráfico 1 – Grau de inclusão do inspetor 1 no padrão de qualidade.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico 2 corresponde ao resultado obtido pelo inspetor 2. Avaliando os fatores de maior importância, classificação “A”, o inspetor atendeu o padrão apenas no item 1.18. Este resultado irá impactar diretamente na confiabilidade intrínseca do operador, uma vez que são os fatores que apresentam maior peso na confiabilidade humana.

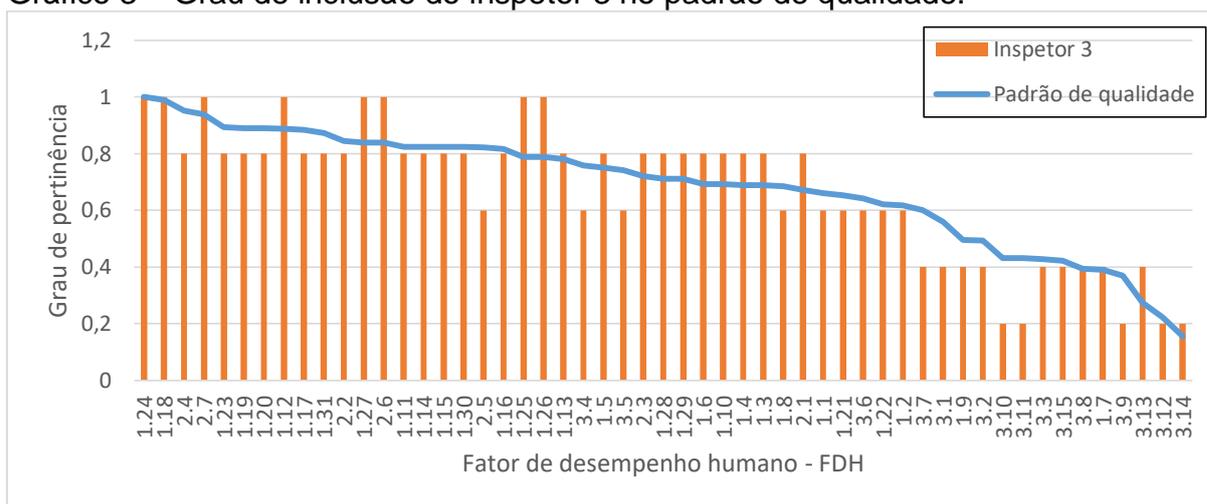
Gráfico 2 – Grau de inclusão do inspetor 2 no padrão de qualidade.



Fonte: Autoria própria.

No gráfico 3, o inspetor 3 é avaliado em função do padrão de qualidade. Visualmente, em comparação aos demais inspetores avaliados, este inspetor apresentou o melhor resultado, atendendo a maior parte dos fatores de maior classificação e com baixa variação em relação ao padrão de qualidade. Desta forma, espera-se que o grau de inclusão no padrão de qualidade seja um dos maiores dentre o grupo avaliado.

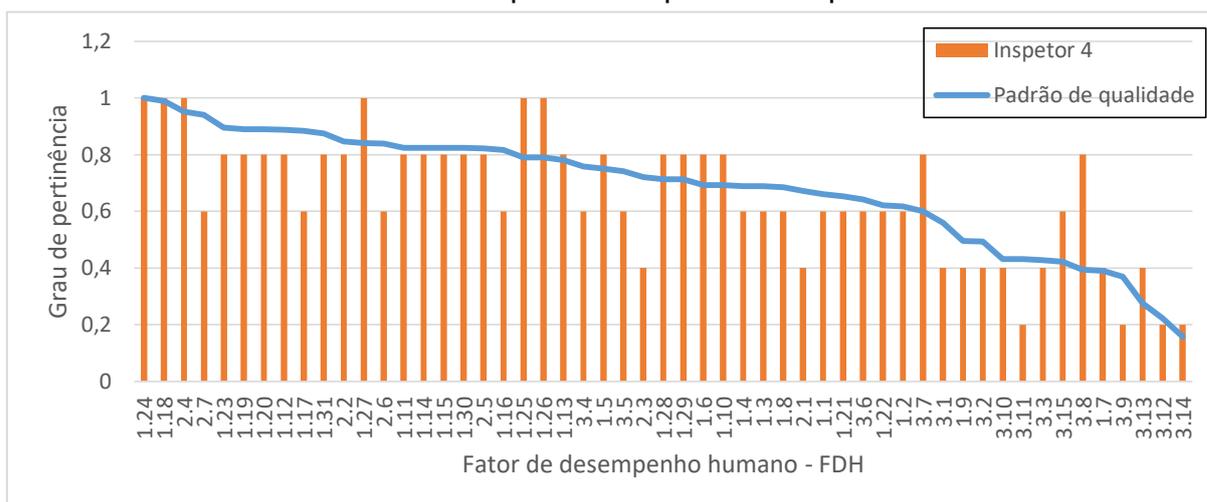
Gráfico 3 – Grau de inclusão do inspetor 3 no padrão de qualidade.



Fonte: Autoria própria.

No gráfico 4, é realizada a comparação entre o resultado obtido pelo instrutor 4 e o padrão de qualidade. Observa-se que o inspetor atendeu os três fatores de maior relevância na confiabilidade. Contudo, a grande maioria dos outros quesitos não foram atendidos, indicando uma baixa confiabilidade em geral.

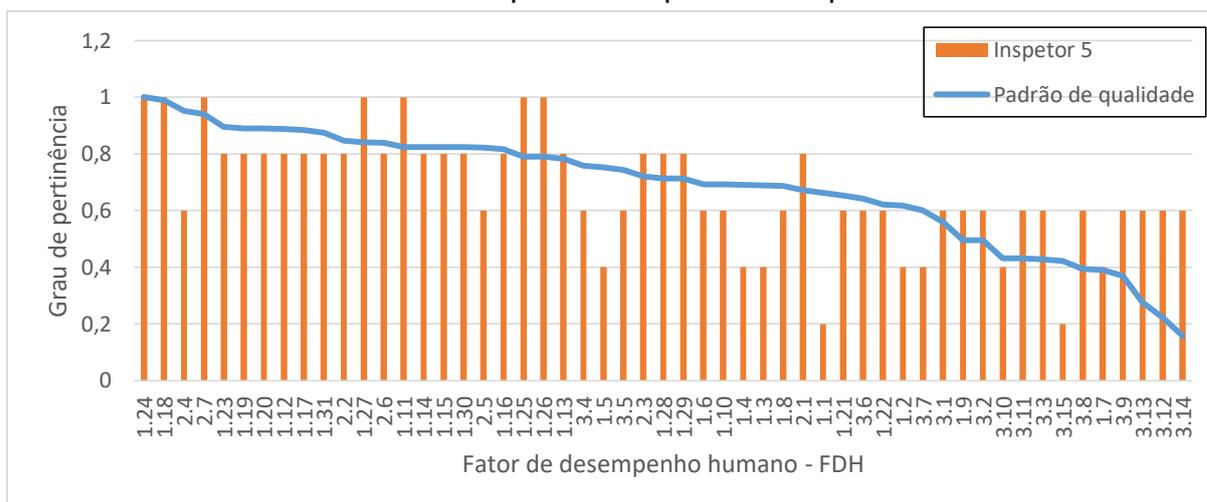
Gráfico 4 – Grau de inclusão do inspetor 4 no padrão de qualidade.



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, no gráfico 5 o inspetor 5 é avaliado. Observa-se uma grande deficiência no quesito 2.4, o qual possui a terceira maior relevância no cálculo da confiabilidade humana. Dentre os inspetores avaliados foi o que apresentou melhor resultado nos quesitos de menor importância, o que possui pouco impacto em sua confiabilidade.

Gráfico 5 – Grau de inclusão do inspetor 5 no padrão de qualidade.



Fonte: Autoria própria.

Uma forma de avaliação da confiabilidade humana no ensaio é através da determinação do grau de atendimento ao padrão de qualidade. Este parâmetro é calculado através do método COG (Center of Gravity), disponível na fórmula 8.

$$R_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^k w_j * r_{ij}}{\sum_{j=1}^k w_j} \quad (8)$$

Onde: w corresponde aos pesos de cada atributo e r o grau de pertinência da resposta do inspetor.

6.1.10 Grau de inclusão no conjunto *fuzzy*

O grau de inclusão do desempenho do inspetor no padrão de qualidade pode ser calculado através da fórmula 11. Sendo, $A(x)$ o conjunto *fuzzy* que representa o padrão de qualidade e $B(x)$ o conjunto *fuzzy* que representa o desempenho do inspetor no ensaio..

$$S(A,B) = \frac{1}{\sum_{x \in X} A(x)} \left\{ \sum_{x \in X} A(x) - \sum_{x \in X} \max\{0, A(x) - B(x)\} \right\} \quad (11)$$

Os resultados estão disponíveis na tabela 17, observou-se que as grandezas grau de atendimento e grau de inclusão não são proporcionais. Uma metodologia avalia o quão próximo do padrão de qualidade o ensaio está, enquanto a outra avalia o grau de atendimento do padrão de qualidade.

Tabela 17 – Grau de desempenho e inclusão do padrão de qualidade

Inspetor	Grau de atendimento	Grau de inclusão no padrão de qualidade
1	0,73	0,914
2	0,72	0,917
3	0,73	0,923
4	0,70	0,894
5	0,71	0,890

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos, é possível afirmar que o inspetor 3 possui o maior grau de confiabilidade. Contudo, é importante ressaltar que todos os inspetores

apresentaram resultados semelhantes, validando a qualidade da equipe como um todo.

6.2 ESTUDO DO PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Nesta etapa, a metodologia proposta por Moré (2004) é semelhante à aplicada na avaliação da confiabilidade humana. A principal diferença é o objeto de estudo, em vez de avaliar a confiabilidade do inspetor, a probabilidade da falha no procedimento será avaliada.

Para tal análise, Moré (2004) estabeleceu seis etapas. Estas contemplam a construção do procedimento de análise, escolha dos termos linguísticos, definição das funções de pertinência, tratamento dos dados, transformação em *fuzzy* e construção da árvore de falha do procedimento.

6.2.1 Construção do procedimento

A primeira etapa consiste na construção do procedimento de análise de vibração. Para fins didáticos, as atividades contempladas correspondem apenas à parte de coleta dos dados. Na tabela 18 está construído o sequenciamento de atividades do procedimento proposto.

Tabela 18– Procedimento de análise de vibração

Ação, item ou tarefa.	
A	Transferir dados software → coletor
B	Identificar equipamento na rota de inspeção
C	Localização do equipamento na planta
D	Identificação do tipo do equipamento
E	Identificação da frequência de operação
F	Seleção dos pontos de coleta
G	Seleção do plano de medição
H	Seleção do tipo de medição
I	Seleção do tipo de fixação
J	Fixação do acelerômetro na máquina
K	Aguardar estabilização
L	Adquirir dados
M	Validar dados
N	Finalizar medição

Ação, item ou tarefa.	
O	Transferir dados coletor → software

Fonte: Autoria própria.

Assim como realizado anteriormente, cada uma dessas ações será considerada como uma variável linguística. O valor *fuzzy* desta variável será obtido a partir do processamento dos termos linguísticos utilizados pelos especialistas em suas opiniões.

6.2.2 Escolha dos termos linguísticos

No questionário aplicado aos especialistas, foram avaliados três diferentes fatores: a probabilidade de falha na execução da tarefa, nível de dependência entre tarefa e sua precedente imediata e, finalmente, o grau de transtorno de uma tarefa nas tarefas subsequentes.

Tabela 19 – Termos linguísticos e respectivos números *fuzzy* para a variáveis “probabilidade de falha” e “nível de dependência da tarefa e sua precedente imediata”.

Grau de importância	Simbologia	Termo linguístico	Número <i>fuzzy</i>
0	ZR	Zero	$N = (0,2;0,2;0,4)$
1	B	Baixa	$N = (0,2;0,4;0,6)$
2	M	Moderada	$N = (0,4;0,6;0,8)$
3	A	Alta	$N = (0,6;0,8;1)$
4	CR	Muito alta	$N = (0,8;1,1)$

Fonte: Autoria própria.

Para as variáveis “probabilidade de falha” e “nível de dependência da tarefa e sua precedente imediata” foi adotada uma escala de importância em cinco diferentes níveis: zero, baixa, moderada, alta e muito alta. Os termos linguísticos, simbologia e respectivos números *Fuzzy* estão dispostos na tabela 19.

Tabela 20 – Termos linguísticos e respectivos números *fuzzy* para a variável “grau de transtorno nas tarefas subsequentes”.

Grau de importância	Termo linguístico	Número <i>fuzzy</i>
0	Nenhum transtorno	$N = (0,2;0,2;0,4)$
1	Pouco transtorno	$N = (0,2;0,4;0,6)$
2	Algum transtorno	$N = (0,4;0,6;0,8)$
3	Importante transtorno	$N = (0,6;0,8;1)$
4	Transtorno crítico	$N = (0,8;1,1)$

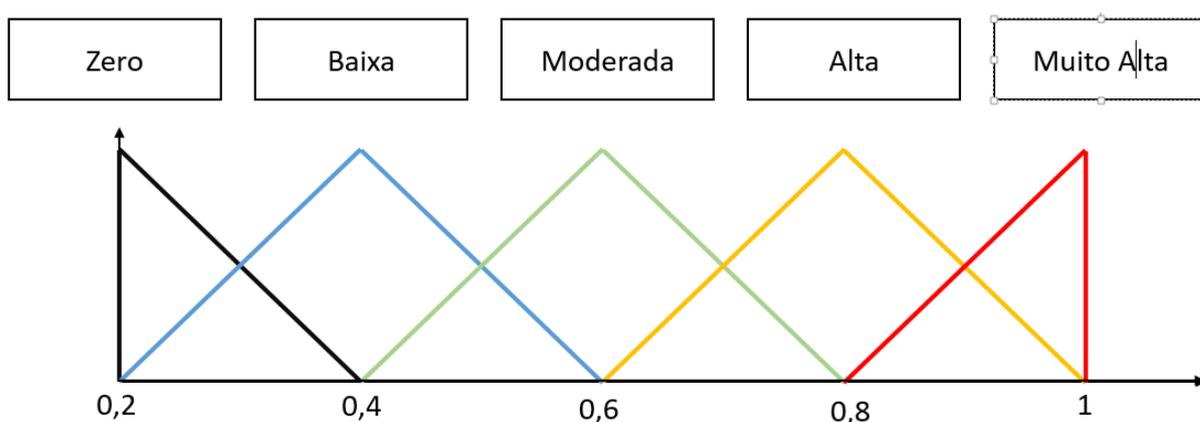
Fonte: Autoria própria.

O mesmo número de graus de importância foi adotado para a variável “grau de transtorno nas tarefas subsequentes”, mas neste caso os termos linguísticos escolhidos foram: nenhum transtorno, pouco transtorno, algum transtorno, importante transtorno e transtorno crítico. A correspondência entre os termos linguísticos, graus de importância e número *Fuzzy* estão exemplificados na tabela 20.

6.2.3 Escolha do intervalo numérico

Como demonstrado anteriormente, cada variável linguística pode ser representada em função de um intervalo e funções de pertinência. Nesta parte do estudo, cada termo linguístico foi representado por um número *fuzzy* triangular positivo, do tipo L-R. Nas tabelas 22 e 23 estão correlacionados os termos linguísticos aos seus respectivos números *fuzzy*.

Figura 13 – Função de pertinência para a variáveis “probabilidade de falha” e “nível de dependência da tarefa e sua precedente imediata”



Fonte: Autoria própria.

Ação, item ou tarefa.		Probabilidade de falha					Nível de dependência entre tarefa i+1 e i				
		Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4	Especialista 5	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4	Especialista 5
B	Identificar equipamento na rota de inspeção	B	B	B	B	B	B	B	M	M	B
C	Localização do equipamento na planta	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
D	Identificação do tipo do equipamento	M	B	B	B	B	B	B	B	B	B
E	Identificação da frequência de operação	M	A	A	A	M	A	M	M	M	M
F	Seleção dos pontos de coleta	M	B	B	B	B	B	B	B	B	B
G	Seleção do plano de medição	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
H	Seleção do tipo de medição	M	B	B	B	B	B	B	B	B	B
I	Seleção do tipo de fixação	B	ZR	ZR	ZR	B	B	B	B	B	B
J	Fixação do acelerômetro na máquina	B	B	M	M	B	M	B	M	M	B
K	Aguardar estabilização	B	B	M	M	M	B	A	A	A	B
L	Adquirir dados	B	ZR	ZR	ZR	B	B	M	M	M	B
M	Validar dados	B	B	M	M	B	B	B	M	M	B
N	Finalizar medição	ZR	ZR	B	B	B	B	B	B	B	B
O	Transferir dados coletor → software	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR

Fonte: Autoria própria. Onde ZR, B, M, A e CR representam zero, baixa, moderada, alta e crítica.

6.2.5 Tratamento dos dados

A metodologia *fuzzy* foi então aplicada através do método proposto na avaliação da confiabilidade humana. Primeiramente, as opiniões foram transformadas em número *fuzzy*, estes foram processados de acordo com o peso dos especialistas e grau de concordância relativa e então foi obtido um número *fuzzy* (a; m; b) correspondente à variável linguística. Os resultados obtidos estão contidos na tabela 22.

Tabela 22 – Representação *fuzzy* da “probabilidade de falha”

Atividade	a	m	b	R	Ranking
E Identificação da frequência de operação	0,53	0,73	0,93	1,00	1

Atividade		a	m	b	R	Ranking
K	Aguardar estabilização	0,33	0,53	0,73	0,62	2
J	Fixação do acelerômetro na máquina	0,29	0,49	0,69	0,56	3
M	Validar dados	0,29	0,49	0,69	0,56	3
D	Identificação do tipo do equipamento	0,23	0,43	0,63	0,44	5
F	Seleção dos pontos de coleta	0,23	0,43	0,63	0,44	5
H	Seleção do tipo de medição	0,23	0,43	0,63	0,44	5
B	Identificar equipamento na rota de inspeção	0,20	0,40	0,60	0,38	8
C	Localização do equipamento na planta	0,20	0,40	0,60	0,38	8
G	Seleção do plano de medição	0,20	0,40	0,60	0,38	8
N	Finalizar medição	0,20	0,32	0,52	0,24	11
I	Seleção do tipo de fixação	0,20	0,26	0,46	0,12	12
L	Adquirir dados	0,20	0,26	0,46	0,12	12
A	Transferir dados software → coletor	0,20	0,20	0,40	0,00	14
O	Transferir dados coletor → software	0,20	0,20	0,40	0,00	14

Fonte: Autoria própria.

Também na tabela 22 foi realizada a ordenação das tarefas de acordo com o máximo grau de pertinência. Já na tabela 23 estão disponíveis os valores da variável “nível de dependência da tarefa e sua precedente imediata”, onde D representa o valor normalizado da dependência.

Tabela 23 – Representação *fuzzy* do “nível de dependência da tarefa e sua precedente imediata”

Atividade		a	m	b
A	Transferir dados software → coletor	0,20	0,20	0,40
B	Identificar equipamento na rota de inspeção	0,29	0,49	0,69
C	Localização do equipamento na planta	0,20	0,40	0,60
D	Identificação do tipo do equipamento	0,20	0,40	0,60
E	Identificação da frequência de operação	0,42	0,62	0,82
F	Seleção dos pontos de coleta	0,20	0,40	0,60
G	Seleção do plano de medição	0,20	0,40	0,60
H	Seleção do tipo de medição	0,20	0,40	0,60
I	Seleção do tipo de fixação	0,20	0,40	0,60
J	Fixação do acelerômetro na máquina	0,32	0,52	0,72

Item	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
H	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,12	0,58	0,12	0,12	0,12	0,12
J	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,58	0,12	0,12	0,12	0,12
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,12	0,12
L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,12	0,12
M	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,12
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

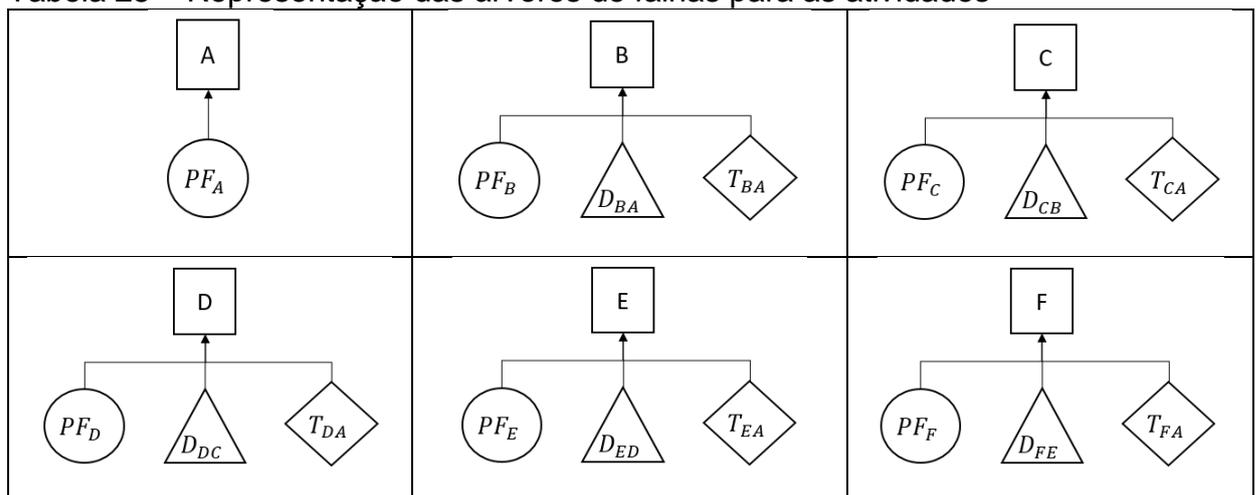
Fonte: Autoria própria.

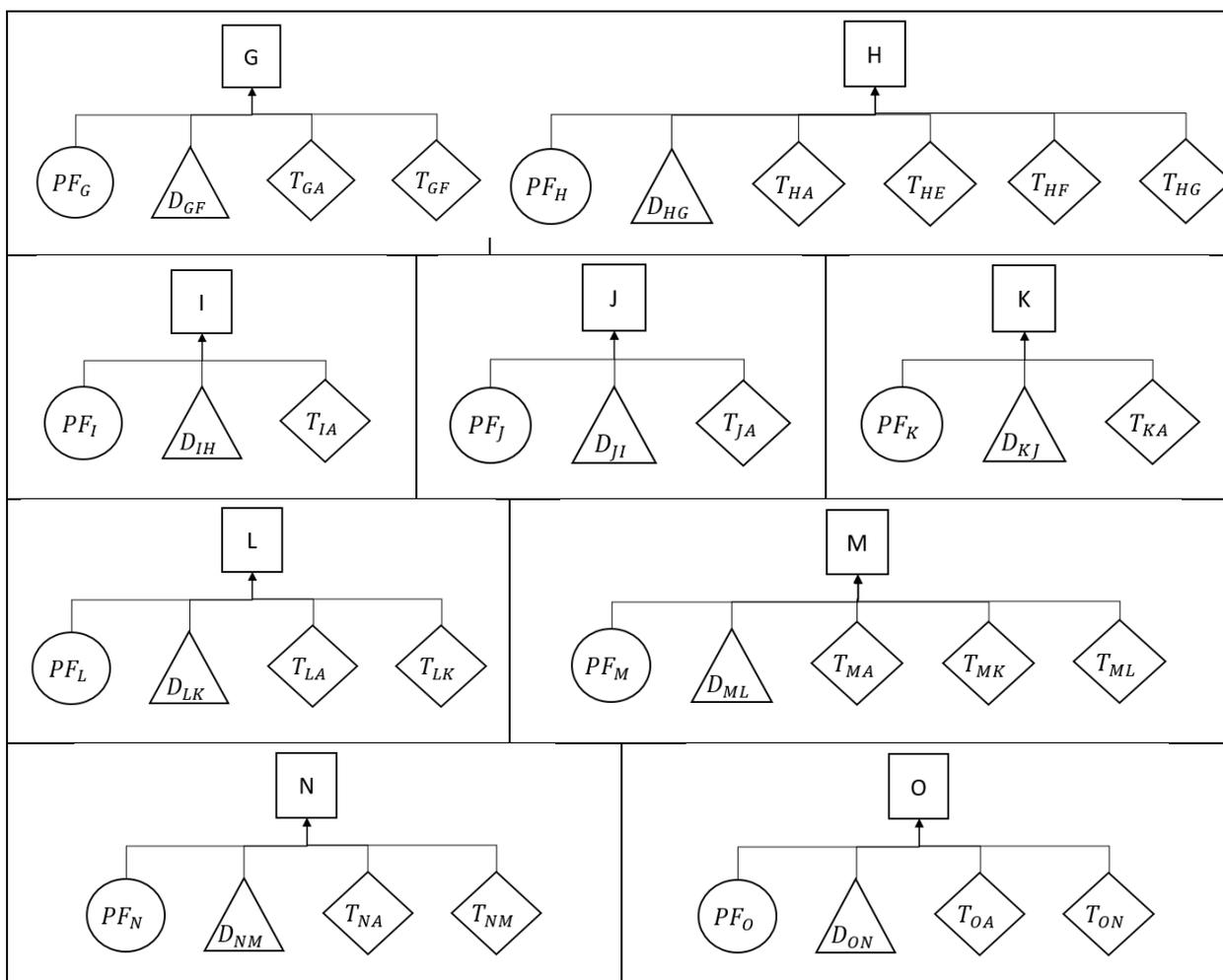
Na tabela, é possível aplicar uma linha de corte para selecionar as atividades com maior impacto no restante do procedimento. Neste caso, foi aplicado um filtro para valores acima de 0,8 e estes foram destacados em outra cor para identificação.

6.2.7 Construção da árvore de falha

A árvore de falhas corresponde a um diagrama correlacionando a atividade a ser executada e os eventos que possuem influência direta em sua execução. Para todas as atividades identificadas no estudo foram construídas árvores correlacionando a probabilidade de falha da atividade (PF), a dependência da atividade em relação à atividade anterior (D) e o transtorno ocasionado por uma atividade prévia na execução atual (T).

Tabela 25 – Representação das árvores de falhas para as atividades





Fonte: Autoria própria.

Na tabela 25 estão disponíveis as árvores de falha para as quinze atividades do procedimento de análise de vibração. Observa-se que a partir da atividade B, todas possuem algum transtorno (T) em função de atividades realizadas previamente. A atividade que é regida pelo maior número de eventos é a H, indicando que esta atividade possui grande dependência do processo realizado previamente, afetando assim sua probabilidade de falha.

6.2.8 Cálculo da probabilidade de falha

De acordo com Moré (2004), as sequências das atividades no procedimento podem ser consideradas um sistema em série. Desta forma, a probabilidade de erro do sistema corresponde ao produto das probabilidades individuais de cada atividade executada.

A probabilidade de erro em cada atividade pode ser calculada a partir dos números *fuzzy* correspondentes à probabilidade de falha, dependência e graus de transtorno avaliados para cada atividade. A equação para o cálculo das probabilidades de erro pode ser construída a partir das respectivas árvores de falha. Desta forma, tem-se:

$$P_a = (1 - (1 - P_{Fa}))$$

$$P_b = (1 - (1 - P_{Fb}) * (1 - D_{ba}) * (1 - T_{ba}))$$

$$P_c = (1 - (1 - P_{Fc}) * (1 - D_{cb}) * (1 - T_{ca}))$$

$$P_d = (1 - (1 - P_{Fd}) * (1 - D_{dc}) * (1 - T_{da}))$$

$$P_e = (1 - (1 - P_{Fe}) * (1 - D_{ed}) * (1 - T_{ea}))$$

$$P_f = (1 - (1 - P_{Ff}) * (1 - D_{fe}) * (1 - T_{fa}))$$

$$P_g = (1 - (1 - P_{Fg}) * (1 - D_{gf}) * (1 - T_{ga}) * (1 - T_{gf}))$$

$$P_h = (1 - (1 - P_{Fh}) * (1 - D_{hg}) * (1 - T_{ha}) * (1 - T_{he}) * (1 - T_{hf}) * (1 - T_{hg}))$$

$$P_i = (1 - (1 - P_{Fi}) * (1 - D_{ih}) * (1 - T_{ia}))$$

$$P_j = (1 - (1 - P_{Fj}) * (1 - D_{ji}) * (1 - T_{ja}))$$

$$P_k = (1 - (1 - P_{Fk}) * (1 - D_{kj}) * (1 - T_{ka}))$$

$$P_l = (1 - (1 - P_{Fl}) * (1 - D_{lk}) * (1 - T_{la}) * (1 - T_{lk}))$$

$$P_m = (1 - (1 - P_{Fm}) * (1 - D_{ml}) * (1 - T_{ma}) * (1 - T_{mk}) * (1 - T_{ml}))$$

$$P_n = (1 - (1 - P_{Fn}) * (1 - D_{nm}) * (1 - T_{na}) * (1 - T_{nm}))$$

$$P_o = (1 - (1 - P_{Fo}) * (1 - D_{on}) * (1 - T_{oa}) * (1 - T_{on}))$$

Tabela 26 – Representação *fuzzy* da probabilidade de erro do inspetor

Atividade		a	m	b
A	Transferir dados software → coletor	0,20	0,20	0,40
B	Identificar equipamento na rota de inspeção	0,83	0,96	0,99
C	Localização do equipamento na planta	0,80	0,95	0,98
D	Identificação do tipo do equipamento	0,81	0,95	0,98
E	Identificação da frequência de operação	0,92	0,99	1,00
F	Seleção dos pontos de coleta	0,81	0,95	0,98
G	Seleção do plano de medição	0,96	1,00	1,00
H	Seleção do tipo de medição	1,00	1,00	1,00
I	Seleção do tipo de fixação	0,80	0,94	0,98
J	Fixação do acelerômetro na máquina	0,85	0,97	0,99

Atividade		a	m	b
K	Aguardar estabilização	0,89	0,98	1,00
L	Adquirir dados	0,97	1,00	1,00
M	Validar dados	0,99	1,00	1,00
N	Finalizar medição	0,96	1,00	1,00
O	Transferir dados coletor → software	0,96	1,00	1,00

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 26 estão disponíveis os números *fuzzy* que representam a probabilidade de erro nas atividades estudadas. Observa-se que as probabilidades obtidas são muito elevadas, o que sugere uma baixa confiabilidade nos ensaios em geral.

6.3 ANÁLISE GERAL

A metodologia proposta por Moré (2004) apresentou-se como um método rápido e eficaz para a avaliação da influência de fatores humanos e ambientais na confiabilidade humana. A partir da aplicação de um questionário a um grupo de especialistas na área de estudo, é possível determinar um padrão de qualidade a ser considerado.

Uma vez estabelecido o padrão, as respostas dos inspetores podem ser avaliadas graficamente, identificando os fatores atendidos pelo avaliado e as deficiências de cada inspetor em comparação ao padrão. Outra forma, é o cálculo do grau de inclusão ao padrão de qualidade, o qual possibilita a classificação de um inspetor específico em relação aos demais em sua equipe de trabalho.

Os resultados obtidos demonstram uma grande homogeneidade na equipe avaliada. Destacam-se os inspetores 1, 2 e 3 que apresentaram grau de inclusão ao padrão acima de 90%.

Já o estudo do procedimento de coleta de dados para a análise vibracional possibilitou a identificação das atividades que possuem maior probabilidade de erro e maior impacto no resultado da coleta com um todo. Observa-se que a atividade de transferência dos dados da rota de inspeção ao coletor apresenta baixa probabilidade de erro, contudo possui influência em todas as atividades subsequentes.

Atividades que necessitam a fundamentação teórica em análise de vibração apresentaram as maiores probabilidades de erro, são elas: identificação da frequência de operação, seleção do plano de medição e seleção do tipo de medição. Este resultado valida a necessidade de treinamentos específicos na área e certificação por parte do inspetor para garantia da qualidade do ensaio.

7. CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi abordar a metodologia desenvolvida por Moré (2004) na avaliação de ensaios de análise de vibração. O método proposto visa utilizar da lógica *fuzzy* para determinar a probabilidade de erro humano em uma tarefa de inspeção. A utilização de variáveis e termos linguístico visa uma aquisição de dados de forma mais precisa, uma vez que representa de forma natural a opinião pessoal e incertezas do especialista quanto ao fator analisado.

A bibliografia analisada foi composta de três principais temáticas. Primeiramente, foi abordado o tema de aplicação do método, a análise vibracional. O aprofundamento neste tópico nos permitiu a construção do sequenciamento de tarefas necessárias para a coleta de dados durante a análise de vibração. Em seguida, a confiabilidade humana foi avaliada a partir de estudos que a correlacionam com fatores de desempenho humano. Desta forma, foram determinados os fatores a serem avaliados através da opinião de especialistas. Por fim, a lógica *fuzzy* foi explanada. O emprego da lógica proporcionou o ferramental matemático para a execução do método proposto.

O ponto positivo da metodologia proposta é a identificação dos fatores que possuem maior influência na confiabilidade humana. Esta identificação possibilita aos gestores ou líderes de equipes de inspeção o direcionamento de esforços para mitigar a ocorrência de erros em campo. Isto pode ser realizado através de treinamentos visando o aperfeiçoamento na técnica, ou ainda, o correto direcionamento da mão de obra em função das características individuais de cada operador.

Da mesma forma, avaliando as atividades envolvidas no procedimento de análise de vibração, é possível identificar as tarefas que possuem maior probabilidade de falha humana, e, seu impacto no processo como um todo. Isto permite a correta instrução da mão de obra quanto à importância da tarefa e o procedimento adequado para sua realização. Deste modo, a qualidade do procedimento será aumentada, reduzindo a probabilidade de erro em sua execução.

As maiores dificuldades para a execução do estudo foram em angariar o time de especialistas para avaliação das variáveis linguísticas em forma de questionários. Isto culminou em um time de inspetores pertencentes à uma única empresa, o que limitou os resultados obtidos à uma realidade específica.

A facilidade de aplicação do método matemático, a lógica *fuzzy*, foi um ponto positivo do emprego desta metodologia. Através deste modelo foi possível processar as informações de forma rápida e construir resultados de forma objetiva e visual. Uma vez construído o modelo, a inserção de novas informações é realizada de forma fácil e intuitiva, o que possibilita o refinamento dos resultados obtidos.

Identificou-se uma grande influência de fatores humanos na confiabilidade do objeto de estudo. A presença de fatores que abordam a afinidade com equipe, comunicação e motivação dentre os itens de maior criticidade demonstram que o resultado de um procedimento não depende apenas de técnica, mas sim de garantir ao inspetor um ambiente de trabalho que proporcione condições físicas e mentais ao funcionário.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se como continuação deste trabalho o refinamento das atividades envolvidas no procedimento de inspeção. Permitindo a construção de uma árvore de falhas mais complexa e realista.

No presente estudo apenas foram contempladas atividades referentes ao processo de coleta de dados. Um novo trabalho envolvendo a análise dos dados coletados deve ser realizado como complementação do presente estudo.

A aplicação de questionários à especialistas de diferentes realidades também permitiria ao modelo a obtenção de resultados condizentes com diferentes campos de aplicação.

O emprego da metodologia em outros tipos de inspeção também é recomendado. Em indústrias modernas, rotinas de inspeção termográfica, por exemplo, também são amplamente empregadas. Estas por sua vez, podem ser objeto de estudo em futuros trabalhos.

REFERÊNCIAS

- ABNT, **NBR. 5462**. 1994. Confiabilidade e Manutenibilidade.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 770: A manager's guide to reducing human errors. Improving human performance in the process industries**. Washington, DC., 2001.
- ASSIS, Rui. **Apoio à Decisão em Gestão da Manutenção: Fiabilidade e manutenibilidade**. 2004.
- EMBREY, David E. **SLIM-MAUD: A computer-based technique for human reliability assessment**. International Journal of Quality & Reliability Management, v. 3, n. 1, p. 5-12, 198
- HOLLNAGEL, Erik. **Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)**. Elsevier, 1998.
- IMV CORPORATION, **Vibration Technical Guide**. Disponível em: <https://www.imv.co.jp/e/pr/vibration_measuring/chapter03/>. Acesso em: 21 abr. 2018.
- LORENZO, D. K. **API-770 Reducing Human Errors (A Manager's Guide to Reducing Human Errors - Improving Human Performance in the Process Industries)**. American Petroleum Institute Inc., 2001.
- MARCAL, Rui Francisco Martins. **Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibração e lógica Fuzzy**. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, de Minas e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- MORE, J. DOMECH et al. Estudo da Confiabilidade Humana na Indústria do Petróleo: uma Abordagem *Fuzzy*. 2009.
- MORÉ, Jesús Domech. Aplicação da lógica *Fuzzy* na avaliação da confiabilidade humana nos ensaios não destrutivos por ultra-som. 176 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro. 2004.
- MOUBRAY, John. **RCM II. Reliability-centred Maintenance**, Pp. I-17, 2007.
- MURARI, Mariana Lima Acioli et al. **Desenvolvimento de ferramentas de sistemas inteligentes na análise de confiabilidade humana em sistemas industriais**. 2012.
- NASCIMENTO, Claudio Souza do et al. **Aplicação da metodologia fuzzy na quantificação da probabilidade de erro humano em instalações nucleares**. 2010. Tese de Doutorado. IPEN, São Paulo, Brazil.

RIGONI, Emerson. **METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE: uma abordagem fundamentada em sistemas baseados em lógica Fuzzy**. 342 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SALES FILHO, Romero Luiz Mendonça. **Uma proposta lingüística para a educação dos parâmetros de redes Bayesianas-Fuzzy na estimação da probabilidade de erro humano**. 2008.

SCHEFFER, Cornelius; GZRDHAR, Paresh. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Elsevier, 2004.

SILVA, E. L., MENEZES, E. M., **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4ªed. Florianópolis. LED/PPGEP/UFSC, 2005.

SWAIN, Alan D. **Accident sequence evaluation program: Human reliability analysis procedure**. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA); Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (USA). Office of Nuclear Regulatory Research, 1987.

SWAIN, Alan D. **THERP**. Sandia Corp., Albuquerque, N. Mex., 1964.

SZWARCMAN, Dilza et al. **A Fuzzy System for the Assessment of Human Reliability**. In: IFSA/EUSFLAT Conf.2009. p. 1102-1107.

US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION et al. **Technical basis and implementation guidelines for a technique for human event analysis (ATHEANA)**. NUREG-1624, Rev, v. 1, 2000.

VIBRATION INSTITUTE, **Analyst Classifications**. Disponível em: <<https://www.vi-institute.org/analystclassifications>>. Acesso em: 09 jan. 2018.

VISSOCI JUNIOR, Rodney Luis. **Confiabilidade em equipamentos rotativos baseado em monitoramento de condição: aumento da confiabilidade de equipamentos rotativos em empresas de papel e celulose**. 2016. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

XENOS, Harilaus G. **Gerenciando a manutenção produtiva**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, v. 171, 1998.