

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DARLAN HENRIQUE ANSOLIN
GILMAR VINICIUS RODRIGUES

**SISTEMA INTEGRADO DE MANUTENÇÃO CENTRADA NA
CONFIABILIDADE (MCC) AUXILIADO POR LÓGICA FUZZY**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

DARLAN HENRIQUE ANSOLIN
GILMAR VINICIUS RODRIGUES

**SISTEMA INTEGRADO DE MANUTENÇÃO CENTRADA NA
CONFIABILIDADE (MCC) AUXILIADO POR LÓGICA FUZZY**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título Bacharel em Engenharia
Mecânica, do Departamento de Mecânica,
da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientadora Prof^a. M.a. Ana Maria Bueno

PONTA GROSSA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

**SISTEMA INTEGRADO DE MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE
(MCC) AUXILIADO POR LÓGICA FUZZY**

por

DARLAN HENRIQUE ANSOLIN E GILMAR VINICIUS RODRIGUES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 27 de novembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^a. Ma.Ana Maria Bueno
Orientadora

Prof. Dr.Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Dr.Evandro Eduardo Broday
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho
Coordenador do Curso

RESUMO

ANSOLIN, Darlan Henrique; RODRIGUES, Gilmar Vinícius. **Sistema Integrado de Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) Auxiliado por Lógica Fuzzy.** 2018. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

A manutenção centrada na confiabilidade (MCC) tem tido cada vez mais espaço dentro da indústria, onde hoje pequenas melhorias representam grandes ganhos. Especificamente, a ferramenta FMEA/FMECA, muito utilizada dentro da MCC, tem papel fundamental na priorização de ações dentro de um bom plano de manutenção. Porém, o FMEA/FMECA possui algumas falhas, oriundas de seu mecanismo matemático de funcionamento. A proposta é reduzir significativamente as limitações da ferramenta, agindo na metodologia de priorização dos modos de falhas. Para isso, foi utilizada a lógica *fuzzy* a fim de modificar a aplicação da ferramenta. Com êxito, foi proposta e desenvolvida uma aplicação Java que reúne a versatilidade da ferramenta com um mais elaborado algoritmo de cálculo para a obtenção dos números de prioridade de risco (NPR) da ferramenta FMEA/FMECA tradicional. Os resultados são satisfatórios e a principal limitação da ferramenta foi eliminada. Dessa forma, uma priorização dos modos de falha de equipamentos e sistemas puderam ser melhor elaboradas.

Palavras chave: Manutenção centrada em confiabilidade. Lógica *fuzzy*. NPR. FMEA/FMECA. Java.

ABSTRACT

ANSOLIN, Darlan Henrique; RODRIGUES, Gilmar Vinícius. **Integrated Reliability Centered Maintenance System (RCM) Aided by Fuzzy Logic**. 2018. 67 f. Graduation work (Bachelor of Mechanical Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2018.

The Reliability-centered Maintenance (RCM) has become increasingly important within industries, where tiny improvements projects huge profits. Specifically, the FMEA/FMECA tool, largely applied in RMC concept, has fundamental protagonism in actions prioritization within a efficient maintenance plan. However, the FMEA/FMECA has some limitations, from your mathematical mecanism. The proposal is to reduce significantly the limitations of the FMEA/FMECA tool acting on the prioritization methodology of the failures modes. For this, the fuzzy logic was used to modify the application of the tool. With success, a Java application was proposed and developed, which brings together the versatility of the FMEA/FMECA tool and a more elaborated calculus algorithm to obtain the risk prioritization number (RPN) of the original FMEA/FMECA. The results are satisfactory and the main tool limitation was overcome. In this way, a more efficient prioritization of the failures modes could be done.

Key-words: Reliability-centered maintenance. Fuzzy logic. RPN. FMEA/FMECA. Java.

AGRADECIMENTOS

Darlan Henrique Ansolin

Primeiramente a Deus, por ter me dado forças e sabedoria para a continuação e finalização deste trabalho.

À minha família, que mesmo estando longe não me privou de todo o carinho, atenção, resguardo, aconselhamento e principalmente da possibilidade de cursar uma graduação a 2.300 km de casa. Obrigado pela confiança e pelo amor.

Aos meus amigos de Sapezal-MT, por todos os momentos de descontração e diversão, além dos conselhos. Em especial aos amigos do Yagós, minha segunda família. Que continuemos vibrando e celebrando cada vitória.

À minha querida amiga Sabrina Heck, por toda a atenção e risadas que me proporcionou nestes cinco anos de graduação.

Aos amigos de Ponta Grossa, em especial os queridos Emerson e Célia Pedroso, e aos amigos que residiram comigo, que me receberam e deram assistência durante quatro anos e meio da minha estadia em Ponta Grossa.

O refúgio da mente para quem está longe de casa são os bons momentos com os amigos e um tereré bem gelado. Sem a sanidade mental, eu nada conseguiria.

Também agradeço ao meu querido amigo Gilmar, que juntamente comigo fez parte de um árduo trabalho. Sem você este trabalho não teria existido. Sua inteligência amplificou os nossos resultados.

E, por último e não menos importante, à UTFPR, por ter me dado a oportunidade de aprender sobre o mundo da engenharia.

AGRADECIMENTOS

Gilmar Vinicius Rodrigues

Agradeço sobretudo a Deus, por ter me concedido essa oportunidade de realizar e concluir um curso com sabedoria, persistência e resiliência.

À minha mãe Rosana com toda coragem e perseverança durante essa longa caminhada, ao meu pai Gilmar, por toda sua paciência e orgulho durante esse período. Vocês foram fundamentais na minha caminhada, minha família é a base de todas as minhas conquistas.

Aos meus amigos, que considero todos como irmãos, afinal, amigos são a família que a gente escolhe. Tive a oportunidade de conhecer pessoas incríveis que me ajudaram a crescer e me deram força, obrigado por todas as risadas e todos os abraços compartilhados durante esses anos.

Quero agradecer em especial o Darlan, uma pessoa sensacional que me convidou a participar deste desafio tão grande, mais um, que é a elaboração de um trabalho de conclusão de curso, aprendi muito contigo.

E queremos agradecer imensamente a ajuda da nossa orientadora, Prof.^a M.a Ana Maria Bueno, que aceitou esse desafio de nos ajudar e orientar no desenvolvimento deste trabalho.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Função de Pertinência.	22
Figura 2 - Comparação entre funções de pertinência.	22
Figura 3 - Função de pertinência triangular.....	23
Figura 4 - Função de pertinência trapezoidal.	24
Figura 5 - Etapas do desenvolvimento.	31
Figura 6 - Gráfico <i>fuzzy</i> da severidade.....	40
Figura 7 - Gráfico <i>fuzzy</i> da ocorrência.	41
Figura 8 - Gráfico <i>fuzzy</i> da detecção.....	41
Figura 9 - NPR.	46
Figura 10 - Centro de Gravidade.....	50
Figura 11 - Área resultante.....	51
Figura 12 - Centro de Gravidade de um trapézio.	52
Figura 13 - Exemplo (detecção).	55
Figura 14 - Exemplo (ocorrência).	56
Figura 15 - Exemplo (severidade).	56
Figura 16 - Resultado do exemplo.	57
Figura 17 - Primeira tela.....	59
Figura 18 - Resultado NPR.	60
Figura 19 - Tela final para salvar o arquivo	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre MCC e Manutenção Tradicional.....	14
Tabela 2 - Pontuação de severidade de falha	17
Tabela 3 - Escala de ocorrência por probabilidade	18
Tabela 4 - Escala de detecção	18
Tabela 5 - Conjuntos <i>Fuzzy</i>	32
Tabela 6 - Conjuntos <i>Fuzzy</i> NPR.....	33
Tabela 7 - Confrontos <i>fuzzy</i>	42
Tabela 8 - Intervalos.....	46
Tabela 9 – Exemplo	48
Tabela 10 - Exemplo.	55
Tabela 11 - Vários Exemplos.	58

LISTA DE SIGLAS

EEO	Evidente com Efeito Operacional e Econômico
FMEA	<i>Failure Mode, Effects and Analysis</i>),
FMECA	<i>Failure Mode, Effects and Criticality Analysis</i>
JVM	<i>Java Virtual Machine</i>
JRE	<i>Java Runtime Environment</i>
JDK	<i>Java Development Kit</i>
MCC	Manutenção Centrada na confiabilidade
NPR	Número de Prioridade de Risco
OSA	Oculto com Efeito na Segurança ou Ambiente
OEO	Oculto com Efeito Operacional ou Econômico
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 TEMA DA PESQUISA.....	5
1.2 PROBLEMA.....	6
1.3 JUSTIFICATIVA.....	6
1.4 OBJETIVO GERAL.....	7
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	8
2.1 MANUTENÇÃO: HISTÓRICO E DEFINIÇÕES	8
2.2 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC)	11
2.2.1 Breve Histórico	11
2.2.2 Conceitos.....	11
2.3 FMEA/FMECA	15
2.3.1 Benefícios e Limitações do FMEA/FMECA.....	19
2.4 LÓGICA <i>FUZZY</i>	20
2.4.1 Histórico.....	20
2.4.2 Conceito.....	20
2.4.3 Variáveis Linguísticas	21
2.4.4 Funções De Pertinência.....	21
2.4.5 Fuzzificação.....	24
2.4.6 Inferência <i>Fuzzy</i>	24
2.4.7 Defuzzificação	25
2.5 JAVA.....	26
2.5.1 Origem.....	26
2.5.2 Funcionamento	26
3 MÉTODOLOGIA DA PESQUISA	28
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	28
3.1.1 Do Ponto De Vista Da Natureza	28
3.1.2 Do Ponto De Vista Da Abordagem Do Problema	28
3.1.3 Do Ponto De Vista De Seus Objetivos.....	29
3.1.4 Do Ponto De Vista Dos Procedimentos Técnicos.....	29
3.2 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO.....	29
3.3 FLUXOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO	31
4 DESENVOLVIMENTO.....	32
4.1 CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	32
4.2 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	33
4.2.1 Severidade.....	33
4.2.1.1 Desprezível.....	34
4.2.1.2 Pequena.....	34
4.2.1.3 Moderada.....	34
4.2.1.4 Grande.....	35

4.2.1.5 Catastrófica.....	35
4.2.2 Ocorrência	36
4.2.2.1 Chance desprezível	36
4.2.2.2 Chance pequena.....	36
4.2.2.3 Chance Moderada.....	36
4.2.2.4 Chance Alta	37
4.2.2.5 Chance Altíssima	37
4.2.3 Detecção.....	38
4.2.3.1 Quase certa	38
4.2.3.2 Alta.....	38
4.2.3.3 Moderada.....	39
4.2.3.4 Baixa	39
4.2.3.5 Remota	39
4.2.4 Gráficos	40
4.3 INFERÊNCIA <i>FUZZY</i>	42
4.4 DEFUZZYFICAÇÃO.....	49
4.4.1 Método do Centro de Gravidade.....	49
4.5 IMPLEMENTAÇÃO	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
6 CONCLUSÃO.....	62
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA DA PESQUISA

A evolução histórica da manutenção foi desenvolvida basicamente em três gerações. A primeira geração teve início na era da mecanização, período entre 1940 a 1950 (SALMAZO, 2012). Nesta fase a estratégia comumente aplicada era a de manutenção corretiva.

A partir da década de 1950, com o desenvolvimento de pesquisas científicas e técnicas de manutenção mais elaboradas, surgiu o conceito de manutenção preventiva, baseada no tempo. Nesta época, a indústria começou a dar importância para o gerenciamento de manutenção, com a aplicação da Manutenção Produtiva Total (TPM, sigla em inglês). Com isso, surgiram os primeiros indícios de análise de falhas.

A terceira geração foi marcada pela evolução da automatização industrial a partir de 1975, e com isso a confiabilidade e disponibilidade se tornaram requisitos de qualidade e desempenho das máquinas. Neste momento, a metodologia MCC (Manutenção Centrada em Confiabilidade) começou a ser aplicada na indústria.

A MCC surgiu efetivamente na indústria aeronáutica dos Estados Unidos em torno de 1970. A confiabilidade de um sistema é obtida através da preservação das suas funções operacionais ao longo do tempo, identificação dos modos de falhas, classificação e priorização das falhas funcionais e suas consequências, além da recomendação das atividades de manutenção utilizando um diagrama de decisão (SOUZA, 2008).

Para Lucatelli (2002), esta metodologia assegura a confiabilidade do sistema mantendo suas funções e principalmente evitando as possíveis falhas, por meio da utilização da ferramenta FMEA (*Failure Mode, Effects and Analysis*), que consiste em uma análise de modos e efeitos de falhas. O FMEA é um método qualitativo que permite identificar os modos de falhas que podem ocorrer em cada item e determina o efeito de cada falha.

Salmazo (2012) descreve uma adaptação do FMEA, conhecido como FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*). Este método acrescenta uma análise de criticidade às falhas, sendo essa análise obtida de forma quantitativa por meio do produto dos fatores de ocorrência, severidade e detecção. A frequência refere-se à

probabilidade de ocorrência da falha, severidade indica a gravidade dos efeitos de cada falha e a detecção é a dificuldade de identificar as causas do modo de falha. Com a multiplicação desses fatores temos o Número de Prioridade de Risco (NPR), que fornece uma orientação de priorização das ações para prevenção ou mitigação das falhas.

1.2 PROBLEMA

É relatado que este método de multiplicação carrega algumas deficiências. Quando é utilizada uma escala de 1 a 10 na classificação da severidade, ocorrência e detecção, existirá um grande vazio entre o valor mínimo 1 e máximo 1000. Outro problema presente é a repetitividade do Número de Prioridade de Risco, sendo que um valor pode ser obtido de diversas combinações de produtos na multiplicação. Logo, surge uma dificuldade na interpretação dos resultados. Outra barreira que dificulta a interpretação é a sensibilidade às pequenas mudanças, sendo que a alteração de um único valor pode ocasionar uma grande diferença na análise do NPR, se comparado com outro valor que teve a mesma variação (ARAUJO, 2008).

1.3 JUSTIFICATIVA

Para que possamos eliminar ou, pelo menos, suavizar essas divergências citadas, é possível recorrer a um recurso amplamente utilizado na academia e indústria atuais, a lógica *fuzzy*.

A lógica *fuzzy* foi introduzida em 1965 por Lofti Asker Zadeh, tendo publicado o artigo *Fuzzy Sets* no *Jornal Information and Control* (RIGNEL, 2011).

Diferente da lógica Booleana, na qual temos valores binários 0 e 1 para a representação de uma variável verdadeira (1) ou falsa (0), a lógica *fuzzy*, ou lógica nebulosa, tem a capacidade de indicar quão verdadeira é uma variável. Outra recursividade da lógica *fuzzy* é a capacidade de trabalhar com conjuntos de variáveis linguísticas – como ‘baixo’, ‘médio’ e ‘muito’ – e relacioná-las com um subconjunto *fuzzy*, indicando um valor de um intervalo binário [0,1] utilizando as funções de pertinência.

É exatamente a recursividade acima que faz com que a lógica *fuzzy* possa ser aplicada ao método FMECA, pois é possível definir dentro do intervalo de valores de 1 a 10, relacionados aos critérios do FMECA, variáveis linguísticas que indicarão a probabilidade de falha (muito baixa, baixa, moderado, alta, muito alta). Com isso, relacionaremos os critérios para assim gerarmos o NPR e conseqüentemente indicarmos qual o fator mais crítico, que deve receber a atenção da manutenção em um dispositivo ou sistema.

Hoje, com o exponencial avanço na era da informação, temos acesso a uma capacidade de processamento estrepitosa a um custo relativamente baixo. Logo, a utilização de métodos integrados com uma interface máquina x programação tem se tornado cada vez mais comuns e significativas na indústria, a exemplo do conceito de Indústria 4.0.

Portanto, focaremos em unir os dois conceitos para criar um aplicativo Java capaz de realizar uma análise FMECA, auxiliada por lógica *fuzzy*, que indicará a ordem de priorização dos modos de falha e evidenciará uma possível decisão de manutenção em algum sistema ou dispositivo de interesse.

1.4 OBJETIVO GERAL

Minimizar os problemas gerados na priorização de risco da análise FMECA tradicional, desenvolvendo um aplicativo Java que integre a lógica *fuzzy* para solucionar o problema.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Obter um valor de NPR mais coerente para os modos de falhas, utilizando a lógica *fuzzy*, a fim de amenizar algumas divergências da metodologia FMECA tradicional.

Realizar o tratamento de dados e incluí-los em uma lista ordenada para auxiliar a tomada de decisão.

Desenvolver um algoritmo capaz de realizar uma análise por lógica *fuzzy* e fornecer resultados confiáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MANUTENÇÃO: HISTÓRICO E DEFINIÇÕES

Segundo Malinowski (2012), a manutenção compreende em executar ações para conservar e manter as funções de uma máquina, equipamento ou sistema, também chamados de ativos físicos. É considerado um conjunto de ações técnicas e administrativas que são aplicadas com o objetivo de evitar a degradação ou recolocar um item em um estado no qual as suas funções sejam cumpridas de acordo com a condição desejada.

Para Wyrebsk (2007), é impossível falar de manutenção sem mencionarmos a grande Revolução Industrial, no final do século XVIII. Nessa época, o que se via era o aumento da preocupação com o pleno funcionamento das máquinas e ferramentas, muitos casos o próprio operador realizava os reparos relacionados a sua unidade produtiva. Santos (2007) diz que essa característica reativa esteve presente na primeira geração histórica da manutenção, compreendida até os anos de 1950, nesse período os processos industriais eram totalmente mecanizados.

Com o passar do tempo, técnicas mais arrojadas de manutenção foram sendo desenvolvidas, pois a manutenção corretiva, que consiste em apenas reparar o equipamento quando ocorresse a falha, necessitava de uma parada total da máquina para ser posta em prática. Também, com as eventuais guerras e corridas tecnológicas da época, era prioridade que tudo funcionasse com a maior eficácia possível (WYREBSKI, 2007).

Segundo Neto (2017), no início do século XX viu-se a necessidade de criar equipes dedicadas ao serviço de manutenção, ainda corretiva, devido à implantação da produção em série, conceituada por Henry Ford.

A manutenção, a partir daí, passou a ser vista como uma atividade estratégica na gestão de qualquer indústria ou empresa competitiva, e não como um “mal necessário” (SANTOS et al., 2007).

Seguindo a evolução histórica, a partir de 1950 surgiu a segunda geração, com o aumento da quantidade de máquinas nas indústrias. Com uma produção industrial em linha, cada vez mais presente nas fábricas, tornava-se cada vez mais importante o funcionamento ideal das máquinas e equipamentos, logo a inatividade

de algum item se tornou questão de preocupação para os gestores. Nessa época surgiu a ideia que as falhas poderiam ser prevenidas e que ações proativas de reparo poderiam ser tomadas em um intervalo fixo de tempo, com a expectativa de aumentar a produtividade e reduzir custos utilizando a programação e o planejamento de reparos (QUEIROZ, 2016).

Ainda no contexto da segunda geração da evolução da manutenção, as técnicas proativas de prevenção de falhas começavam a serem aplicadas, surgiu a necessidade de gerenciamento dessas atividades. Então, na década de 1970, uma visão mais administrativa das atividades da manutenção foi criada com o objetivo de organizar um sistema total e global todos os procedimentos de prevenção de falhas a partir da criação da manutenção produtiva total (TPM - *Total Productive Maintenance*) (MORENGHI, 2005). Para Neto (2017) fatores como confiabilidade, viabilidade econômica e técnicas de gestão, foram combinados para conceituar um formato de gestão de manutenção.

A gestão da manutenção é um fator essencial na produtividade de uma indústria. Com a utilização de métodos de gerenciamento foi possível obter um controle mais eficaz dos impactos que possíveis falhas traziam ao processo produtivo aplicando a padronização de procedimentos técnicos e administrativos previamente determinados. Outro grande marco é a inclusão do conceito de manutenção nas normas da série ISO 9000, em 1993. Isso atesta o reconhecimento da importância da integração da gestão de manutenção na gestão de qualidade de qualquer empresa.

A técnica mais conhecida de gestão de manutenção é o, TPM sigla em inglês para Manutenção Produtiva Total, esta é uma filosofia que teve origem no Japão, desenvolvida primeiramente na empresa *Nippon Denso*, do grupo Toyota, com foco na disponibilidade de um equipamento. Por ser uma filosofia, ela deve ser seguida por todas as partes dentro de uma organização, visando a melhoria contínua e a eficiência operacional (SOUZA, 2008).

Para Santos (2007) a manutenção produtiva total tem como base a melhoria focada no problema, visando o melhor desempenho do equipamento, manutenção autônoma que consiste no autogerenciamento de atividade de reparos por parte do operador da máquina, manutenção planejada que utiliza o controle e a programação das ações de manutenção e o planejamento das paradas, educação e treinamento dos colaboradores, principalmente dos mais envolvidos na linha de produção, controle

inicial do gerenciamento dos novos projetos, manutenção da qualidade com foco em zero defeito, TPM *office* com a utilização de programas de gerenciamento e, por fim, a segurança estabelecendo um sistema de segurança e saúde dos colaboradores.

Queiroz (2016) diz que a terceira geração foi conhecida como a era da confiabilidade e disponibilidade dos ativos físicos. Neste momento teve início estudos de novas técnicas de monitoramento da condição dos ativos, assim como estudos de comportamento e análise de falha, por meio da análise do modo e efeito da falha e análise de riscos. Logo, uma base de dados começou a ser desenvolvida e surgiram ferramentas de suporte à tomada de decisão que facilitavam a assertividade das ações a serem tomadas. A expectativa da utilização dos métodos de confiabilidade e disponibilidade são: o aumento da qualidade do produto, aumento da vida útil dos ativos e redução do impacto das falhas na produção, segurança dos operadores e no meio ambiente.

“Observa-se então, na terceira geração o desenvolvimento da chamada Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), a qual enfatiza, em sua análise e aplicação, as funções dos equipamentos e sistemas, e também realiza uma criteriosa avaliação das consequências das falhas para a segurança, para o meio ambiente e para a produção, visando obter o máximo benefício com redução dos custos operacionais.” (SALMAZO, 2012, p. 16)

Alguns autores já trazem alguns conceitos da quarta geração da manutenção. Considera-se a inclusão de toda a organização na estratégia e na missão da manutenção, com todos os níveis de hierarquia envolvidos na redução de custos e eliminação das perdas (SANTOS, 2007). Essa geração também se fundamenta na engenharia da confiabilidade através de monitoramento e controle juntamente com a inteligência artificial (SALMAZO, 2012).

Atualmente a gestão de manutenção utiliza o monitoramento de componentes através da utilização de sistemas inteligentes, aplicando técnicas avançadas de manutenção baseada na condição ou preditivas. Com a manutenção preditiva as ações serão planejadas e aplicadas em um momento aceitável, reduzindo custos tempo de parada dos ativos. Com a aplicação de um monitoramento eficiente a confiabilidade e disponibilidade dos ativos aumenta, isso traz vários benefícios e vantagem competitiva para a organização (MALINOWSKI, 2012).

2.2 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC)

2.2.1 Breve Histórico

O primeiro registro oficial que definiu os conceitos da manutenção centrada em confiabilidade foi o livro *Reliability Centered Maintenance*, publicado por F. Stanley Nowlan e Howard F. Heap, em dezembro de 1978.

Ao final dos anos 1950, os custos da manutenção chegaram a um nível que fez com que fosse necessário ter uma outra visão e focar no desenvolvimento da manutenção preventiva (NOWLAN et al., 1978).

No começo, o principal centro de desenvolvimento de técnicas de RCM foi a *United Airlines*. Em um panorama cronológico, surgiram os primeiros diagramas de decisão em 1965, publicado em *Turbine Engine Reliability Program*, por H. N. Taylor e F. S. Nowlan, a partir disso, a técnica foi se desenvolvendo (NOWLAN et al., 1978).

Os procedimentos foram documentados e utilizados posteriormente em planos de manutenção para o Boeing 747, e era conhecida como MSG-1. Posteriormente, mais documentos foram lançados, como o MSG-2, a fim de melhorar e complementar o primeiro documento lançado.

Segundo Aladon (2016) a partir dos anos 1980 a MCC começou a ser utilizada em outros ramos industriais.

Em 1991 foi lançado o livro RCM II por John Moubray, publicado em mais de 40 países, sendo reconhecido pela SAE como um processo “RCM” (TAVARES, 2012).

2.2.2 Conceitos

Souza (2008) diz que a Manutenção Centrada na Confiabilidade é uma metodologia de gestão de manutenção que visa manter um ativo operando nos parâmetros ideais e cumprindo a função desejada, também considerando a redução de custos e maior segurança. Essa metodologia fornece um embasamento eficaz na identificação e probabilidade de falhas e suas consequências. O objetivo da MCC é estabelecer ações ótimas de manutenção que serão aplicadas durante o processo de

planejamento da manutenção, através da tomada de decisão auxiliada por ferramentas de análises de falhas.

Com o envolvimento de pessoas com alto poder intelectual, a MCC consegue dar uma visão baseada na racionalidade, evidenciando possíveis soluções a serem tomadas mediante a situações de qualquer fábrica. Como abordado em *Confiabilidade e Manutenção Industrial*, de Flavio Fogliatto e José Luis Duarte Ribeiro (2011, p. 218) os pilares da MCC são:

- (i) Amplo envolvimento de engenheiros, operadores e técnicos de manutenção, caracterizando um ambiente de engenharia simultânea;
- (ii) Ênfase no estudo das consequências das falhas, que direcionam todas as tarefas de manutenção;
- (iii) Abrangência das análises, que consideram questões associadas à segurança, meio ambiente, operação e custos;
- (iv) Ênfase nas atividades proativas, envolvendo tarefas preditivas e preventivas;
- (v) Combate às falhas escondidas, que reduzem a confiabilidade do sistema.

Rigoni (2009, p.38) traz as setes questões que devem ser respondidas para que a utilização dessa metodologia seja aplicada de uma forma eficiente são:

1. Quais são as funções e padrões de desempenho associado ao item no contexto operacional atual?
2. De que forma ele falha em cumprir suas funções?
3. O que causa cada falha funcional?
4. O que acontece quando cada falha ocorre?
5. De que forma cada falha tem importância?
6. O que pode ser feito para prevenir cada falha?
7. O que deve ser feito, se não for encontrada uma tarefa preventiva apropriada?

A primeira questão define quais são as funções de cada ativo e quais ativos serão priorizados com base nos custos de inatividade e reparo. Já a segunda questão traz informações das possíveis formas de falha que podem interferir na função desejada do ativo. Na terceira etapa, são definidos o momento e o modo em que um

equipamento começa a operar fora dos parâmetros normais, ou seja, já tendo ocorrido um desvio de função. Para a quarta questão surgem as causas da falha. Na quinta etapa é identificado o grau de severidade da consequência da falha e qual o impacto dela na segurança, meio ambiente e operação e economia. Nas duas últimas etapas é determinado e implementado algum plano de ação das atividades que trarão os melhores resultados (QUEIROZ, 2016).

As funções de um equipamento compreendem tudo aquilo que o equipamento deve fazer e aquilo que as partes envolvidas esperam que ele faça. É imprescindível que essas informações sejam obtidas para a aplicação de um bom programa de MCC.

As funções podem ser divididas em primárias e secundárias. As funções primárias compreendem tudo aquilo que o equipamento foi projetado para desempenhar.

É conveniente citar o exemplo de um ventilador industrial. Um equipamento desse tipo tem a função primária de ventilar o ambiente e provocar uma pressão positiva no interior da planta. Já as funções secundárias compreendem as funções implícitas do equipamento, ou, pelo menos, o que se espera. Por exemplo, as funções secundárias de um ventilador industrial seriam o baixo nível de ruído e a não-variação da sua potência ou rotação de trabalho. Podemos também citar como funções secundárias itens relacionados à segurança ocupacional e ambiental (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

Aliado às funções, devem ser levantados os padrões de funcionamento esperados do equipamento em questão. E qualquer equipamento em funcionamento deve ser capaz de operar acima da sua capacidade mínima esperada. Isso é conhecido como capacidade inicial ou confiabilidade inerente ao equipamento.

Em uma análise comparativa, a MCC está mais preocupada em manter a função do equipamento do que o equipamento em si, como é na manutenção tradicional. Vide Tabela 1.

Tabela 1 - Relação entre MCC e Manutenção Tradicional

Características	Manutenção tradicional	MCC
Foco	Equipamento	Função
Objetivo	Manter o Equipamento	Preservar
Atuação	Componente	Sistema
Atividades	O que pode ser feito	O que deve ser feito
Dados	Pouca ênfase	Muita ênfase
Documentação	Reduzida	Obrigatória e Sistemática
Metodologia	Empírica	Estruturada
Combate	Falhas	Consequências das Falhas
Normalização	Não	Sim
Priorização	Inexistente	Por função

Fonte: Siqueira (2009) p. 17

Também compete à MCC identificar os modos de falhas relacionados à cada equipamento. As falhas podem ser descritas como episódios suscetíveis ao equipamento que comprometem suas funções, sejam elas primárias ou secundárias.

Podem estar inclusas falhas que já ocorreram ou falhas que, de acordo com a equipe, são passíveis de ocorrer (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

“[...] enquanto a falha é associada à função do sistema, o modo de falha é associado ao evento que provoca a transição para o estado de falha.” (SIQUEIRA, 2009 apud. BARAN, 2001, p. 41)

Um exemplo de modo de falha seria a danificação do rotor de um ventilador industrial. Em outras palavras, tudo aquilo que compromete uma função do equipamento é considerado um modo de falha. A equipe de manutenção deve ser o grupo mais capacitado para identificar os modos de falhas possíveis de cada tipo de equipamento.

Para Salmazo (2012) a causa da falha é o evento que ocasiona a perda de função de um equipamento, a causa pode estar ligada à falha de projeto, erros no processo de fabricação, defeito no material, erros de montagem entre outros.

Dentro da engenharia de confiabilidade são determinados alguns aspectos de consequências significativas, que impactam na segurança, meio ambiente e na

operação e economia do processo produtivo. Cada efeito terá um grau de impacto e de criticidade para a segurança, meio ambiente e produção, e esses efeitos são classificados da seguinte forma: evidente com efeito na segurança ou ambiente (ESA), evidente com efeito operacional e econômico (EEO), oculto com efeito na segurança ou ambiente (OSA) e oculto com efeito operacional ou econômico (OEO) (RIGONI, 2009).

As ações de mitigação, prevenção e correção das falhas são orientadas pela natureza e severidade da consequência gerada pela falha, pois cada falha possui um conjunto de consequências que afetam os padrões de desempenho do equipamento.

“[...] com o conhecimento dos efeitos da falha é possível se estabelecer ações de manutenção preventiva, preditiva e detectiva, em razão da importância de cada falha” (MORENGHI, 2005, p. 58)

Logo, as ações devem ser aplicadas com base em uma análise das consequências. Quanto maior a severidade, maior o esforço para evitar e prevenir que as falhas ocorram, e para baixas consequências, ações de correção podem ser aplicadas (SALMAZO, 2012).

2.3 FMEA/FMECA

Existem várias ferramentas que auxiliam na análise de falhas e suas consequências e fornecem uma forma mais assertiva na tomada de decisão para um plano de manutenção focado na confiabilidade e disponibilidade dos ativos físicos. As ferramentas mais utilizadas são o FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), ou Análise de Modos e Efeitos de Falhas e o FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), ou Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falhas. A diferença entre as duas ferramentas é a análise de criticidade de falha, que consiste basicamente em obter um fator para quantificar o risco da falha (SALMAZO, 2012).

Para Ajeje (2015) a técnica da ferramenta FMEA é desenvolvida em uma tabela com análises das causas e efeitos das falhas. Essa tabela é construída por uma equipe de profissionais multidisciplinares que analisam todas as relações entre os modos de falha, efeitos, causas e consequências que podem ocorrer, discutindo e sugerindo possíveis ações para cada ocorrência.

Basicamente, a FMEA consiste em uma análise dos vários modos de falhas que um equipamento pode sofrer, e também fornece informações da potencialidade de cada falha. Essa ferramenta tem como objetivo reconhecer e avaliar a falha potencial de um produto/processo e seus defeitos, identificando ações que podem eliminar ou reduzir a hipótese de o modo de falha potencial vir a ocorrer e documentar o processo de análise.

Porém, Pedrosa (2014) diz que a ferramenta FMEA oferece apenas informações qualitativas, que são interpretadas levando em conta a relevância do impacto de cada falha. Entretanto, o FMECA nos traz uma abordagem mais quantitativa de cada falha, através da realização da análise de criticidade da falha.

O FMECA é composto por uma análise FMEA juntamente a uma análise de criticidade. Com isso é possível obter um Número de Prioridade de Risco (NPR) com base na gravidade da consequência de cada falha. Baran et al. (2011, p. 4-5) traz o seguinte fluxo de aplicação da ferramenta:

- Entender a função do sistema escolhido, seu modo de operação, subsistemas, componentes e peças envolvidas;
- Estabelecer a profundidade da análise quanto ao nível hierárquico do sistema;
- Identificar cada item a ser analisado;
- Identificar todos os possíveis modos de falhas para cada componente em análise;
- Determinar o efeito de falha de cada item para cada modo de falha;
- Determinar o efeito das falhas em um contexto do sistema local, sistemas auxiliares e níveis superiores do sistema;
- Identificar causas potenciais para os modos de falhas de cada componente;
- Listar os métodos, procedimentos e ferramentas para a detecção de possíveis falhas;
- Determinar a gravidade de cada modo de falha;
- Estimar frequência ou probabilidade de ocorrência do modo de falha em um período determinado.

A forma de mensurar quantitativamente a criticidade de cada falha é aplicando a análise utilizando os seguintes parâmetros, severidade, ocorrência e detecção.

Definidos valores para cada um desses parâmetros, a ferramenta realiza a multiplicação dos três para obter um fator denominado Número de Prioridade de Risco, o NPR. Normalmente é utilizado uma escala de 1 a 10 para quantificar os fatores.

A severidade é o impacto causado por cada modo de falha do sistema ou processo. A Tabela 2 traz um exemplo de escala de severidade.

Tabela 2 - Pontuação de severidade de falha

Severidade	Pontuação
Nenhuma	1
Muito desprezível	2
Desprezível	3
Pequena	4
Moderada	5
Significante	6
Grande	7
Extrema	8
Séria	9
Catastrófica	10

Fonte: AJEJE (2015)

A ocorrência é a frequência com que a falha pode ocorrer. Esse fator representa uma confiabilidade matemática através das frequências previstas. A Tabela 3, na página seguinte, traz um exemplo de parametrização de ocorrência.

Vide também a Tabela 4, que define uma forma de parametrização do fator de detecção de falhas, que caracteriza como ela será identificada caso ocorra e a dificuldade de identificar as causas do modo de falha.

Tabela 3 - Escala de ocorrência por probabilidade

Critério	Pontuação	Razão da Possibilidade
Chance remota	1	0
Baixa Razão de falha	2	1/20000
	3	1/10000
Moderada Razão de falha	4	1/2000
	5	1/1000
Média	6	1/200
Alta Razão de Falha	7	1/100
	8	1/20
Muito Alta Razão de Falha	9	1/10
Catastrófica	10	1/2

Fonte: AJEJE (2015)

Tabela 4 - Escala de detecção

Deteção	Probabilidade de deteção	Pontuação
Absolutamente incerta	A manutenção não detecta a falha	10
Muito remota	Chance muito remota de se detectar a causa da falha	9
Remota	Chance remota de se detectar a causa da falha	8
Muito baixa	Chance muito baixa de detectar a causa da falha	7
Baixa	Chance baixa de se detectar a causa da falha	6
Moderada	Moderada chance de se detectar a causa da falha	5
Moderadamente alta	Moderadamente alta a chance de se detectar a causa da falha	4
Alta	Chance alta de se detectar a causa da falha	3
Muito alta	Chance muito alta de se detectar a causa da falha	2
Quase certa	A manutenção quase certamente detectará a causa da falha	1

Fonte: AJEJE 2015

2.3.1 Benefícios e Limitações do FMEA/FMECA

Segundo Pedrosa (2014) como qualquer tipo de metodologia ou ferramenta, o FMEA/FMECA traz consigo benefícios e algumas limitações de aplicação. Ao decidir pela utilização da ferramenta, o chefe mantenedor atingirá maior confiabilidade, qualidade e segurança dos produtos ou processos afetados pela metodologia, já que está submetendo-as a uma análise multicritério. A aplicação também fornece maior eficiência na detecção e mitigação das falhas de todo o processo. Além disso, vemos uma redução de custos de projetos, retrabalho e garantia ao cliente, aumentando assim sua satisfação.

Também é possível ver a possibilidade de documentar e registrar todo o plano de manutenção do aplicador, tornando a empresa mais competitiva, reduzindo gastos e produtos não conformes (PEDROSA, 2014).

Entre as limitações, é vista a necessidade de se conhecer profundamente sobre o produto ou processo, para termos uma certa validade nos resultados obtidos. Por isso a necessidade de uma equipe multidisciplinar e inteiramente envolvida no processo analisado (HAQ & LIPOL, 2011 apud. PEDROSA, 2014).

Araújo (2008) diz que a definição do NPR possui algumas brechas, relatando a mesma criticidade a diferentes notas nos quesitos de severidade, ocorrência e detecção. Por exemplo, um NPR de 200 pode ser obtido por índices [2;10;10], ou [4;5;10], ou ainda [8;5;5] – [S;O;D]. Nesses casos, a decisão é dificultada, pois apenas o NPR não será capaz de diferenciar ou priorizar o item para manutenção.

A própria equação utilizada para calcular o NPR é questionável, utiliza-se apenas o produto entre os três fatores para obter-se o NPR. Porém, quantificar o risco pode assumir algo mais complexo que um simples produto. Além disso, pequenas variações nos fatores geram uma grande variação no NPR, tornando a equação muito sensível. Também, não são considerados pesos para a ponderação dos três fatores envolvidos, severidade, ocorrência e detecção. Cada um dos fatores pode e deve ter pesos diferentes em cada análise de produto ou processo (LIU et al., 2012).

As interdependências entre os modos e efeitos de falhas também não são consideradas ao realizar-se uma análise FMEA/FMECA, já que não são listadas as relações entre os mesmos (LIU et al., 2012).

2.4 LÓGICA *FUZZY*

2.4.1 Histórico

O principal motivo da evolução da humanidade nos últimos séculos foi a compreensão das leis que regem o mundo, através de estudos, pesquisas e muita paciência. Com o desenvolvimento surgiram várias maneiras de entender como os fenômenos ocorriam na natureza e no dia-a-dia da vida das pessoas.

A matemática foi fundamental para expressar as definições dos fenômenos existentes. Porém, a matemática considerava apenas informações precisas, conhecida como a lógica clássica, onde apenas se consideravam resultados como verdadeiros ou falsos, não considerando as incertezas existentes nos fenômenos. Para a realização do tratamento das incertezas surgiu a lógica *fuzzy*, ou lógica difusa, que fornece uma abordagem que considera a existência de variáveis entre o verdadeiro e o falso. Essa lógica fornece uma análise mais realista dos fenômenos (ARAÚJO, 2008; AJEJE, 2015).

Em 1920 Jan Lukasiewicz desenvolveu o conceito de lógica *fuzzy*. Ele foi o primeiro a introduzir conjuntos utilizando graus de pertinência juntamente com a lógica clássica. Mas, no ano de 1965 o autor Lofti Asker Zadeh publicou o primeiro estudo com embasamento e documentação validando a lógica *fuzzy*. Teve como objetivo estruturar uma ferramenta matemática que fosse capaz de realizar o tratamento de informações imprecisas e incertas (RIGEL et. al, 2011; MALINOWSKI, 2012).

2.4.2 Conceito

Malinowski (2012) apresenta que o método desenvolvido por Zadeh consiste em utilizar valores intermediários entre o verdadeiro e o falso, em um intervalo $[0,1]$. A lógica difusa basicamente determina o grau de um valor pertencer ou não pertencer a um conjunto. Para determinar a incerteza da posição do valor são utilizadas variáveis linguísticas que representam valores do meio termo de uma decisão.

Logo, a lógica *fuzzy* proporciona um raciocínio aproximado dos fenômenos, variando entre o exato e o inexato. Com isso, é possível incluir e avaliar as incertezas presentes em um problema, criando uma modelagem mais realista (AJEJE, 2015).

Como toda modelagem matemática, a lógica *fuzzy* também segue um algoritmo de aplicação, Ajeje (2015, p.22) traz os seguintes passos da modelagem:

1. Definir as variáveis linguísticas e os termos (parametrização);
2. Construir as funções de pertinência (parametrização)
3. Construir a base de regras (parametrização)
4. Converter os dados de entrada *crisp* para valores *fuzzy* usando as funções de pertinência (“fuzzificação”);
5. Parametrizar as regras na base de regras (inferência);
6. Combinar os resultados de cada regra (agregação);
7. Converter os dados de saída para valores não-*fuzzy* (defuzzificação).

2.4.3 Variáveis Linguísticas

As variáveis linguísticas são os termos utilizados para definir as incertezas. Elas serão sentenças, que em uma linguagem definirão valores no intervalo de um conjunto. Por exemplo, em um conjunto de quantidade as variáveis seriam: vazio, quase vazio, meio cheio, quase cheio, cheio, muito cheio. O objetivo das variáveis linguísticas é oferecer uma forma de caracterizar as incertezas e resultados mal definidos em uma modelagem de tomada de decisão (MALINOWSKI, 2012)

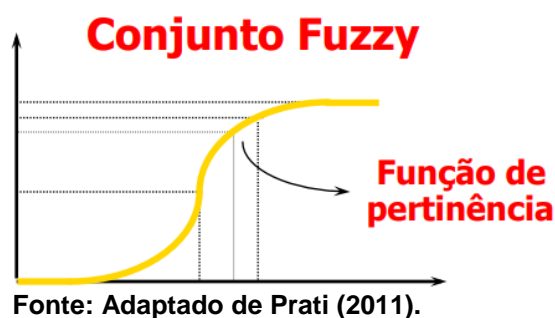
2.4.4 Funções De Pertinência

Para caracterizar o grau de pertinência de um subconjunto a um subconjunto *fuzzy*, é necessário estabelecer uma função de pertinência, denotada neste trabalho por $\varphi_A(x)$, a qual nos dará um valor num intervalo $[0,1]$, indicando quão uma variável pertence a um conjunto.

Cada elemento x de um universo de discurso U será denotado por $[x, \varphi_A(x)]$, sendo $\varphi_A(x)$ a função que representa o grau de pertinência de x a um subconjunto *fuzzy* 'A'.

O gráfico de uma função de pertinência é representado pela Figura 1.

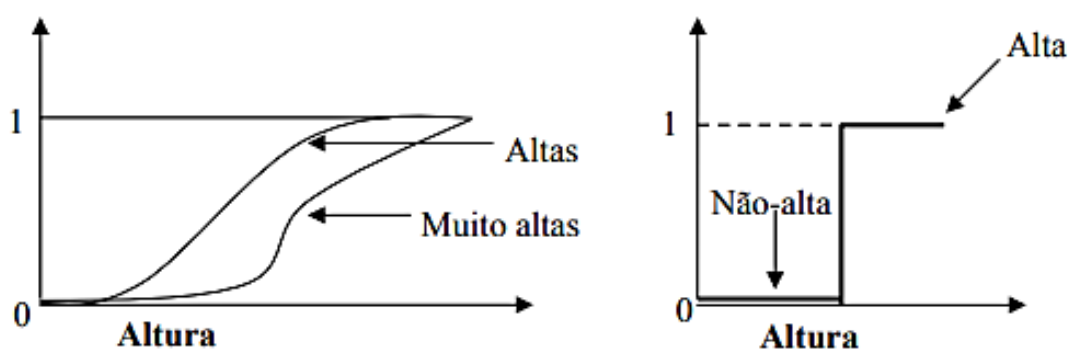
Figura 1 - Função de Pertinência.



Na Figura 1, o eixo das abscissas representa o valor da variável x analisada, e o eixo das ordenadas representa um valor no intervalo $[0,1]$ que representa o grau de pertinência da variável x sobre o conjunto *fuzzy* A .

Vaz (2006) observa que diferentemente da lógica *booleana* tradicional, as funções de pertinência *fuzzy* apresentam curvas suaves e geralmente contínuas. Observe a diferença de funções de pertinência na lógica tradicional e lógica *fuzzy* na Figura 2, a respeito de uma análise de estatura humana.

Figura 2 - Comparação entre funções de pertinência.



Fonte: VAZ, 2006 p.12

Na Figura 2, à esquerda, é ilustrada a possibilidade de obtermos valores intermediários entre 0 e 1 (*fuzzy*). Já à direita, apenas uma possibilidade binária.

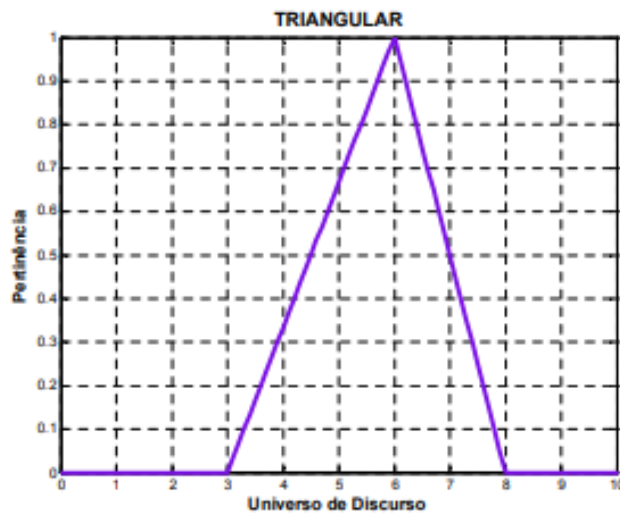
Alguns tipos de funções de pertinência clássicos são discriminados na bibliografia. Alguns deles são as funções do tipo triangular, trapezoidal, sino e gaussiana. Neste trabalho utilizaremos duas, a triangular e a trapezoidal.

i. Triangular

O equacionamento da função triangular segue a forma da Equação (1) e é representado na Figura 3 (NETO et al., 2006).

$$f(x, a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (1)$$

Figura 3 - Função de pertinência triangular



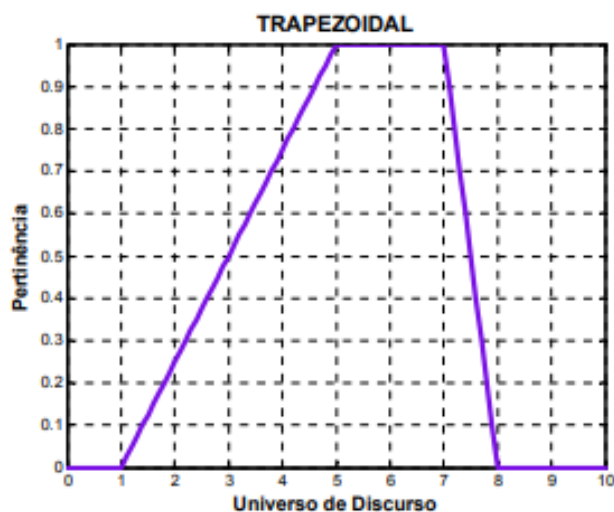
Fonte: Neto et al. (2006) p. 15

ii. Trapezoidal

O equacionamento da função trapezoidal segue a forma da Equação (2) e é representada pela Figura 4 (NETO et al., 2006).

$$f(x, a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (2)$$

Figura 4 - Função de pertinência trapezoidal.



Fonte: Neto et al. (2006) p. 14

2.4.5 Fuzzificação

A fuzzificação é a etapa na qual as variáveis do seu Universo de Discurso são transformadas em variáveis linguísticas. Dessa forma, são classificadas regiões do gráfico, que são delimitadas pelas funções de pertinência e pela sua variável x contida no universo de discurso estabelecido. Nesta etapa que se justifica a presença de especialistas sobre o assunto a ser tratado, pois as funções de pertinência devem ser cuidadosamente estabelecidas para nos fornece variáveis linguísticas e graus de pertinência coerentes (SOUZA, 2010).

2.4.6 Inferência *Fuzzy*

O processo de inferência *fuzzy* consiste no efetivo tratamento de dados. Dessa forma, são utilizadas ferramentas de lógica de conjunto *fuzzy* para fornecer os dados de saída (SOUZA, 2010).

Portanto Neto et al. (2006) diz que o sistema avaliará as regras, comutando-as com as entradas e levando ao resultado final. As regras podem ser classificadas com condicionais ou incondicionais.

As regras incondicionais são aquelas que não dependem de qualquer evento para atribuir um valor a uma variável ou fazer uma afirmação. Por exemplo,

$x \text{ é } Y \rightarrow x \text{ é um subconjunto de } Y$ (NETO et al., 2006).

As regras condicionais dependem de um evento para realizar qualquer tipo de afirmação ou atribuição de valor. Por exemplo,

Se $w \text{ é } Z$, então $x \text{ é } Y \rightarrow$ observe que neste caso há uma condição a ser atendida (NETO et al., 2006).

Adicionalmente, é necessário que, se no sistema existir os dois tipos de regras, as regras incondicionais devem ser realizadas primeiramente. Ainda, qualquer combinação das variáveis de entrada deve ativar ao menos uma regra; e as regras com as mesmas variáveis devem produzir saídas mutuamente exclusivas. (NETO et al., 2006).

Finalmente, o processo de inferência realiza a análise das regras, fornecendo um valor bem definido de saída (ainda linguístico).

2.4.7 Defuzzificação

Agora que possuímos um valor linguístico de saída, o sistema realiza a defuzzificação para transformar a variável linguística em um valor numérico. O método de defuzzificação que será utilizado é o Centro de Gravidade.

Basicamente, tomaremos a média ponderada das áreas que correspondem às regiões que cada grau de pertinência produz, sob a própria função de pertinência. Para um domínio discreto, o que é o nosso caso, temos a Equação (3) para representar o método (SOUZA, 2010).

$$G(A) = \frac{\sum A_n(\mu) \cdot x_{CG}}{\sum A_n(\mu)} \quad (3)$$

$A_n(\mu) \rightarrow$ área pertinente do conjunto fuzzy

$x_{CG} \rightarrow$ centro de gravidade da área em questão

$G(A) \rightarrow$ valor de saída no domínio do universo de discurso

obs: $G(A)$, no caso do presente trabalho, é o NPR

2.5 JAVA

2.5.1 Origem

Schildt (2014) relata que o homem sempre esteve sujeito a algoritmos para a resolução de problemas, desde modelos matemáticos a simples decisões cotidianas. Com o surgimento da linguagem C, houve enormes impactos sobre a forma de pensar e programar, sendo uma linguagem eficiente e muito bem estruturada.

Baseado na linguagem C, eis que surge a linguagem Java, tendo muitos de seus recursos e funções totalmente herdados da linguagem anterior e também C++. Não diferentemente, a linguagem Java foi desenvolvida para solucionar alguns problemas ou adicionar alguns recursos poderosos em sua utilização (SCHILDT, 2014).

A linguagem Java foi desenvolvida em 1991 por James Gosling, Patrick Naughton, Chris Warth, Ed Frank e Mike Sheridan na Sun Microsystems, Inc. Após ganharem ajuda de muitos outros programadores, a linguagem Java (primeiramente denominada Oak) foi se tornando cada vez mais usual e eficiente (SCHILDT, 2014).

A evolução significativa do Java em relação ao C e C++ é que, no caso do Java, não é necessário ter um pré-processador para o código ser compilado, o que não é verdade na C e C++. Nas linguagens C, o fato da necessidade de um pré-processador impossibilita o uso eficiente das mesmas em algumas CPU's. Já no Java, o código é gerado diretamente, sem a necessidade de um pré-processador para qualquer CPU (SCHILDT, 2014).

2.5.2 Funcionamento

Como dito, diferentemente nas linguagens C e C++, a linguagem Java tem um funcionamento diferente. Quando um código é desenvolvido, esse código é compilado e é gerado um *bytecode Java*, o qual conversa com uma JVM (*Java Virtual Machine*). Essa máquina virtual pode ser interpretada como a simulação de um computador real. Ela existe para vários sistemas operacionais. Dessa forma, um mesmo *bytecode* pode ser executado em inúmeras JVM, de vários Sistemas Operacionais. E essa é a

vantagem da linguagem Java, possibilitando o desenvolvimento e a execução em qualquer Sistema Operacional, não necessariamente iguais (CAELUM, 2018).

A sintaxe dentro da linguagem é derivada, como dito, da linguagem C. Dessa forma, muitos dos recursos são semelhantes.

Segundo Caelum (2018) para o desenvolvimento de um aplicativo Java são necessários uma JVM (*Java Virtual Machine*), um JRE (*Java Runtime Enviroment* - composto pela JVM e pelas bibliotecas) e de um JDK (*Java Development Kit*). Dessa forma, temos o necessário para sintetizar um código e gerar o arquivo executável do mesmo. A JRE e a JDK necessários serão obtidos pela empresa Oracle.

A conveniência de utilizarmos uma linguagem desse porte é o suporte que a mesma possui em relação à sintetização de relatórios, gráficos e manipuladores de texto. Além disso, a linguagem dá a possibilidade de crescimento e melhoria do próprio *software* (CAELUM, 2018).

3. MÉTODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Gil (2002, p.17) a pesquisa é um procedimento utilizado para obter soluções e respostas para problemas previamente identificados, porém não resolvidos ou respondidos. A pesquisa é realizada em várias etapas, iniciando pela identificação do problema de forma clara e objetiva, até alcançar os resultados. As etapas são desenvolvidas utilizando métodos e técnicas de procedimentos científicos.

Dependendo da característica do problema a sua solução será obtida a partir de um gênero específico de pesquisa, logo a pesquisa possui diversos tipos de classificação. Sendo classificada com relação à sua natureza, quanto aos seus objetivos pretendidos, sendo avaliada também com relação à abordagem do problema e aos seus procedimentos técnicos (PRADANOV, FREITAS, 2013. p. 49).

3.1.1 Do Ponto De Vista Da Natureza

Nossa pesquisa é considerada uma pesquisa aplicada, pois temos como objetivo desenvolver conhecimentos de aplicação prática por meio da criação de um método de solução de um problema específico. Iremos desenvolver um meio para solucionar o problema de inconsistência da aplicação da ferramenta FMECA com a criação de uma solução concreta (PRADANOV, FREITAS, 2013. p. 51).

3.1.2 Do Ponto De Vista Da Abordagem Do Problema

Para atendermos a proposta de solução do nosso problema, realizaremos uma pesquisa de forma quantitativa utilizando a estipulação de dados em um modelo teste. O modelo de solução será desenvolvido em uma plataforma digital com a utilização de procedimentos estruturados, com isso, facilitando a leitura dos dados que poderão ser quantificados, fornecendo resultados mais realista e precisos (GERHARDT, SILVEIRA. 2009, p. 34).

3.1.3 Do Ponto De Vista De Seus Objetivos

De acordo com Gil (2002), podemos classificar nossa pesquisa como, uma pesquisa explicativa, sendo que estamos analisando fatores e variáveis de um método que pode levar a inconsistências, este tipo de pesquisa fornece uma explicação do fenômeno estudado aplicando o conhecimento juntamente com a realidade, expondo os fatos e as evidências do problema e dos resultados.

O método experimental se justifica pelo fato de que ocorrerão análises de vários conjuntos de dados, a fim de confrontá-los com os resultados obtidos na nova metodologia proposta (utilizando lógica *fuzzy*). Assim, ajustaremos e refinaremos o algoritmo para obtermos o melhor resultado possível

3.1.4 Do Ponto De Vista Dos Procedimentos Técnicos

É classificada como uma pesquisa experimental, já que são feitos manipulações e controles de variáveis para que possamos controlar o resultado final. As variáveis em questão são os fatores numéricos atribuídos aos critérios do método FMECA, sendo eles: ocorrência, severidade e detecção. (GIL, 2002)

3.2 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO

Primeiramente, será levantado um algoritmo em pseudocódigo para elaborarmos a lógica de resolução que será aplicada na causa desse trabalho.

Serão levadas em conta as Tabelas 2, 3 e 4, dispostas no capítulo 2 desse trabalho, para levantarmos as funções de pertinência adequadas. Com isso, teremos uma prévia do comportamento de cada função de pertinência, relacionado à cada critério FMECA em questão.

Serão criadas funções de pertinência de entrada que serão levadas em conta na fuzzificação. Com todas as funções de pertinência elaboradas, o domínio estará estabelecido e assim será possível começar a implementação do software JAVA.

Com a utilização da plataforma JavaFX, será possível elaborar uma tela inicial para aplicativo. As principais opções que serão: adicionar o modo de falha e selecionar

um valor numérico para cada um dos critérios FMECA, sendo eles: ocorrência, severidade, detecção e criticidade. Esse valor numérico deve ser um número natural de 1 a 10. Conforme a escolha, o algoritmo selecionará e quantificará a variável linguística mais adequada para a análise.

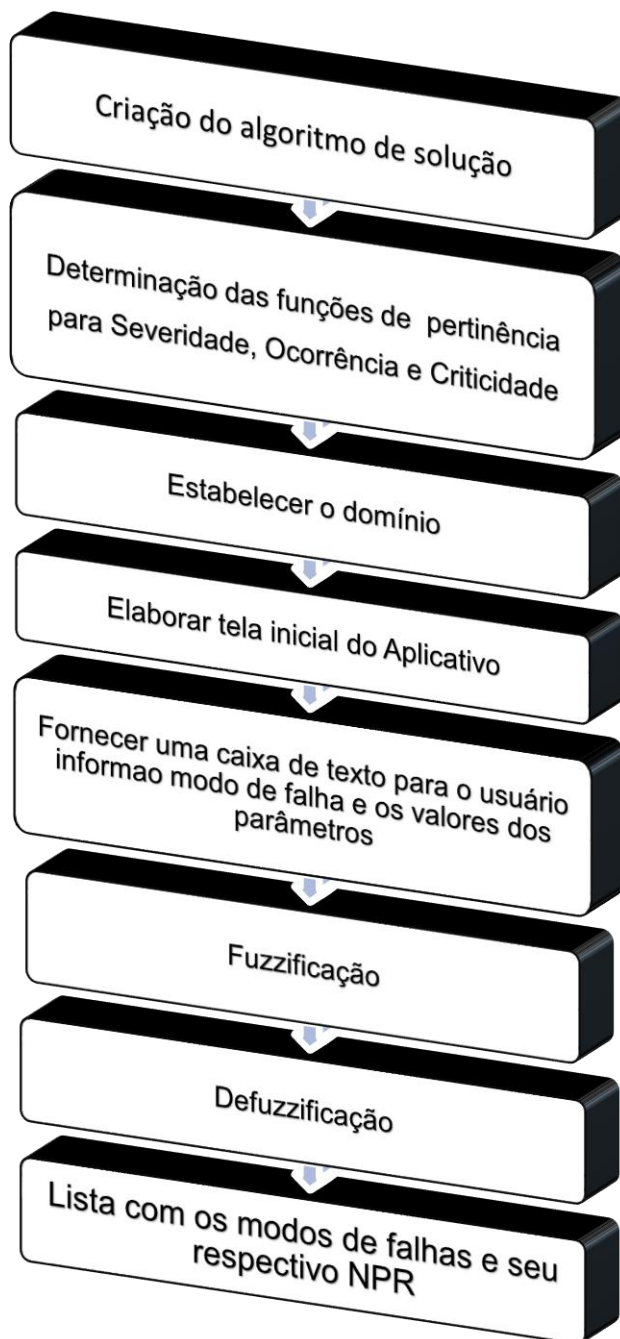
A análise será realizada por meio da fuzzificação, que atribui graus de pertinência para o valor selecionado.

Ainda dentro do algoritmo desenvolvido, há um espaço para a realização da inferência *fuzzy*. Nesta etapa, são confrontadas as situações e variáveis linguísticas estabelecidas pelo usuário, fornecendo um valor de saída, utilizando o método de centro de gravidade para defuzzificação do valor.

3.3 FLUXOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO

A Figura 5 ilustra um fluxograma que representa as etapas macro do desenvolvimento do algoritmo Java.

Figura 5 - Etapas do desenvolvimento.



Fonte: Própria

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 CONJUNTOS *FUZZY*

O primeiro passo para o desenvolvimento do software foi levantar todas as funções de pertinência correspondentes aos conjuntos *fuzzy* tratados.

Foram levadas em conta, para a seleção das variáveis linguísticas, as Tabelas 2, 3 e 4, dispostas no capítulo 2 desse trabalho. Com elas, é possível ter uma base para a escolha dos conjuntos *fuzzy*, já que são elencados os principais grupos com suas respectivas notas do método FMECA.

Porém, o número de conjuntos *fuzzy* foi reduzido à cinco, a fim de simplificar o algoritmo e evitar possíveis erros de compilação. Mesmo com cinco conjuntos para cada universo de discurso *fuzzy*, sendo eles severidade, ocorrência e detecção, tivemos 125 possibilidades de comutação de variáveis entre si. Dessa forma, o algoritmo de cálculo resultou numa estrutura robusta, porém eficiente.

Os conjuntos *fuzzy* escolhidos para cada universo de discurso estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Conjuntos *Fuzzy*.

	Universo de discurso		
	Severidade	Detecção	Ocorrência
Conjunto <i>Fuzzy</i>	Desprezível	Quase certa	Chance desprezível
	Pequena	Alta	Chance pequena
	Moderada	Moderada	Chance moderada
	Grande	Baixa	Chance alta
	Catastrófica	Remota	Chance altíssima

Fonte: própria.

Ainda, para o NPR, definimos as seguintes variáveis linguísticas, dispostas na Tabela 6.

Tabela 6 - Conjuntos *Fuzzy* NPR.

	Universo de Discurso
	NPR
Conjunto <i>Fuzzy</i>	Muito baixo
	Baixo
	Médio baixo
	Médio
	Médio alto
	Alto
	Muito alto

Fonte: própria.

Dessa forma, o operador computará os inputs e terá como retorno um NPR baseado nas variáveis linguísticas recém apresentadas.

Para uma maior abrangência nos primeiros universos de discurso, desenvolvemos funções de pertinência que cobrem uma parte considerável do eixo dos abscissas. Dessa forma, um input pode ter pertinências variadas para dois ou mais variáveis linguísticas.

4.2 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Abaixo levantaremos todas as funções de pertinência correspondentes a cada conjunto *fuzzy* citado na seção anterior. Para o levantamento, foram desenvolvidas funções lineares para ilustrar os gráficos triangulares selecionados. Dessa forma, foram desenvolvidos dois polinômios de primeiro grau para cada conjunto *fuzzy*, com exceção dos primeiros e últimos conjuntos de cada universo de discurso.

4.2.1 Severidade

Dividida em cinco diferentes conjuntos *fuzzy*, a severidade representa o grau de consequência do modo de falha em questão.

Para os cinco conjuntos que foram definidos, temos os seguintes domínios de função.

4.2.1.1 Desprezível

O conjunto *fuzzy* do tipo desprezível indica que a consequência gerada do modo de falha não tem influência significativa sobre o sistema produtivo em questão. Sendo n a nota para o universo de discurso severidade, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto desprezível:

$$\begin{aligned}
 D &= \{(n, \mu_D(n)) \mid n \in N_D\} \\
 N_D &= \{1, 2\} \\
 \mu_D(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_D(n) &= 2 - n
 \end{aligned} \tag{4}$$

4.2.1.2 Pequena

O conjunto *fuzzy* do tipo pequena indica que a consequência gerada do modo de falha tem certa, mas pequena, influência sobre o sistema produtivo em questão. Sendo n a nota para o universo de discurso severidade, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto pequena:

$$\begin{aligned}
 P &= \{(n, \mu_P(n)) \mid n \in N_P\} \\
 N_P &= \{2, 3, 4\} \\
 \mu_P(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_P(n) &= \begin{cases} n - 1 & \text{se } n = 2 \\ \frac{5 - n}{3} & \text{se } 3 \leq n \leq 4 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{5}$$

4.2.1.3 Moderada

O conjunto *fuzzy* do tipo moderada indica que a consequência gerada do modo de falha tem considerável influência sobre o sistema produtivo em questão. Sendo n a nota para o universo de discurso severidade, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto moderada:

$$\begin{aligned}
M &= \{(n, \mu_M(n)) \mid n \in N_M\} \\
N_M &= \{3, 4, 5, 6, 7\} \\
\mu_M(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
\mu_M(n) &= \begin{cases} \frac{n-2}{3} & \text{se } 3 \leq n \leq 4 \\ \frac{8-n}{3} & \text{se } 5 \leq n \leq 7 \end{cases} \quad (6)
\end{aligned}$$

4.2.1.4 Grande

O conjunto *fuzzy* do tipo grande indica que a consequência gerada do modo de falha tem alta influência sobre o sistema produtivo em questão. Sendo n a nota para o universo de discurso severidade, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto grande:

$$\begin{aligned}
G &= \{(n, \mu_G(n)) \mid n \in N_G\} \\
N_G &= \{6, 7, 8, 9\} \\
\mu_G(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
\mu_G(n) &= \begin{cases} \frac{n-5}{3} & \text{se } 6 \leq n \leq 7 \\ \frac{10-n}{2} & \text{se } 8 \leq n \leq 9 \end{cases} \quad (7)
\end{aligned}$$

4.2.1.5 Catastrófica

O conjunto *fuzzy* do tipo catastrófica indica que a consequência gerada do modo de falha tem catastrófica influência sobre o sistema produtivo em questão, ou seja, é crucial. Sendo n a nota para o universo de discurso severidade, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto catastrófica:

$$\begin{aligned}
C &= \{(n, \mu_C(n)) \mid n \in N_C\} \\
N_C &= \{8, 9, 10\} \\
\mu_C(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
\mu_C(n) &= \frac{n-7}{3} \quad (8)
\end{aligned}$$

4.2.2 Ocorrência

A ocorrência indica a frequência de acontecimentos do modo de falha em questão. Também foi dividida em cinco conjuntos *fuzzy*. Para os cinco conjuntos que foram definidos, temos os seguintes domínios de função.

4.2.2.1 Chance desprezível

O conjunto *fuzzy* do tipo chance desprezível indica que a probabilidade de ocorrer o modo de falha é praticamente remota, da razão perto de 0. Sendo n a nota para o universo de discurso ocorrência, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto chance desprezível.

$$\begin{aligned}
 CD &= \{(n, \mu_{CD}(n)) \mid n \in N_{CD}\} \\
 N_{CD} &= \{1, 2\} \\
 \mu_{CD}(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_{CD}(n) &= 2 - n
 \end{aligned} \tag{9}$$

4.2.2.2 Chance pequena

O conjunto *fuzzy* do tipo chance pequena indica que a probabilidade de ocorrer o modo de falha já é significativa, porém baixa, da razão de 1/20000 a 1/2000, baseando-se na Tabela 3. Sendo n a nota para o universo de discurso severidade, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto chance pequena:

$$\begin{aligned}
 CP &= \{(n, \mu_{CP}(n)) \mid n \in N_{CP}\} \\
 N_{CP} &= \{2, 3, 4, 5\} \\
 \mu_{CP}(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_{CP}(n) &= \begin{cases} \frac{n-1}{3} & \text{se } 2 \leq n \leq 3 \\ \frac{6-n}{2} & \text{se } 4 \leq n \leq 5 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{10}$$

4.2.2.3 Chance Moderada

O conjunto *fuzzy* do tipo chance moderada indica que a probabilidade de ocorrer o modo de falha é razoavelmente alta, da razão de 1/2000 a 1/200, de acordo

com a Tabela 3. Sendo n a nota para o universo de discurso ocorrência, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto chance moderada:

$$\begin{aligned}
 CM &= \{(n, \mu_{CM}(n)) \mid n \in N_{CM}\} \\
 N_{CM} &= \{4, 5, 6\} \\
 \mu_{CM}(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_{CM}(n) &= \begin{cases} \frac{n-3}{2} & \text{se } 4 \leq n \leq 5 \\ \frac{7-n}{2} & \text{se } n = 6 \end{cases} \quad (11)
 \end{aligned}$$

4.2.2.4 Chance Alta

O conjunto *fuzzy* do tipo chance alta indica que a probabilidade de ocorrer o modo de falha é alta, da ordem de 1/200 a 1/20, já requerendo grande atenção do plano de manutenção. Sendo n a nota para o universo de discurso ocorrência, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto chance alta:

$$\begin{aligned}
 CA &= \{(n, \mu_{CA}(n)) \mid n \in N_{CA}\} \\
 N_{CA} &= \{6, 7, 8, 9\} \\
 \mu_{CA}(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_{CA}(n) &= \begin{cases} \frac{n-5}{2} & \text{se } 6 \leq n \leq 7 \\ \frac{10-n}{3} & \text{se } 8 \leq n \leq 9 \end{cases} \quad (12)
 \end{aligned}$$

4.2.2.5 Chance Altíssima

O conjunto *fuzzy* do tipo chance altíssima indica que a probabilidade de ocorrer o modo de falha é catastróficamente alta, da ordem de 1/20 a 1. Sendo n a nota para o universo de discurso ocorrência, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto chance altíssima:

$$\begin{aligned}
 CA+ &= \{(n, \mu_{CA+}(n)) \mid n \in N_{CA+}\} \\
 N_{CA+} &= \{9, 10\} \\
 \mu_{CA+}(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_{CA+}(n) &= \frac{n-8}{2} \quad (13)
 \end{aligned}$$

4.2.3 Detecção

A detecção de um modo de falha indica o quanto é possível identificar o acontecimento da falha antes que a mesma ocorra. Quanto maior a nota, menor a possibilidade de um mecanismo ou recurso identificar o modo de falha em questão.

Para os cinco conjuntos fuzzy escolhidos para o universo de discurso detecção, temos os seguintes domínios de função:

4.2.3.1 Quase certa

O conjunto *fuzzy* do tipo quase certa indica que a probabilidade de detectar o modo de falha antes de seu acontecimento é praticamente certa. Sendo n a nota para o universo de discurso detecção, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto quase certa:

$$\begin{aligned}
 QC &= \{(n, \mu_{QC}(n)) \mid n \in N_{QC}\} \\
 N_{QC} &= \{1,2\} \\
 \mu_{QC}(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_{QC}(n) &= \frac{3-n}{2} \quad (14)
 \end{aligned}$$

4.2.3.2 Alta

O conjunto *fuzzy* do tipo alta indica que a possibilidade de detecção do modo de falha antes de seu acontecimento é totalmente factível, porém não absolutamente certa. Sendo n a nota para o universo de discurso detecção, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto alta:

$$\begin{aligned}
 A &= \{(n, \mu_A(n)) \mid n \in N_A\} \\
 N_A &= \{2,3,4,5\} \\
 \mu_A(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_A(n) &= \begin{cases} \frac{n-1}{2} & \text{se } 2 \leq n \leq 3 \\ \frac{6-n}{3} & \text{se } 4 \leq n \leq 5 \end{cases} \quad (15)
 \end{aligned}$$

4.2.3.3 Moderada

O conjunto *fuzzy* do tipo moderada indica que a possibilidade de detecção do modo de falha antes de seu acontecimento não é mais tão elevada, porém ainda factível. Sendo n a nota para o universo de discurso detecção, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto moderada:

$$\begin{aligned}
 M &= \{(n, \mu_M(n)) \mid n \in N_M\} \\
 N_M &= \{4, 5, 6\} \\
 \mu_M(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_M(n) &= \begin{cases} \frac{n-3}{2} & \text{se } 4 \leq n \leq 5 \\ \frac{7-n}{2} & \text{se } n = 6 \end{cases} \quad (16)
 \end{aligned}$$

4.2.3.4 Baixa

O conjunto *fuzzy* do tipo baixa indica que a possibilidade de detecção do modo de falha antes de seu acontecimento começa a ser baixa, dificilmente possibilitando tomar medidas antecipadas. Sendo n a nota para o universo de discurso detecção, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto baixa:

$$\begin{aligned}
 B &= \{(n, \mu_B(n)) \mid n \in N_B\} \\
 N_B &= \{5, 6, 7, 8\} \\
 \mu_B(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_B(n) &= \begin{cases} \frac{n-4}{3} & \text{se } 5 \leq n \leq 6 \\ \frac{9-n}{2} & \text{se } 7 \leq n \leq 8 \end{cases} \quad (17)
 \end{aligned}$$

4.2.3.5 Remota

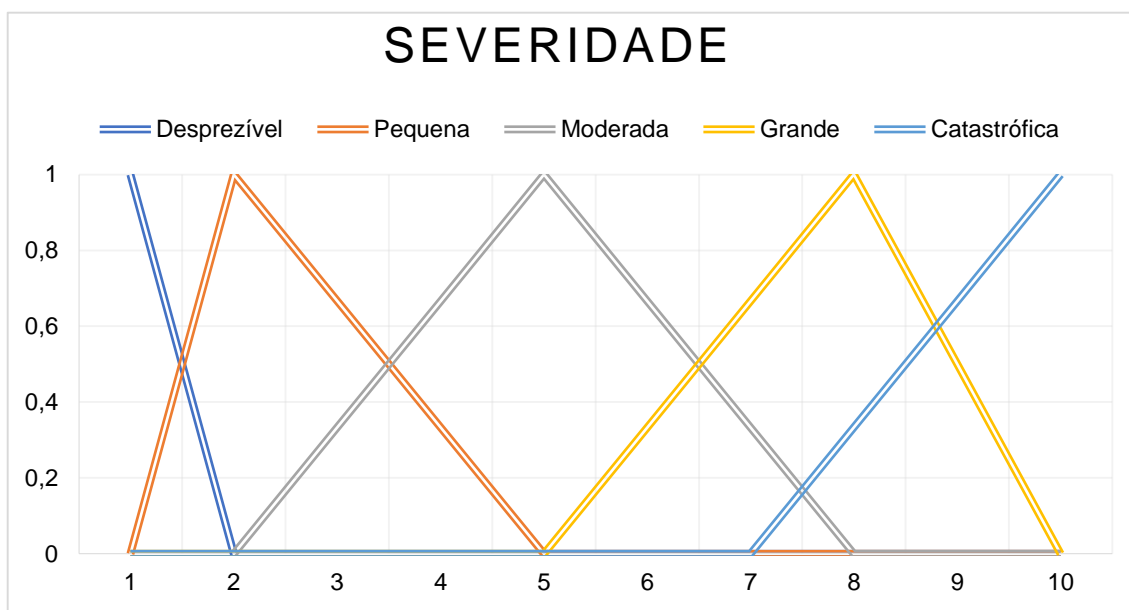
O conjunto *fuzzy* do tipo remota indica que a possibilidade de detecção do modo de falha é praticamente impossível, inviabilizando a tomada de medidas corretivas e preventivas para a amenizar as consequências da falha. Sendo n a nota para o universo de discurso detecção, temos o seguinte domínio para a função de pertinência do conjunto remota:

$$\begin{aligned}
 R &= \{(n, \mu_R(n)) \mid n \in N_R\} \\
 N_R &= \{9, 10\} \\
 \mu_R(n) &\rightarrow \text{função de pertinência do conjunto} \\
 \mu_R(n) &= \frac{n - 8}{2} \quad (18)
 \end{aligned}$$

4.2.4 Gráficos

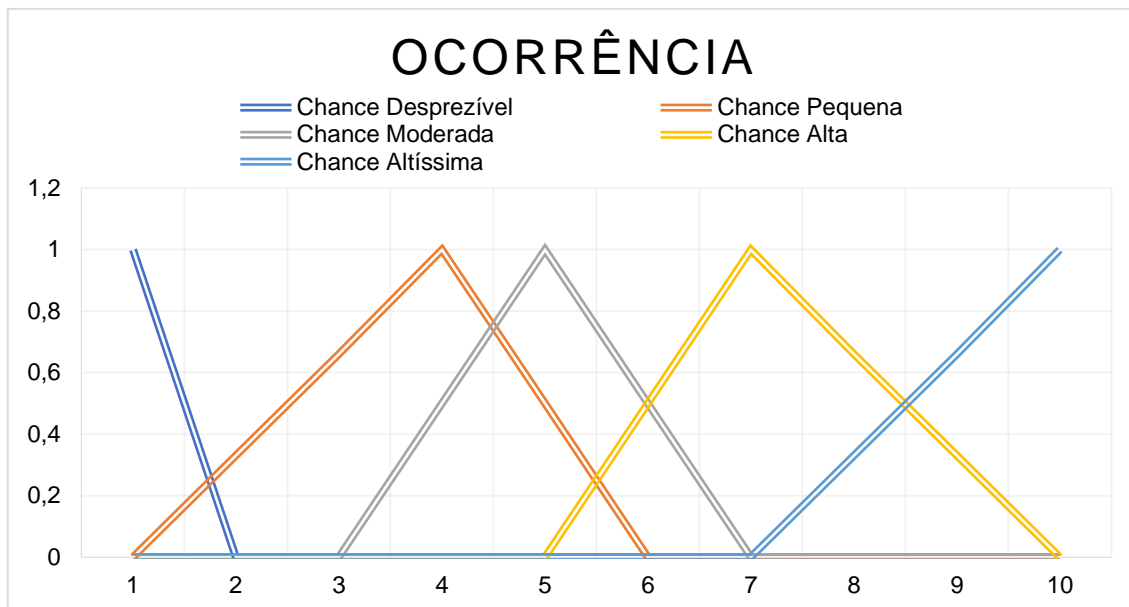
Para as funções de pertinência apresentadas, temos os seguintes gráficos *fuzzy*. Vide Figuras 6, 7 e 8, que representam a severidade, a ocorrência e a detecção, respectivamente.

Figura 6 - Gráfico *fuzzy* da severidade.



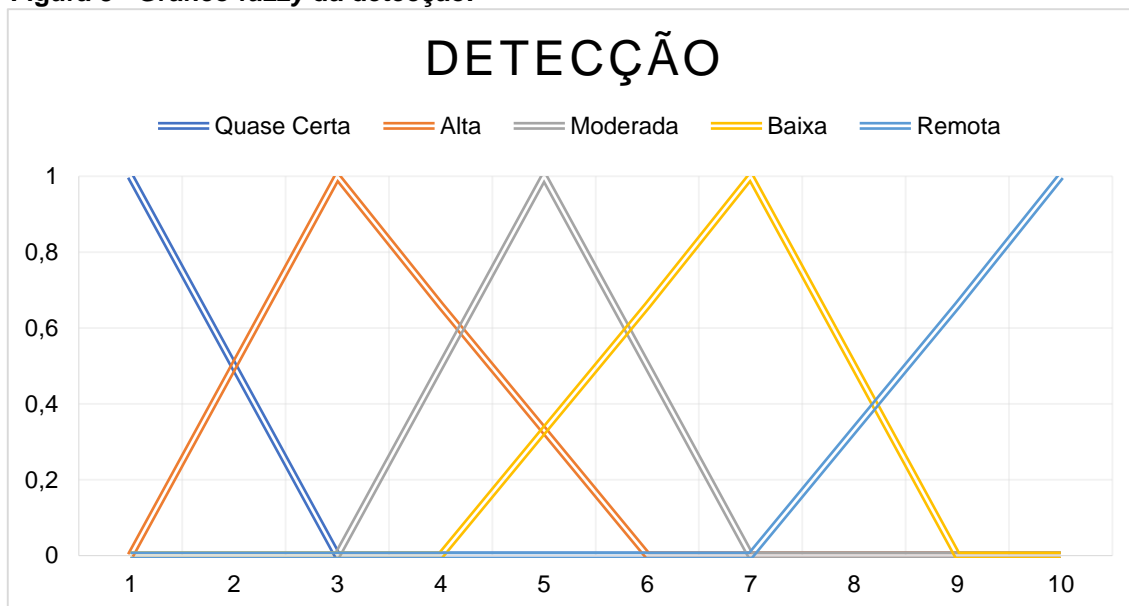
Fonte: própria.

Figura 7 - Gráfico *fuzzy* da ocorrência.



Fonte: própria.

Figura 8 - Gráfico *fuzzy* da detecção.



Fonte: própria.

Com os gráficos representados nas Figuras 6, 7 e 8 foi possível levantar, de acordo com as funções de pertinência apresentadas, todos os valores de pertinência dos conjuntos *fuzzy* utilizados.

4.3 INFERÊNCIA FUZZY

Para as regras de inferência *fuzzy* foram levantadas todas as possibilidades de iterações entre as variáveis linguísticas de entrada, ou seja, realizar o confronto de cada conjunto *fuzzy* a fim de projetar a combinação nos conjuntos *fuzzy* no universo de discurso de saída para o NPR. As regras de inferências são determinantes para o funcionamento correto do método. Na Tabela 7 identificamos todos as possibilidades de combinações para a inferência e as variáveis linguísticas resultantes para saída de cada combinação.

Tabela 7 - Confrontos *fuzzy*.

Universo de discurso (Input)			Output
Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
Desprezível	Quase certa	Chance desprezível	Muito baixo
Desprezível	Quase certa	Chance pequena	Muito baixo
Desprezível	Quase certa	Chance moderada	Muito baixo
Desprezível	Quase certa	Chance alta	Muito baixo
Desprezível	Quase certa	Chance altíssima	Baixo
Desprezível	Alta	Chance desprezível	Muito baixo
Desprezível	Alta	Chance pequena	Muito baixo
Desprezível	Alta	Chance moderada	Baixo
Desprezível	Alta	Chance alta	Baixo
Desprezível	Alta	Chance altíssima	Baixo
Desprezível	Moderada	Chance desprezível	Muito baixo
Desprezível	Moderada	Chance pequena	Baixo
Desprezível	Moderada	Chance moderada	Baixo
Desprezível	Moderada	Chance alta	Baixo
Desprezível	Moderada	Chance altíssima	Médio baixo
Desprezível	Baixa	Chance desprezível	Muito baixo
Desprezível	Baixa	Chance pequena	Baixo
Desprezível	Baixa	Chance moderada	Baixo
Desprezível	Baixa	Chance alta	Médio baixo
Desprezível	Baixa	Chance altíssima	Médio baixo
Desprezível	Remota	Chance desprezível	Muito baixo
Desprezível	Remota	Chance pequena	Baixo
Desprezível	Remota	Chance moderada	Baixo

Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
Desprezível	Remota	Chance alta	Médio baixo
Desprezível	Remota	Chance altíssima	Médio baixo
Pequena	Quase certa	Chance desprezível	Baixo
Pequena	Quase certa	Chance pequena	Baixo
Pequena	Quase certa	Chance moderada	Baixo
Pequena	Quase certa	Chance alta	Baixo
Pequena	Quase certa	Chance altíssima	Médio baixo
Pequena	Alta	Chance desprezível	Baixo
Pequena	Alta	Chance pequena	Baixo
Pequena	Alta	Chance moderada	Baixo
Pequena	Alta	Chance alta	Médio baixo
Pequena	Alta	Chance altíssima	Médio baixo
Pequena	Moderada	Chance desprezível	Baixo
Pequena	Moderada	Chance pequena	Baixo
Pequena	Moderada	Chance moderada	Médio baixo
Pequena	Moderada	Chance alta	Médio baixo
Pequena	Moderada	Chance altíssima	Médio
Pequena	Baixa	Chance desprezível	Baixo
Pequena	Baixa	Chance pequena	Médio baixo
Pequena	Baixa	Chance moderada	Médio baixo
Pequena	Baixa	Chance alta	Médio
Pequena	Baixa	Chance altíssima	Médio
Pequena	Remota	Chance desprezível	Baixo
Pequena	Remota	Chance pequena	Médio baixo
Pequena	Remota	Chance moderada	Médio
Pequena	Remota	Chance alta	Médio
Pequena	Remota	Chance altíssima	Médio alto
Moderada	Quase certa	Chance desprezível	Baixo
Moderada	Quase certa	Chance pequena	Médio baixo
Moderada	Quase certa	Chance moderada	Médio
Moderada	Quase certa	Chance alta	Médio alto
Moderada	Quase certa	Chance altíssima	Médio alto
Moderada	Alta	Chance desprezível	Médio baixo
Moderada	Alta	Chance pequena	Médio

Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
Moderada	Alta	Chance moderada	Médio
Moderada	Alta	Chance alta	Médio
Moderada	Alta	Chance altíssima	Médio alto
Moderada	Moderada	Chance desprezível	Médio baixo
Moderada	Moderada	Chance pequena	Médio
Moderada	Moderada	Chance moderada	Médio
Moderada	Moderada	Chance alta	Médio
Moderada	Moderada	Chance altíssima	Médio alto
Moderada	Baixa	Chance desprezível	Médio
Moderada	Baixa	Chance pequena	Médio
Moderada	Baixa	Chance moderada	Médio alto
Moderada	Baixa	Chance alta	Médio alto
Moderada	Baixa	Chance altíssima	Alto
Moderada	Remota	Chance desprezível	Médio
Moderada	Remota	Chance pequena	Médio alto
Moderada	Remota	Chance moderada	Médio alto
Moderada	Remota	Chance alta	Alto
Moderada	Remota	Chance altíssima	Alto
Grande	Quase certa	Chance desprezível	Médio
Grande	Quase certa	Chance pequena	Médio
Grande	Quase certa	Chance moderada	Médio alto
Grande	Quase certa	Chance alta	Alto
Grande	Quase certa	Chance altíssima	Alto
Grande	Alta	Chance desprezível	Médio
Grande	Alta	Chance pequena	Médio
Grande	Alta	Chance moderada	Médio alto
Grande	Alta	Chance alta	Alto
Grande	Alta	Chance altíssima	Alto
Grande	Moderada	Chance desprezível	Médio
Grande	Moderada	Chance pequena	Médio alto
Grande	Moderada	Chance moderada	Médio alto
Grande	Moderada	Chance alta	Alto
Grande	Moderada	Chance altíssima	Alto
Grande	Baixa	Chance desprezível	Médio alto

Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
Grande	Baixa	Chance pequena	Médio alto
Grande	Baixa	Chance moderada	Alto
Grande	Baixa	Chance alta	Alto
Grande	Baixa	Chance altíssima	Alto
Grande	Remota	Chance desprezível	Médio alto
Grande	Remota	Chance pequena	Alto
Grande	Remota	Chance moderada	Alto
Grande	Remota	Chance alta	Alto
Grande	Remota	Chance altíssima	Alto
Catastrófica	Quase certa	Chance desprezível	Médio
Catastrófica	Quase certa	Chance pequena	Médio alto
Catastrófica	Quase certa	Chance moderada	Médio alto
Catastrófica	Quase certa	Chance alta	Alto
Catastrófica	Quase certa	Chance altíssima	Alto
Catastrófica	Alta	Chance desprezível	Médio
Catastrófica	Alta	Chance pequena	Médio alto
Catastrófica	Alta	Chance moderada	Alto
Catastrófica	Alta	Chance alta	Alto
Catastrófica	Alta	Chance altíssima	Muito alto
Catastrófica	Moderada	Chance desprezível	Médio alto
Catastrófica	Moderada	Chance pequena	Médio alto
Catastrófica	Moderada	Chance moderada	Alto
Catastrófica	Moderada	Chance alta	Muito alto
Catastrófica	Moderada	Chance altíssima	Muito alto
Catastrófica	Baixa	Chance desprezível	Médio alto
Catastrófica	Baixa	Chance pequena	Alto
Catastrófica	Baixa	Chance moderada	Alto
Catastrófica	Baixa	Chance alta	Muito alto
Catastrófica	Baixa	Chance altíssima	Muito alto
Catastrófica	Remota	Chance desprezível	Alto
Catastrófica	Remota	Chance pequena	Alto
Catastrófica	Remota	Chance moderada	Muito alto
Catastrófica	Remota	Chance alta	Muito alto
Catastrófica	Remota	Chance altíssima	Muito alto

Com a definição das variáveis linguísticas resultantes de cada combinação foi possível determinar o gráfico de saída para valores de NPR. O intervalo para cada conjunto *fuzzy* foi determinado a partir do número total de combinações para cada variável. Realizou-se assim uma normalização dos valores para convertê-los em intervalos proporcionais. A Tabela 8 mostra a quantidade resultante de combinações para cada variável de saída e seu respectivo intervalo no gráfico NRP.

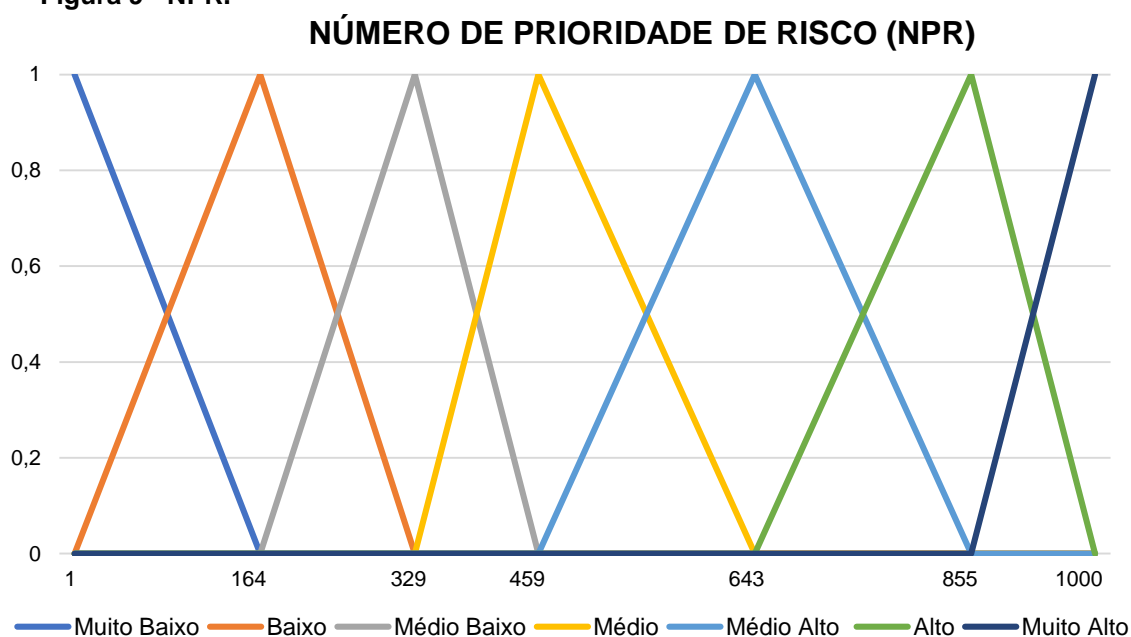
Tabela 8 - Intervalos.

Variáveis de Saída	Quantidade de Combinações	Intervalo
MUITO BAIXO	9	164
BAIXO	23	329
MÉDIO BAIXO	16	295
MÉDIO	22	314
MÉDIO ALTO	22	396
ALTO	25	357
MUITO ALTO	8	145

Fonte: própria.

O gráfico da Figura 9 mostra as funções de pertinência de saída do universo de discurso *fuzzy*.

Figura 9 - NPR.



Fonte: própria.

A Equação 19 é referente a função de pertinência **muito baixo**.

$$\mu_{MB}(x_k) = -\frac{x_k - 164}{163} \quad (19)$$

As Equações 20 e 21 são referentes a função de pertinência **baixo**.

$$\mu_{1B}(x_k) = \frac{x_k - 1}{163} \quad (20)$$

$$\mu_{2B}(x_k) = \frac{-x_k + 329}{165} \quad (21)$$

As Equações 22 e 23 são referentes a função de pertinência **médio baixo**.

$$\mu_{1MedB}(x_k) = \frac{x_k - 164}{165} \quad (22)$$

$$\mu_{2MedB}(x_k) = \frac{-x_k + 459}{130} \quad (23)$$

As Equações 24 e 25 são referentes a função de pertinência **médio**.

$$\mu_{1Med}(x_k) = \frac{x_k - 329}{130} \quad (24)$$

$$\mu_{2Med}(x_k) = \frac{-x_k + 643}{184} \quad (25)$$

As Equações 26 e 27 são referentes a função de pertinência **médio alto**.

$$\mu_{1MedA}(x_k) = \frac{x_k - 459}{184} \quad (26)$$

$$\mu_{2MedA}(x_k) = \frac{-x_k + 855}{212} \quad (27)$$

As Equações 28 e 29 são referentes a função de pertinência **alto**.

$$\mu_{1A}(x_k) = \frac{x_k - 643}{212} \quad (28)$$

$$\mu_{2A}(x_k) = \frac{-x_k + 1000}{145} \quad (29)$$

A Equação 30 são referentes a função de pertinência **muito alto**.

$$\mu_{MA}(x_k) = \frac{x_k - 855}{145} \quad (30)$$

As variáveis linguísticas para o NPR foram selecionadas uma a uma, priorizando sempre o critério de severidade, detecção e ocorrência, respectivamente. Dessa forma, conseguimos considerar com mais peso os critérios que mais influenciam num processo produtivo.

Com isso, os modos de falha que obteriam produtos iguais no método original, são priorizados conforme a maior nota de severidade, sumariamente.

Ou seja, num exemplo prático teríamos (vide Tabela 9):

Tabela 9 – Exemplo

Modo de Falha	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR [clássico]
X	6	5	5	150
Y	5	6	5	150
Z	5	5	6	150

Fonte: própria.

Como ilustrado na Tabela 8, o FMECA tradicional não consegue classificar os modos de falha X, Y e Z, do ponto de vista da criticidade. Porém, baseando-se em uma inferência *fuzzy* com os critérios da Tabela 7, o modo de falha X será o mais crítico, por ter uma nota de severidade maior. Os resultados serão apresentados com mais ênfase no próximo capítulo.

Após serem levantados todos os confrontos possíveis, é preciso definir qual a relação entre as pertinências dos universos de entrada com o universo de saída.

Como foi constatado, tratando de um conjunto em um domínio discreto, um método adequado para a inferência é a regra de inferência composicional (GOMIDE, GUDWIN, TANSCHKEIT, 2018).

Com isso, as pertinências do universo de saída são dadas pelo produto interno do vetor que representa as pertinências dos universos de entrada.

Sejam **U**, **V** e **W** vetores que representam as pertinências de diferentes objetos de estudo em cada universo de discurso (A, B e C), as pertinências no universo de saída (z) são (vide Equações 31, 32 e 33):

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{W} = z \quad (31)$$

Sendo,

$$\mathbf{U} = (\mu_A(n_i))$$

$$\mathbf{V} = (\mu_B(n_j))$$

$$\mathbf{W} = (\mu_C(n_k))$$

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{W} = (\mu_A(n_i)) \cdot (\mu_B(n_j)) \cdot (\mu_C(n_k)) = z = \mu_D(n_1) \quad (32)$$

Com,

$$\mu_D(n_1) = \mu_A(n_i) \cdot \mu_B(n_j) \cdot \mu_C(n_k) \quad (33)$$

Isso indica que a pertinência no universo de saída é a multiplicação das três pertinências dos universos de entrada, baseando-se na Tabela 7 para a seleção do conjunto *fuzzy* de saída. Essa rotina matemática resume a regra de inferência composicional.

No algoritmo, temos uma estrutura *array*, que é basicamente uma matriz, a qual armazena todas as pertinências do universo de saída para cada modo de falha.

4.4 DEFUZZYFICAÇÃO

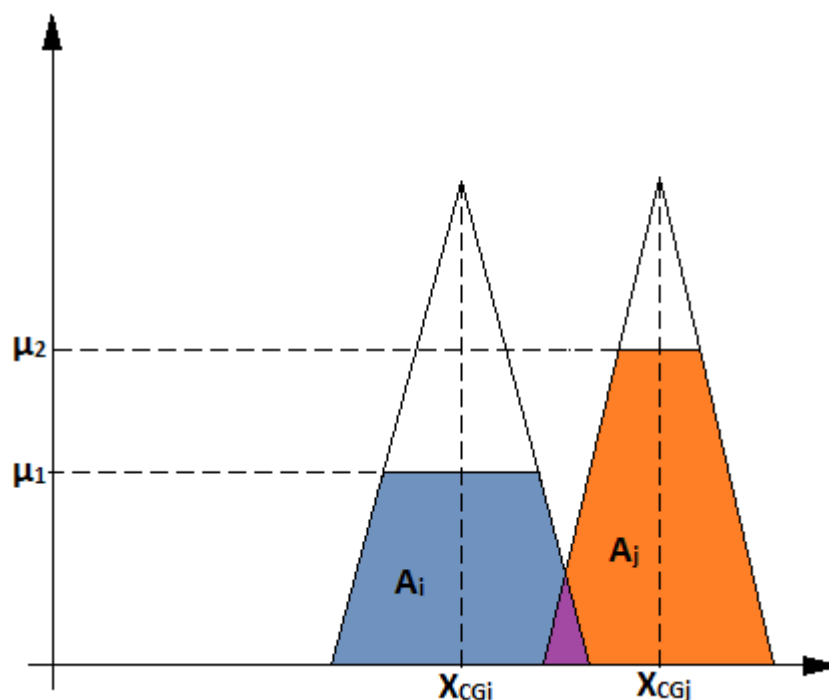
Agora que as pertinências para cada conjunto *fuzzy* do universo de saída foram obtidas, é possível aplicar o método de defuzzyficação do centro de gravidade para ser obtido o NPR com base na lógica *fuzzy*.

4.4.1 Método do Centro de Gravidade

Para ser feita a defuzzyficação, como já dito, foi utilizado o método do centro de gravidade. O método baseia-se na ponderação dos centros de gravidade de cada região dos conjuntos *fuzzy* do universo de discurso de saída.

Sendo assim, foram consideradas μ_1 e μ_2 as pertinências de dois conjuntos *fuzzy*, 1 e 2, no universo de discurso de saída. Também, A_i e A_j as respectivas áreas das regiões resultantes da intersecção de uma linha paralela às abscissas saindo do valor da pertinência com as funções de pertinência referentes àquele conjunto. Vide Figura 10 para uma melhor visualização.

Figura 10 - Centro de Gravidade.



Fonte: própria.

Vide os dois centros de gravidade, x_{CGi} e x_{CGj} , referentes às duas áreas, A_i e A_j . Com isso, calcular-se-á o centro de gravidade resultante da junção das duas regiões. Para o feito, foi utilizada a Equação 3, na seção 2.4.7.

$$G(A) = \frac{\sum A_n(\mu) \cdot x_{CG}}{\sum A_n(\mu)}$$

Sendo,

$A_n(\mu) \rightarrow$ área da região resultante de cada conjunto fuzzy;

$x_{CG} \rightarrow$ centro de gravidade da região resultante de cada conjunto fuzzy;

Dessa forma, obteve-se um novo centro de gravidade da figura composta por todas as regiões que possuem pertinência $\mu \neq 0$. Para o caso deste trabalho, este novo centro de gravidade será o novo NPR_{fuzzy} .

Para facilitar a implementação do algoritmo, foi utilizada uma equação que explicita a área em função da pertinência encontrada.

Como todas as funções de pertinência resultam em um triângulo, as áreas serão expressas por figuras como trapézios, em casos de pertinências menores que um ($\mu < 1$), e triângulos, em casos de pertinências iguais a um ($\mu = 1$).

A área de um trapézio é definida por,

$$A_{\text{trapézio}} = \frac{(B + b) \cdot h}{2} \quad (34)$$

Sendo,

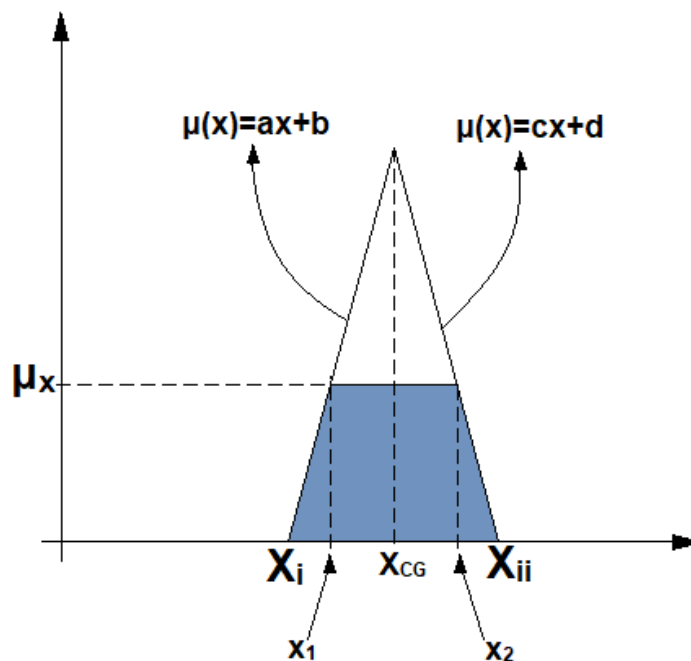
$B \rightarrow$ base maior

$b \rightarrow$ base menor

$h \rightarrow$ altura

A Figura 11 representa um conjunto *fuzzy* genérico.

Figura 11 - Área resultante.



Fonte: própria.

Neste caso, para a Equação 34, temos:

$$B = X_{ii} - X_i \quad (35)$$

$$b = x_2 - x_1 \quad (36)$$

$$h = \mu_x \quad (37)$$

Ainda, explicitando a variável x nas funções de pertinência, temos.

$$\mu_1(x) = a x_1 + b$$

$$x_1 = \frac{\mu_1(x_1) - b}{a} \quad (38)$$

Igualmente,

$$x_2 = \frac{\mu_2(x_1) - d}{c} \quad (39)$$

E, como,

$$\mu_1(x_1) = \mu_2(x_2) \equiv \mu_x$$

Substituindo na Equação X, temos:

$$\begin{aligned} A_{\text{trapézio}} &= \frac{(B + b) \cdot h}{2} = \frac{((X_{ii} - X_i) + (x_2 - x_1)) \cdot \mu_x}{2} \\ &= \frac{\left((X_{ii} - X_i) + \left(\frac{\mu_x - d}{c} - \frac{\mu_x - b}{a} \right) \right) \cdot \mu_x}{2} \end{aligned} \quad (40)$$

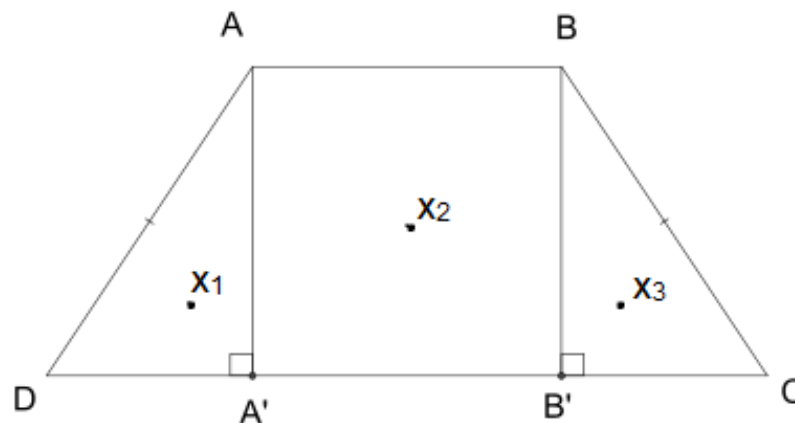
A Equação 40 foi a equação base para termos uma melhor eficiência e facilidade na implementação. Para ilustrar que a Equação 40 também representa as áreas dos triângulos, tomou-se o limite para quando a diferença $(x_2 - x_1) \rightarrow 0$.

$$\lim_{(x_2 - x_1) \rightarrow 0} \frac{((X_{ii} - X_i) + (x_2 - x_1)) \cdot \mu_x}{2} = \frac{(X_{ii} - X_i) \cdot \mu_x}{2} \rightarrow \frac{B \cdot h}{2}$$

Ou seja, a Equação X abrange todas as áreas de interesse.

Da mesma forma, foi explicitada uma equação para o centro de gravidade de cada área dos conjuntos *fuzzy*. Foi considerado um trapézio como a junção de dois triângulos e um retângulo. Vide Figura 12.

Figura 12 - Centro de Gravidade de um trapézio.



Fonte: própria.

Considerando também que X_1 , X_2 , e X_3 são as coordenadas horizontais do centro de gravidade da figura e que A_1 , A_2 e A_3 sejam as áreas das figuras representadas pelos vértices **AA'D**, **A'B'BA** e **BB'C**, respectivamente, o centro de área da figura composta pode ser representado por:

$$CG = \frac{\sum A_i \cdot X_i}{\sum A_i} \quad (41)$$

Sendo, com base nas coordenadas da Figura 9,

$$A_1 = \frac{(x_1 - X_i) \cdot \mu_x}{2} = \frac{\left(\frac{\mu_x - b}{a} - X_i\right) \cdot \mu_x}{2} \quad (42)$$

$$A_2 = (x_2 - x_1) \cdot \mu_x = \left(\frac{\mu_x - d}{c} - \frac{\mu_x - b}{a}\right) \cdot \mu_x \quad (43)$$

$$A_3 = \frac{\left(X_{ii} - \frac{\mu_x - d}{c}\right) \cdot \mu_x}{2} \quad (44)$$

$$X_1 = \frac{(x_1 - X_i) \cdot 2}{3} + X_i = \frac{\left(\frac{\mu_x - b}{a} - X_i\right) \cdot 2}{3} + X_i \quad (45)$$

$$X_2 = \frac{x_2 + x_1}{2} = \frac{\frac{\mu_x - d}{c} + \frac{\mu_x - b}{a}}{2} \quad (46)$$

$$X_3 = \frac{X_{ii} - x_2}{3} + x_2 = \frac{X_{ii} - \frac{\mu_x - d}{c}}{3} + \frac{\mu_x - d}{c} \quad (47)$$

Observe que foi levado em consideração o ponto de referência para ser obtida a real coordenada do centro de gravidade. Com isso, é tido o centro de gravidade de qualquer trapézio. Vide Equação 48.

$$CG = \frac{A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (48)$$

Agora, com todas as pertinências de todos os conjuntos no universo de saída, é possível calcular as áreas de interesse, assim como seus respectivos centros de gravidade. Dessa forma, o NPR será resultado da Equação 48, com todas as áreas resultantes do processo.

4.5 IMPLEMENTAÇÃO

Através da plataforma IDE do NetBeans®, foi desenvolvida uma programação que uniu os conceitos de lógica *fuzzy* e análise FMECA. Essa união proporcionou uma solução coerente ao problema em questão.

À título de recordação, o método tradicional do FMECA obtém o Número de Prioridade de Risco (NPR) por meio de um produto simples entre os valores computados de severidade, ocorrência e detecção. Isso gera uma repetitividade de valores NPR para situações de modo de falha diferentes e, além disso, possui uma pequena região de abrangência para resultados entre 1 e 1000. Por fim, em uma análise onde o risco será maior, o aumento de apenas uma unidade em algum dos critérios ocasionará um impacto mais significativo se comparado com uma análise de menor risco.

Utilizando a programação, foi possível tratar os valores de entrada fornecidos pelo especialista de manutenção de uma forma mais próxima da realidade. Os dados foram tratados dentro do universo de discurso *fuzzy* e convertidos em valores de saída do sistema, utilizando o método de centro de gravidade para a defuzzyficação dos valores, como explicado no capítulo 4 desse trabalho.

A implementação se deu por meio da utilização de estruturas *arrays*, que são basicamente matrizes. Essas matrizes carregam toda a informação de entrada e, através das equações demonstradas no capítulo 4, fazem o cálculo para gerar o NPR baseado na lógica *fuzzy* com inferência composicional.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Computando um modo de falha com as notas de severidade, ocorrência e detecção dispostas na Tabela 10, temos a seguinte análise.

Tabela 10 - Exemplo.

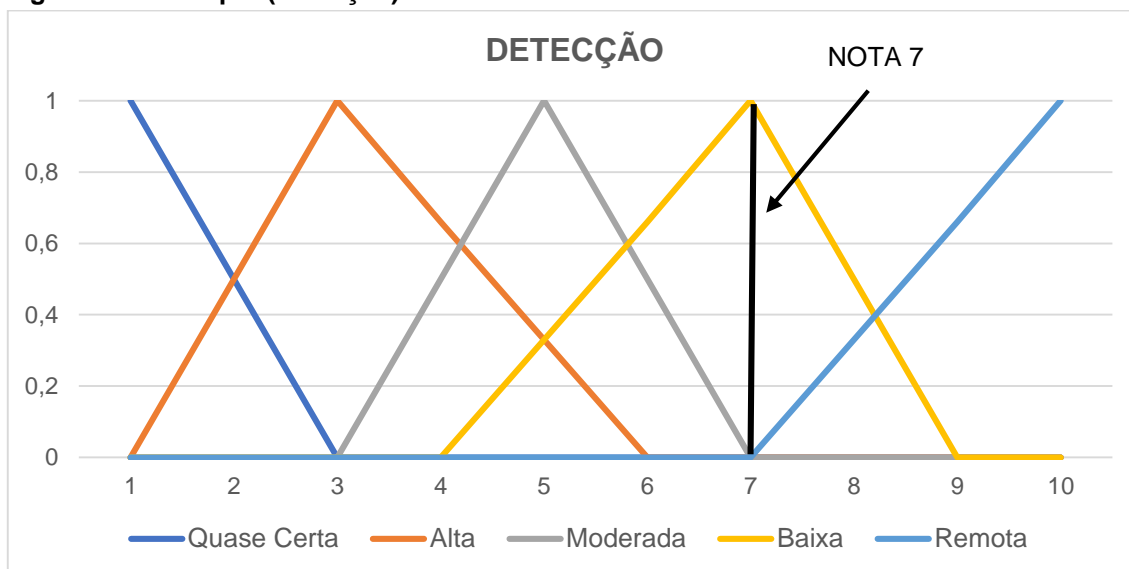
Severidade	Ocorrência	Detecção
9	5	7

Fonte: própria.

- Severidade com grau de pertinência de **0,5** para o conjunto *fuzzy* 'grande' e **0,667** para 'catastrófica';
- Para a ocorrência temos grau de pertinência de **0,5** para 'chance pequena' e **1** para 'chance moderada';
- Para a detecção temos grau de pertinência **1** para 'baixa'.

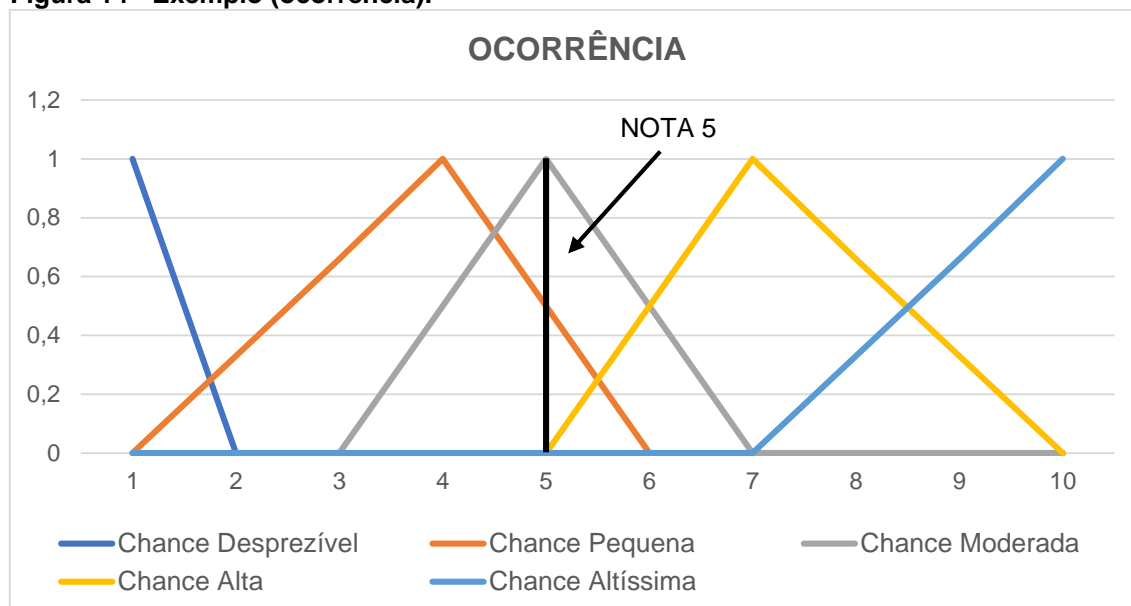
Os gráficos a seguir das Figuras 13,14 e 15 mostram essa interação dos graus de pertinência para os valores de entrada.

Figura 13 - Exemplo (detecção).



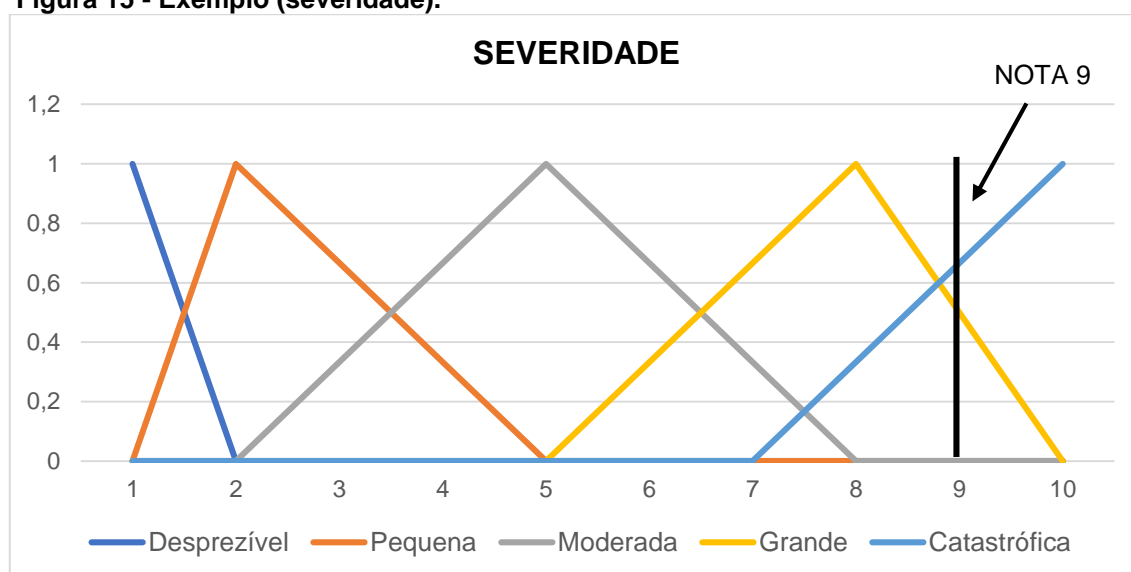
Fonte: própria.

Figura 14 - Exemplo (ocorrência).



Fonte: própria.

Figura 15 - Exemplo (severidade).



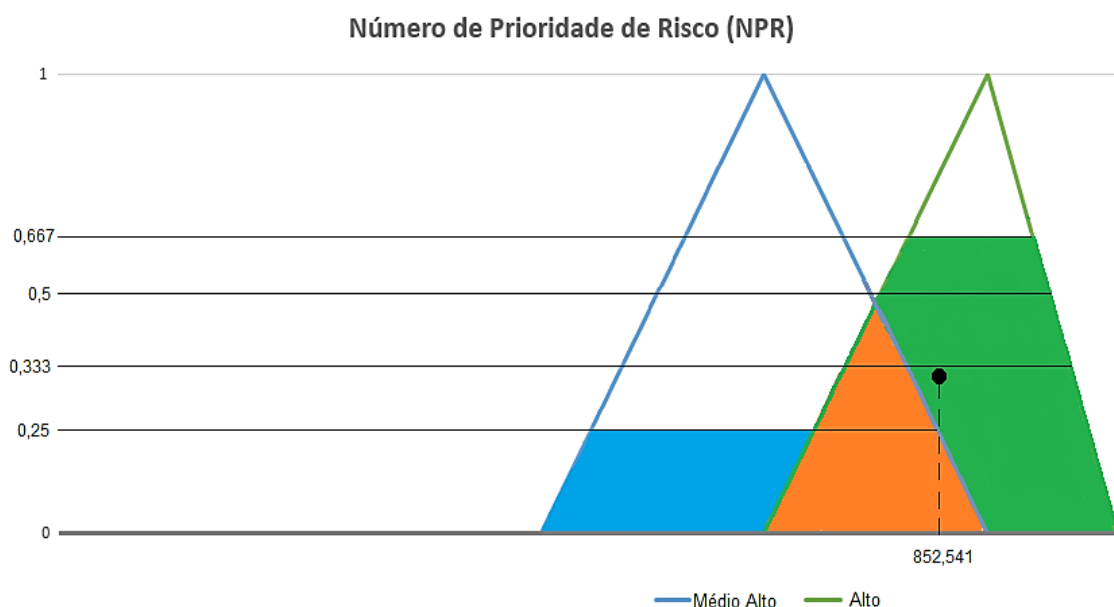
Fonte: própria.

Aplicando-se as regras de inferência para esse exemplo teremos os seguintes resultados:

- Grau de pertinência de **0,25** para o conjunto *fuzzy* de saída 'muito alto';
- Grau de pertinência de **0,33** para 'alto';
- Grau de pertinência de **0,5** para 'alto';
- Grau de pertinência de **0,667** para 'alto'.

Aplicando esses valores às funções de pertinência de saída e ao método de centro de gravidade, utilizando as Equações 3, 33 e 48, obteremos o valor de **852,541** para o NPR. A Figura 16 mostra o resultado final.

Figura 16 - Resultado do exemplo.



Fonte: própria.

No método tradicional do FMECA essa mesma interação resultaria em um valor de 315 para o NPR, que é um valor baixo para o grau de risco presente no exemplo.

O grau 9 para severidade indica um modo de falha com alto impacto para o cenário analisado. O grau 5 de ocorrência representa que o mesmo ocorre com certa frequência. O grau 7 para detecção indica que o modo de falha é difícil de ser detectado ou necessita de um mecanismo específico para isso. É possível, então, definir que o método de obtenção do NPR com a utilização da lógica *fuzzy* é mais eficiente e próximo da realidade se comparado com o método tradicional.

Para reforçar a eficiência do método faremos uma comparação entre os valores do NPR com o FMECA tradicional e o FMECA utilizando lógica *fuzzy*. A tabela 11 mostra a diferença entre os resultados do NPR para modos de falha que, utilizando o método tradicional, resultariam em um mesmo valor de NPR e também o resultado para uma variação de apenas uma unidade em algum critério.

Tabela 11 - Vários Exemplos.

	Modos de Falhas	Entradas			Resultados	
		Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR_{norm}	NPR_{fuzzy}
Mesmo Valores de Entrada	Modo de Falha 01	6	4	8	192	666,966
	Modo de Falha 02	8	6	4	192	705,66
Alteração de apenas uma unidade na entrada de severidade	Modo de Falha 03	4	3	2	24	315,237
	Modo de Falha 04	5	3	2	30	401,207
	Modo de Falha 05	9	8	7	504	867,768
	Modo de Falha 06	10	8	7	560	945,796

Fonte: própria.

É possível notar que na primeira comparação onde os valores de entrada são os mesmos, o resultado do NPR_{fuzzy} foi mais coerente, levando em consideração o maior valor de severidade. E, para a segunda análise, com a alteração pequena em apenas um dos valores de entrada foi possível perceber que para o $NPR_{tradicional}$ a diferença entre os resultados do modo de falha 03 e 04 foi significativamente menor em comparação com a diferença entre o resultado do modo de falha 05 e 06. A diferença dos resultados do NPR_{fuzzy} para a mesma comparação se mostrou mais coerente, pois faz uma utilização mais abrangente do domínio do universo de saída.

Como já dito, desenvolvemos um *software* com essa rotina de cálculo para validar a solução proposta.

A Figura 17 mostra a tela inicial, na qual o especialista irá adicionar cada modo de falha referente à análise que está executando e na sequência selecionar os valores de entrada para severidade, ocorrência e detecção, clicando então em **adicionar**.

Na parte inferior será mostrada a lista dos modos de falha adicionados. Caso ocorra algum erro de digitação ou na seleção dos valores é possível excluí-los selecionando a linha e clicando no botão **excluir** que se encontra no canto superior direito da tela.

Ao encerrar a lista dos modos de falha que serão avaliados deve-se clicar no botão **gerar lista NPR**, que está posicionado na parte inferior da tela.

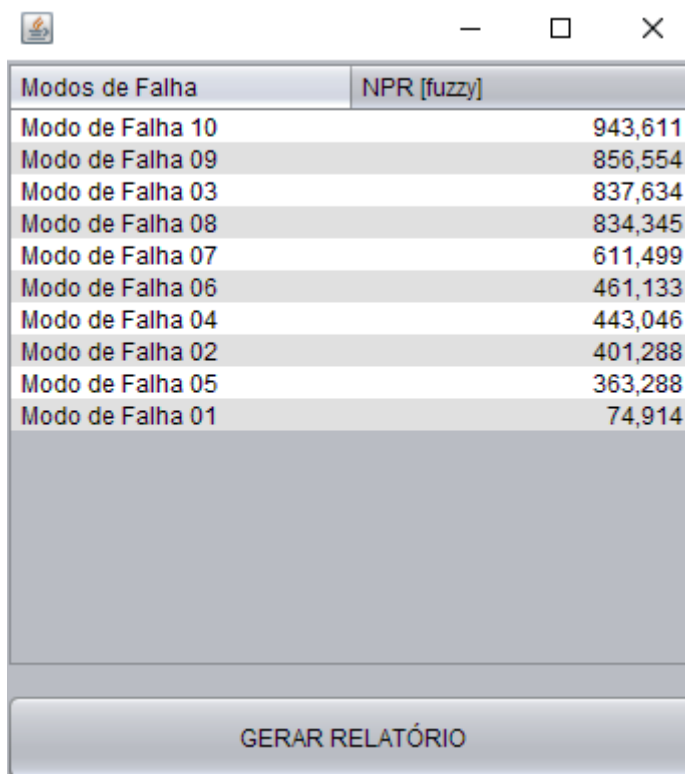
Figura 17 - Primeira tela.

Modo de falha	Severidade	Ocorrência	Detecção
Modo de Falha 01	1	2	2
Modo de Falha 02	5	2	2
Modo de Falha 03	5	8	9
Modo de Falha 04	2	6	8
Modo de Falha 05	2	6	6
Modo de Falha 06	2	9	6
Modo de Falha 07	2	9	9
Modo de Falha 08	6	9	9
Modo de Falha 09	8	9	9
Modo de Falha 10	10	6	9

Fonte: própria.

Após clicar no botão para **gerar lista NPR**, será mostrada uma nova janela com todos os modos de falha e seus respectivos resultados de NPR. Essa lista classifica os valores na ordem decrescente, ou seja, os resultados aparecem na ordem do risco mais crítico para o risco menos crítico. A Figura 18 mostra a tela com a lista.

Figura 18 - Resultado NPR.

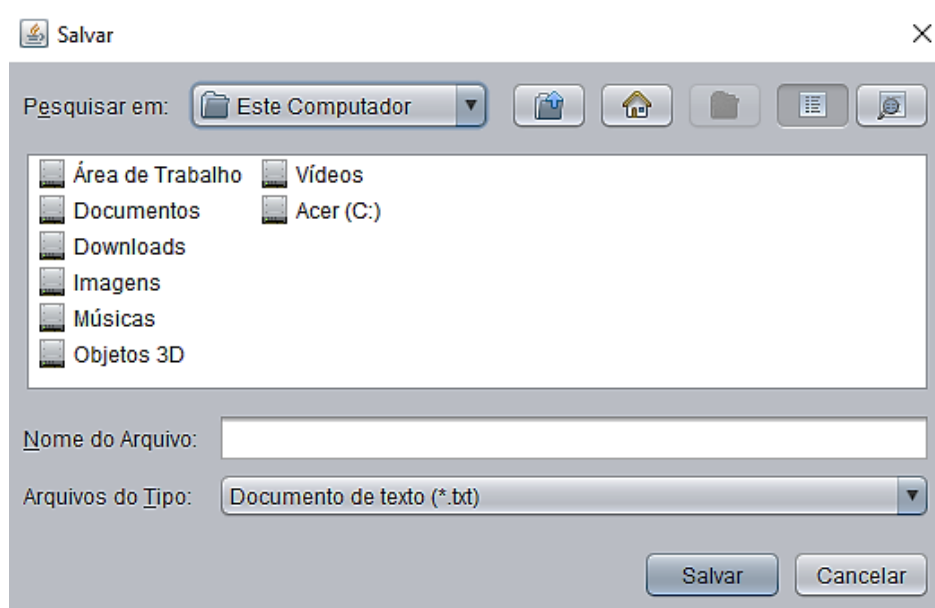


Modos de Falha	NPR [fuzzy]
Modo de Falha 10	943,611
Modo de Falha 09	856,554
Modo de Falha 03	837,634
Modo de Falha 08	834,345
Modo de Falha 07	611,499
Modo de Falha 06	461,133
Modo de Falha 04	443,046
Modo de Falha 02	401,288
Modo de Falha 05	363,288
Modo de Falha 01	74,914

GERAR RELATÓRIO

Fonte: própria.

Ao final, é possível gerar um relatório da lista clicando no botão **Gerar Relatório** que se encontra na parte inferior da tela. Essa ação resultará em uma nova tela que permitirá a escolha do formato que se deseja salvar o arquivo e a pasta onde será armazenado. Com isso é possível exportar os dados do resultado para qualquer outro software ou planilhas de manutenção, a tela final está demonstrada na Figura 19.

Figura 19 - Tela final para salvar o arquivo

Fonte: Própria

Os dados obtidos com aplicativo fornecem uma maior credibilidade no desenvolvimento de um planejamento de manutenção centrado na confiabilidade e possibilitam o aumento na assertividade das tomadas de decisões referentes a gestão de manutenção.

6. CONCLUSÃO

Foi possível incorporar o conhecimento de programação em *Java* à uma pesquisa sólida dos conceitos de Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), lógica *fuzzy* e análise FMECA, visando desenvolver um aplicativo capaz de realizar a interação da lógica *fuzzy* aplicado na análise FMECA.

Essa lógica trouxe resultados mais concisos e próximos da realidade, fornecendo uma abrangência maior para o Número de Prioridade de Risco (NPR), reduzindo a repetitividade dos valores e atribuindo uma maior coerência aos resultados, com isso, é possível definir que a utilização da lógica *fuzzy* aplicada na análise FMECA foi mais eficiente do que o método tradicional.

Com a validação dos resultados apresentados no capítulo 5 desse trabalho, foi possível, de fato, eliminar a limitação do FMEA/FMECA tradicional. Em casos onde não seria possível a priorização de modos de falha com o método tradicional, o aplicativo com lógica *fuzzy* conseguiu ordenar os modos de falha.

Com os dados em mãos é possível desenvolver uma lista de atividades de prevenção ou mitigação dos modos de falha analisados. Essa prática traz grandes benefícios para a organização, aumentando a confiabilidade dos ativos físicos e proporcionando uma redução de custos dos processos de manutenção. Com isso, é possível elevar a competitividade e a lucratividade da empresa através da utilização do software desenvolvido na sua estratégia de manutenção.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização desse aplicativo pode ser aprimorada para determinar o grau do risco que um modo de falha tem na produção, no meio ambiente e na segurança do trabalho para o cenário analisado pelo especialista de manutenção.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria a possibilidade de utilizar essa análise para obter diferentes graus de risco para um mesmo modo de falha, ou seja, o quanto esse modo de falha irá influenciar na produção, no meio ambiente e na segurança do trabalho, caso ele ocorra.

Além disso, é válido afirmar que, ao decorrer da utilização do software em um âmbito industrial, as funções de pertinência devem sempre ser melhoradas, a fim de atender o real objetivo. Conforme se obtiverem mais dados, os mesmos devem ser analisados para que seja possível a melhoria das funções e para que cada vez mais os dados representem a realidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJEJE, G. A. F. **Fuzzy-FMEA: Uso da Lógica Fuzzy para Ponderação das Falhas no FMEA**. São Carlos, 2015.

ALI, I., HASAN, Suhaib. **Integer Fuzzy Programming Approach in Bi-objective Selective Maintenance Allocation Problem**. Department of Statistics and Operations Research, Aligarh Muslim University, 2014.

ARAUJO, I. M., SANTOS, C. K. S. **Manutenção Elétrica Industrial**. UFRN, 2008.

BARAN, L. R. **Manutenção centrada em confiabilidade aplicada na redução de falhas: um estudo de caso**. Ponta Grossa: UTFPR, 2011.

BILOBROVEC, M., MARÇAL, R. F. M., KOVALESKI, J. L. **Implementação de um sistema de controle inteligente utilizando a lógica fuzzy**. XI SIMPEP: Bauru – SP, 2004.

CAELUM. **Java e Orientação a Objetos**. Curso FJ-11. 2018.

COSTA, M. A. **Gestão estratégica da manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional**. UFJF: Juiz de Fora, 2013.

FELECIA. **Fuzzy Logic Reliability Centered Maintenance**. Indonesia: Faculty of Industrial Technology, 2014.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1. ed. São Paulo: Campus-Elsevier, 2011.

GERHARDT, T. E. SILVEIRA R. T. **Métodos de Pesquisa**. 1ª ed, Porto Alegre, 2009.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª Edição, São Paulo. 2002.

GOMIDE, F. A. C., GUDWIN, R. R. **Modelagem, controle, sistemas e lógica Fuzzy**. Campinas: UNICAMP, 1994.

GOMIDE, F. A. C., GUDWIN, R. R., TANSCHIEDT, R. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos *fuzzy*, lógica *fuzzy* e aplicações**. Campinas: UNICAMP, 2018.

LIU, H., LIU L., LIU N. **Risk Evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review**. Elsevier: 2012.

LUCATELLI, M. V. **Proposta de aplicação da manutenção centrada em confiabilidade em equipamentos medico-hospitalares**. UFSC, 2002.

MALINOWSKI, E.L; **um aplicativo para a execução de sistemas especialistas no planejamento e controle da manutenção**. Ponta Grossa 2012.

MORENGHI, L. C. R. **Proposta de um sistema integrado de monitoramento para manutenção**. São Carlos 2005.

NETO, L. B. COELHO, P. H. G. AMARAL, J. L. M. MELLO, M. H. C. S. **Minicurso de Sistema Especialista Nebuloso**. XXXVIII SBPO: Goiânia, 2006.

NETO, T. C. M. **A história da evolução do sistema de gestão de manutenção**. Web Artigos, 2017. Disponível em: <<https://www.webartigos.com/artigos/a-historia-da-evolucao-do-sistema-de-gestao-de-manutencao/75650/>>. Acesso em: maio, 2017.

NIU, G. LI, H. **IETM centered intelligent maintenance system integrating fuzzy semantic inference and data fusion**. ELSEVIER, 2017.

NOWLAN, F. Stanley; HEAP, Howard F. **Reliability-Centered Maintenance**. I. ed. Washington, DC: Office Of Assistant Secretary Of Defense, 1978. 520 p. v. I.

QUEIROZ, A. R. S. **Estratégia de Manutenção de Equipamentos Elétricos em unidades Offshore de Produção de petróleo e gás baseada na filosofia de operações integradas.** São Paulo 2016.

PRATI, R. **Sistemas Fuzzy.** 2011, 38 slides.

PEDROSA, B. M. M. **Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) aplicada a um Secador Industrial.** Lisboa, 2014.

PRODANOV, C. C., FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico.** 2ª ed; Novo Hamburgo, 2013.

RIGONI, E. **Metodologia para implantação da manutenção centrada na confiabilidade: uma abordagem fundamentada em sistemas baseados em conhecimento e Lógica *Fuzzy*.** Florianópolis-Sc, 2009.

SALMAZO, F. **Proposta de manutenção centrada na confiabilidade: estudo de caso no sep de redes subterrâneas em Curitiba.** Curitiba 2012.

SANTOS, W. B., COLOSIMO, E. A., MOTTA, S. B. **Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório.** Gest. Prod.: São Carlos – SP, 2007.

SANTOS, A. C. R dos; **um aplicativo para a execução de sistemas especialistas no planejamento e controle da manutenção.** Rio de Janeiro 2007.

SCHILD, H. **Java: The Complete Reference, Ninth Edition.** McGraw-Hill/Osborne Media: Delhi, 2014.

SOUZA, O. N. **Introdução à Teoria dos Conjuntos Fuzzy.** UEL: Londrina, 2010.

SOUZA, R. D. **Análise da gestão da manutenção focando a manutenção centrada na Confiabilidade: estudo de caso mrs logística.** Juiz de fora 2008.

SIQUEIRA, Y. P. D. S. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implantação**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

TAVARES, H. D. F. **Aplicação de Metodologias RCM nos Planos de Manutenção de Sistemas de Proteção, Comando e Controlo**. Porto: Faculdade de Engenharia do Porto, 2012.

VAZ, A. M. **Estudo das funções de pertinência para conjuntos *fuzzy* utilizados em controladores semafóricos *fuzzy***. UnB: Brasília, 2006.

WYREBSKI, J. **Manutenção Produtiva Total – Um modelo adaptado**. UFSC: Florianópolis – SC, 1997.