



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica & Escola de Química  
Programa de Engenharia Ambiental

Luis Nathan Leal Giraldes

Uma metodologia lógica-possibilística *Fuzzy* para analisar os principais mecanismos de danos em tubulações e equipamentos instalados em uma plataforma de petróleo.

Rio de Janeiro

2019



UFRJ

Luis Nathan Leal Giraldes

Uma metodologia lógica-possibilística *Fuzzy* para analisar os principais mecanismos de danos em tubulações e equipamentos instalados em uma plataforma de petróleo.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Assed Naked Haddad, D.Sc.

Rio de Janeiro

2019

Giraldes, Luis Nathan Leal

Uma metodologia lógica-possibilística Fuzzy para analisar os principais mecanismos de danos em tubulações e equipamentos instalados em uma plataforma de petróleo. /Luis Nathan Leal Giraldes. – 2019.

100 f.: il.:13 30cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2019

Orientador: Assed Naked Haddad

1.Segurança de Processo. 2. Inspeção. 3. Corrosão. 4. Mecanismos de Danos. 5. Lógica Fuzzy. I. Haddad, Assed Naked. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Uma metodologia lógica-possibilística Fuzzy para analisar os principais mecanismos de danos em tubulações e equipamentos instalados em uma plataforma de petróleo.



UFRJ

Uma metodologia lógica-possibilística *Fuzzy* para analisar os principais mecanismos de danos em tubulações e equipamentos instalados em uma plataforma de petróleo.

Luis Nathan Leal Giraldes

Orientador: Prof. Assed Naked Haddad

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

---

Presidente, Prof. Assed Naked Haddad, D.Sc, UFRJ

---

Prof. Isaac José Antonio Luquetti dos Santos, D.Sc, IEN

---

Prof. Carlos Alberto Pereira Soares, D.Sc, UFF

---

Prof. Jean David Job Emmanuel Marie Caprace, D.Sc, UFRJ

Rio de Janeiro  
2019

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pela motivação em todos os momentos destinados a esta dissertação.

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade.

À minha família, minha esposa Ana Carolina e minhas filhas Helena e Catarina, por sempre estarem ao meu lado.

Ao meu pai Luis Carlos e à minha mãe Joana, por sempre acreditarem.

Aos amigos, pela grande torcida.

Ao meu orientador, Professor Assed Naked pela atenção e incentivo.

## RESUMO

GIRALDES, Luis Nathan Leal. Uma metodologia lógica-possibilística Fuzzy para analisar os principais mecanismos de danos em tubulações e equipamentos instalados em uma plataforma de petróleo. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Atualmente um dos temas mais discutidos em diversas indústrias é a segurança de processo. Nem todos os perigos e riscos são iguais ou podem causar as mesmas consequências. Os perigos/riscos de processo podem ocasionar acidentes maiores, envolvendo a liberação de materiais potencialmente perigosos, incêndios e explosões ou ambos. Os estudos dos acidentes ocorridos demonstram que o mal funcionamento de equipamentos é uma das maiores causas de inesperados e indesejáveis eventos, e por isso a inspeção tem sido uma técnica para examinar a real condição de equipamentos expostos a mecanismos de danos. Uma das informações de saída do processo de inspeção é a observação de qual mecanismo de dano está atuando de forma mais intensa no equipamento ou na tubulação. Ter esta informação pode auxiliar na previsão das taxas de corrosão, o que conseqüentemente auxilia na elaboração de um melhor plano de inspeção e de manutenção. Este trabalho apresenta uma metodologia baseada na lógica *Fuzzy* de decisão, para analisar quais são os mecanismos de danos que mais contribuem para a deterioração dos equipamentos e tubulações em uma plataforma de petróleo, e os resultados mostram que a metodologia usada reduz substancialmente a imprecisão dos dados, pois com base na experiência e conhecimento de especialistas da área, foram determinados os mecanismos de degradação mais impactantes, e que mostram consenso com os mecanismos que mais estavam presentes nos relatórios de inspeção realizadas anteriormente.

Palavras-chave: Segurança de Processo; Inspeção; Corrosão; Mecanismos de Danos, Lógica Fuzzy.

## ABSTRACT

GIRALDES, Luis Nathan Leal. A Fuzzy logic-possibilistic methodology to analyze the main corrosion damages mechanisms in pipes and equipment installed in a platform of petroleum, 2019. Thesis (MA) - Program of Environmental engineering, Polytechnic and School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Currently one of the most discussed topics in various industries is process safety. Not all hazards and risks are the same or can have the same consequences. Process hazards and risks can cause major accidents, involving the release of potentially hazardous materials, fires and explosions, or both. Accident studies have shown that equipment malfunctions are one of the major causes of unexpected and undesirable events, and so the inspection has been a technique to examine the actual condition of equipment exposed to damage mechanisms. One of the output information from the inspection process is the observation of which damage mechanism is acting more intensely on the equipment or the piping. Having this information can help in forecasting the corrosion rates, which consequently assists in the design of a better inspection and maintenance plan. This work presents a methodology based on the *Fuzzy Decision Logic* to analyze the mechanisms of damages that contribute most to the deterioration of the equipment and pipelines in an oil platform, and the results show that the methodology used substantially reduces the inaccuracy of the data, since based on the experience and knowledge of specialists in the field, the most impressive degradation mechanisms were determined, and they show a consensus with the mechanisms that were most present in the previous inspection reports.

Keywords: Process Safety; Inspection; Corrosion; Damage Mechanisms; Fuzzy Logic.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Acidentes tecnológicos.....	15
Figura 2 - Número de pessoas mortas por acidentes tecnológicos.....	16
Figura 3 – Segurança de processos no ciclo de vida das instalações.....	28
Figura 4 – Acidente de Processo X Acidente Ocupacional.....	31
Figura 5 – Pilares (Blocos fundamentais) e elementos associados que constituem o RBPS...35	
Figura 6 – Matriz de risco.....	46
Figura 7 – Lista dos principais mecanismos de danos.....	52
Figura 8 – Exemplos de danos causados por erosão-corrosão.....	53
Figura 9 – Passo a passo da análise <i>fuzzy</i> .....	56
Figura 10 – Estatísticas de plataforma no Brasil.....	60
Figura 11 – Principais partes de um FPSO.....	61
Figura 12 – Gráfico das funções relevantes.....	65
Figura 13 – Expressão do termo ordenado de um número <i>fuzzy</i> triangular.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Acidentes de processo de destaque na indústria química e petroquímica.....	23
Tabela 2 – Números <i>fuzzy</i> para termos linguísticos.....	57
Tabela 3 – Resultados dos graus de importância dos especialistas.....	64
Tabela 4 – Resultado do grau de importância de cada indicador.....	66
Tabela 5 – Valores das áreas de interseção.....	67
Tabela 6 – Matriz de concordância.....	68
Tabela 7 – Concordância relativa.....	69
Tabela 8 – Grau de concordância relativa.....	69
Tabela 9 – Coeficiente de consenso.....	70
Tabela 10 – Números <i>fuzzy</i> .....	71
Tabela 11 – Valores em ordem decrescente.....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

API – *American Petroleum Institute*

BP – *British Petroleum*

BS – *British Standard*

CCPS - *Chemical Process Safety European*

COF – *Consequences of Failure*

DNV – *Det Norske Veritas*

EM-DAT - *International Disaster Database – Centre of Research on the Epidemiology of Disasters*)

END – Ensaio Não Destrutivo

FPSO – *Floating Production Storage and Offloading*

FLS – *Fuzzy Logic System*

HSE – *Health, Safety and Environment*

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis

IBR – Inspeção Baseada no Risco

IE – *Integrity Engineer*

ISO – International Organization for Standardization

ITPM - Inspeção, Teste e Manutenção Preventiva

LOPA – *Layer of Protection Analysis*

OIM – *Offshore Installation Manager*

PHA – *Preliminary Hazard Analysis*

PIE – Plano de Inspeção de Equipamentos

POF – *Probability of Failure*

QRA – *Quantitative Risk Assessment*

RBI – *Risk Based Inspection*

RBPS - *Risk Based Process Safety*

RP – *Recommended Practice*

TMM – *Technical Maintenance Manager*

## SUMÁRIO

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO .....	14
1.1 Apresentação do Tema .....	14
1.2 Contextualização da Área de Pesquisa.....	16
1.3 Justificativa.....	17
1.4 Objetivo.....	18
1.5 Objetivos específicos.....	18
1.6 Estrutura do Trabalho .....	18
CAPITULO 2 – PANORAMA NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS.....	20
2.1 Acidentes na Indústria.....	21
CAPITULO 3 – SEGURANÇA DE PROCESSO.....	25
3.1 Indústria <i>Offshore</i> .....	28
3.2 Segurança de Processo Vs Segurança Ocupacional .....	29
3.3 Mecanismos de Gestão .....	30
CAPITULO 4 – INSPEÇÃO .....	40
4.1 RBI – Risk Based Inspection.....	42
CAPITULO 5 – MECANISMOS DE DANOS.....	49
5.1 Processos Corrosivos.....	50
CAPÍTULO 6- LÓGICA FUZZY .....	53
6.1 Etapas do Processo de Fuzzyficação .....	55
7- ESTRUTURA METODOLÓGICA.....	58
7.1 Desenvolvimento da Estrutura Metodológica .....	58
7.1.1 Descrição da Plataforma de Petróleo.....	58
7.1.2 Indicadores.....	61
7.1.3 Seleção dos Especialistas.....	61
7.1.4 Determinação do grau de importância dos especialistas .....	62
7.1.5 Escolha dos Termos Linguísticos e das Funções de Pertinência .....	63
7.1.6 Determinação do Grau de Importância de Cada Indicador .....	64
7.1.7 Tratamento dos dados coletados dos especialistas na avaliação de cada indicador .....	66
CAPITULO 8 – ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS E RESULTADOS.....	70
CAPITULO 9 – CONCLUSÃO .....	72
CAPITULO 10 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	74

APÊNDICES .....	77
APÊNDICE A .....	78
APÊNDICE B .....	81
B.1 – Definição dos indicadores .....	81
B.2 – Seleção dos especialistas .....	81
B.3 – Determinação do grau de importância dos especialistas .....	82
B.4 – Escolha dos termos linguísticos e funções de pertinência .....	82
B.5 – Determinação de importância de cada indicador preditivo .....	83
B.6- Tratamento dos dados coletados dos especialistas .....	83
B.6.1 Cálculo do grau de concordância entre opiniões.....	84
B.6.2 Construção da matriz de concordância.....	91
B.6.3 Cálculo da concordância relativa .....	93
B.6.4 Cálculo do grau de concordância relativa .....	95
B.6.5 Cálculo do coeficiente de consenso dos especialistas .....	97
B.6.6 Determinação do valor <i>fuzzy</i> .....	99
B.7 Tabela com os valores <i>fuzzy</i> de todos os indicadores.....	100

## CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 Apresentação do Tema

Após a 2ª Guerra Mundial, intensifica-se a demanda por novos materiais e de acordo com o *International Disaster Database – Centre of Research on the Epidemiology of Disasters* (EM-DAT), nunca houve tantos registros de acidentes tecnológicos como nas últimas décadas. Isso acaba desencadeando uma mudança na importância da “Segurança”, que tem se tornando um importante fator a ser considerado devido ao aumento da complexidade de processos (operações com elevadas temperaturas e pressões) nas indústrias que podem ocasionar desastres tecnológicos de natureza industrial, e com isso, o próprio conceito tem se transformado, deixando de lado a ênfase somente na segurança pessoal e rumando para o que podemos chamar de prevenção de perdas.

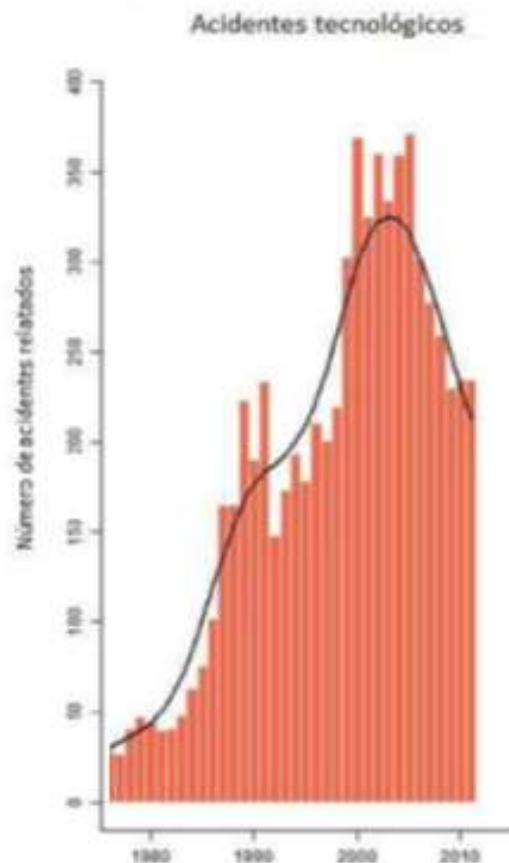


Figura 1: Acidentes tecnológicos (Período 1980 – 2010). fonte: EM-DAT

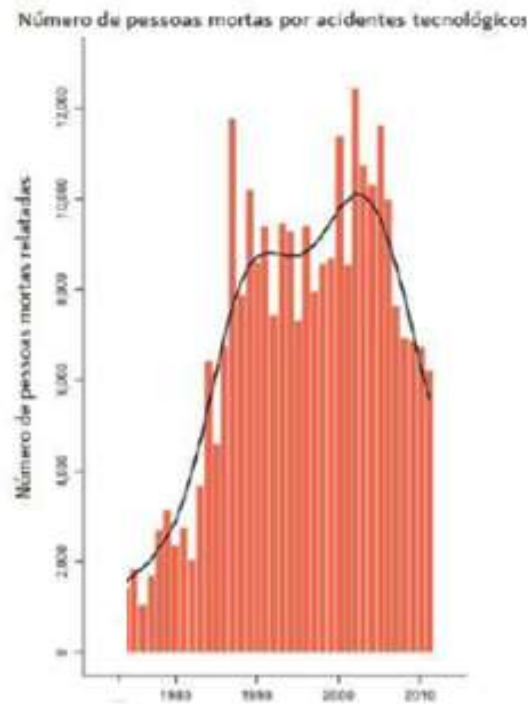


Figura 2: Número de pessoas mortas por acidentes tecnológicos (Período 1980 – 2010). Fonte:EM-DAT

Os acidentes industriais ocorridos nos últimos anos, em particular na década de 80, contribuíram de forma significativa para despertar a atenção das autoridades governamentais, da indústria e da sociedade como um todo, no sentido de buscar mecanismos para a prevenção desses episódios que comprometem a segurança das pessoas e a qualidade do meio ambiente. Assim, as técnicas e métodos já amplamente utilizados nas indústrias bélica, aeronáutica e nuclear passaram a ser adaptados para a realização de estudos de análise e avaliação dos riscos associados a outras atividades industriais, em especial nas áreas de petróleo, química e petroquímica. No Brasil, em particular no estado de São Paulo, a preocupação com os acidentes de grande porte ganhou ênfase em 1984, após o rompimento de um duto de gasolina seguido de incêndio em Cubatão, causando cerca de 500 vítimas, das quais 93 fatais. Então pode-se dizer que um dos grandes desafios da indústria atualmente e que na verdade sempre fará parte dos objetivos e processos de qualquer indústria, é identificar e pôr em uso práticas preventivas, que evitem situações de colapso de materiais de tubulações e equipamentos, ou seja, prevenindo perdas.

O presente estudo usa como base um subtipo dos acidentes tecnológicos, que são os acidentes industriais (acidentes de processo), que possuem como característica o fato de terem

baixa probabilidade de ocorrência, porém quando desencadeado, este tipo de acidente pode provocar enormes tragédias humanas e ambientais. O acidente de processo basicamente é resultado da falta de domínio sobre os processos químicos nas operações industriais, e pode-se entender como falta de domínio a: falta de conhecimento do produto, falta de conhecimento e controle das variáveis do processo, tais como: pressão, temperatura, reatividade, corrosividade, etc.; falta de manutenção da integridade de equipamentos e acessórios.

Assim, esta dissertação irá apresentar uma análise dos principais mecanismos corrosivos de danos em tubulações e equipamentos instalados em uma plataforma de petróleo, que podem ser os causadores de acidentes de processo, devido à perda de contenção de produtos.

## 1.2 Contextualização da Área de Pesquisa

Atualmente um dos temas mais discutidos em diversas indústrias é a segurança de processo. Nem todos os perigos e riscos são iguais ou podem causar as mesmas consequências. Perigos/riscos pessoais ou ocupacionais, tais como escorregões, quedas, cortes e acidentes com veículos, geralmente produzem efeitos sobre um único trabalhador. Por outro lado, perigos/riscos de processo podem ocasionar acidentes maiores, envolvendo a libertação de materiais potencialmente perigosos, incêndios e explosões ou ambos.

Os incidentes de segurança de processo podem ter efeitos catastróficos e podem resultar em múltiplas mortes e feridos, assim como danos substanciais à economia, à propriedade e ao ambiente. Os estudos dos acidentes ocorridos demonstram que o mal funcionamento de equipamentos é uma das maiores causas de inesperados e indesejáveis eventos, tais como descargas tóxicas e inflamáveis, fogo e explosões. As falhas normalmente são causadas pela inadequada gestão de integridade, que podem resultar em trincas, furos, rupturas e consequentemente perda de contenção de substâncias perigosas.

Neste contexto, a inspeção tem sido uma técnica para examinar a real condição de equipamentos expostos a mecanismos de danos. O *Risk Based Inspection* (RBI), é uma ferramenta que auxilia na priorização de quais equipamentos terão uma intervenção, e sua base está na análise de risco. A Inspeção Baseada em Risco (IBR) tem como princípio a quantificação das consequências de uma falha estrutural que cause um vazamento, bem como o cálculo da probabilidade deste evento ocorrer. Esta ferramenta faz uso de uma matriz do tipo



“consequência versus probabilidade”, para determinar planos de inspeção adequados. A matriz usada é a que está no documento API 581 – *Risk Based Inspection*.

No relatório do RBI, pode-se encontrar inúmeras informações que ajudam na elaboração de um plano de inspeção, inclusive que mecanismos de danos estão mais presentes, e quais estão apresentando as maiores taxas de redução de espessura de material, etc., entretanto, muito dos dados de “entrada” no sistema especialista são observações e interpretações feitas pelos profissionais responsáveis, que podem ter um determinado grau de incerteza. E se, com o uso de uma modelo matemático, conseguirmos reduzir a objetividade do processo? Certamente isso nos dará maior assertividade e confiança nos resultados de “saída” da análise, e que comporão o plano de inspeção. Isso significa que ações serão mais ajustadas à necessidade, tais como: periodicidade de inspeção, tipo(s) de ensaio(s) a ser(em) utilizado(s), extensão do(s) ensaio(s), etc.

### 1.3 Justificativa

Com base no estudo do histórico de casos de acidentes de processo provém informações valiosas para engenheiros envolvidos com segurança de processos. Tais informações são utilizadas para melhorar procedimentos e práticas na prevenção de acidentes similares no futuro (KING, 1990).

Os maiores acidentes de processo envolvendo substâncias químicas ou radioativas tiveram grande repercussão na percepção pública e em ocorrência deste fato, as companhias e agências regulatórias passaram a desenvolver estudos e ferramentas para análise e prevenção desses tipos de acidentes. Alguns acidentes em particular, se mostraram devastadores ao ponto de se desenvolverem novas leis e normas regulamentadoras para mitigação de tais riscos e técnicas específicas para o controle e gerenciamento de inspeção.

Sendo assim, o assunto a ser estudado tem importância para as indústrias, pois quanto mais preciso o resultado da priorização de inspeção dada pela ferramenta RBI, pode-se dizer que é diretamente proporcional ao ganho de segurança para operar equipamentos, redução de custo com manutenções corretivas, e redução na probabilidade de eventos de grande magnitude.

O intuito do estudo é identificar se há alternativas para se aumentar a precisão do gerenciamento de inspeção.

## 1.4 Objetivo

Realizar, através da metodologia *fuzzy de decisão*, a priorização em termos de potencial de dano, dos mecanismos corrosivos que mais influenciam e impactam na integridade dos materiais de tubulações e equipamentos fixos, o que conseqüentemente ajudaria a elaborar um plano de inspeção mais assertivo, com dados de saída mais corretos, a serem usados no processo do RBI, tais como: periodicidade de inspeção, tipo de inspeção e ensaio, extensão do ensaio, etc. A pergunta a ser respondida é se o uso da metodologia *fuzzy* pode nos ajudar a ordenar os mecanismos de danos, por grau de potencial de perda de integridade. O método *fuzzy* escolhido foi desenvolvido por HSU e CHEN (1996), que se baseia em um procedimento para a agregação das opiniões dos especialistas.

## 1.5 Objetivos específicos

O estudo está dividido em 3 partes:

- Escolher os principais mecanismos de danos com base em normas internacionais;
- Aplicar a metodologia *fuzzy* para obter o ranqueamento dos mecanismos de danos corrosivos;
- Analisar e comparar resultados obtidos pelo binômio “números *fuzzy*” X “resultados inspeção RBI”;

Além disso, o estudo será baseado nas seguintes limitações:

- Análise de tubulações e equipamentos fixos de uma plataforma de petróleo do tipo *Floating Production, Storage, and Offloading System (FPSO)*;
- A análise terá foco somente na disciplina “Segurança”, não analisando outras categorias, tais como: Meio ambiente e financeiro;
- Somente 7 modos de danos de corrosão serão levados em consideração para a análise;

## 1.6 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 apresenta os objetivos deste trabalho e justificativa para o seu desenvolvimento, vinculando-o a uma problemática vivenciada atualmente pelas empresas que possuem potencial para ocorrência de grandes acidentes. Apresenta também uma visão geral de toda a estrutura deste trabalho. O Capítulo 2 mostra um panorama e um histórico de acidentes

na indústria. O Capítulo 3 discorre sobre a segurança de processo, sua importância e como deve ser estruturada em termos de sistema de gestão. O Capítulo 4 fala sobre o método de inspeção, RBI, entrada e saídas, e como a análise de risco participa nesse processo. O Capítulo 5 explica os mecanismos de danos, quais são os principais, como eles evoluem, como aparecem e os seus impactos. No Capítulo 6, pode-se entender o que é a metodologia *fuzzy* e como ela pode ajudar na redução de incertezas de processos. No Capítulo 7, apresenta-se e desenvolve-se a estrutura metodológica, que através de um estudo de caso, mostra como o método *fuzzy* fará o ranqueamento dos mecanismos de danos, com o intuito de usar esta informação como subsídio para tomadas de decisões e priorização no plano de inspeção. O Capítulo 8 mostra a análise dos dados coletados e resultados obtidos. O Capítulo 9 destina-se à conclusão da dissertação, recomendações e proposta de novos trabalhos. Após, são fornecidas as referências bibliográficas, apêndices e anexos.

## CAPITULO 2 – PANORAMA NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

Conforme já mencionado na introdução, o número de desastres tecnológicos aumentou muito nos últimos anos, e isso certamente é um ponto de preocupação para a indústria, pois com os acidentes, temos enormes perdas que podem ser vistas sobre vários pontos de vista. Podemos ter perda de vidas, o que é o mais crítico, podemos ter perdas financeiras, impactos ao meio ambiente que podem durar anos, impactos para a imagem da organização, perda de tempo nas atividades operacionais, etc. É importante que saibamos a extensão que um acidente pode alcançar, na verdade, saber analisar as consequências um acidente faz parte do processo de gerenciamento de riscos, e certamente ajuda no levantamento de ações preventivas e/ou de mitigação. Um ponto que faz parte deste processo é utilizar experiências já vividas na indústria para sabermos o que fazer para evitar novas ocorrências.

De acordo com a corretora de seguros Marsh (2013), a falha de múltiplos processos e sistemas de segurança é a causa mais comum dos maiores danos ao patrimônio de refinarias, petroquímicas, processadoras de gás, empresas de terminais e distribuição e plataformas no mundo todo. Estima-se que os danos causados ao patrimônio destas empresas geraram perdas de US\$ 34 bilhões desde 1974, no mundo todo, com a maioria dos acidentes registrados em setores offshore e em refinarias.

O negócio das atividades com hidrocarboneto é tal que, em todas as operações, há o potencial de exposição a riscos, devido à natureza dos materiais a serem extraídos, transportados e processados. Cada vez mais as operações da indústria estão se movendo para ambientes mais perigosos (águas mais profundas, climas mais extremos ou localizações mais remotas). Portanto, as decisões sobre qualquer desenvolvimento ou operação devem se basear numa avaliação completa dos riscos associados para identificar as medidas que podem ser tomadas para evitar perdas para a operação (Marsh, 2013).

Todas as atividades relacionadas à exploração de petróleo e gás são de grande importância para a obtenção dos combustíveis que movimentam o mundo atualmente. Os projetos da indústria de petróleo são desafiantes, pois são complexos, envolvem mais riscos, envolvem muitas empresas e órgãos regulamentadores, os projetos são tecnicamente difíceis e normalmente devem se encaixar em orçamentos e cronogramas considerados pequenos para a complexidade dos trabalhos. As instalações offshore vêm crescendo junto com a demanda de petróleo tanto para a quantidade de instalações produzidas e instaladas, quanto para as tecnologias em desenvolvimento. As descobertas recentes de novas áreas de produção, como o

Pré-sal, exigirão vários projetos e inovações tecnológicas, bem como altos custos operacionais e dificuldades inerentes na logística e manutenção de transporte. O número de acidentes envolvendo plataformas offshore vem diminuindo, devido à implantação de novas tecnologias e técnicas de segurança, mas ainda é necessário ter o máximo cuidado com este tipo de atividade, pois como já dito, mesmo que a probabilidade diminua, a consequência na maioria das vezes é catastrófica. Neste contexto um projeto bem planejado e executado deve ser inserido, abordando tanto os aspectos do cronograma, as atividades do projeto e os riscos, em todas as suas esferas de atuação, associados a cada atividade. As técnicas e ferramentas utilizadas para elaborar análises de risco evoluíram muito nos últimos anos, tornando-se mais fáceis de compreensão e utilização. O que propiciou melhores resultados sobre as análises e assim um melhor entendimento dentro das organizações sobre a importância do uso dessas técnicas e da importância dos sistemas de gestão de segurança.

## 2.1 Acidentes na Indústria

Algumas das principais reservas de petróleo offshore encontram-se nas seguintes localidades: Venezuela, Arábia Saudita, México, Brasil e Noruega. Estes centros de exploração encontram-se distantes dos centros de refino e dos grandes mercados consumidores, este fator adicionado à velocidade dos ventos no mar, visibilidade local e a locomoção na água agravam ainda mais os riscos, tornando as condições de trabalho nestes locais mais críticas e complexas. Assim, acidentes que ocorrem nestas localidades são considerados mais drásticos e de grande importância para os estudos de segurança de processos. Na tabela 1 encontra-se um levantamento dos principais acidentes que aconteceram na indústria de petróleo e gás. O quadro apresenta de forma consolidada os acidentes relacionados à segurança de processo com maiores perdas no mundo, sendo que para a indústria de petróleo são consideradas as atividades petroquímicas, de processamento de gás, de terminais e distribuição, de refinaria e de extração e produção em plataformas de petróleo.

Tabela 01 – Acidentes de Processo de destaque na Indústria Química e Petroquímica

Fonte: Adaptado. MARSH, 2013. KLETZ, 2005.

<<http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/p/casos.html>> acessado em 28 de março de 2019

Data	Local	País	Tipo unidade produtiva	Fenômenos	Perdas humanas	Perdas materiais
1966	Feyzin	França	Refinaria	Vazamento de GLP - BLEVE	15 a 18 mortes aproximadamente 80 feridos	NÃO INFORMADO
1972	REDUC	Brasil	Refinaria	Vazamento de GLP - BLEVE	42 mortes aproximadamente 80 feridos	
1974	Flixborough	Inglaterra	Planta de produção de caprolactama	Vazamento de ciclohexano	28 mortes aproximadamente 104 feridos	
1976	Seveso	Itália	Usina química	Nuvem de dioxina	193 doentes	
1980	Kielland	Noruega	Sonda Semi Submersível	Adernamento	123 mortos	
1984	Bhopal	Índia	Fabricação de pesticidas	Liberação de 40 toneladas de gases tóxicos	Aprox. 3.700 mortos e 150.000 doentes e fechamento da fábrica	
1984	San Juanico	México	Terminal de GLP	BLEVE	650 mortos; 6000 feridos	
1984	Vila Socó	Brasil	Duto	Vazamento / explosão	93 mortos	
1984	Enchova	Brasil	Plataforma de petróleo	BLOWOUT	37 mortos	
1988	Piper Alpha	Mar do Norte	Plataforma de petróleo	Vazamento de condensado de gás natural e explosão	167 mortes	
1988	Enchova	Brasil	Plataforma de petróleo	Explosão / incêndio	-	USD 700,000,000.00
1988	Henderson	EUA	Petroquímica	Explosão	2 mortos e 350 feridos	USD 640,000,000.00
1988	Norco	EUA	Refinaria	Explosão de nuvem de vapor	4 mortos e 42 feridos	USD 610,000,000.00
1989	Pasadena	UEA	Petroquímica	Explosão de nuvem de vapor	23 mortos e 232 feridos	USD 1,400,000,000.00
1989	Baker	Golfo do México	Plataforma de petróleo	Explosão / incêndio	7 mortos	USD 830.000.000,00
1992	Guadalajara	México	Duto	Explosão / incêndio	206 mortos	USD 1.400.000.000,00
1997	Bintulu	Malásia	Processamento de gás	Explosão / incêndio	12 feridos	USD 490.000.000,00
1998	Logford	Austrália	Usina de gás	Explosão	2 mortes, 8 feridos	USD 750.000.000,00

2000	Mina Al Ahmadi	Kuwait	Refinaria	Explosão / incêndio	5 mortes e 50 feridos	USD 810.000.000,00
2001	Toulouse	França	Usina química	Explosão	30 mortos, 2500 feridos	USD 680.000.000,00
2001	P-36	Brasil	Plataforma de petróleo	Explosão e adernamento	11 mortos	USD 790.000.000,00
2004	Skikda	Argélia	Processamento de gás	Explosão / incêndio	27 mortos e 56 feridos	USD 940.000.000,00
2005	Texas City	EUA	Refinaria	UVCE seguido de explosão	15 mortos e aproximadamente 180 feridos	USD 200.000.000,00
2009	Montara	Austrália	Plataforma de petróleo	Vazamento de petróleo e gás (450 mil galões)		NÃO INFORMADO
2010	Deepwater Horizon	Golfo do México	Plataforma de petróleo	Vazamento ( <i>blowout</i> ) seguido de explosão	11 mortos	USD 600.000.000,00
2011	Campo de Frade	Brasil	Plataforma de petróleo	Vazamento de petróleo (3700 barris)		NÃO INFORMADO
2012	PEMEX	México	Refinaria	Vazamento de gás natural	40 mortos	NÃO INFORMADO
2012	Bangkok	Tailândia	Refinaria	Explosão / incêndio		USD 140.000.000,00
2012	Map ta Phut	Tailândia	Petroquímica	Explosão / incêndio	12 mortes e 129 feridos	USD 140.000.000,00
2012	KS Endeavour	Nigéria	Plataforma de petróleo	Explosão / incêndio	2 mortes	NÃO INFORMADO
2012	Elgin	Mar do Norte	Plataforma de petróleo	Vazamento de petróleo e gás		USD 10.000.000,00
2012	Falcon State	Venezuela	Refinaria	Explosão	48 mortes e aproximadamente 80 feridos	USD 330.000.000,00
2013	Geismar	EUA	Petroquímica	Explosão / incêndio	2 mortes e 76 feridos	USD 10.000.000,00
2013	Golfo do México	EUA	Plataforma de petróleo	<i>Blowout</i>		USD 140.000.000,00

Conforme pode ser visto no quadro acima, as consequências de um acidente de processo são inúmeras e todas de grande impacto. Por isso, o tema “segurança de processo” ganha cada vez mais espaço nas indústrias, principalmente na área de petróleo e gás.

Na maioria das vezes as falhas que acontecem são revertidas a tempo e as situações são controladas; em outros casos, erros sucessivos levam a eventos catastróficos que custam a vida de muitas pessoas, danos irreparáveis ao meio ambiente e perdas financeiras significativas. O estudo dos acidentes mais relevantes mundialmente e o entendimento do seu contexto trazem ensinamentos para a indústria e portanto, novas posturas e práticas na engenharia e na análise dos riscos.



## CAPITULO 3 – SEGURANÇA DE PROCESSO

No final do século passado apenas um número próximo de duas dezenas de elementos químicos constituintes da Tabela Periódica fazia parte do cotidiano dos indivíduos e foi na segunda metade do século XX que a humanidade experimentou uma evolução exponencial que a levou a conviver praticamente com a totalidade dos elementos químicos observados na Tabela Periódica nos dias atuais (CROWL; LOUVAR, 2001).

A segurança de processo nasceu às margens do Rio Brandywine, Pensilvânia, nos primórdios do século 19, nos trabalhos de fabricação de pólvora do Eleuthère Irénée du Pont. Reconhecendo que mesmo um pequeno incidente poderia precipitar danos consideráveis e perdas de vida, Du Pont dirigiu os trabalhos a serem construídos e operados sob condições de segurança muito específicas. A partir de 1950 registrou-se significativo avanço na tecnologia de processo de substâncias, aumentando o inventário de uso, armazenamento, processamento e transporte, o que inevitavelmente levou a uma necessidade de maior controle nas tarefas operacionais, que também significa dizer que houve a introdução de novos e sofisticados mecanismos de gestão de riscos (CROWL; LOUVAR, 2001)

A segurança de processo se desenvolveu com a evolução da indústria ao longo dos séculos 19 e 20, mas realmente surgiu como uma disciplina após o grave acidente industrial em Bhopal, na Índia, em 1984, em que uma liberação catastrófica de isocianato de metila matou mais de 3.000 pessoas (oficialmente) e feriu mais de 100.000 (AIChE, 2015). De acordo com a prática recomendada americana 754 da American Petroleum Institute de 2016 (API RP 754) “*Process Safety Performance Indicators for Refining and Petrochemical Industries – Downstream Segment*”, segurança de processo é uma estrutura disciplinada para o gerenciamento da integridade dos sistemas operacionais e processos perigosos por meio da aplicação de bons princípios, engenharia e práticas operacionais e de manutenção. De acordo com a prática recomendada britânica 456 da *International Association of Oil & Gas Producers* de 2011 (IOGP Report 456) “*Process Safety – Recommended Practice on Key Performance Indicators*”, a segurança de processo lida com a prevenção e controle de eventos que têm o potencial de liberar materiais e energias perigosos. Tais incidentes podem resultar em exposições tóxicas, incêndios ou explosões, e poderia finalmente resultar em acidentes graves, incluindo mortes, ferimentos, danos materiais, perda de produção ou danos ambientais.

Os acidentes da *Deepwater Horizon* (Poço de Macondo) e P-36 ocorridos nos últimos anos, têm evidenciado que a gestão de Segurança de Processo na produção de petróleo offshore não tem sido tão efetiva. Porém, pode-se observar que esses acidentes apressaram o desenvolvimento de instrumentos reguladores e técnicos para o estabelecimento de procedimentos rigorosos de detecção de perigos e de avaliação de riscos. Isto demonstra que as grandes empresas e órgãos regulamentadores dos países estão preocupados e atentos a necessidade do estudo da segurança de processo. Isto pode ser confirmado pelas iniciativas internacionais, tanto por meio de normas e padrões como por meio de referências da literatura técnica.

As iniciativas mais marcantes da área foram:

- 1982 - Diretiva de SEVESO, Comunidade Europeia;
- 1993 - Convenção 174, Organização Internacional do Trabalho (OIT);
- 1996 - Diretiva SEVESO II, Comunidade Europeia;
- 2007 - *Risk Based Process Safety*, Estados Unidos da América;
- 2000 - OSHA 3132 - *Process Safety Management*, Estados Unidos da América; e
- 2012 - Diretiva SEVESO III, Comunidade Europeia.

Segundo o relatório da *British Petroleum* (BP) (2010), o acidente de Macondo mostrou que a segurança operacional deve ser prioridade nas atividades de perfuração de poços.

O acidente de Macondo foi um dos maiores já ocorridos na perfuração mundial (ITOPF, 2013). A busca por petróleo torna-se cada vez mais complicada em função das condições geoambientais das novas descobertas (Rocha, 2009).

O Relatório Baker (2013), produzido após o acidente numa refinaria do Texas pertencente a BP, em 2005, apontou que faltava uma "cultura de segurança" entre os trabalhadores e que havia foco na excelência de segurança pessoal, mas não de processos. O relatório salientou também que apesar da BP possuir políticas rígidas de segurança, a sua aplicação não era consistente nas unidades. De acordo com a análise do relatório do acidente de Macondo, (BP, 2010) o mesmo ocorreu com a *Deepwater Horizon*.

A segurança do processo deve estar presente em todo o ciclo de vida das instalações Industriais, conforme indicado na figura 3, desde a ideia inicial de negócio, durante a elaboração do projeto, da construção e funcionamento da instalação, passando pela manutenção, até o descomissionamento da instalação.

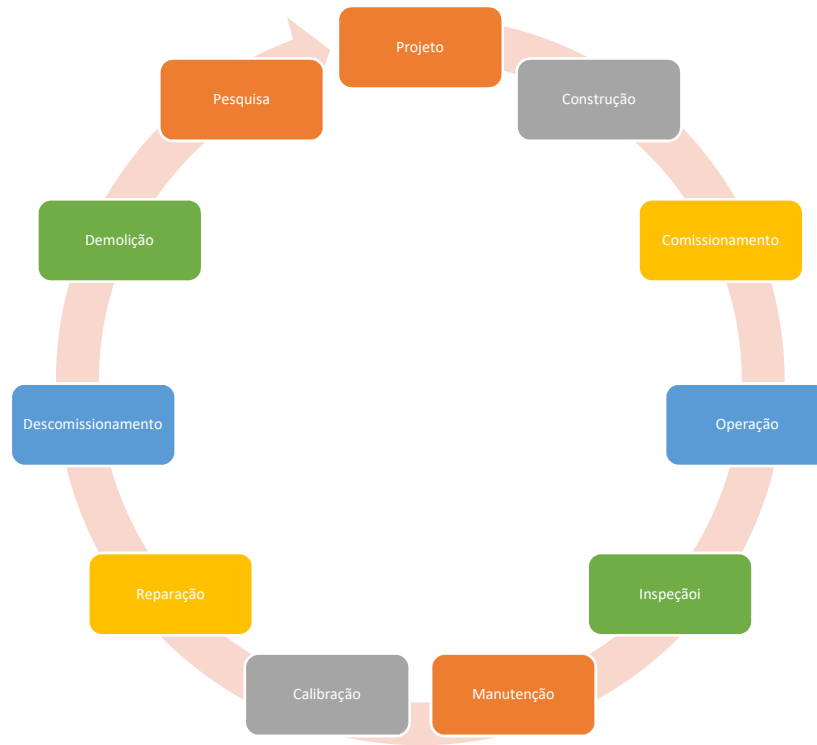


Figura 3: Segurança de processos no ciclo de vida das Instalações.  
Fonte: Elaboração própria (2019).

Abaixo se encontram fatores que influenciam e medidas que devem ser tomadas para se garantir a segurança de processos:

- **Projeto e construção:** O projeto das instalações industriais deve ser o mais simplificado possível eliminando o armazenamento de substâncias que não acrescentam valor, utilizando substâncias menos perigosas, equipando o processo com todos os dispositivos de proteção necessários e pensando na ergonomia para os usuários. E na fase de construção é necessário que seja garantido o controle de qualidade de todos os equipamentos para que se cumpram todos os requisitos do projeto e assim atingir o nível de segurança definido.
- **Operação e manutenção:** Devem ser executadas de acordo com procedimentos bem definidos, testados e comprovados, e principalmente devem seguir as instruções do fabricante dos equipamentos.
- **Plano de contingência:** Devem ser o último recurso para evitar acidentes industriais, ou minimizar as suas consequências, no entanto todas as pessoas devem conhecer estes

planos para agirem com eficácia caso tenham que os pôr em prática.

- **Tempo de vida da instalação:** O envelhecimento deve ser avaliado em contínuo, ou periodicamente, para estimar o tempo de vida restante dos equipamentos e assim salvaguardar a sua integridade.
- **Fatores Humanos:** As falhas humanas podem estar associadas a vários fatores que influenciam o comportamento humano. Assim, quanto mais dependente de fatores humanos for o processo, maior deve ser o investimento da organização no capital humano de modo a minimizar a probabilidade da ocorrência de erros e/ou violações.

### 3.1 Indústria *Offshore*

Normalmente em plataformas de petróleo, há grandes inventários de produtos inflamáveis e poluidores o que implica em grandes potenciais “destruidores”. Além disso, as unidades de produção *offshore* são congestionadas e com inúmeros pontos de possíveis vazamentos. Por todas essas características, a indústria de petróleo *offshore* é obrigada a fazer um gerenciamento de riscos minucioso. Desde a identificação dos riscos, avaliação quantitativa das suas consequências, acompanhamento da implementação das recomendações dos estudos e inspeções, desdobramentos da identificação dos riscos nos planos de resposta a emergências e descrição dos equipamentos críticos de segurança na plataforma dentre outros. As boas práticas de engenharia de inspeção, o aprendizado com acidentes anteriores e as análises de riscos de processo são ferramentas essenciais para um projeto seguro e se entrelaçam.

A operação do processo é a atividade mais perigosa ao lado da operação de transporte e perfuração em uma plataforma *offshore* de petróleo e gás. Experiências passadas de atividades *onshore* e *offshore* de petróleo e gás revelaram que um pequeno erro na operação do processo pode se transformar em uma catástrofe. Isso é uma preocupação especial na plataforma devido ao espaço limitado e à geometria compacta da área de processo, menos ventilação e rotas de escape difíceis. Em uma plataforma, cada medida de controle extra, que é implementada, não ocupa apenas espaço na plataforma e aumenta o congestionamento, mas também adiciona carga extra à plataforma. A indústria de petróleo *offshore* se desenvolveu rapidamente nos últimos anos. Apesar do desenvolvimento técnico, ocorreram vários acidentes ao longo dos anos com severas consequências ao meio ambiente e múltiplas mortes de trabalhadores.

Com base no que foi exposto, temos vários conceitos convergindo para um único objetivo que é reduzir a imprevisibilidade dos processos nas indústrias. Apesar da grande variedade de ferramentas para se realizar o gerenciamento de riscos, há sempre espaço para se buscar inovações neste campo.

### 3.2 Segurança de Processo Vs Segurança Ocupacional

A percepção que se tem sobre o conceito de segurança é que somente a pouco tempo, talvez nos últimos 30 anos, é que a indústria entendeu que o termo “segurança” não podia se prender somente à segurança pessoal, apenas com o intuito de prevenir acidentes pessoais, e indo mais além, de que a preocupação com a segurança só era vista após a ocorrência de algum evento. O professor Andrew Hopkins da *Australian National University* sugere o seguinte exemplo para mostrar a diferença entre segurança pessoal e segurança de processo. Uma preocupação de segurança importante na indústria da aviação comercial são as lesões causadas aos carregadores de bagagens – por exemplo, lesões nas costas e luxações musculares (segurança pessoal). Mas nenhuma empresa aérea jamais pensaria que seus esforços para reduzir esse tipo de lesão melhoraria a segurança de voo (equivalente a segurança de processo). São necessárias atividades e programas diferentes para gerir estas diferentes áreas da segurança.

A segurança na indústria de processo pode ser dividida em dois tipos: segurança ocupacional e segurança de processo. Os incidentes relacionados com Segurança Ocupacional são mais frequentes, mas provocam menores danos, geralmente tratam-se de acidentes de trabalhos típicos como quedas de altura, choque elétrico, atropelamento, entre outros. Por sua vez, na Segurança do Processo os acidentes acontecem com uma menor frequência, mas com danos consideravelmente mais severos. Exemplos disso seriam os acidentes causados por falha de integridade dos equipamentos do processo, como por exemplo vasos, torres, tubulações, etc., caracterizados por vazamentos, rupturas ou descontroles operacionais, os quais levam à perda de contenção de produtos perigosos e consequências severas, como explosões e incêndios.

A Segurança Ocupacional tem como objetivo garantir as condições de trabalho das pessoas, enquanto a Segurança de Processo tem como objetivo garantir as condições de operação de processos industriais. Desta forma, a segurança de processos enfoca em eventos de maior capacidade de dano e maior criticidade para as empresas e assim devem-se seguir diretrizes específicas para obter-se uma gestão de processos eficiente e adequada para este foco.

A ênfase estava na segurança do pessoal da fábrica com o termo 'segurança' sendo usado para implicar o uso de equipamentos de proteção pessoal - chapéu, sapatos, avental, luvas, óculos etc. - e aderência a algumas regras simples, como não fumar nas instalações da fábrica. Além disso, a segurança das instalações foi considerada responsabilidade de apenas algumas pessoas que trabalham na divisão de segurança. Com o progresso do pensamento e da tecnologia, o termo "segurança" foi substituído por "prevenção de perdas". A abordagem foi alterada para evitar a ocorrência de desastres nas fábricas por meio de manutenção preventiva e preditiva. A ênfase é identificar os vários riscos latentes bem antes de causar qualquer acidente.

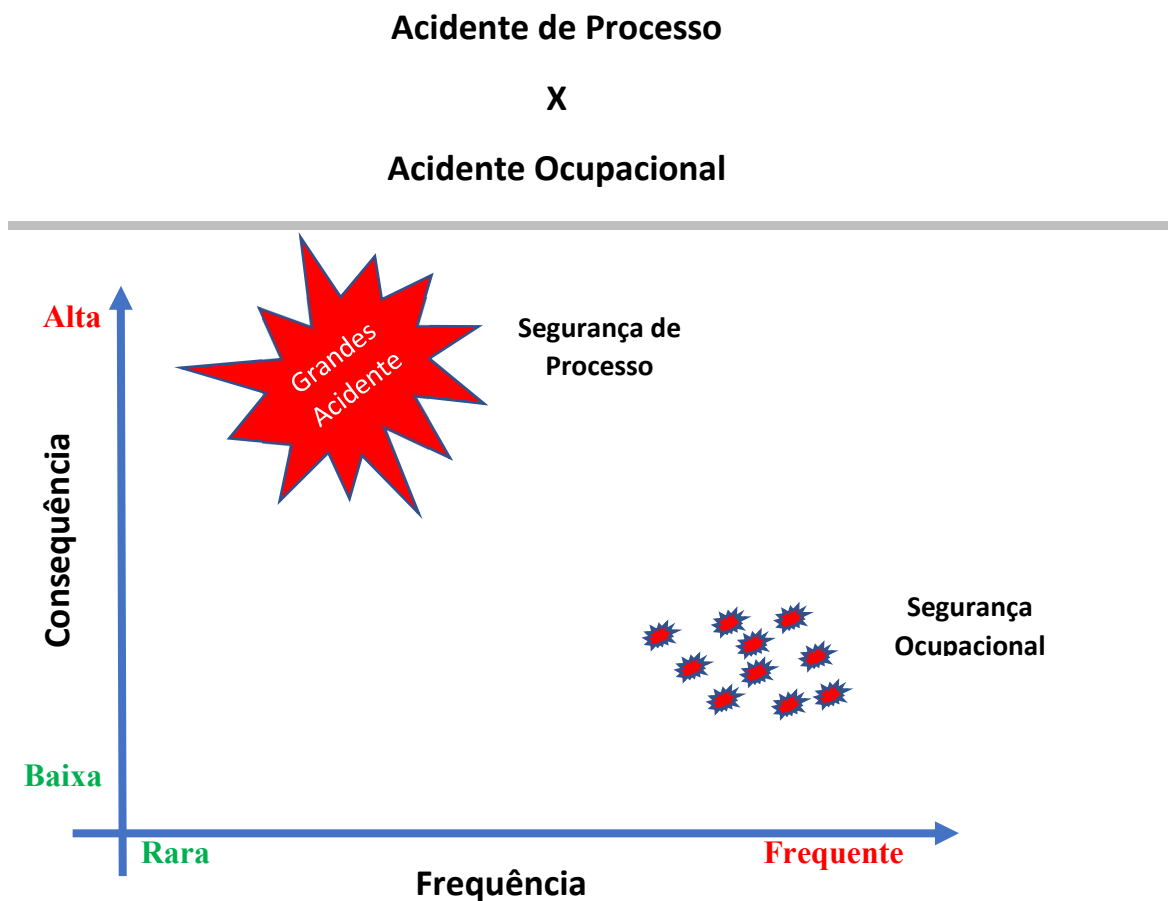


Figura 4 – Acidente de Processo X Acidente Ocupacional

### 3.3 Mecanismos de Gestão

Os processos da indústria de petróleo e gás são diversificados, o que confere certa complexidade ao gerenciamento de seus riscos quando analisamos a cadeia produtiva como um

todo. O termo segurança de processo tem sido associado às tecnologias para proteção da vida, meio ambiente e patrimônio. Segurança de processo envolve soluções baseadas no conhecimento de química, física, termodinâmica, biologia, entre outras disciplinas.

Os mecanismos de gestão de riscos foram uma resposta às demandas do mercado, que com o domínio de tecnologias químicas mais complexas, onde são utilizados processos com elevadas pressões, temperaturas, produtos químicos mais reativos, passamos a conviver com novos riscos até então não conhecidos (CROWL; LOUVAR, 2001).

Segundo citado por (FAWCETT; WOOD, 1982, p. 1) em seu livro *Safety and Accident Prevention in Chemical Operations* “Conhecer é fundamental para sobreviver, enquanto ignorar fundamentos da química é caminho certo para desastres”. Fica claro entender que a conclusão que se tira desta citação é que muitos acidentes aconteceram por falta de conhecimento dos processos industriais e que a segurança precisava ser estudada de forma profunda e séria.

Durante muitos anos, as organizações concentraram seus esforços de prevenção de acidentes na melhoria da tecnologia e dos fatores humanos, muitas vezes colocando como ações corretivas somente o fato de realizar mais treinamentos ou comprar novos equipamentos. Em meados da década de 1980, após uma série de acidentes graves em todo o mundo, empresas, indústrias e governos começaram a identificar os sistemas de gestão (ou a falta deles) como a causa subjacente desses acidentes. As empresas já estavam adotando abordagens de sistemas de gestão em relação à qualidade do produto, muito com base na conhecida ISO 9001, que estabelece os requisitos de um sistema de gestão da qualidade. Entretanto, perceberam que precisavam focar em segurança, e por isso iniciaram o desenvolvimento de políticas, grupos industriais publicaram normas e os governos emitiram regulamentações, todas destinadas a acelerar a adoção de uma abordagem de sistemas de gerenciamento para segurança de processo.

Muitos executivos não compreendem o quanto realmente custam os acidentes e outros acontecimentos que ocasionam as perdas, que tanto comprometem a imagem da empresa e muitas vezes até mesmo sua sobrevivência. Com o pensamento tradicional no campo de acidentes, é provável que somente vejam os custos agregados a área de segurança, tais como, salário direto dos profissionais de segurança, tratamento médico, da remediação ambiental e de indenizações a pessoas afetadas nos acidentes industriais. Algo ainda pior pode acontecer e as companhias podem aceitá-los como custos inevitáveis que fazem parte do negócio ou como custos que podem ser assumidos pelas seguradoras

Poucos são os executivos que compreendem que os mesmos fatores que provocam acidentes, estão também criando perdas de eficiência, bem como, problemas de qualidade, custo e também repercutindo na imagem da empresa. Nenhum evento começa grande. A análise de grandes acidentes mostrou que em alguns casos a indústria não dispunha, na rotina diária de trabalho, de um serviço de segurança apoiado e prestigiado pela liderança e que fosse adequado para atuar, corrigir e sugerir medidas de prevenção nos diversos pequenos acidentes e incidentes que por vezes ocorriam. Muitos destes pequenos incidentes e ou acidentes, estavam ligados a inexistências de controles administrativos e gerenciais capazes de atuar preventivamente. Infelizmente, ainda existe o pensamento, entre poucos executivos que acreditam que a maioria dos acidentes é causada por descuido, assim, acabam optando por recorrer a castigos ou programas de incentivos para fazer com que as pessoas sejam mais cuidadosas. O resultado mais provável desta estratégia será o de que os acidentes se ocultem em vez de serem resolvidos. As empresas que acreditam que os acidentes são acontecimentos normais tendem a proteger-se com seguros mais abrangentes, e acabam descobrindo posteriormente que raramente, ou nunca, estes cobrem todas as perdas. Segundo LEES, 1986, em seu livro *Loss Prevention in the Process Industries – Volume 1* “Esses poderiam ser classificados como as anomalias normais pois acabam fazendo parte da cultura da empresa”. Assim a segurança não é considerada, e acaba se tornando algo mecanizado e rotineiro consequentemente não efetivo. A improvisação assume o lugar do planejamento e do procedimento, possibilitando que um evento não planejado aconteça. A forma como são conduzidas as atividades prevencionista na empresa e o enfoque tradicional adotado por uma considerável parcela de técnicos e engenheiros da área constituem uma visão primária e errônea do problema. O mesmo pode ser dito em relação a maioria dos executivos de pequenas e médias empresas brasileiras e a uns poucos de grandes empresas de várias nacionalidades, que insistem em adotar procedimentos gerenciais equivocados para a condução das atividades de segurança industrial.

O comportamento adotado para prevenção de acidentes industriais deve sofrer uma transformação essencial e passar de reativo para proativo. As ações devem ser de antecipação e não mais de julgamento e correção. Hoje é esperado que as empresas sejam ágeis e lucrativas e acima de tudo seguras, para seus funcionários, meio ambiente e para as comunidades vizinhas às instalações. Espera-se também uma interação maior entre empresas, comunidade e agências regulatórias, para que ocorra uma maior clarificação e entendimento dos riscos inerentes ao processo industrial.



Atualmente, algumas empresas já estão usando metodologias para padronizar a forma de gerir os processos, tais como o *Risk Based Process Safety* (RBPS), que significa que o processo do estudo de segurança é feito com base no risco. Este conceito estabelece formalmente e documenta uma série de atividades desenhadas para produzir resultados específicos de maneira consistente em uma base sólida.

A abordagem de segurança de processo baseada em risco é estruturada em quatro pilares, de acordo com o *Center for Chemical Process Safety European* (CCPS) (2014):

- Compromisso com a segurança de processo;
- Entendimento dos perigos e riscos;
- Gestão do risco;
- Aprendizado com a experiência.

Estes pilares estão divididos em 20 elementos e refletem 15 anos de experiência do trabalho original realizado em 1989, que continha com 12 pilares além das melhores práticas de diversas indústrias e exigências regulatórias do mundo inteiro.

O principal objetivo deste “*approach*” é ajudar à organização a construir e operar um sistema de gerenciamento de segurança de processo mais eficiente. As diretrizes descrevem como desenhar ou melhorar cada atividade de segurança de processo, para que a energia colocada na atividade seja apropriada para atender às necessidades previstas para essa atividade.

A abordagem estratégica da RBPS baseia-se no princípio de que os níveis adequados de detalhe e rigor nas práticas de segurança do processo se baseiam em três fatores:

- um entendimento suficiente do risco associado aos processos nos quais as práticas de segurança do processo estão focadas;
- O nível de demanda por atividade de trabalho de segurança de processo (por exemplo, o número de solicitações de mudança que devem ser revisadas a cada mês) em comparação com os recursos disponíveis;
- A cultura de segurança do processo na qual as práticas de segurança do processo serão implementadas.

Um sistema de gestão RBPS incorpora 4 pilares da prevenção de acidentes (blocos fundamentais), que pode ser visto na figura 5

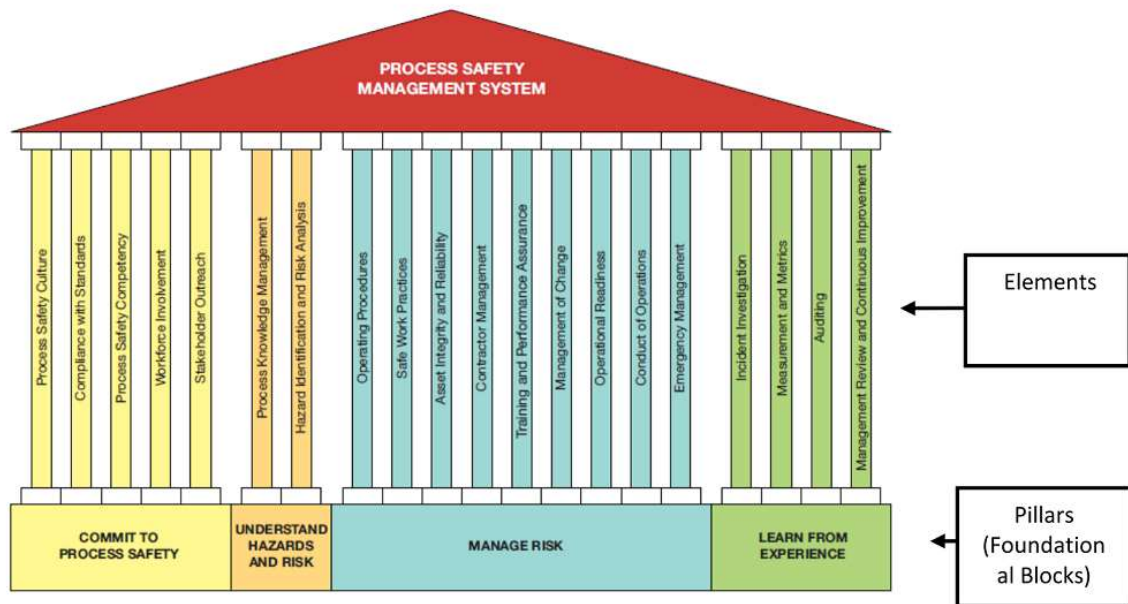


Figura 5 – Pilares (Blocos fundamentais) e elementos associados que constituem o RBPS

1º Pilar (Bloco Fundamental) - O compromisso autêntico de processar a segurança é a base da excelência em segurança de processo. O compromisso de gestão não tem substituto. As organizações geralmente não melhoram sem uma liderança forte e um compromisso sólido. Toda a organização deve fazer o mesmo compromisso. Uma força de trabalho convencida de que a organização apoia plenamente a segurança como um valor central tenderá a fazer as coisas certas, da maneira correta, nos momentos certos, mesmo quando ninguém estiver olhando. Esse comportamento deve ser consistentemente estimulado e celebrado em toda a organização. Uma vez incorporado à cultura da empresa, esse compromisso com a segurança do processo pode ajudar a manter o foco na excelência nos aspectos mais técnicos da segurança do processo.

Este pilar é composto por 5 elementos:

- 1º Elemento: Cultura de segurança de processo;
- 2º Elemento: Conformidade com padrões;

- 3º Elemento: Eficácia de segurança de processo;
- 4º Elemento: Participação da força de trabalho;
- 5º Elemento: Atendimento às partes interessadas.

2º Pilar (Bloco Fundamental) - Organizações que entendem os perigos e riscos são mais capazes de alocar recursos limitados da maneira mais eficaz. A experiência da indústria tem demonstrado que as empresas que utilizam informações sobre riscos para planejar, desenvolver e implantar operações estáveis e de menor risco têm muito mais chances de obter sucesso a longo prazo.

Este pilar é composto por 2 elementos:

- 6º Elemento: Gestão do conhecimento do processo;
- 7º Elemento: Identificação de perigos e análise de riscos

3º Pilar (Bloco Fundamental) - O gerenciamento de riscos concentra-se em três questões: (1) Prudentemente operar e manter processos que representam o risco. (2) Gerenciando alterações nesses processos para garantir que o risco permaneça tolerável. (3) Preparar, responder e gerenciar incidentes que ocorrem. O gerenciamento de riscos ajuda uma empresa ou uma instalação a implementar sistemas de gerenciamento que ajudam a sustentar operações de longo prazo, livres de incidentes e lucrativas.

Este pilar é composto por 9 elementos:

- 8º Elemento: Procedimentos operacionais;
- 9º Elemento: Práticas de trabalho seguro;
- 10º Elemento: Integridade de ativos e confiabilidade;
- 11º Elemento: Gestão da contratada;
- 12º Elemento: Garantia de desempenho e treinamento;
- 13º Elemento: Gestão de mudança;
- 14º Elemento: Prontidão operacional;

- 15º Elemento: Realização das operações;
- 16º Elemento: Gestão de emergências

4º pilar (Bloco Fundamental) - Aprender com a experiência envolve o monitoramento e a atuação em fontes internas e externas de informação. Apesar dos melhores esforços de uma empresa, as operações nem sempre prosseguem conforme o planejado, de modo que as organizações devem estar prontas para transformar seus erros - e os dos outros - em oportunidades para melhorar os esforços de segurança do processo. As maneiras mais econômicas de aprender com a experiência são: (1) Aplicar as melhores práticas para fazer o uso mais eficaz dos recursos disponíveis. (2) Corrigir deficiências expostas por incidentes internos e quase acidentes. (3) Aplique lições aprendidas de outras organizações. Além de reconhecer essas oportunidades para gerenciar melhor os riscos, as empresas também devem desenvolver uma cultura e uma infraestrutura que as ajudem a lembrar as lições e a aplicá-las no futuro. As métricas podem ser usadas para fornecer feedback oportuno sobre o funcionamento dos sistemas de gestão da RBPS, e a análise da administração, uma autoavaliação honesta periódica, ajuda a sustentar o desempenho existente e impulsiona a melhoria em áreas consideradas importantes pela administração.

Este pilar é composto por 4 elementos:

- 17º Elemento: Investigação de Incidente;
- 18º Elemento: Medição e métrica;
- 19º Elemento: Auditoria;
- 20º Elemento: Análise da gestão de melhoria contínua Atenção

Com base no assunto da dissertação, vamos focar no 3º pilar, que apresenta o elemento de integridade e confiabilidade dos ativos.

Este elemento do RBPS é o que ajuda a garantir que o equipamento seja adequadamente projetado, instalado de acordo com as especificações e que permanece apto para uso até ser retirado, é um dos nove elementos do Pilar de Gerenciamento de Risco (Bloco Fundamental). A integridade do ativo Este elemento é a implementação sistemática de atividades, tais como inspeções e testes necessários para assegurar que equipamentos importantes sejam adequados

para a aplicação pretendida por toda a sua vida. Especificamente, as atividades de trabalho relacionadas a este elemento se concentram em:

(1) impedir uma liberação catastrófica de um material perigoso ou uma liberação súbita de energia e

(2) assegurar alta disponibilidade (ou confiabilidade) de sistemas críticos de segurança ou de serviços públicos que previnam ou mitiguem os efeitos desses tipos de eventos

Os seguintes princípios-chave devem ser abordados ao desenvolver, avaliar ou melhorar qualquer sistema de gerenciamento para o elemento de integridade do ativo:

- Manter uma prática confiável
 

As organizações que decidem adotar um programa formal de integridade de ativos devem desenvolver políticas ou procedimentos escritos para orientar a implementação e a execução do programa. Esses documentos devem abordar o escopo, funções e responsabilidades, padrões e outros aspectos do sistema de gerenciamento para esse elemento.

  - o Desenvolver uma descrição / política escrita do programa.
  - o Determinar o escopo do elemento de integridade do ativo. o Projeto de base e tarefas de inspeção, teste e manutenção preventiva (ITPM) nos padrões.
  - o Envolver pessoal competente.
  - o Atualizar práticas baseadas em novos conhecimentos.
  - o Integrar o elemento de integridade de ativos com outros objetivos.
  
- Identificar equipamentos e sistemas que estão no escopo do programa de integridade de ativos e atribuir tarefas do ITPM.
 

O escopo do elemento de integridade do ativo inclui o equipamento físico que fornece sistemas de contenção e segurança / serviços públicos que são projetados para prevenir ou mitigar os efeitos da perda de contenção ou a liberação repentina de energia.

  - o Identificar equipamentos / sistemas para inclusão no elemento de integridade de ativos.
  - o Desenvolver uma ITPM.
  - o Atualizar o plano da ITPM quando as condições do equipamento mudarem.
  
- Desenvolver e manter conhecimentos, habilidades, procedimentos e ferramentas
 

A execução bem-sucedida de atividades de trabalho para o elemento de integridade de ativos

depende de trabalhadores treinados que usam as ferramentas certas e executam atividades de acordo com procedimentos escritos. Nesse contexto, as ferramentas incluem: (1) dispositivos usados para conduzir inspeções, testes e reparos e (2) sistemas usados para planejar tarefas de ITPM e armazenar / analisar o grande volume de dados gerados por essas atividades.

- o Desenvolver procedimentos para inspeção, teste, reparo e outras atividades críticas de manutenção.
  - o Treinar funcionários e contratados.
  - o Garantir que os inspetores tenham certificações apropriadas.
  - o Fornecer as ferramentas certas.
- 
- Garantir a Continuidade da Aptidão para o Propósito  
Independentemente dos procedimentos, ferramentas e outras condições, a medida final de sucesso para o elemento de integridade do ativo é garantir que o equipamento permaneça adequado para o propósito pretendido, pelo menos até a próxima inspeção programada. No caso de sistemas de segurança, o equipamento precisa estar disponível quando necessário e capaz de operar em um nível específico de desempenho para um tempo de missão especificado. Esse desempenho é normalmente alcançado por meio de uma combinação integrada de tarefas de ITPM e medidas de garantia de qualidade.
    - o Realizar inspeções e testes iniciais como parte do comissionamento da planta.
    - o Realizar testes e inspeções durante as operações.
    - o Executar as atividades de calibração, ajuste, manutenção preventiva e reparo.
    - o Planejar, controlar e executar atividades de manutenção.
    - o Garantir a qualidade das peças de reparo e materiais de manutenção.
    - o Certificar que as revisões, reparos e testes não prejudiquem a segurança.
  
  - Endereçar falhas e deficiências no equipamento

Embora a noção de ação baseada em dados de inspeção e teste seja intuitiva, na prática isso pode se tornar um problema. Em algumas instalações, os arquivos de inspeção estão repletos de recomendações não endereçadas. As causas disso variam, incluindo recomendações sem especificidade, indisponibilidade do tempo de inatividade necessário para concluir o trabalho de reparo, financiamento insuficiente no orçamento de manutenção e / ou falta de conhecimento da necessidade de revisar cuidadosamente os relatórios de inspeção / teste.

- o Endereçar diretamente condições que podem levar à falha.
- o Revisar os relatórios de teste e inspeção.
- o Examine os resultados para identificar problemas mais amplos.
- o Investigar falhas crônicas usando uma metodologia estruturada.
- o Planejar as atividades de manutenção e reparo.

- Analisar dados

O valor de conhecer a condição de um equipamento em um momento específico é um pouco limitado. A intenção do elemento de integridade do ativo é determinar com um grau razoável de certeza que o equipamento: (1) está atualmente apto para serviço e (2) continuará apto para manutenção, pelo menos até a próxima inspeção ou teste programado. Assim, a coleta e a análise de dados são geralmente necessárias.

- o Coletar e analisar dados.
- o Ajustar frequências e métodos de inspeção.
- o Realizar inspeções ou testes adicionais, conforme necessário.
- o Planejar substituições ou outras ações corretivas.
- o Arquivar dados.

## CAPITULO 4 – INSPEÇÃO

Conforme pode ser visto no capítulo anterior, a atividade de inspeção é de suma importância no sistema de gestão da segurança de processo.

Inspeção é o procedimento avaliativo e investigativo sobre determinados serviços, ambientes e/ou produtos, visando a detecção de possíveis riscos que possam ocasionar acidentes e doenças ocupacionais. Pode-se dizer ainda que a inspeção é um processo de avaliação da conformidade pela observação e julgamento, acompanhada, conforme apropriado, por medições, ensaios ou uso de calibres. A inspeção é o mecanismo de avaliação da conformidade muito utilizado para avaliar serviços, após a sua execução.

Nas áreas industriais, programas de inspeção e teste e monitoramento de processo são estabelecidos para detectar e avaliar a deterioração devido aos efeitos da operação em serviço. Conforme explicitado pela Prática Recomendada do *American Petroleum Institute* (RP API 581), a eficácia dos programas de inspeção varia muito, desde programas reativos, que se concentram em áreas conhecidas de preocupação, até programas proativos abrangentes que abrangem uma variedade de equipamentos. Um extremo disso seria a abordagem "não corrigir a menos que seja quebrada". O outro extremo seria a inspeção completa de todos os itens do equipamento com frequência.

Com base em requisitos legais, boas práticas de engenharia, histórico de acidentes, etc., é sabido que todo e qualquer tubulação ou equipamento instalados em uma planta industrial devem ser inspecionados adequadamente para assegurar integridade mecânica a fim de manter a continuidade do processo. Manter a integridade mecânica significa que estamos mantendo/conservando as características físicas e estruturais de um sistema, além de estar em conformidade com os parâmetros específicos do projeto. Seguindo com mais detalhes nesse processo, podemos dizer que a principal razão da realização de uma inspeção é descobrir, analisar, entender e monitorar os mecanismos de danos que podem levar à perda de integridade mecânica de tubulações e equipamentos.

Conforme estabelecido pelo Guia de Inspeção do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP), o plano de inspeção é o documento que descreve as atividades necessárias para avaliar as condições físicas de um equipamento, considerando o histórico, os mecanismos de danos previsíveis e os riscos envolvidos para as pessoas, instalações e meio ambiente, e deve incluir os exames e testes a serem realizados.

Os equipamentos devem ter seus planos de inspeção desenvolvidos em função dos mecanismos de danos esperados para o tipo de serviço a que estarão submetidos. Os



mecanismos de dano são processos de deterioração das características micro e macroestruturais, físicas e mecânicas dos materiais quando estes são expostos às envoltórias de solicitações que ocorrem ao longo da vida útil dos equipamentos e componentes, acarretando perda progressiva de suas funções.

Para cada tipo de mecanismo de dano devem ser selecionadas técnicas adequadas de inspeção. De uma maneira geral, os danos e deteriorações que ocorrem com mais frequência em equipamentos estáticos sob pressão em unidades industriais são:

- Corrosão;
- Perda de espessura;
- Mudanças metalúrgicas;
- Trincas;
- Alterações dimensionais;
- Empolamento;
- Incrustações.

Uma das mais importantes perguntas no campo da inspeção é “quando” se deve realizar a inspeção. Definir os intervalos / datas de vencimento entre as inspeções evoluiu com o tempo. Com a necessidade de verificar periodicamente a integridade do equipamento, as organizações inicialmente recorreram a intervalos / datas com base no tempo ou no “calendário”. Com os avanços nas abordagens de inspeção e melhor compreensão do tipo e taxa de deterioração, os intervalos de inspeção / datas de vencimento tornaram-se mais dependentes da condição do equipamento (ou seja, inspeção baseada em condições) do que do que poderia ter sido uma data de calendário arbitrária. Códigos e padrões como API 510, API 570 e API 653 evoluíram para uma filosofia de inspeção com elementos como:

- a) intervalos / datas de inspeção com base em alguma porcentagem da vida útil do equipamento (como meia-vida);
- b) inspeção em linha em vez de inspeção interna baseada em baixas taxas de deterioração;

- c) requisitos de inspeção interna para mecanismos de danos relacionados ao ambiente de processo rachaduras induzidas;
- d) intervalos de inspeção baseados em conseqüências / datas de entrega.

O *Risk Based Inspection* (RBI) representa a próxima geração de abordagens de inspeção e configuração de intervalo / data de vencimento, reconhecendo que o objetivo final da inspeção é a segurança e a confiabilidade das instalações operacionais. O RBI, como uma abordagem baseada no risco, concentra a atenção especificamente no equipamento e nos mecanismos de danos associados que representam o maior risco para a instalação. Ao focar os riscos e sua mitigação, o RBI fornece uma melhor ligação entre os mecanismos que levam à falha do equipamento (perda de contenção) e as abordagens de inspeção que efetivamente reduzirão os riscos associados. Embora possa haver muitas definições para falha de equipamento sob pressão, neste documento, falha é definida como perda de contenção.

#### 4.1 RBI – Risk Based Inspection

O desenvolvimento industrial em todo o mundo foi acompanhado por diversos acidentes e falhas em equipamentos de processo, gerando perdas humanas, prejuízos financeiros e provocando impactos negativos ao meio ambiente. Devido a inúmeros acidentes, houve a necessidade da criação de ferramentas que pudessem trabalhar de forma preventiva, que contribuíssem para a eliminação/redução da probabilidade de acidentes de processo, e uma das disciplinas que mais teve contribuições foi o setor de inspeção de equipamentos/tubulações das grandes indústrias.

A maioria destas ferramentas, como por exemplo, as técnicas de ensaios não destrutivos (END's), que surgiram na década de 70, ocasionaram o aumento de produção, que, aliado ao avanço tecnológico em termos de interfaces analógicas e digitais, originou não só na necessidade de detecção de possíveis falhas que acarretassem perdas significativas, mas também em uma análise de falhas que determinasse a sua causa raiz, buscando assim, a identificação dos principais mecanismos de danos atuantes em cada equipamento.

Com o estudo cada vez mais profundo de disciplinas ligadas à engenharia de materiais, tais como, mecânica da fratura, metalurgia física, ensaios avançados, soldagem etc., e a sua explicitação em códigos ou normas, tais como BS-7910 e o API RP 579, tornou-se possível

avaliar a criticidade de um determinado dano, mais especificadamente, uma descontinuidade, ou seja, até que ponto este dano ameaça à integridade estrutural do equipamento. Entretanto, estes procedimentos devem ser precedidos pela identificação dos mecanismos de dano a fim de se determinar se a análise se refere a uma descontinuidade estática ou uma descontinuidade dinâmica (em progressão).

Neste último caso, pode-se fazer uma avaliação da vida residual do equipamento, se o tipo de mecanismo atuante seja susceptível a esse tipo de análise, como é o caso do mecanismo de degradação por corrosão uniforme.

Através da ferramenta Inspeção Baseada em Risco (IBR) surgida com as publicações das normas API RP 580 (2002) e API STD 581 (2000), é que se desenvolveu o estudo dos tipos de mecanismo. As mesmas apresentam uma metodologia detalhada formada por um conjunto de procedimentos que permite a determinação tanto das consequências de falha, quanto da probabilidade de um evento ocorrer. Segundo o API RP 580, o risco de um equipamento falhar é definido pela combinação da probabilidade de ocorrência de um evento, durante um período de interesse, com as consequências, geralmente negativas, associadas a esse evento.

Segundo Filho (2003), a IBR se constitui no primeiro passo em direção a um programa de gerenciamento de risco. Em vez de se direcionar a análise de risco apenas sob aspectos de segurança dos equipamentos, recentemente há uma crescente atenção para a necessidade de se avaliar o risco resultante a partir do risco interno das instalações sobre os empregados, do risco externo das instalações sobre a comunidade e dos riscos devidos à interrupção referente ao negócio e de agressão ao meio ambiente.

A saída do processo de planejamento de inspeção conduzida de acordo com essas diretrizes deve ser um plano de inspeção para cada item de equipamento analisado que inclua:

- a) métodos de inspeção que devem ser utilizados;
- b) extensão da inspeção (porcentagem da área total a ser examinada ou locais específicos);
- c) intervalo de inspeção ou próxima data de inspeção;
- d) outras atividades de mitigação de risco, nível de risco após a inspeção e outras ações de mitigação terem sido implementadas;

O plano RBI produzido de acordo com a prática recomendada API, combinado com um conjunto abrangente de janelas de operação de integridade para cada unidade de processo e um

rigoroso programa de gestão de mudanças deve fornecer a base para a gestão sólida da integridade e equipamentos fixos a indústria de refino e processo petroquímico.

O RBI é sinônimo de inspeção priorizada por risco, inspeção informada por risco e planejamento de inspeção usando métodos baseados em risco.

Através das ponderações acima, são elaborados os Planos de Inspeção dos Equipamentos (PIE) que também devem ser desenvolvidos em função dos mecanismos de danos esperados para o tipo de serviço a que estão submetidos cada equipamento. Há de esclarecer que para cada tipo de mecanismo de dano devem ser selecionadas as técnicas adequadas para cada inspeção.

Com o mesmo objetivo atribuído para o API RP 1160 que trata da IBR - Inspeção Baseada em Risco - para os oleodutos, o API RP 580 fornece os elementos básicos para o desenvolvimento e a implementação de um programa de IBR para equipamentos de plantas industriais de processamento químico de hidrocarbonetos, tais como vasos de pressão; sistemas de tubulação de processo; tanques de armazenamento; equipamentos rotativos; caldeiras e aquecedores; permutadores e válvulas de segurança.

Os dois principais benefícios básicos à aplicação da metodologia da norma API RP 580 em uma unidade industrial são:

- Elaboração da classificação dos equipamentos avaliados segundo o seu grau de risco;
- Formulação do plano de inspeção detalhado para os equipamentos avaliados, abrangendo a técnica de inspeção a ser empregada em cada área dos equipamentos e a extensão da aplicação da referida técnica.

A norma API STD 581 é constituída por uma metodologia simplificada para determinar que tipo de evento pode ocorrer, qual a consequência, denominada *Consequence of Failure* (COF) quando um equipamento falhar, e quão provável, qual é a probabilidade, denominada *Probability of Failure* (POF) desse evento de acontecer.

A probabilidade de falha é avaliada levando-se em consideração os mecanismos de danos atuantes e suas taxas, conjugados à capacidade dos planos de inspeção de detectá-los e medir corretamente a sua extensão. Para a definição da Probabilidade de Falha, o documento API 581 não considera a probabilidade de falha instantânea, mas sim uma frequência de falha

anual, corrigida por dois fatores: um é referente ao equipamento; e o outro é referente ao gerenciamento do risco que é tratado na unidade industrial.

O conceito de risco vem sendo bastante utilizado no setor de inspeção de equipamentos e está baseado na união das variáveis de probabilidade de falha e na consequência da falha segundo o API STD 581 o risco é apresentado por meio de uma matriz denominada de Matriz de Risco, de acordo com a Figura 6. Isto permite a fácil verificação da contribuição relativa de ambos os fatores envolvidos (frequência e consequência).

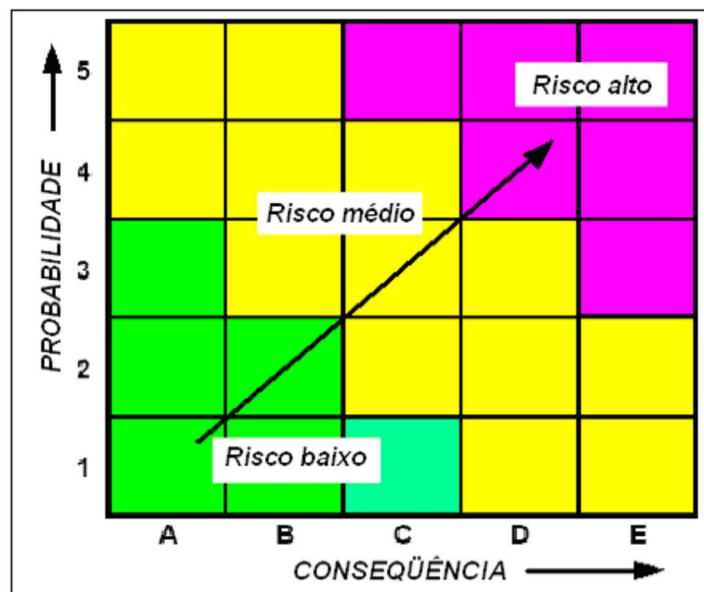


Figura 6 – Matriz de risco

Segundo a Matriz de Risco apresentada, as conseqüências de uma falha são muito influenciadas pela quantidade perdida/vazada devido à perda de contenção de um equipamento ou tubulação, que guarda uma proporcionalidade direta com relação ao volume contido no equipamento. Sendo assim, imaginando unidades industriais do mesmo tipo, mas com capacidade de produção diferente, aquela que processar volumes maiores terá seus equipamentos localizados na matriz de risco tendendo a um deslocamento para a direita, isto é, com maiores conseqüências.

No caso da probabilidade de falha, este deslocamento sistêmico não ocorrerá, isto é, considerando-se dois equipamentos em condições operacionais e planos de inspeção iguais, seus posicionamentos quanto à probabilidade de falha serão os mesmos.

A metodologia da IBR tem o potencial de reduzir custos de um modo tal que ofereça um sistema capaz de priorizar as inspeções respeitando totalmente os aspectos de segurança. Para Filho (2003), O ranqueamento dos equipamentos de uma planta, segundo o risco de falhas, estabelece as bases para alocação dos recursos de inspeção de modo que as áreas potencialmente de alto risco possam ser inspecionadas mais freqüentemente, com técnicas mais sofisticadas, enquanto as de baixo risco com freqüências e técnicas apropriadas para situações de baixo risco.

A utilização do RBI fornece um veículo para melhorar continuamente a inspeção de instalações e reduzir sistematicamente o risco associado a falhas no limite de pressão. À medida que novos dados (como resultados de inspeção e experiências do setor com processos semelhantes) se tornam disponíveis ou quando ocorrem mudanças (por exemplo, condições operacionais), pode ser feita uma reavaliação do programa RBI que fornecerá uma visão atualizada dos riscos. Planos de gerenciamento de risco devem ser ajustados apropriadamente. O RBI oferece a vantagem adicional de identificar lacunas ou falhas na eficácia das tecnologias e aplicações de inspeção disponíveis comercialmente. Nos casos em que a tecnologia não pode mitigar riscos de forma adequada e / ou com eficiência de custo, outras abordagens de mitigação de risco podem ser implementadas. O RBI deve servir para orientar a direção do desenvolvimento da tecnologia de inspeção e, espera-se, promover uma implantação mais rápida e mais ampla das tecnologias de inspeção emergentes, bem como tecnologias de inspeção comprovadas que podem estar disponíveis, mas são subutilizadas.

Importante ressaltar também as limitações apresentadas pelo RBI. Esta ferramenta é baseada em princípios de avaliação e gerenciamento de risco comprovado e sólido. No entanto, O RBI não compensará:

- Informações imprecisas ou faltantes;
- Projetos inadequados ou instalação de equipamentos defeituosos;
- Operar fora de padrões aceitáveis;
- Não executar efetivamente os planos;
- Falta de pessoal qualificado;

Os Equipamento coberto por esta prática recomendada são:

- a) Vasos de pressão - Todos os componentes que contêm pressão;
- b) Tubulação de processo - Componentes de tubulação e tubulação;

- c) Tanques de armazenamento - atmosféricos e pressurizados;
- d) Equipamento Rotativo - Componentes contendo pressão;
- e) Caldeiras e aquecedores - componentes pressurizados;
- f) Permutadores de calor (cascas, cabeças flutuantes, canais e feixes);
- g) Dispositivos de alívio de pressão;

Os principais elementos que devem existir em qualquer programa RBI incluem:

- a) sistemas de gestão para manutenção de documentação, qualificação de pessoal, requisitos de dados, consistência do programa e atualizações de análise;
- b) método documentado para determinação da POF;
- c) método documentado para determinação de COF;
- d) metodologia documentada para gerenciamento de risco por meio de inspeção, controle de processo e outras atividades de mitigação.

Retornando ao documento API-581 – *Risk Based Inspection*, que tem como objetivo apresentar uma metodologia para a priorização dos riscos associados aos equipamentos e unidades industriais; o mesmo estabelece uma normalização de conceitos de fundamental importância para a área de risco baseado em inspeção. A metodologia descrita no documento auxilia os operadores a focar as áreas com alto risco e define ações para reduzir o risco global. Estas ações minimizam os gastos com as atividades de inspeção e manutenção, aumentando a produtividade e confiabilidade do sistema.

O documento API-581 define o risco que um determinado equipamento como sendo função do produto entre a probabilidade e a consequência da falha, conforme a Equação mostrada abaixo (Donato et al, 2001)

$$R = C \times P$$

Onde R é o risco, C representa as consequências em função da área afetada pela falha, e P é a medida da probabilidade de falha, que no caso do documento (RBI) é definida pelo fator dano.

Sendo expresso pelo somatório de todos os subfatores de dano calculados para cada mecanismo de dano atuante no equipamento. As consequências “C” são calculadas a partir da área que o

vazamento afetaria, sendo então calculados os danos causados a população (fatalidades), aos equipamentos e ao meio ambiente nela contidos. Também deve ser considerado como consequência das perdas de produção em função do tempo em que a unidade ficará fora de operação.

A aplicação do RBI, promove uma integração entre as áreas de inspeção e manutenção, permitindo classificar e quantificar os riscos. Desta forma, os recursos destinados a estas áreas (inspeção e manutenção), são empregados de forma eficaz, garantindo uma maior produtividade e confiabilidade nas plantas e equipamentos industriais.

A efetividade de um programa de inspeção pode ser quantificada como a probabilidade de que o estado observado ou detectado através da inspeção, representa em relação ao estado real de dano no equipamento. Entretanto, a efetividade mencionada pode não ser a única forma de melhoria do processo.



## CAPITULO 5 – MECANISMOS DE DANOS

Basicamente, os meios pelos quais um componente se degrada, é o que podemos chamar de mecanismos de danos. Segundo a Prática Recomendada DNV-RP-G101 – Inspeção Baseada em Risco de Equipamentos Mecânicos estáticos em Instalações Offshore - estes danos podem ser de natureza química ou física, e podem ser orientados por tempo ou evento. Ainda com base no documento da *Det Norske Veritas* (DNV), a degradação é a redução da capacidade de um componente de realizar sua função. Conforme mencionado pela Prática Recomendada API 581, que fornece orientação sobre o desenvolvimento de um programa de inspeção baseada em riscos (RBI) para equipamentos fixos e tubulações nas indústrias de hidrocarbonetos e processos químicos; entender a operação do equipamento e a interação com o ambiente de processo (interno e externo) e o ambiente mecânico é fundamental para identificar os mecanismos de danos. O equipamento deve ter seus planos de inspeção desenvolvidos de acordo com os mecanismos de danos esperados para o tipo de serviço ao qual serão submetidos. Técnicas de inspeção apropriadas devem ser selecionadas para cada tipo de mecanismo de dano. Em geral, os danos e deteriorações que ocorrem com mais frequência em equipamentos de pressão estática em unidades industriais são:

- Corrosão;
- Perda de espessura;
- mudanças metalúrgicas;
- falhas;
- mudanças dimensionais;
- soprar;
- *Fouling*.

Verifica-se que entre os diversos mecanismos de deterioração apresentados, os processos corrosivos merecem destaque, pois costumam causar sérios danos ao equipamento do processo.

## 5.1 Processos Corrosivos

Segundo Telles (2003), a corrosão é um conjunto de fenômenos de deterioração progressiva de materiais, principalmente metálicos, devido a reações químicas ou eletroquímicas entre o material e o meio ambiente. A corrosão é uma ameaça contínua à integridade de qualquer ativo comercial. Ele nunca pode ser eliminado, mas pode ser constantemente mitigado durante toda a vida frutífera do ativo. É uma ameaça constante para os negócios, meio ambiente, segurança e bem-estar das pessoas que trabalham e vivem nas instalações.

Segundo Gemelli (2001), a corrosão é um fenômeno de interface que afeta materiais orgânicos e principalmente materiais inorgânicos, manifestando-se através de reações químicas ou eletroquímicas. No primeiro caso, a transferência de elétrons ocorre diretamente entre as duas espécies químicas envolvidas. Já na corrosão eletroquímica, os elétrons são transferidos indiretamente, isto é, eles se difundem através da superfície do sólido (metal ou filme) até o ponto em que são recebidos pelo elemento do meio (oxidante). Neste caso, o receptor e o doador de elétrons estão em lugares diferentes, em oposição às reações químicas, onde o doador e o receptor estão localizados no mesmo ponto da superfície do material.

De acordo com o API 571, corrosão por erosão é uma descrição dos danos que ocorrem quando a corrosão contribui para a erosão removendo películas ou escamas de proteção, ou expondo a superfície do metal a corrosão adicional sob a ação combinada de erosão e corrosão [2]. Os materiais afetados são todos os metais, ligas e refratários, e ainda com base na API 571, os principais fatores críticos são:

- A taxa de perda de metal depende da velocidade e concentração do meio impactante (partículas, líquidos, gotículas, lamas, fluxo bifásico), do tamanho e da dureza das partículas impactantes, da dureza e resistência à corrosão do material sujeito a erosão; o ângulo de impacto.
- Ligas mais suaves, como cobre e ligas de alumínio, que são facilmente desgastadas por danos mecânicos, podem estar sujeitas a severa perda de metal sob condições de alta velocidade.
- Embora a dureza crescente do substrato de metal seja uma abordagem comum para minimizar danos, nem sempre é um bom indicador de resistência melhorada à erosão, particularmente onde a corrosão desempenha um papel significativo.

- O aumento da corrosividade do ambiente pode reduzir a estabilidade dos filmes de superfície de proteção e aumentar a suscetibilidade à perda de metal. O metal pode ser removido da superfície como íons dissolvidos, ou como produtos de corrosão sólidos que são varridos mecanicamente da superfície do metal.
- Fatores que contribuem para o aumento da corrosividade do meio ambiente, como temperatura, pH, etc., podem aumentar a suscetibilidade à perda de metal.

DM#	Damage Mechanism	DM#	Damage Mechanism
1	Sulfidation	34	Softening (Spheroidization)
2	Wet H <sub>2</sub> S Damage (Blistering/HIC/SOHIC/SSC)	35	Reheat Cracking
3	Creep / Stress Rupture	36	Sulfuric Acid Corrosion
4	High temp H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> S Corrosion	37	Hydrofluoric Acid Corrosion
5	Polythionic Acid Cracking	38	Flue Gas Dew Point Corrosion
6	Naphthenic Acid Corrosion	39	Dissimilar Metal Weld (DMW) Cracking
7	Ammonium Bisulfide Corrosion	40	Hydrogen Stress Cracking in HF
8	Ammonium Chloride Corrosion	41	Dealloying (Dezincification/ Denickelification)
9	HCl Corrosion	42	CO <sub>2</sub> Corrosion
10	High Temperature Hydrogen Attack	43	Corrosion Fatigue
11	Oxidation	44	Fuel Ash Corrosion
12	Thermal Fatigue	45	Amine Corrosion
13	Sour Water Corrosion (acidic)	46	Corrosion Under Insulation (CUI)
14	Refractory Degradation	47	Atmospheric Corrosion
15	Graphitization	48	Ammonia Stress Corrosion Cracking
16	Temper Embrittlement	49	Cooling Water Corrosion
17	Decarburization	50	Boiler Water / Condensate Corrosion
18	Caustic Cracking	51	Microbiologically Induced Corrosion (MIC)
19	Caustic Corrosion	52	Liquid Metal Embrittlement
20	Erosion / Erosion-Corrosion	53	Galvanic Corrosion
21	Carbonate SCC	54	Mechanical Fatigue
22	Amine Cracking	55	Nitriding
23	Chloride Stress Corrosion Cracking	56	Vibration-Induced Fatigue
24	Carburization	57	Titanium Hydriding
25	Hydrogen Embrittlement	58	Soil Corrosion
26	Steam Blanketing	59	Metal Dusting
27	Thermal Shock	60	Strain Aging
28	Cavitation	61	Sulfate Stress Corrosion Cracking
29	Graphitic Corrosion (see Dealloying)	62	Phosphoric Acid Corrosion
30	Short term Overheating – Stress Rupture	63	Phenol (carbolic acid) Corrosion
31	Brittle Fracture	64	Ethanol Stress Corrosion Cracking
32	Sigma Phase/ Chi Embrittlement	65	Oxygen-Enhanced Ignition and Combustion
33	885°F (475°C) Embrittlement	66	Organic Acid Corrosion Of Distillation Tower Overhead Systems

Figura 7: Lista dos principais mecanismos de danos conforme a API571 – Mecanismos de danos que afetam equipamentos fixos na indústria de refinaria



Figura 8: Exemplos de danos causados por erosão-corrosão. (a) Erosão de um aquecedor (9Cr-1Mo); (b) Erosão-corrosão de um flange de uma válvula de um catalisador (1.25Cr 300 #). (source: API 571).

## CAPÍTULO 6- LÓGICA FUZZY

Existem algumas fases de uma análise de risco de processo, que a situação real muitas vezes não é nítida e determinista devido ao número de incertezas. Essas incertezas podem ser classificadas em dois grupos: como "incertezas objetivas", que surgem de um caráter aleatório do processo de avaliação (variabilidade) e "incertezas subjetivas", decorrentes de conhecimentos e informações limitados e parciais (imprecisão). Em tal situação, a lógica difusa pode ser usada. De acordo com Zadeh, a lógica *fuzzy* ou a teoria dos conjuntos *fuzzy* podem trabalhar com incerteza e precisão e podem resolver problemas onde não existem limites precisos e valores precisos. O conceito de um conjunto difuso fornece formulações matemáticas que podem caracterizar os parâmetros incertos envolvidos no método de análise de risco. Segundo CHAMOVITZ e COSENZA (2010), o uso da lógica difusa em será indicado sempre que se desejar abordar o modelo construído da realidade. Esta afirmação baseia-se no princípio da incompatibilidade estabelecido por ZADEH (1973): "À medida que a complexidade de um sistema aumenta, nossa capacidade de fazer declarações precisas e significativas sobre esse sistema diminui até que um limiar seja atingido além da precisão e importância (ou relevância). Na lógica *fuzzy*, o equivalente das variáveis independentes tradicionais, os conjuntos *fuzzy* são definidos para variáveis linguísticas específicas. As categorias selecionadas de cada variável constituem os conjuntos *fuzzy*. Um conjunto *fuzzy* definido em um universo discursivo (U) é caracterizado por uma função de associação (X), que assume valores do intervalo [0, 1]. Uma função de associação fornece uma medida do grau de similaridade de um elemento U para o subconjunto difuso.

O uso da lógica *fuzzy* em relação à lógica clássica em processos complexos é justificado de acordo com JANG e GULLEY, 1995:

- Porque a naturalidade de sua abordagem torna seus conceitos fáceis de entender.
- Porque é flexível.
- Porque é tolerante a dados imprecisos.
- Porque pode modelar funções não-lineares de complexidade de arbitrariedade.
- Porque pode ser construído com base na experiência de especialistas.
- Porque é baseado em linguagem natural, a base da comunicação humana

A lógica *fuzzy*, também chamada dos conjuntos nebulosos é uma extensão da lógica convencional ou lógica booleana, que introduziu o conceito que considera verdades não absolutas. O foco é justamente tratar imprecisões, sendo uma tentativa de aproximar a tal precisão requerida. Na lógica *fuzzy*, as interpretações surgem de observações reais, de especialistas, de conceitos conhecidos mesmo que de forma não completa.

Os denominados conjuntos *fuzzy* ou nebulosos que em contrapartida dos conjuntos de números reais ou lógicos estão associados a abstrações e a generalizações, pois assim determinados conceitos que apresentam vagueza ou imprecisão poderiam ser considerados, sem deixar de lado ao final da análise uma precisão matemática (COSENZA, 1981).

Logo, os números nebulosos estão associados com a abstração e a generalização, que abre um campo de observações não limitado pelas definições Falso e Verdadeiro como conceitos matemáticos que desde Aristóteles e outros filósofos foi tão difundida.

Mc NEILL (1994) descreve algumas aplicações que serão possíveis através de pesquisa em lógica nebulosa como: carros mais inteligentes que através de sonares que acionariam os freios com mais segurança quando o trânsito de uma determinada via parasse bruscamente.

DORIA E DORIA (1999) descrevem alguns programas capazes de produzir textos e até dialogar, mesmo com certas limitações, com o ser humano. Os trens de Sendai no Japão, são também, um excelente exemplo atual de aplicações de lógica nebulosa por sua característica única de partirem e chegarem as suas estações com percepção mínima do efeito da inércia nos passageiros.

O sistema foi modelado para ser extremamente suave e são também muito eficientes no uso de energia, aproveitando ao máximo a energia empregada para mover e a energia cinética para frear.

Resumindo, a lógica *fuzzy* é empregada para reduzir incertezas e imprecisões.

### 6.1 Etapas do Processo de Fuzzyficação

Como já explicamos, a lógica *fuzzy* tem como objetivo atuar em processos subjetivos, fazendo, por meio de uma série de análises específicas de indicadores, recursos matemáticos de conjuntos e matrizes, uma análise que tem como saída números que geram dados mais precisos e confiáveis. Basicamente, o passo-a-passo (Figura 9) para fazer análises baseadas em *fuzzy* é:

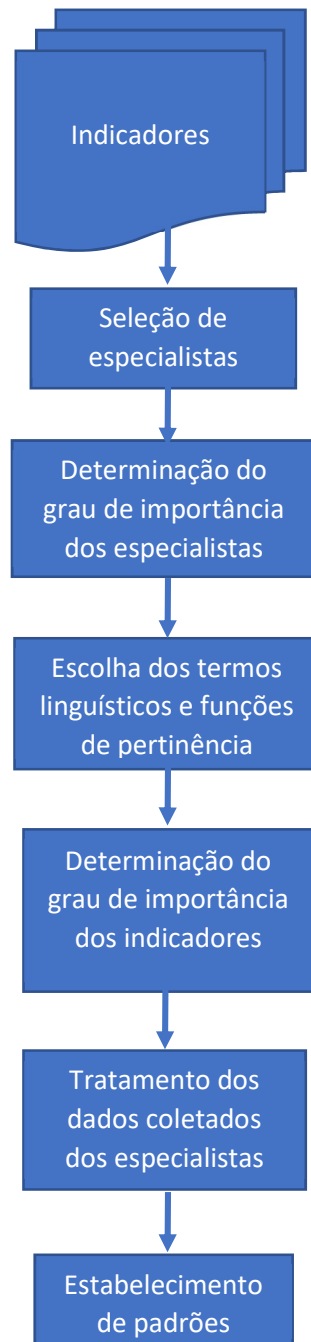


Figure 9: Passo a passo da análise *fuzzy*

- Definição de indicadores: quais são exatamente os dados que queremos analisar e buscar maior precisão.
- Seleção de especialistas. A teoria dos conjuntos difusos nos permite representar o conhecimento eliciado por meio de funções de pertinência. Um modelo *fuzzy* construído com a ajuda de especialistas aumenta sua precisão à medida que aumenta o número de especialistas reconhecidos por seu conhecimento, experiência e trabalho na área de interesse.
- Determinação do grau de importância dos especialistas. Como um grupo especializado é geralmente heterogêneo, as opiniões podem ser consideradas com a mesma intensidade, ou seja, com o mesmo grau de importância. Desta forma, cada opinião terá importância, dado o grau de importância do especialista. A determinação do grau de importância do especialista é feita por meio de um instrumento de coleta de dados.
- Escolha de termos linguísticos e funções de pertinência para a avaliação de indicadores preditivos: Da perspectiva da teoria *fuzzy*, cada indicador preditivo pode ser visto como uma variável linguística, relacionada a um conjunto de termos linguísticos associados a funções de pertinência, em uma referência previamente estabelecida. conjunto. Cada indicador será uma composição de termos linguísticos, obtidos em um processo de avaliação, feito através do julgamento de especialistas. Portanto, eles também serão números *fuzzy*.
- Determinação do grau de importância de cada indicador preditivo. Esta etapa visa obter dos especialistas os graus de importância de cada um dos indicadores de cada princípio de engenharia de resiliência, através da utilização do conjunto de termos linguísticos, caracterizados pelos números *fuzzy* triangulares mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Números fuzzy para termos linguísticos

Grau de Importância	Simbologia	Termo Linguístico	Número fuzzy Triangular
0,0	B	BAIXO	N1= (0,0;0,0;1,0)
1,0	M	MÉDIO	N2= (0,0;1,0;2,0)
2,0	MA	MÉDIO ALTO	N3= (1,0;2,0;3,0)
3,0	A	ALTO	N4= (2,0;3,0;3,0)



• Tratamento dos dados coletados dos especialistas na avaliação de cada indicador preditivo: Nesta etapa, utilizando o método de agregação de similaridade proposto por HSU e CHEN (1996), uma combinação de julgamentos individuais de especialistas é feita. Esta etapa envolve:

- 1) o cálculo do grau de concordância entre opiniões;
- 2) a construção da matriz de concordância;
- 3) cálculo de concordância relativa;
- 4) cálculo do grau relativo de concordância;
- 5) o cálculo do coeficiente de consenso dos especialistas;
- 6) a determinação do valor *fuzzy* de cada indicador referente aos princípios de engenharia de resiliência.

## 7- ESTRUTURA METODOLÓGICA

A estrutura metodológica para alcançar os objetivos definidos no capítulo 1 é constituída pelas seguintes etapas:

- Descrever a instalação industrial escolhida;
- Pesquisar no referencial teórico os principais mecanismos de danos que servirão como indicadores;
- Selecionar grupo de especialistas;
- Aplicar um método *fuzzy* para determinação do grau de importância dos especialistas e de cada indicador (mecanismos de danos);
- Tratar os dados coletados dos especialistas para avaliação de cada indicador;
- Desenvolver ferramenta para coleta e análise dos dados dos indicadores.

Existem vários tipos de métodos *fuzzy* de decisão, que utilizam a opinião de especialistas. Para este estudo será utilizado o método desenvolvido por HSU e CHEN (1996), que se baseia em um procedimento para a agregação das opiniões dos especialistas.

### 7.1 Desenvolvimento da Estrutura Metodológica

#### 7.1.1 Descrição da Plataforma de Petróleo

O tipo de plataforma objeto deste estudo é do tipo FPSO – Floating Production, Storage, and Offloading System, que são unidades flutuantes que possuem cascos com grandes tanques de armazenamento. Periodicamente esta produção é transferida por mangueiras flexíveis para navios aliviadores, que são navios que coletam a produção de um FPSO e a transporta para um terminal terrestre, ou seja, é um navio de transporte de petróleo entre os campos de produção marítimos e os terminais de terra.

Basicamente, o FPSO é um navio onde se coloca uma planta de processo, módulos de utilidades e demais equipamentos e instalações operacionais. Muitos projetos são desenvolvidos com o aproveitamento de um casco de navio petroleiro em final de vida útil. Outros projetos partem de um casco novo. As plataformas deste tipo têm conseguido grande sucesso de aplicação, sobretudo porque muitos estudos de viabilidade técnica e econômica

apontam esse conceito de instalação *offshore* como o de melhor resultado. Mas cada caso é um caso e somente a avaliação específica de cada projeto pode indicar a melhor opção dentre os conceitos de plataforma disponíveis (PORTELA, 2015, p.73). Aqui no Brasil, devido à vocação offshore das bacias sedimentares, há uma variedade enorme de plataformas, tendo destaque para as plataformas do tipo FPSO, que dobraram de quantidade nos últimos 2 anos e contabilizam 52 unidades em operação. A exploração de novas fronteiras, em lâminas d'água cada vez mais profundas, é um desafio tecnológico da indústria petrolífera brasileira.

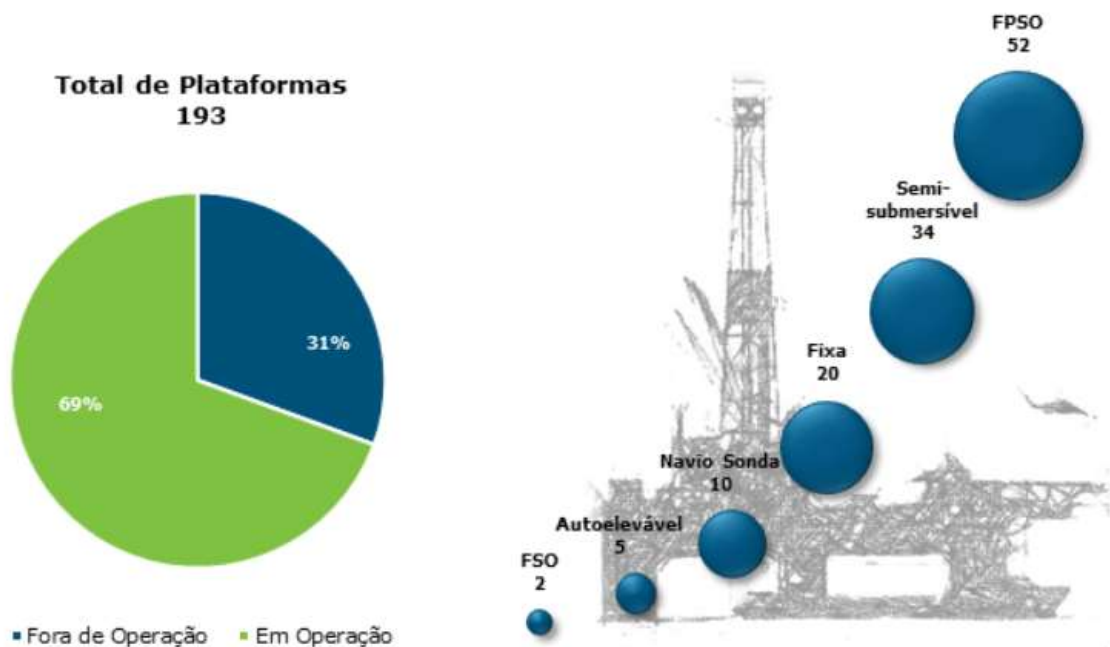


Figura 10 – Estatísticas de plataforma no Brasil.

Fonte: Elaboração IBP com dados da Marinha do Brasil

Os FPSO's, em virtude da grande capacidade de armazenamento de hidrocarbonetos, concentram imensa quantidade de energia. Além do que, danos navais podem resultar em perda de contenção dos grandes tanques, causando acidentes com significativo impacto ambiental. Isso faz do FPSO um tipo de equipamento em que os requisitos de segurança marítima e de processo se tornam muito rigorosos. A proporção entre o comprimento do convés principal em relação a sua largura eleva a possibilidade, durante um acidente catastrófico, do isolamento de pessoas na área considerada menos segura (proa e planta de processo). Isso implica em recursos adicionais de proteção das rotas de fugas principais que são projetadas para permitir a comunicação entre proa e popa. Essa característica também requer recursos adicionais para promover uma eventual necessidade de abandono pela proa. Apesar da quantidade de hidrocarbonetos armazenada e as atividades operacionais críticas que desempenham,

plataformas do tipo FPSO são instalações seguras quando bem projetadas e submetidas a um gerenciamento de riscos responsável (PORTELA, 2015, p.75).

Na figura 11, podemos ver as principais áreas de um FPSO, que são:

- *Turret* : Torre que centraliza a chegada dos *risers*;
- Torre do *Flare*: Local (chaminé) onde se faz a queima de gases;
- Planta de processo: Local onde se processa o produto retirado do leito marinho;
- Acomodações (casario): Local onde se localizam os dormitórios, cozinha, área de lazer, etc.;
- Helideck: Local para pouso do helicóptero, que serve para troca da tripulação ou para emergências médicas;
- Linhas de amarração: Linhas que ancoram o FPSO
- *Risers*: Linhas interligadas ao poço, que transportam o produto;
- Tanques de estocagem: Tanques de armazenamento;
- Mangueira de *offloading*: Mangueira que transporta o produto para os navios aliviadores
- Sala de controle: Local onde todos os sistemas são monitorados;



1 Turret & swivel stack	5 Heating medium	9 Helideck	13 Fiscal metering
2 Flare tower	6 Power generation	10 Mooring lines	14 Offloading hose
3 Gas compression	7 Switchgear room	11 Risers and umbilicals	15 Central Control Room
4 Process plant	8 Accommodation	12 Storage tanks	

Figura 11 – Principais partes de um FPSO

### 7.1.2 Indicadores

Os indicadores serão os mecanismos de dano por corrosão. Como já indicado na figura 7, a API nos fornece uma lista dos principais mecanismos, no entanto, usaremos apenas 7 desses mecanismos, baseados no DNV RP G101 Apêndice A.

- Corrosão de CO<sub>2</sub> (local / uniforme);
- corrosão externa – atmosférica;
- erosão de areia;
- MIC - corrosão micro biologicamente influenciada;
- SCC externo (cloreto);
- Corrosão do ponto de orvalho do gás de combustão;
- corrosão da água

A escolha desses indicadores se deve ao fato de que pelo histórico de inspeção na plataforma usada como referência, estes foram os mecanismos que mais causaram perda de espessura nas paredes de tubos e equipamentos. Devido a essa referência, o *software* usado pela empresa para rodar o RBI, apresenta somente estes 7 mecanismos disponíveis.

### 7.1.3 Seleção dos Especialistas

A teoria dos conjuntos difusos permite representar o conhecimento eliciado através de funções de pertinência. Um modelo fuzzy construído com a ajuda de especialistas aumenta a sua precisão à medida que aumenta o número de especialistas reconhecidos pelo seu conhecimento, experiência e trabalho na área de interesse (ISHIKAWA et al., 1993) [10]. Desta forma, a seleção dos especialistas é um fator crítico, uma vez que a confiabilidade e a qualidade dos resultados dependem da qualidade dos especialistas.

A seleção do grupo de especialistas foi realizada com base no perfil técnico e experiência apresentada na área *offshore*. A ideia era utilizar profissionais envolvidos tanto na elaboração do plano de inspeção quanto nos profissionais que executam e / ou auditam as ações de fiscalização, tais como:

- E1 - Gerente de Instalação Offshore – OIM (experiência de mais de 20 anos em gerenciamento de unidades marítimas, plataformas e embarcações);
- E2 - Gerente Técnico de Manutenção – TMM (experiência de mais de 10 anos na gestão de manutenção de áreas industriais);
- E3 - Engenheiro de Integridade – IE (experiência de mais de 20 anos com inspeção de equipamentos, ensaios e testes, planos de inspeção e recomendações técnicas);
- E4 - Gerente de HSE (profissional com mais de 17 anos de experiência na área de gestão de segurança, tendo trabalhado em várias áreas do setor de petróleo e gás, tais como: construção de módulos, instalação de dutos e equipamentos submarinos, operação de plataformas);

Como resultado da análise do perfil dos especialistas, os quatro foram habilitados a prosseguir a pesquisa, pois possuíam em seu currículo envolvimento com o assunto estudado e em diferentes atuações nas atividades com o petróleo.

#### 7.1.4 Determinação do grau de importância dos especialistas

Como um grupo especializado é geralmente heterogêneo, as opiniões não podem ser consideradas com o mesmo grau de importância. A determinação do grau de importância do especialista é feita por meio de um instrumento de coleta de dados. Esse instrumento utilizado para coleta de dados é um questionário (Apêndice A) utilizado por BELCHIOR (1997) e MORÉ (2004) para identificar o perfil do especialista. Cada questionário contém informações de um único especialista do GIE. Os respectivos graus de importância são definidos como um subconjunto  $\mu_i(k) \in [0,1]$ . O grau de importância de cada especialista,  $GIE_i$ , que é o seu grau relativo de importância em comparação com outros especialistas, é definido por:

$$GIE_i = \frac{tQ_i}{\sum_{i=1}^n tQ_i} \quad (7.1)$$

Em que:

$GIE_i$  = Grau de Importância de cada especialista;

$tQ_i$  = Total de pontos do questionário para o especialista  $i$ ;

$n$  = número de questões.

A Tabela 3 apresenta o resultado dos dados coletados de cada especialista. O total de pontos do questionário de cada especialista,  $tQ_i$ , é a soma dos graus de importância de cada questão ( $q$ ) e o grau de importância de cada especialista,  $GIE_i$ , foi calculado por meio da Equação 7.1.

Tabela 3 – Resultados dos graus de importância dos especialistas

Ei	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	tQi	GIEi
1	1	0,4	0	0	0,7	0,7	1	0,9	1	5,7	0,231
2	1	0,6	0	0	1	0,7	1	1	1	6,3	0,255
3	1	0,6	0	0	1	0,7	1	0,9	1	6,2	0,251
4	0,8	0,8	0,5	0,4	0,7	0,7	1	0,7	0,9	6,5	0,263
Total										24,7	1

Como visto na Tabela 3, o especialista 4 tem o maior grau de importância, seguido pelo especialista 2.

### 7.1.5 Escolha dos Termos Linguísticos e das Funções de Pertinência

Do ponto de vista da teoria *fuzzy*, cada indicador preditivo pode ser visto como uma variável linguística, relacionada a um conjunto de termos linguísticos associados a funções de pertinência, em um conjunto de referência previamente estabelecido. Cada indicador será uma composição de termos linguísticos, obtidos em um processo de avaliação, feito através do julgamento de especialistas. Portanto, eles também serão números *fuzzy*. Os termos linguísticos foram definidos como:

- Alto (A): para indicadores considerados muito importantes (têm grande influência);
- Médio-Alto (MA): para indicadores considerados importantes (têm influência);
- Médio (M): para indicadores que são considerados de menor importância (têm pouca influência);
- Baixo (B): para indicadores que não são considerados importantes / não têm influência.

Estes termos linguísticos serão representados por números *fuzzy* triangulares, que indicarão o grau de importância de cada indicador considerado. Segundo PEDRYCZ (1994), os números fuzzy triangulares lidam muito bem com informações com alto grau de incerteza e incerteza, assim como as variáveis linguísticas que traduzem as opiniões de especialistas. A Figura 12 mostra o gráfico das suas funções de relevância.

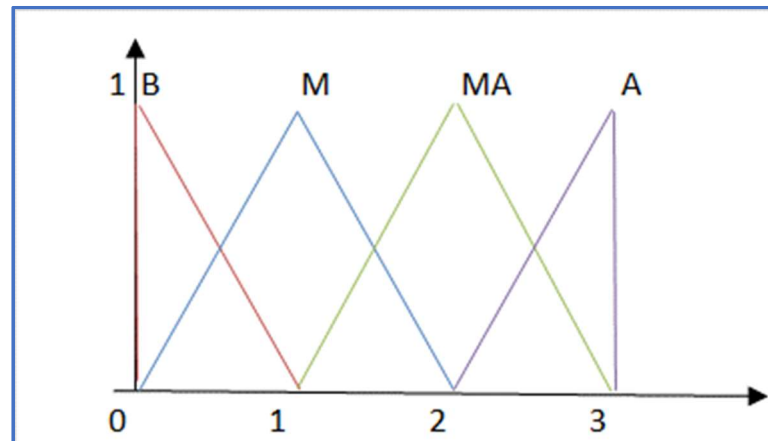


Figura 12 – Gráfico das funções relevantes

A definição destes 4 termos linguísticos se baseia nas categorias de risco adotadas pela API RP 581. Além disso, o plano de inspeção no qual o trabalho se baseia utiliza esses 4 termos e para que a comparação seja coerente entre o resultado da lógica *fuzzy* e o plano de inspeção, temos que comparar termos idênticos. Outra definição importante para o processo é a utilização da função de associação triangular. Tem sido frequente a utilização da função triangular, muitas vezes pela impressionante simplicidade e por se ajustar bem á limitada disponibilidade de informações pertinentes sobre os termos linguísticos.

#### 7.1.6 Determinação do Grau de Importância de Cada Indicador

O objetivo desta etapa é obter dos especialistas os graus de importância de cada um dos indicadores, através do uso do conjunto de termos linguísticos, caracterizado pelos números triangulares fuzzy mostrados na Tabela 2. Para determinar o grau de importância dos indicadores, foi utilizada uma planilha. Essa planilha foi preenchida pelos especialistas, utilizando o conjunto de termos linguísticos, caracterizado pelos números triangulares *fuzzy* mostrados na Tabela 2. A qualidade da pesquisa depende do nível de transparência das opiniões



fornecidas pelos especialistas. A matemática difusa será usada para agregar essas opiniões e elaborar uma hierarquia de indicadores.

Segundo Pedrycz (1994), utilizar números *fuzzy* triangulares é uma excelente solução no tratamento de informações com alto grau de incerteza e de indefinição, como é o caso das variáveis linguísticas (pouco importante, importante, muito importante) que traduzem as opiniões de especialistas. Estes números são expressos na forma de um terno ordenado  $(a, b, c)$ , conforme mostrado na figura 13

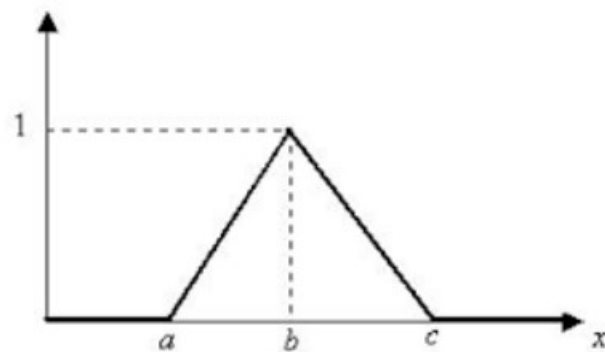


Figura 13 – Expressão do termo ordenado de um número *fuzzy* triangular

Tabela 4 – Resultado do grau de importância de cada indicador

Indicador	E1	E2	E3	E4
Erosão por areia	B	B	B	B
Corrosão de CO <sub>2</sub>	A	MA	MA	A
MIC	M	B	M	M
SCC externo	B	M	M	B
Corrosão externa - atmosférica	MA	M	M	MA
Corrosão do ponto de orvalho	M	M	M	A
corrão pela água	A	M	M	MA

### 7.1.7 Tratamento dos dados coletados dos especialistas na avaliação de cada indicador

Neste tópico, iniciaremos o tratamento dos dados da pesquisa com os 04 especialistas para avaliar os graus de importância dos 7 indicadores. As etapas a seguir detalham a aplicação desse método:

- 1) verificar as áreas de união e intersecção de opiniões *fuzzy*;
- 2) calcular o grau de concordância de opiniões;
- 3) construir a matriz de concordância;
- 4) calcular a concordância relativa;
- 5) calcular o grau de concordância relativa;
- 6) calcular o coeficiente de consenso dos especialistas;
- 7) encontre o valor *fuzzy* de cada um dos 7 indicadores escolhidos;

Como exemplo, nesta etapa, são apresentados os cálculos da avaliação do indicador “corrosão externa”. O cálculo completo dos outros indicadores está apresentado no apêndice B.

#### 7.1.7.a Verificar as áreas de união e de intersecção das opiniões *fuzzy*

Neste item, temos que encontrar os valores das áreas de intersecção e união de opiniões *fuzzy*, que são mostradas nas tabelas 05 e 06.

Tabela 5: Valores das áreas de intersecção

Opinião dos Especialistas	MA	M	M	MA
MA	1	0,25	0,25	1
M	0,25	1	1	0,25
M	0,25	1	1	0,25
MA	1	0,25	0,25	1

Tabela 6: Valores das áreas de união

Opinião dos Especialistas	MA	M	M	MA
MA	1	1,75	1,75	1
M	1,75	1	1	1,75
M	1,75	1	1	1,75
MA	1	1,75	1,75	1

### 7.1.7.b Cálculo do grau de concordância entre opiniões

O próximo passo é calcular o grau de concordância entre as opiniões (GC). Este valor é encontrado pela razão entre a área de intersecção (AI) e a área de união (AU).

$$GC_{ij} = \frac{A_i}{A_j} \quad (7.2)$$

### 7.1.7.c Matriz de concordância

O próximo passo é construir a matriz de concordância (MC), que é obtida combinando todos os graus de concordância entre cada par de especialistas. Veja a tabela 6. Como selecionamos quatro especialistas, a matriz de concordância será uma matriz simétrica ( $GC_{ij} = GC_{ji}$ ) de 4 linhas e 4 colunas, com todos os elementos de sua diagonal iguais a 1.

Tabela 6: Matriz de Concordância

1	0,142857	0,142857	1
0,142857	1	1	0,142857
0,142857	1	1	0,142857
1	0,142857	0,142857	1

### 7.1.7.d Cálculo da concordância relativa

Neste tópico vamos calcular a concordância relativa (Cri) de cada especialista, com base na seguinte fórmula:

$$CR_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (GC_{ij})^2} \quad (7.3)$$

Tabela 7: Concordância Relativa

Especialistas	CR <sub>i</sub>
1	0,824786
2	0,824786
3	0,824786
4	0,824786
Total	3,299144

#### 7.1.7.e Cálculo o grau de concordância relativa

O grau de concordância relativa (GCR<sub>k</sub>) de cada especialista, em relação aos demais especialistas, é obtido pela equação abaixo:

$$GCR_k = \frac{CR_i}{\sum_{k=1}^n CR_k} \quad (7.4)$$

Tabela 8: Grau de Concordância Relativa

Especialistas	GCR <sub>k</sub>
1	0,25
2	0,25
3	0,25
4	0,25

#### 7.1.7.f Cálculo de consenso dos especialistas

O coeficiente de consenso de cada especialista (CCE<sub>k</sub>), é calculado de acordo com a fórmula abaixo:

$$CCE_k = \frac{GCR_k * GIE_i}{\sum_{i=0}^n GCR_k * GIE_i} \quad (7.5)$$

Tabela 9: Coeficiente de Consenso

Especialistas	CCEk
1	0,230769
2	0,255061
3	0,251012
4	0,263158

### 7.1.7.g Valor Fuzzy

Após a obtenção do coeficiente de consenso dos 4 especialistas, teremos o último passo, que consiste no cálculo do valor Fuzzy de cada um dos indicadores escolhidos.

$$N = \sum_{i=1}^n (CCE_i * n_i) \quad (7.6)$$

onde  $n_i$  é o número *fuzzy* triangular relativo aos termos linguísticos utilizados pelos especialistas na avaliação dos indicadores. A Tabela 10 mostra os números *fuzzy* encontrados para cada índice escolhido.

Tabela 10: Números *fuzzy*

Indicadores	Números <i>Fuzzy</i>			GII
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
Corrosão por CO <sub>2</sub>	1,493927	2,493927	3	1
Corrosão externa	0,493927	1,493927	2,493927	0,599026
Erosão por areia	0	0	1	0
MIC	0	0,827935	1,827935	0,331981
SCC externa	0	0,506073	1,506073	0,202922
Corrosão do ponto de orvalho	0	0,506073	1,506073	0,202922
Corrosão por água	0,609275	1,609275	2,419288	0,645277

## CAPITULO 8 – ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS E RESULTADOS

Depois de encontrarmos os números *fuzzy* para cada indicador (Apêndice B), agora precisamos priorizar os valores obtidos, e para isso é necessário calcular o grau de relevância de cada um deles. O grau de relevância de cada indicador (GRFi) é obtido pela normalização dos valores desses indicadores. Essa normalização é executada usando a seguinte expressão:

$$GRF_i = \frac{b_i}{Major(b)} \quad (7.7)$$

Na equação acima, major (b) é o maior valor de b do número *fuzzy* triangular encontrado para cada indicador. Nós escolhemos  $b_i$  porque esse valor corresponde a um grau de associação de 1. Portanto, a GRI será o valor nítido de cada um dos indicadores. A análise dos resultados obtidos na Tabela 11 indica que o maior valor de b ocorre no indicador de corrosão do CO<sub>2</sub>.

Tabela 11: Valores em ordem decrescente

Indicadores	GII
Corrosão por CO <sub>2</sub>	1
Corrosão externa	0,645277
Erosão por areia	0,599026
MIC	0,331981
SCC externa	0,202922
Corrosão do ponto de orvalho	0,202922
Corrosão por água	0

Assim, deve ser maior (b) = 2,49, levando a um grau de relevância igual a 1 para este indicador, seguido do indicador de corrosão da água, como pode ser visto na tabela 11, que mostra a hierarquia em ordem decrescente dos sete indicadores.

O resultado mostrado na tabela 11 mostra que os 3 principais mecanismos de dano são: corrosão por CO<sub>2</sub>, corrosão por água e corrosão externa.

Agora podemos comparar este resultado com os resultados das inspeções realizadas na área de processo. Se olharmos para as taxas de redução de paredes devido à corrosão (mm / ano), podemos ver que as maiores taxas foram causadas pela corrosão por água e corrosão por CO<sub>2</sub>. A corrosão da água parece mais do que a corrosão por CO<sub>2</sub> por ter mais equipamentos e tubulações onde a água participa mais no processo. No entanto, fica claro que os dois primeiros mecanismos de dano apontados pela lógica Fuzzy são os que causaram mais danos, mais reduções nas paredes de tubulações e equipamentos. Agora, com esse resultado em mãos, a equipe responsável por determinar quais equipamentos e tubos serão inspecionados e em que intervalos, ganha mais objetividade no momento do planejamento, pois sabe exatamente quais mecanismos devem ser priorizados, o que significa que tem havido uma maior confiabilidade

## CAPITULO 9 – CONCLUSÃO

Realizar a gestão adequada de uma indústria para prevenir acidentes de processo é de extrema importância para evitar a ocorrência de acidentes catastróficos. As empresas devem trabalhar para melhorar continuamente os seus processos, buscando reduzir e/ou eliminar perigos e riscos, pois isso trará cada vez mais a redução de consequências negativas, tais como: perdas humanas, impactos ao meio ambiente, danos ao patrimônio, repercussão negativa da imagem da empresa, etc.

Com o intuito de obter informações que ajudem na elaboração de um plano de inspeção mais assertivo, este trabalho objetivou usar a metodologia *fuzzy* de decisão, para listar em ordem decrescente os mecanismos de danos que mais podem causar impactos negativos na integridade de tubulações e equipamentos estacionários. Essa informação é muito importante se quisermos gerenciar os riscos de uma planta de processo localizada em uma unidade flutuante, produzindo e armazenando petróleo.

A hierarquização mostrou os indicadores (mecanismos de danos) que mais impactam a integridade de tubulações e equipamentos no FPSO usado como referência, demonstrando consenso com os resultados de perda de espessura levantados durante as campanhas de inspeção. Com este resultado, é possível priorizar que equipamentos devem ter sua manutenção preventiva realizada.

Com a realização desta análise crítica, é possível que sejam tomadas decisões assertivas, capazes de ter o melhor plano de inspeção, promovendo a preservação da vida, propriedade, meio ambiente, sociedade, imagem e negócios, etc.

O desenvolvimento deste trabalho constata a necessidade da utilização de ferramentas que possam melhorar os dados que servem como base da elaboração de um plano de inspeção. Após a comparação com o plano de inspeção da plataforma, verifica-se que o método usado realmente elimina subjetividades e imprecisões. Um outro ponto muito importante que deve ser ressaltado é que um trabalho como este não deve ser feito somente por uma pessoa, mas sim por uma equipe multidisciplinar, com experiência e conhecimento do assunto, para que os resultados obtidos reflitam o máximo possível a realidade do que acontece nas instalações fabris.

O desenvolvimento dessa dissertação com foco em obter uma lista em ordem decrescente dos principais mecanismos de danos em tubulações e equipamentos de um FPSO



permitiu o interesse em aprofundar o estudo no tema. Assim, são propostos os seguintes trabalhos:

- Aplicar o método *fuzzy* de decisão para sistemas específicos da plataforma de petróleo, como por exemplo: tubulações de água produzida ou tubulações de gás inerte;
- Aplicar o método *fuzzy* e desenvolver uma nova matriz de risco com o intuito de comparar os resultados do plano de inspeção elaborados pela matriz de risco da API 581 e pela matriz fuzzificada;

## CAPITULO 10 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Adam S. M.; Mannan M. S. **Fuzzy risk matrix**. Journal of Hazardous Materials 159 (2008) 152-157.

Beisl, Carlos Henrique. **Utilização de mosaicos JERS-1 SAR e de lógica fuzzy para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental temporal a derrames de óleo na Amazônia Central**. Rio de Janeiro, 2009. Tese de Doutorado, Programa de Pós -Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

BW Offshore. **MS-MP01637**: Corrosion Management. BWO, Singapore, 2015.

BW Offshore. **MS-MP01638**: Corrosion Management Strategy. BWO, Singapore, 2015

Chi-Hui Chien, Chun-Hung Chena, Yuh J. Chao. **A strategy for the risk-based inspection of pressure safety valves**. Reliability Engineering and System Safety 94 (2009) 810-818.

Det Norske Veritas. **Recommended Practice DNV-RP-G101**: Risk Bases Inspection of Offshore Topsides Static Mechanical Equipment. DNV, Norway, 2010.

Khan F.I., Sadiq R., Husain T. **Risk-based process safety assessment and control measures design for offshore process facilities**. J Hazard Mater. 2002 Sep 2; 94(1):1-36.

Fernandes, S. Z. **Análise da segurança de processo baseada em riscos no ciclo de vida das plataformas de petróleo**. Rio de Janeiro, 2018. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica & Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

CCPS. **Workshop sobre Noções de Segurança de Processo**. Rio de Janeiro, 2018.

GRECCO, C. H. S. **Avaliação da resiliência em organizações que lidam com tecnologias perigosas: o caso da expedição de radiofármacos**. 2012. 154 f. Tese (doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro.

*CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Guidelines for Process Safety Metrics*. AIChE, New York, 2010.

Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Observatório do Setor. **Número de Plataformas no Brasil**. Rio de Janeiro. Disponível em <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/numero-de-plataformas-no-brasil-jan-2019/>>. Acessado em : 14 de maio de 2019.

Kang Z., Menglan D., Xiaolan L., Guangxin H. **A fuzzy risk matrix method and its application to the installation operation of subsea collet connector**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 45 (2017) 147-159

Karl V. S. **Process safety improvement—Quality and target zero**. Journal of Hazardous Materials 159 (2008) 42-48.

Kazunari F., Satoshi N., Yasunari A., Toshihiro F., Kenichiro F., Shigeru M., Kentaro T., Taro K. **Risk-based inspection and maintenance systems for steam turbines**. International Journal of Pressure Vessels and Piping 81 (2004) 825-835.

Jacek S. **The simulation-fuzzy method of assessing the risk of air traffic accidents using the fuzzy risk matrix**. Safety Science 88 (2016) 76-87.

Inspeção de sistemas de tubulações— Rio de Janeiro: IBP, 2017. 68 p.; il. (**Guia de Inspeção**, n. 06).

Maneesh S., Marshal P. **A Fuzzy logic-possibilistic methodology for risk-based inspection (RBI) planning of oil and gas piping subjected to microbiologically influenced corrosion (MIC)**. International Journal of Pressure Vessels and Piping 159 (2018) 45-54

Mohammad R. S., Mohammad N. B., Seyed J. H., Elahe S. **Comparison of API 510 pressure vessels inspection planning with API 581 risk-based inspection planning approaches**. International Journal of Pressure Vessels and Piping 111-112 (2013) 202-208

Morim, A. C. D. L. **Abordagem Metodológica para Formação de Preço Aplicando Matriz de Sensibilidade Fuzzy**. 2014. 53 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Nabile H., Nigel B. **Correction of prediction model output for structural design and risk-based inspection and maintenance planning**. Ocean Engineering 97 (2015) 114-125.

Portela, G. **Gerenciamento de riscos na indústria de petróleo e gás: *offshore* e *onshore***. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

Santos, L. F. M. **Indicadores proativos de segurança de processo em instalações de armazenamento e transporte dutoviário de petróleo e derivados: construção de um painel de indicadores**. 2018. 320 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica & Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

VIANNA FILHO, A. M. **Análise da disponibilidade da instrumentação nuclear de um reator de pesquisa**. 2016. 133 f. Tese (doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012.

Wen-Kai K. H., Show-Hui S. H., Wen-Jui T. **Evaluating the risk of operational safety for dangerous goods in airfreights – A revised risk matrix based on fuzzy AHP**. *Transportation Research Part D* 48 (2016) 235-247.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

Instrumento de coleta de dados do especialista. Avaliador:

1) Marque seu cargo (nível de responsabilidade e atuação no plano de inspeção).

- |   |     |
|---|-----|
| <input type="checkbox"/> Responsável direto pelo planejamento | 1,0 |
| <input type="checkbox"/> Responsável pela verificação         | 0,8 |
| <input type="checkbox"/> Responsável pela execução            | 0,8 |
| <input type="checkbox"/> Responsável pelo <i>software</i>     | 0,5 |

2) Marque a melhor opção do seu grau de escolaridade.

- |  |     |
|--|-----|
| <input type="checkbox"/> Doutorado                           | 1,0 |
| <input type="checkbox"/> Mestrado                            | 0,8 |
| <input type="checkbox"/> Pós-Graduação Lato Sensu            | 0,6 |
| <input type="checkbox"/> Cursos de extensão (Especialização) | 0,4 |

3) Quantidade de artigos internacionais publicados relacionados à segurança de processo

- |                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <input type="checkbox"/> nenhum      | 0   |
| <input type="checkbox"/> até 2       | 0,5 |
| <input type="checkbox"/> de 3 a 7    | 0,9 |
| <input type="checkbox"/> maior que 7 | 1,0 |

4) Quantidade de artigos nacionais publicados relacionados à segurança de processo

- |                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <input type="checkbox"/> nenhum      | 0   |
| <input type="checkbox"/> até 2       | 0,4 |
| <input type="checkbox"/> de 3 a 7    | 0,8 |
| <input type="checkbox"/> maior que 7 | 1,0 |

5) Quantidade de relatórios técnicos relacionados à segurança de processo.

- |                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <input type="checkbox"/> nenhum      | 0   |
| <input type="checkbox"/> até 2       | 0,3 |
| <input type="checkbox"/> de 3 a 7    | 0,7 |
| <input type="checkbox"/> maior que 7 | 1,0 |

6) Quantidade de participações em eventos/congressos relacionados à segurança de processo.

- |                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <input type="checkbox"/> nenhuma     | 0   |
| <input type="checkbox"/> até 2       | 0,3 |
| <input type="checkbox"/> de 3 a 7    | 0,7 |
| <input type="checkbox"/> maior que 7 | 1,0 |

7) Quantidade de participações na elaboração de normas, procedimentos ou instruções relacionadas à segurança de processo.

- |                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <input type="checkbox"/> nenhuma     | 0   |
| <input type="checkbox"/> até 2       | 0,5 |
| <input type="checkbox"/> de 3 a 7    | 0,9 |
| <input type="checkbox"/> maior que 7 | 1,0 |

8) Quantos anos de experiência relacionados à segurança de processo?

- |                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| <input type="checkbox"/> nenhum     | 0   |
| <input type="checkbox"/> até 5      | 0,3 |
| <input type="checkbox"/> de 6 a 10  | 0,7 |
| <input type="checkbox"/> de 11 a 15 | 0,9 |
| <input type="checkbox"/> mais de 15 | 1,0 |

- 9) Como você classificaria seu entendimento relacionado à segurança do processo?
- |                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <input type="checkbox"/> excelente | 1,0 |
| <input type="checkbox"/> bom       | 0,9 |
| <input type="checkbox"/> médio     | 0,6 |
| <input type="checkbox"/> baixo     | 0,3 |
| <input type="checkbox"/> nenhum    | 0   |



## APÊNDICE B

### B.1 – Definição dos indicadores

Os indicadores preditivos a serem usados são os mecanismos de danos, que interferem no processo de inspeção de tubulações e equipamentos. Os parâmetros abaixo afetam a redução de espessura da tubulação e conseqüentemente interferem no plano de inspeção (programação).

- Corrosão de CO<sub>2</sub> (local / uniforme);
- corrosão externa – atmosférica;
- erosão de areia;
- MIC - corrosão micro biologicamente influenciada;
- SCC externo (cloreto);
- Corrosão do ponto de orvalho do gás de combustão;
- corrosão da água

A escolha desses indicadores se deve ao fato de que pelo histórico de inspeção na plataforma usada como referência, estes foram os mecanismos que mais causaram perda de espessura nas paredes de tubos e equipamentos. Devido a essa referência, o *software* usado pela empresa para rodar o RBI, apresenta somente estes 7 mecanismos disponíveis.

### B.2 – Seleção dos especialistas

Neste tópico, mostramos o perfil técnico e a experiência na área offshore de cada especialista escolhido.

- E1 - Gerente de Instalação Offshore – OIM (experiência de mais de 20 anos em gerenciamento de unidades marítimas, plataformas e embarcações);
- E2 - Gerente Técnico de Manutenção – TMM (experiência de mais de 10 anos na gestão de manutenção de áreas industriais);
- E3 - Engenheiro de Integridade – IE (experiência de mais de 20 anos com inspeção de equipamentos, ensaios e testes, planos de inspeção e recomendações técnicas);

• E4 - Gerente de HSE (profissional com mais de 17 anos de experiência na área de gestão de segurança, tendo trabalhado em várias áreas do setor de petróleo e gás, tais como: construção de módulos, instalação de dutos e equipamentos submarinos, operação de plataformas);

### B.3 – Determinação do grau de importância dos especialistas

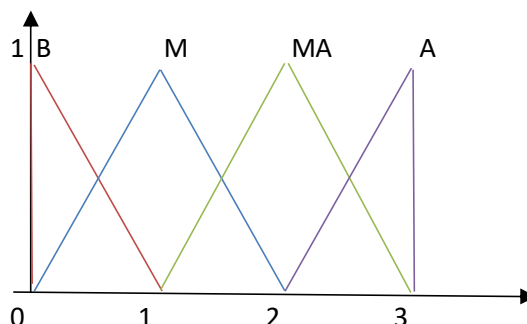
A tabela abaixo mostra o resultado do questionário (Apêndice A), que foi o instrumento usado como coleta de dados, para levantarmos o grau de importância de cada especialista, baseado em seu conhecimento e experiência.

Ei	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	tQi	GIEi
1	1	0,4	0	0	0,7	0,7	1	0,9	1	5,7	0,231
2	1	0,6	0	0	1	0,7	1	1	1	6,3	0,255
3	1	0,6	0	0	1	0,7	1	0,9	1	6,2	0,251
4	0,8	0,8	0,5	0,4	0,7	0,7	1	0,7	0,9	6,5	0,263
Total										24,7	1

### B.4 – Escolha dos termos linguísticos e funções de pertinência

A definição destes 4 termos linguísticos se baseia nas categorias de risco adotadas pela API RP 581. Além disso, o plano de inspeção no qual o trabalho se baseia utiliza esses 4 termos e para que a comparação seja coerente entre o resultado da lógica Fuzzy e o plano de inspeção, temos que comparar termos idênticos.

- Alto (A): para indicadores considerados muito importantes (têm grande influência);
- Médio-Alto (MA): para indicadores considerados importantes (têm influência);
- Médio (M): para indicadores que são considerados de menor importância (têm pouca influência);
- Baixo (B): para indicadores que não são considerados importantes / não têm influência.



### B.5 – Determinação de importância de cada indicador preditivo

A tabela abaixo mostra o resultado dos graus de importância de cada um dos indicadores, dados pelos especialistas. Cada indicador recebeu de cada especialista um termo linguístico, com o intuito de realizar uma priorização em termos de qual indicador seria mais crítico para a redução de espessura de parede, e com mais força para causar degradação, o que consequentemente é o mesmo que dizer que seria os mecanismos que mais impacta na segurança dos ativos.

Indicador	E1	E2	E3	E4
Erosão por areia	B	B	B	B
Corrosão de CO <sub>2</sub>	A	MA	MA	A
MIC	M	B	M	M
SCC externo	B	M	M	B
Corrosão externa - atmosférica	MA	M	M	MA
Corrosão do ponto de orvalho	M	M	M	A
corrão pela água	A	M	M	MA

### B.6- Tratamento dos dados coletados dos especialistas

No item 7.1.7, mostramos os cálculos da avaliação do indicador “corrosão externa”, para ilustrar a sequência da metodologia *fuzzy*. Agora neste tópico, mostraremos os cálculos para os demais mecanismos de danos, na mesma sequência anteriormente desenvolvida.

Com o intuito de facilitar o entendimento, cada indicador terá seus cálculos sinalizados com cores específicas, como apresentado na legenda abaixo:

Indicadores
Corrosão por CO <sub>2</sub>
Corrosão externa
Erosão por areia
MIC
SCC externa
Corrosão do ponto de orvalho
Corrosão por água

### B.6.1 Cálculo do grau de concordância entre opiniões

Este grau de concordância é calculado pela razão entre a área de interseção ( $A_i$ ) e área de União ( $A_u$ ).

#### CO2 corrosão

Especialistas	Termos	Números fuzzy N	Área de N
1	A	(2,3,3)	0,5
2	MA	(1,2,3)	1
3	MA	(1,2,3)	1
4	A	(2,3,3)	0,5

#### valores da área de interseção

opiniões	A	MA	MA	A
A	0,5	0,25	0,25	0,5
MA	0,25	1	1	0,25
MA	0,25	1	1	0,25
A	0,5	0,25	0,25	0,5

#### valores da área de união

opiniões	A	MA	MA	A
A	0,5	1,25	1,25	0,5
MA	1,25	1	1	1,25
MA	1,25	1	1	1,25
A	0,5	1,25	1,25	0,5

Resultado:

1	0,2	0,2	1
0,2	1	1	0,2
0,2	1	1	0,2
1	0,2	0,2	1

## corrosão externa

Especialistas	Termos	Números fuzzy N	Área de N
1	MA	(1,2,3)	1
2	M	(0,1,2)	1
3	M	(0,1,2)	1
4	MA	(1,2,3)	1

## valores da área de interseção

opiniões	MA	M	M	MA
MA	1	0,25	0,25	1
M	0,25	1	1	0,25
M	0,25	1	1	0,25
MA	1	0,25	0,25	1

## valores da área de união

opiniões	MA	M	M	MA
MA	1	1,75	1,75	1
M	1,75	1	1	1,75
M	1,75	1	1	1,75
MA	1	1,75	1,75	1

Resultado:

1	0,14285714	0,14285714	1
0,14285714	1	1	0,14285714
0,14285714	1	1	0,14285714
1	0,14285714	0,14285714	1

## Erosão por areia

Especialistas	Termos	Números fuzzy N	Área de N
1	B	(0,0,1)	0,5
2	B	(0,0,1)	0,5
3	B	(0,0,1)	0,5
4	B	(0,0,1)	0,5

## Erosão por areia

opiniões	B	B	B	B
B	0,5	0,5	0,5	0,5
B	0,5	0,5	0,5	0,5
B	0,5	0,5	0,5	0,5
B	0,5	0,5	0,5	0,5

## Erosão por areia

opiniões	B	B	B	B
B	0,5	0,5	0,5	0,5
B	0,5	0,5	0,5	0,5
B	0,5	0,5	0,5	0,5
B	0,5	0,5	0,5	0,5

Resultado:

1	1	1	1
1	1	1	1
1	1	1	1
1	1	1	1

## MIC

Especialistas	Termos	Números fuzzy N	Área de N
1	M	(0,1,2)	1
2	B	(0,0,1)	0,5
3	M	(0,1,2)	0,5
4	M	(0,1,2)	0,5

## MIC

opiniões	M	B	M	M
M	1	0,25	1	1
B	0,25	0,5	0,25	0,25
M	1	0,25	1	1
M	1	0,25	1	1

## MIC

opiniões	M	B	M	M
M	1	1,25	1	1
B	1,25	0,5	1,25	1,25
M	1	1,25	1	1
M	1	1,25	1	1

Resultado:

1	0,2	1	1
0,2	1	0,2	0,2
1	0,2	1	1
1	0,2	1	1

## External SCC

Especialistas	Termos	Números fuzzy N	Área de N
1	B	(0,0,1)	0,5
2	M	(0,1,2)	1
3	M	(0,1,2)	1
4	B	(0,0,1)	0,5

## External SCC

opiniões	B	M	M	B
B	0,5	0,25	0,25	0,5
M	0,25	1	1	0,25
M	0,25	1	1	0,25
B	0,5	0,25	0,25	0,5

## External SCC

opiniões	B	M	M	B
B	0,5	1,25	1,25	0,5
M	1,25	1	1	1,25
M	1,25	1	1	1,25
B	0,5	1,25	1,25	0,5

Resultado:

1	0,2	0,2	1
0,2	1	1	0,2
0,2	1	1	0,2
1	0,2	0,2	1



Corrosão do ponto de orvalho

Especialistas	Termos	Números fuzzy N	Área de N
1	M	(0,1,2)	1
2	M	(0,1,2)	1
3	M	(0,1,2)	1
4	A	(2,3,3)	0,5

Corrosão do ponto de orvalho

opiniões	M	M	M	A
M	1	1	1	0
M	1	1	1	0
M	1	1	1	0
A	0	0	0	0,5

Corrosão do ponto de orvalho

opiniões	M	M	M	A
M	1	1	1	1,5
M	1	1	1	1,5
M	1	1	1	1,5
A	1,5	1,5	1,5	0,5

Resultado:

1	1	1	0
1	1	1	0
1	1	1	0
0	0	0	1

## corrosão por água

Especialistas	Termos	Números fuzzy N	Área de N
1	A	(2,3,3)	0,5
2	M	(0,1,2)	1
3	M	(0,1,2)	1
4	MA	(1,2,3)	1

## corrosão por água

opiniões	A	M	M	MA
A	0,5	0	0	0,25
M	0	1	1	0,25
M	0	1	1	0,25
MA	0,25	0,25	0,25	1

## corrosão por água

opiniões	A	M	M	MA
A	0,5	1,5	1,5	1,25
M	1,5	1	1	1,75
M	1,5	1	1	1,75
MA	1,2	1	1	1

Resultado:

1	0	0	0,2
0	1	1	0,142857
0	1	1	0,142857
0,2	0,25	0,25	1

### B.6.2 Construção da matriz de concordância

A matriz de concordância é obtida combinando todos os graus de concordância entre cada par de especialistas. Como selecionamos 4 especialistas, a matriz de concordância será uma matriz simétrica de 4 linhas e 4 colunas, com todos os elementos de sua diagonal iguais a 1.

matriz de concordância –  
Corrosão por CO2

1	0,2	0,2	1
0,2	1	1	0,2
0,2	1	1	0,2
1	0,2	0,2	1

matriz de  
concordância –  
Corrosão externa

1	0,142857	0,142857	1
0,14285714	1	1	0,142857
0,14285714	1	1	0,142857
1	0,142857	0,142857	1

matriz de  
concordância –  
Erosão por areia

1	1	1	1
1	1	1	1
1	1	1	1
1	1	1	1

matriz de concordância  
- MIC

1	0,2	1	1
0,2	1	0,2	0,2
1	0,2	1	1
1	0,2	1	1

matriz de concordância  
– SCC externa

1	0,2	0,2	1
0,2	1	1	0,2
0,2	1	1	0,2
1	0,2	0,2	1

matriz de concordância  
– Corrosão do ponto de  
orvalho

1	1	1	0
1	1	1	0
1	1	1	0
0	0	0	1

matriz de concordância  
– Corrosão por água

1	0	0	0,2
0	1	1	0,142857
0	1	1	0,142857
0,2	0,25	0,25	1

### B.6.3 Cálculo da concordância relativa

A concordância relativa é calcula conforme a fórmula 7.3, e os resultados para cada indicador são:

Concordância relativa – Corrosão por CO2	
especialistas	Cri
1	0,832666
2	0,832666
3	0,832666
4	0,832666
Total	3,330666

Concordância relativa – Corrosão externa	
especialistas	Cri
1	0,824786
2	0,824786
3	0,824786
4	0,824786
Total	3,299144

Concordância relativa – Erosão por areia	
especialistas	Cri
1	1,154701
2	1,154701
3	1,154701
4	1,154701
Total	4,618802

Concordância relativa - MIC	
especialistas	Cri
1	1,006645
2	0,61101
3	1,006645
4	1,006645
Total	3,630944

Concordância relativa –  
SCC externa

especialistas	Cri
1	0,832666
2	0,832666
3	0,832666
4	0,832666
Total	3,330666

Concordância relativa –  
Corrosão do ponto de  
orvalho

especialistas	Cri
1	1
2	1
3	1
4	0,57735
Total	3,57735

Concordância relativa –  
Corrosão por água

especialistas	Cri
1	0,588784
2	0,820652
3	0,820652
4	0,623164
Total	2,853252

### B.6.4 Cálculo do grau de concordância relativa

O grau de concordância relativa é calculado conforme a fórmula 7.4, e os resultados para cada indicador são:

#### Grau de Concordância relativa – Corrosão por CO<sub>2</sub>

especialistas	GCRk
1	0,25
2	0,25
3	0,25
4	0,25

#### Grau de Concordância relativa – Corrosão externa

especialistas	GCRk
1	0,25
2	0,25
3	0,25
4	0,25

#### Grau de Concordância relativa – Erosão por areia

especialistas	GCRk
1	0,25
2	0,25
3	0,25
4	0,25

#### Grau de Concordância relativa - MIC

especialistas	GCRk
1	0,27724
2	0,168279
3	0,27724
4	0,27724

Grau de Concordância  
relativa – SCC externa

especialistas	GCRk
1	0,25
2	0,25
3	0,25
4	0,25

Grau de Concordância  
relativa – Corrosão do  
ponto de orvalho

especialistas	GCRk
1	0,279537
2	0,279537
3	0,279537
4	0,16139

Grau de Concordância  
relativa – Corrosão por  
água

especialistas	GCRk
1	0,206355
2	0,28762
3	0,28762
4	0,218405



### B.6.5 Cálculo do coeficiente de consenso dos especialistas

O coeficiente de consenso é calculo conforme a fórmula 7.5, e os resultados para cada indicador são:

Coeficiente de consenso -  
Corrosão por CO2

especialistas	CCEk
1	0,230769
2	0,255061
3	0,251012
4	0,263158

Coeficiente de consenso  
– Corrosão externa

especialistas	CCEk
1	0,230769
2	0,255061
3	0,251012
4	0,263158

Coeficiente de  
consenso – Erosão por  
areia

especialistas	CCEk
1	0,230769
2	0,255061
3	0,251012
4	0,263158

Coeficiente de consenso  
- MIC

especialistas	CCEk
1	0,25648
2	0,172065
3	0,278978
4	0,292477

Coeficiente de consenso  
– SCC externa

especialistas	CCEk
1	0,230769
2	0,255061
3	0,251012
4	0,263158

Coeficiente de  
consenso – Corrosão do  
ponto de orvalho

especialistas	CCEk
1	0,259648
2	0,28698
3	0,282424
4	0,170948

Coeficiente de consenso  
– Corrosão por água

especialistas	CCEk
1	0,189986
2	0,292679
3	0,288033
4	0,229302

### B.6.6 Determinação do valor *fuzzy*

O cálculo do valor *fuzzy* é obtido através da fórmula 7.6. Abaixo temos os valores *fuzzy* para cada indicador.

Corrosão por CO<sub>2</sub>

N=	1,493927	2,493927	3
----	----------	----------	---

Corrosão externa

N=	0,493927	1,493927	2,493927
----	----------	----------	----------

Erosão por areia

N=	0	0	1
----	---	---	---

MIC

N=	0	0,827935	1,827935
----	---	----------	----------

SCC externa

N=	0	0,506073	1,506073
----	---	----------	----------

Corrosão do ponto de orvalho

N=	0,341895	1,341895	2,170948
----	----------	----------	----------

Corrosão por água

N=	0,609275	1,609275	2,419288
----	----------	----------	----------

B.7 Tabela com os valores *fuzzy* de todos os indicadores

Indicadores	Números <i>Fuzzy</i>			GII
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
CO2 Corrosão	1,493927	2,493927	3	1
corrosão externa	0,493927	1,493927	2,493927	0,599026
erosão por areia	0	0	1	0
MIC	0	0,827935	1,827935	0,331981
external SCC	0	0,506073	1,506073	0,202922
Corrosão do ponto de orvalho	0	0,506073	1,506073	0,202922
corrosão por água	0,609275	1,609275	2,419288	0,645277

valores em ordem decrescente

Indicadores	GII
CO2 Corrosão	1
corrosão por água	0,645277333
corrosão externa	0,599025974
MIC	0,331980608
external SCC	0,202922078
Corrosão do ponto de orvalho	0,202922078
erosão por areia	0