

APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NA QUANTIFICAÇÃO DA PROBABILIDADE DE EMISSÃO DE ENERGIA DE IGNIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS INSTALADOS EM ÁREAS CLASSIFICADAS NAS PLATAFORMAS DE PERFURAÇÃO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO.

Rafael Augusto Delgado Silvestre (UFF) - rafaads@me.com

Carlos Frederico de Oliveira Barros (UFF) – carlosfredericobarros@gmail.com

Resumo

O objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia de confiabilidade *fuzzy* com a finalidade de quantificar a probabilidade de emissão de energia de ignição dos equipamentos elétricos comumente instalados em áreas classificadas nas plataformas de perfuração *offshore* na indústria do petróleo. Nesta pesquisa, a lógica *fuzzy* proveu um método de traduzir expressões verbais, vagas, qualitativas e imprecisas, comuns na comunicação humana, em uma representação formal, estruturada e lógica do conhecimento implícito na avaliação de especialistas sobre situações potenciais de emissão de energia de ignição causadas por equipamentos elétricos desconformes às normas técnicas.

O objetivo geral da pesquisa foi atingido, visto que a utilização da metodologia contribui na quantificação da probabilidade de emissão de energia de ignição e permite que gestores e equipe de manutenção priorizem os equipamentos desconformes com maior probabilidade de ignizar uma atmosfera explosiva.

Palavras-chave: Atmosferas explosivas; Lógica Fuzzy; Probabilidade de ignição.

1. Introdução

A análise, avaliação e gerenciamento de riscos industriais são imprescindíveis nos processos e atividades das empresas modernas e devem estar diretamente relacionados com a gestão estratégica visando a continuidade sustentável do negócio. Não há negócio ou atividade sem riscos.

O controle dos riscos nas atividades industriais é um grande desafio. No contexto das atividades industriais, a indústria do petróleo possui um elevado potencial para ocorrência de consequências indesejáveis para a sociedade, tais como incêndios, explosões e impactos ambientais. A incidência e o aumento no número de acidentes, associados aos impactos significativos aos trabalhadores e ao meio ambiente, afetado por esses eventos, tem despertado um aumento de planejamento e investimentos em ações preventivas e corretivas, como por exemplo, os Programas de Análise de Riscos, incluindo auditorias de campo. (OLIVEIRA, 2012).

Sociedades modernas contam com grandes plantas químicas e petrolíferas para a produção de energia e materiais a serem transformados em alimentos, drogas e componentes de bens de consumo. Mas estas plantas podem ser perigosas de operar. Um fato que em 6 de julho de 1988, um vazamento de condensado de gás gerou uma grande explosão sobre a plataforma de Piper Alpha ocasionando um incêndio e impossibilitando o acesso ao centro de comunicação. 167 colaboradores foram a óbito e 62 sobreviveram. (PAULA, 2013).

O acidente narrado acima e outros de igual característica tiveram em comum acidentes iniciados por falhas de processo, em quase sua totalidade proveniente de erros humanos, onde ocorreram vazamento indesejados de hidrocarbonetos que geraram um ambiente de atmosfera explosiva. Bastou esta atmosfera explosiva encontrar uma fonte de ignição, geralmente um equipamento elétrico energizado, para ocorrer a primeira explosão e assim desencadear uma incontrolável reação em cadeia de explosões, vindo a causar verdadeiras catástrofes humanas, patrimoniais e ambientais.

Segundo Bossert (2001), acidentes ocorridos em várias partes do mundo, e em várias épocas da era industrial, tiveram como origem um equipamento elétrico indevidamente especificado, instalado ou malconservado, para operar em uma área cuja presença de substâncias inflamáveis no ambiente criava condições especiais para sua ocorrência.

Toda organização cujas instalações produzem, transformam, manipulam, utilizam, descartam ou armazenam de uma maneira permanente ou transitória, uma ou várias substâncias classificadas como perigosas, deve definir como um dos objetivos de sua gestão, a redução de acidentes que ameaçam o ambiente, a segurança e a saúde dos trabalhadores e comunidades do entorno.

As plantas industriais de exploração e produção de petróleo utilizam equipamentos elétricos em suas instalações, muitas das vezes em áreas onde há riscos de formação de atmosferas explosivas, provenientes principalmente dos hidrocarbonetos que são produzidos ou explorados

por plataformas de petróleo. Estes equipamentos elétricos devem atender aos requisitos de normas especializadas em proteção contra explosão, no tocante ao projeto, fabricação, instalação, operação e manutenção. Fato é que estes equipamentos muitas vezes são encontrados nas instalações fora de conformidade com os requisitos de segurança, o que ocasiona riscos de se tornarem uma fonte de ignição para uma atmosfera potencialmente explosiva.

A análise das causas de acidentes envolvendo explosões devido a vazamentos de hidrocarbonetos é muitas vezes difícil de se concluir, devido principalmente ao fato de que a fonte de ignição inicializadora da explosão fica totalmente destruída após o acidente e não se percebe qual fragilidade este componente apresentava antes da ignição e, conseqüentemente, da explosão. Soma-se a isto, o fato da dificuldade em registrar o histórico de falhas dos equipamentos elétricos utilizados em atmosferas explosivas, o que aumenta a variabilidade estocástica e dificulta a análise da confiabilidade da forma tradicional.

Segundo Donghan e Won (2000), o tratamento de informações incertas induzidas por especialistas tem sido um assunto de crescente interesse entre vários pesquisadores nos últimos anos. Em particular, a opinião de especialistas desempenha um papel importante na avaliação de probabilidades relacionadas a fenômenos físicos complicados na avaliação de segurança probabilística, como frequências sísmicas ou a ocorrência de explosões devido a gases e vapores de hidrocarbonetos. Em termos aproximados, existem três questões básicas a serem consideradas no tratamento da opinião de especialistas:

- a) como representar a informação incerta induzida por especialistas;
- b) como combinar a informação incerta obtida de diferentes especialistas; e
- c) como propagar a informação através de um sistema.

Zadeh (1965) introduziu a teoria do conjunto difuso em seu trabalho pioneiro, onde argumentou que a teoria da probabilidade tradicional, por si só, é insuficiente para caracterizar todos os tipos de incerteza associados às conceituações humanas do mundo real.

A teoria dos conjuntos difusos é especialmente concebida para fornecer uma linguagem com sintaxe e semântica para traduzir conhecimentos / julgamentos qualitativos em raciocínio numérico e para capturar incertezas subjetivas e vagas (ABRAHAMSSON, 2002). Chen (1994) apresentou um método para analisar a confiabilidade de sistemas difusos usando operações aritméticas com números triangulares *fuzzy*.

1.1. Objetivos

Identificar os principais equipamentos elétricos e componentes instalados em áreas classificadas em que não estejam em conformidade com os requisitos de segurança, de forma a permitir uma priorização de ações corretivas para a equipe de manutenção. Para isto, utilizou-se a teoria de conjuntos *fuzzy* para agregar opiniões individuais de especialistas por consenso e importância.

1.2. Delimitação

No presente trabalho as principais suposições são feitas:

- a) Somente os equipamentos elétricos instalados e seus componentes são considerados como fonte de ignição na hipótese de inflamar uma atmosfera potencialmente explosiva. Qualquer outro elemento do sistema não é considerado como fonte de ignição, tais como trabalhos à quente, reações pirofóricas e vasos pressurizados;
- b) A área de abrangência desta pesquisa limita-se às instalações de campo usuais em plataformas de perfuração de óleo e gás em operação *offshore* na indústria do petróleo.

2. Aplicação da metodologia

Primeira etapa:

➤ Escolha dos termos linguísticos para avaliar as probabilidades de geração de energia de ignição de cada equipamento em função da situação de não conformidade encontrada nas auditorias de segurança.

Foram escolhidos sete termos que definem a incerteza da variável linguística “probabilidade de ignição”, conforme avaliação da situação de cada equipamento: *zero (Z)*, *muito baixa (MB)*, *baixa (B)*, *moderada (M)*, *alta (A)*, *muito alta (MA)* e *certeza (C)*. A representação destes termos linguísticos e seus respectivos números *fuzzy* estão descritos na Tabela 1. Os termos linguísticos utilizados neste trabalho e seus respectivos números *fuzzy* são do tipo normais triangulares positivos.

Tabela 1 – Números *fuzzy* triangulares (a; m; b).

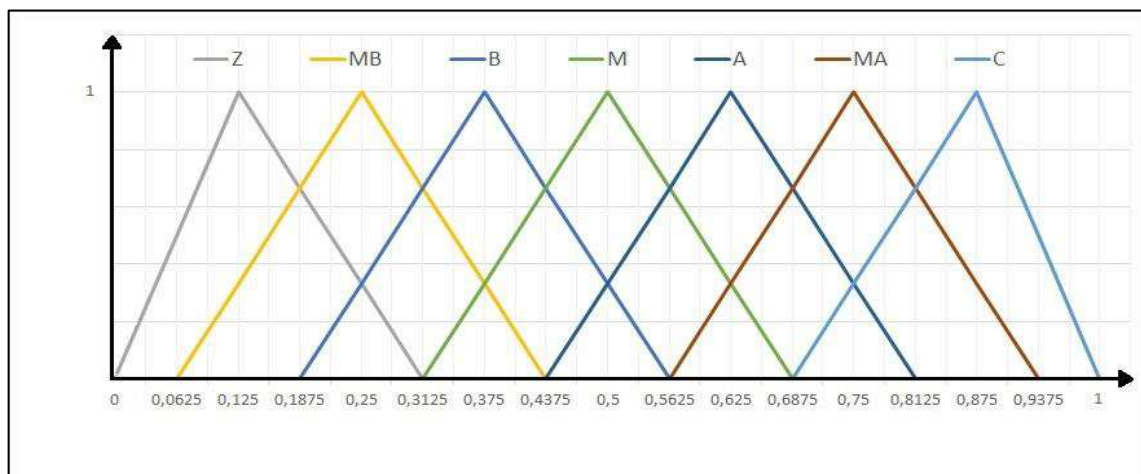
Termo linguístico	Simbologia	Número fuzzy		
		a	m	b
Zero	Z	0	0,125	0,3125
Muito Baixa	MB	0,0625	0,25	0,4375
Baixa	B	0,1875	0,375	0,5625
Moderada	M	0,3125	0,5	0,6875
Alta	A	0,4375	0,625	0,8125
Muito Alta	MA	0,5625	0,75	0,9375
Certeza	C	0,6875	0,875	1

Fonte: O Autor

Segunda etapa:

- As funções de pertinência dos termos *fuzzy* são representados por números *fuzzy* triangulares. A Figura 1 mostra a representação dos números fuzzy.

Figura 1 – Representação das funções de pertinência



Fonte: Autor.

Terceira etapa:

- Escolha dos especialistas.

A teoria dos conjuntos *fuzzy* permite representar o conhecimento elicitado por meio de funções de pertinências. É possível construir um modelo *fuzzy* com ajuda de um especialista, mas se for possível elicitar o conhecimento de mais especialistas e ao mesmo tempo que sejam de alto nível de hierarquia, o modelo heurístico ganharia em precisão.

Foram escolhidos um total de 11 especialistas que atuaram ou atuam na área de engenharia, operação, manutenção, pesquisa, ou fiscalização na disciplina de Classificação de Áreas, dentre engenheiros, consultores e técnicos que trabalham na empresa Petrobras no ramo de óleo e gás. Como base teórica, considera-se:

$E = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_m\}$ o conjunto de especialistas, onde $m = 11$.

Quarta etapa:

➤ Elaborar o questionário e determinar o grau de importância de cada especialista.

O questionário contempla as situações mais comuns de erros e não-conformidades encontradas em auditorias de campo nas plataformas de perfuração para os equipamentos elétricos e componentes instalados em áreas classificadas. O guia corporativo da Petrobras **Instruções gerais para instalações em atmosferas explosivas / Instru-Ex** (2002) e a norma **ABNT NBR IEC 60079-17 - Inspeção e manutenção de instalações elétricas** (2014) foram utilizados como referência.

O guia corporativo da Petrobras **Instruções gerais para instalações em atmosferas explosivas / Instru-Ex** (2002) apresenta os erros mais comuns encontrados em equipamentos e nas instalações para atmosferas explosivas, com o objetivo de subsidiar roteiro de inspeção;

A norma **ABNT NBR IEC 60079-17 - Inspeção e manutenção de instalações elétricas** (2014) apresenta recomendações relacionadas à inspeção e manutenção de instalações elétricas em áreas classificadas, incluindo uma lista de programa de inspeção para instalações Ex-d, Ex-e, Ex-n, Ex-p e Ex-i.

As situações escolhidas de não-conformidade dos equipamento e componentes elétricos para estudo deste trabalho é um compilamento dos dados de auditorias de campo nas plataformas de perfuração no ramo de óleo e gás nos últimos doze anos, no guia corporativo da Petrobras Instru-Ex e na norma ABNT de inspeção e manutenção. Estas situações contemplam 95% das situações de não-conformidade encontradas nas auditorias de segurança de campo em atmosferas explosivas nas plataformas de perfuração no ramo de óleo e gás no período de 2005 a 2017. A Tabela 2 apresenta as principais situações de não-conformidade destes equipamentos e componentes elétricos. Os equipamentos e componentes elétricos estão organizados por categorias de aplicação e tipos de proteção (geral, cabos elétricos, Ex-d, Ex-p, Ex-e, Ex-n e Ex-m q). Esta tabela faz parte do questionário apresentado aos especialistas.

Tabela 2 –situações de não-conformidades

Situação
1. Geral
1.1 Conexões de aterramento frouxas ou inexistentes.
1.2 Uso de prensa-cabo do tipo à prova de tempo (não do tipo “Ex”).
1.3 Luminária com lâmpada diferente do especificado e aprovado.
1.4 Lâmpadas fluorescentes ou de descarga estão apresentando os efeitos de EOL (End of Life).
1.5 O equipamento não está apropriado para os requisitos de EPL ou Zona do local da instalação.
1.6 O grupo do equipamento não está correto.
1.7 A classe de temperatura do equipamento não está correta.
1.8 O grau de proteção (Código IP) do equipamento não é apropriado para o nível de proteção.
1.9 Os dispositivos automáticos de proteção elétrica não operam dentro dos limites permitidos.
1.10 Existe acúmulo indevido de poeira ou sujeira.
1.11 O isolamento elétrico não está limpo e seco.
2. Cabos elétricos
2.1 Emenda em cabos elétricos dentro de Áreas Classificadas.
2.2 Cabos com isolamento avariado e reconstituído.
2.3 Pontas de cabo soltas ou não (mal) isoladas, função desconhecida, circuitos desfeitos e abandonados.
2.4 Cabos de instalações provisórias sem proteção.
3. Ex-d
3.1 Falta de parafuso ou parafusos frouxos em tampas de invólucros à prova de explosão.
3.2 Dimensões dos interstícios acima do máximo permitido em invólucros à prova de explosão (flangeado).
3.3 Borracha de silicone no interstício de invólucros à prova de explosão.
3.4 Corrosão acentuada nas juntas flangeadas de invólucros à prova de explosão.
3.5 Unidade seladora faltando massa seladora.
3.6 Falta de unidades seladoras ou aplicadas de forma irregular.
3.7 Uso de prensa-cabo de bitola inadequada (cabo folgado permitindo passagem de ar).
3.8 Vedação de tampa ou conexão de eletrodutos, com menos de 5 fios rosqueados, em invólucros à prova de explosão.
3.9 Furo de entrada reserva em invólucro à prova de explosão – sem o bujão adequado para vedação.
3.10 Painéis/Caixas de junção do tipo à prova de explosão, com cabo removido e prensa-cabo com furo
3.11 Caixas do tipo à prova de explosão (Ex-d) com juntas flangeadas pintadas.
3.12 Caixas do tipo à prova de explosão (Ex-d) furadas para instalação de cabo de aterramento.
4. Ex-p
4.1 Equipamento Ex-p pressurizado por ar-comprimado, saturados de água ou óleo arrastado pela linha de ar.
4.2 Equipamento Ex-p sem pressurização ou desregulado.
4.3 Equipamento Ex-p sem placa de aviso para manter pressurizado.
4.4 Alarmes de equipamento pressurizado (Ex-p) desativado ou removido.
4.5 Os dutos, tubos e invólucros não estão em boas condições.
5. Ex-e
5.1 As conexões elétricas não estão apertadas.
6. Ex-n
6.1 Invólucros de respiração restrita não estão satisfatórios.
7. Ex-m,q
7.1 Dispositivos de manobra encapsulados ou dispositivos selados hermeticamente apresentam danos.

Fonte: O Autor

Para se ter uma indicação da importância relativa de cada especialista, foi utilizado um Questionário de Identificação do Perfil de Especialista (QIPE) com o objetivo de avaliar cada especialista e determinar o peso do especialista. A Tabela 3 apresenta as opções de preenchimento pelos especialistas e o respectivo peso de cada opção. O cálculo dos pesos de cada especialista é utilizado no método de agregação das opiniões dos especialistas.

Tabela 3 – Questionário de Identificação de Perfil do Especialista.

Questão
Marque sua experiência de atuação na área de Atmosferas Explosivas.
Já participou de treinamentos em Atmosferas Explosivas? Quantos?
Já ministrou cursos em Atmosferas Explosivas? Quantos?
Já participou de auditorias de campo em Atmosferas Explosivas? Quantos?
Marque a opção que melhor classificaria seu grau de escolaridade
Como você classificaria seu entendimento sobre Atmosferas Explosivas?

Fonte: O Autor

Quinta etapa:

➤ Levantamento dos julgamentos subjetivos dos especialistas em termos linguísticos sobre as probabilidades de emissão de energia de ignição de cada equipamento em função da situação de não conformidade encontrada nas auditorias de segurança.

Foi realizado um levantamento de opiniões *fuzzy* com os especialistas com relação às probabilidades de emissão de energia de ignição de cada equipamento elétrico em função da situação de não conformidade encontrada nas auditorias de segurança.

Para responder o questionário, cada especialista classificou (assinalar com X) com as seguintes opções:

Z	quando julgar que a probabilidade de ignição seja zero ;	+	0%
MB	quando julgar que a probabilidade de ignição seja muito baixa ;	+	
B	quando julgar que a probabilidade de ignição seja baixa ;	+	
M	quando julgar que a probabilidade de ignição seja moderada ;	+	50%
A	quando julgar que a probabilidade de ignição seja alta ;	+	
MA	quando julgar que a probabilidade de ignição seja muito alta ;	+	
C	quando julgar que a probabilidade de ignição seja certeza ;	+	100%

Sexta etapa:

- Transformar as expressões linguísticas em números *fuzzy*.
- Agregar as opiniões dos especialistas através do método proposto por Hsu e Chen (1996).

A Tabela 4 apresenta os termos linguísticos utilizados na pesquisa e os respectivos números *fuzzy* normais triangulares positivos, referentes à variável linguística “probabilidade de emissão de energia de ignição”. O processo de conversão das opiniões *fuzzy* dos especialistas num formato numérico usando números *fuzzy* é chamado de *fuzzificação*.

Tabela 4 – Números *fuzzy* triangulares (a; m; b) para termos linguísticos representando a variável “probabilidade de emissão de energia de ignição”.

Termo linguístico	Simbologia	Número <i>fuzzy</i>		
		a	m	b
Zero	Z	0	0,125	0,3125
Muito Baixa	MB	0,0625	0,25	0,4375
Baixa	B	0,1875	0,375	0,5625
Moderada	M	0,3125	0,5	0,6875
Alta	A	0,4375	0,625	0,8125
Muito Alta	MA	0,5625	0,75	0,9375
Certeza	C	0,6875	0,875	1

Fonte: O Autor

O método utilizado para agregar as opiniões dos especialistas foi o proposto por Hsu e Chen (1996).

A combinação dos prognósticos individuais é feita a partir de uma função *fuzzy* específica envolvendo um cálculo do grau de concordância entre opiniões, a geração de uma matriz de concordância (MC), a determinação do grau de concordância relativa (GCR), o cálculo do coeficiente de grau de consenso (CGC) dos especialistas e a determinação do valor *fuzzy* de cada variável linguística.

Segue a sequência do método utilizado neste trabalho:

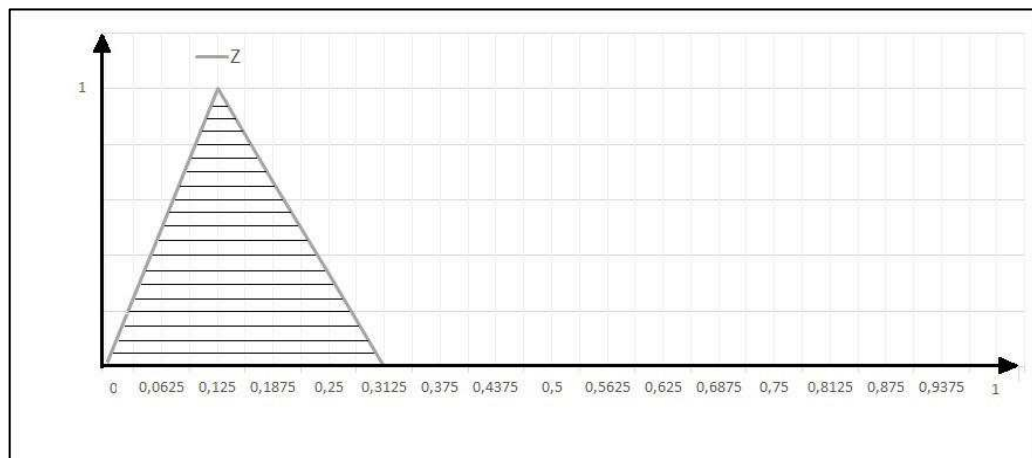
1. Cálculo da área das opiniões (números) *fuzzy*.

É calculada a área de cada número *fuzzy* correspondente ao seu termo linguístico. Por exemplo, a área do número *fuzzy* triangular que representa o termo linguístico “Zero” (0 ; 0,125 ; 0,3125) é:

$$\text{Área de “Zero”} = \frac{(0,3125 - 0) \times 1}{2} = 0,156$$

A Figura 2 visualiza a região hachurada da área deste número *fuzzy*.

Figura 2 – Representação da área do número *fuzzy* Z.



Fonte: Autor.

A Tabela 5 ilustra as áreas dos números *fuzzy*.

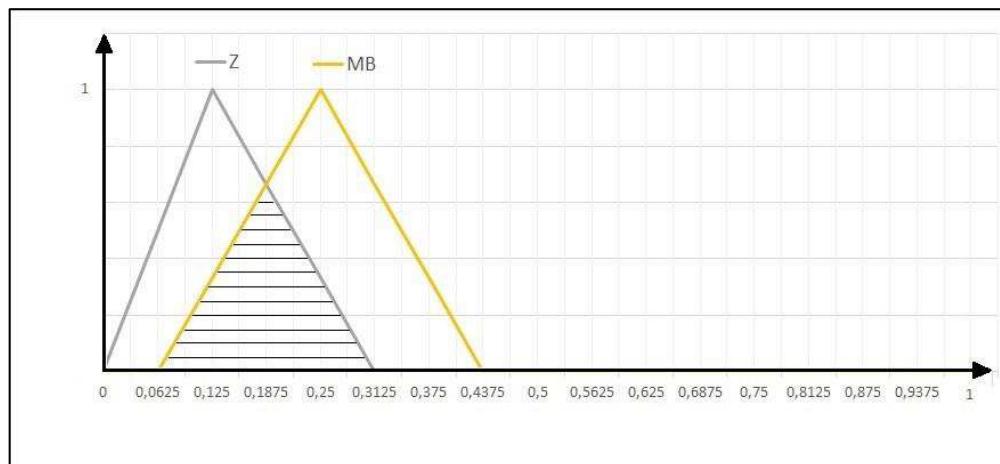
Tabela 5 – Matriz de números *fuzzy* e a áreas dos números *fuzzy*.

Termo linguístico	Simbologia	Número fuzzy			Área do número fuzzy
		a	m	b	
Zero	Z	0	0,125	0,3125	0,156
Muito Baixa	MB	0,0625	0,25	0,4375	0,188
Baixa	B	0,1875	0,375	0,5625	0,188
Moderada	M	0,3125	0,5	0,6875	0,188
Alta	A	0,4375	0,625	0,8125	0,188
Muito Alta	MA	0,5625	0,75	0,9375	0,188
Certeza	C	0,6875	0,875	1	0,156

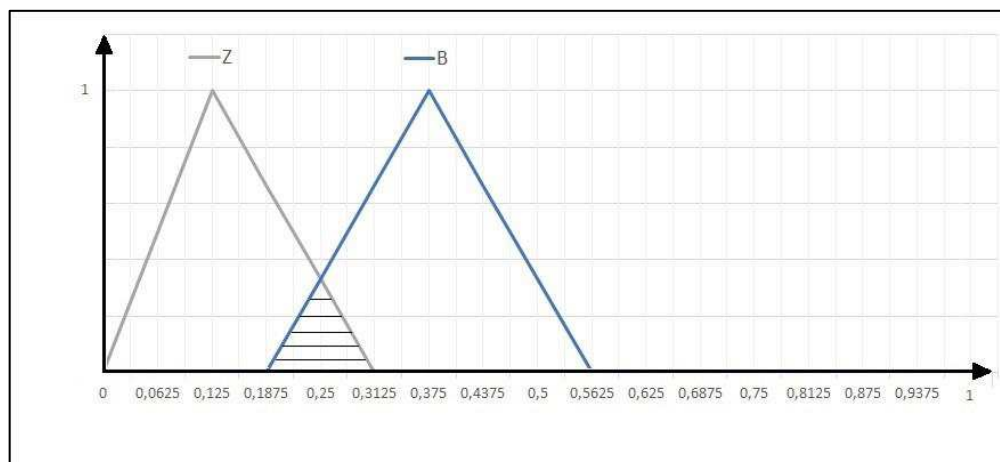
Fonte: O Autor

2. Cálculo da área de interseção de cada dois termos linguístico fuzzy (matriz de interseção).

$$\text{Área de interseção (AI) de dois termos linguísticos fuzzy} = \int_x \min\{\mu_{R_i}(x), \mu_{R_j}(x)\} dx$$

Figura 3 – Representação da área de interseção dos números *fuzzy* Z e MB.

Fonte: Autor.

Figura 4 – Representação da área de interseção dos números *fuzzy* Z e B.

Fonte: Autor.

A Figura 3 e Figura 4 representam a área de interseção dos números *fuzzy* Z e MB e Z e B, respectivamente.

Na Tabela 6 é apresentada a área de interseção entre cada dois termos linguísticos *fuzzy*.

Tabela 6 – Matriz de interseção dos números *fuzzy*.

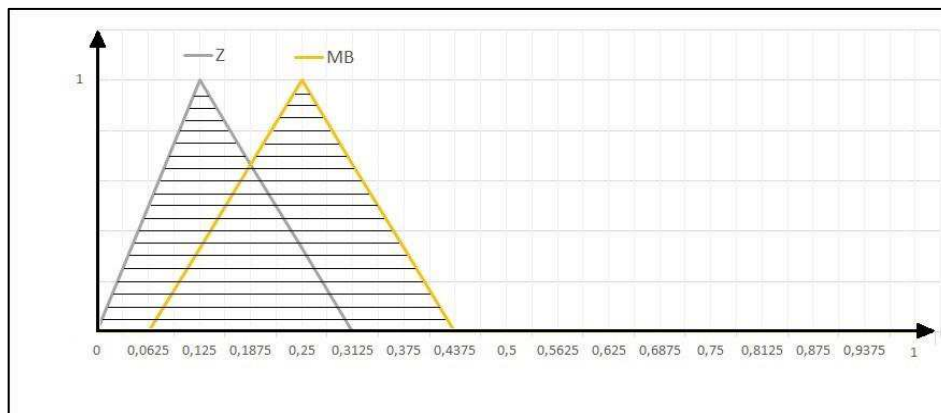
Matriz de interseção							
	Z	MB	B	M	A	MA	C
Z	0,156	0,083	0,021	0	0	0	0
MB	0,083	0,188	0,083	0,021	0	0	0
B	0,021	0,083	0,188	0,083	0,021	0	0
M	0	0,021	0,083	0,188	0,083	0,021	0
A	0	0	0,021	0,083	0,188	0,083	0,021
MA	0	0	0	0,021	0,083	0,188	0,083
C	0	0	0	0	0,021	0,083	0,156

Fonte: O Autor

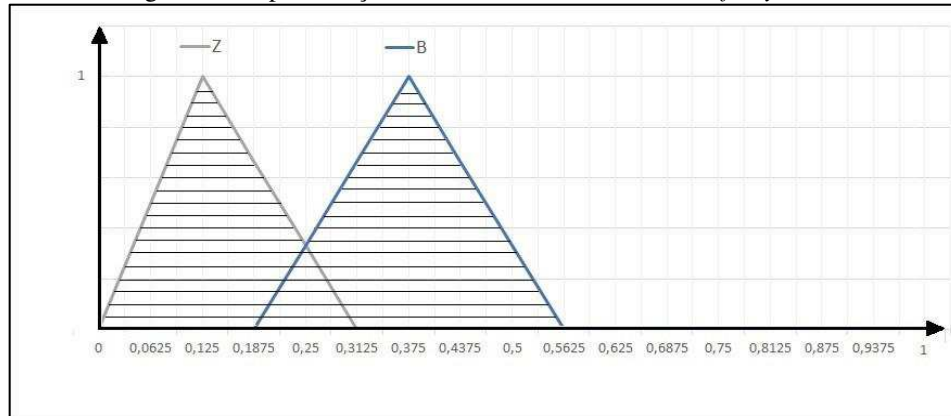
3. Cálculo da área total de cada dois termos linguístico fuzzy (matriz de união).

$$\text{Área Total (AT) de dois termos linguísticos fuzzy} = \int_x \max\{\mu_{R_i}(x), \mu_{R_j}(x)\} dx$$

Figura 5 – Representação da área de união dos números *fuzzy* Z e MB.



Fonte: Autor.

Figura 6 – Representação da área de união dos números *fuzzy* Z e B.

Fonte: Autor.

A Figura 5 e a Figura 6 representam a área de união dos números *fuzzy* Z e MB e Z e B, respectivamente.

Na Tabela 7 é apresentada a área de união entre cada dois termos linguísticos *fuzzy*.

Tabela 7 – Matriz de união dos números *fuzzy*.

Matriz de união							
	Z	MB	B	M	A	MA	C
Z	0,156	0,260	0,323	0,344	0,344	0,344	0,313
MB	0,260	0,188	0,292	0,354	0,375	0,375	0,344
B	0,323	0,292	0,188	0,292	0,354	0,375	0,344
M	0,344	0,354	0,292	0,188	0,292	0,354	0,344
A	0,344	0,375	0,354	0,292	0,188	0,292	0,323
MA	0,344	0,375	0,375	0,354	0,292	0,188	0,260
C	0,313	0,344	0,344	0,344	0,323	0,260	0,156

Fonte: O Autor

4. Cálculo da matriz função medida de similaridade de cada dois termos linguísticos *fuzzy*.

A função medida de similaridade entre cada dois termos linguísticos *fuzzy* é calculada pela seguinte equação:

$$S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j) = \frac{AI}{AT} = \frac{\int_x (\min\{\mu_{\tilde{R}_i}(x), \mu_{\tilde{R}_j}(x)\}) dx}{\int_x (\max\{\mu_{\tilde{R}_i}(x), \mu_{\tilde{R}_j}(x)\}) dx}$$

Assim, na Tabela 8 é apresentada a função medida de similaridade entre cada dois termos linguísticos *fuzzy*.

Tabela 8 – Matriz função de similaridade de opiniões *fuzzy*.

Matriz função de similaridade							
	Z	MB	B	M	A	MA	C
Z	1	0,32	0,065	0	0	0	0
MB	0,32	1	0,286	0,059	0	0	0
B	0,065	0,286	1	0,286	0,059	0	0
M	0	0,059	0,286	1	0,286	0,059	0
A	0	0	0,059	0,286	1	0,286	0,065
MA	0	0	0	0,059	0,286	1	0,32
C	0	0	0	0	0,065	0,32	1

Fonte: O Autor

5. Cálculo da Matriz de Concordância (MC) de opiniões *fuzzy*.

Depois que definidos os graus de concordância (função medida de similaridade) entre cada dois termos linguísticos *fuzzy*, pode-se construir a Matriz de Concordância (MC) de opiniões *fuzzy* entre os n especialistas:

$$MC = \begin{bmatrix} 1 & S_{12} & \cdots & S_{1j} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{i1} & S_{i2} & \cdots & S_{ij} & \cdots & S_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nj} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Exemplo.

Para exemplificar esta etapa e as etapas posteriores, será considerada a situação de não conformidade do item 1.1 – “Conexões de aterramento frouxas ou inexistentes” para os cálculos de avaliação.

A Tabela 9 mostra o resultado do cálculo dos graus de concordância entre os especialistas que geram a matriz de concordância correspondente ao item 1.1.

Tabela 9 – Matriz de concordância (*MC*) de opiniões *fuzzy* da situação de não conformidade do item 1.1 – “Conexões de aterramento frouxas ou inexistentes”.

Matriz de concordância (<i>MC</i>) de opiniões <i>fuzzy</i> do item 1.1												
Especialista / Avaliação		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11
		B	Z	MA	MA	MA	MA	MB	M	Z	A	B
E1	B	1	0,065	0	0	0	0	0,286	0,286	0,065	0,059	1
E2	Z	0,065	1	0	0	0	0	0,32	0	1	0	0,065
E3	MA	0	0	1	1	1	1	0	0,059	0	0,286	0
E4	MA	0	0	1	1	1	1	0	0,059	0	0,286	0
E5	MA	0	0	1	1	1	1	0	0,059	0	0,286	0
E6	MA	0	0	1	1	1	1	0	0,059	0	0,286	0
E7	MB	0,286	0,32	0	0	0	0	1	0,059	0,32	0	0,286
E8	M	0,286	0	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	1	0	0,286	0,286
E9	Z	0,065	1	0	0	0	0	0,32	0	1	0	0,065
E10	A	0,059	0	0,286	0,286	0,286	0,286	0	0,286	0	1	0,059
E11	B	1	0,065	0	0	0	0	0,286	0,286	0,065	0,059	1

Fonte: O Autor

6. Cálculo do grau de concordância relativa (GCR) de cada especialista.

Inicialmente calcula-se o grau de concordância médio do especialista E_i ($i=1, 2, \dots, n$):

$$M(E_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n S_{ij}$$

Em seguida, calcula-se o grau de concordância relativa (*GCR*) do especialista E_i ($i=1, 2, \dots, n$) utilizando a seguinte equação:

$$GCR_i = \frac{M(E_i)}{\sum_{i=1}^n M(E_i)}$$

O grau de concordância relativa, GCR_i , de cada especialista, em relação aos demais especialistas, foi obtido pela média ponderada de $M(E_i)$ de cada especialista.

A Tabela 10 mostra o resultado do grau de concordância relativa de cada especialista para a situação “Conexões de aterramento frouxas ou inexistentes”.

Tabela 10 – Grau de concordância média $M(E_i)$ e grau de concordância relativa GCR_i de cada especialista para a situação “Conexões de aterramento frouxas ou inexistentes”.

Especialista	$M(E_i)$	GCR_i
E1	0,176	0,074
E2	0,138	0,058
E3	0,334	0,141
E4	0,334	0,141
E5	0,334	0,141
E6	0,334	0,141
E7	0,127	0,054
E8	0,115	0,049
E9	0,145	0,061
E10	0,155	0,065
E11	0,176	0,074

Fonte: O Autor

7. Cálculo do coeficiente de grau de consenso de cada especialista (CGCi) de cada especialista.

O coeficiente de grau de consenso ($CGCi$) de cada especialista considera tanto o grau de concordância relativa GCR_i , quanto o peso do especialista w_i . A partir do Questionário de Identificação do Perfil de Especialista (QIPE), calculou-se o peso de cada especialista, conforme Tabela 11.

Define-se o grau de importância w_i como:

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, i = 1, 2, \dots, n.$$

Onde r_i é o peso relativo do i -ésimo especialista. O especialista mais importante é atribuído peso um.

Tabela 11 – Resultado do Questionário de Identificação do Perfil de Especialista (QIPE).

Especialista	Resultado do QIPE de cada especialista							w_i
	Experiência	Treinamentos	Docência	Auditorias	Escolaridade	Entendimento	r_i	
E1	1	0,4	0,3	0,4	0,8	0,8	0,76	0,086
E2	0,8	0,7	0,3	0,4	1	0,8	0,82	0,093
E3	0,5	0,7	0,3	0,4	1	0,8	0,76	0,086
E4	0,8	0,4	0,3	1	0,8	0,8	0,84	0,095
E5	1	1	0,3	1	0,8	0,8	1,00	0,114
E6	0,5	0,4	0,3	0,4	1	0,5	0,63	0,072
E7	1	0,4	0,3	0	1	0,5	0,65	0,074
E8	1	0,7	0,3	0	1	0,8	0,78	0,088
E9	1	0,7	0,3	1	0,4	0,8	0,86	0,098
E10	0,8	0,4	0,3	0,7	1	0,8	0,82	0,093
E11	0,8	0,7	0,3	0,7	1	0,8	0,88	0,100

Fonte: O Autor

Define-se coeficiente de grau de consenso (CGC_i) de cada especialista como:

$$CGC_i = \beta \bullet w_i + (1 - \beta) \bullet GCR_i$$

Onde $0 \leq \beta \leq 1$.

Neste trabalho foi escolhido o valor de β igual a 0,4, pois o grau de concordância dos especialistas foi considerado mais importante que o grau de importância dos especialistas.

Assim, a Tabela 12 apresenta o resultado do cálculo do coeficiente de grau de consenso (CGC_i) de cada especialista, para a situação “Conexões de aterramento frouxas ou inexistentes”.

Tabela 12 – Coeficiente de grau de consenso (CGC_i) de cada especialista para a situação “Conexões de aterramento frouxas ou inexistentes”.

Especialista	β	CGC_i
E1	0,4	0,079
E2	0,4	0,072
E3	0,4	0,119
E4	0,4	0,123
E5	0,4	0,130
E6	0,4	0,114
E7	0,4	0,062
E8	0,4	0,064
E9	0,4	0,076
E10	0,4	0,076
E11	0,4	0,085

Fonte: O Autor

8. Resultado da agregação.

Seja $\tilde{R}$ um número *fuzzy* "global" de opiniões de especialistas combinados. Pela definição do coeficiente de grau de consenso do especialista E_i ($i=1, 2, \dots, n$), o resultado da agregação $\tilde{R}$ pode ser definido como:

$$\tilde{R} = \sum_{i=1}^n (CGC_i \otimes \tilde{R}_i),$$

Onde $\otimes$ é o operador multiplicação *fuzzy*, conforme descrito por Kauffman e Gupta (1985). $\tilde{R}_i$ é o número *fuzzy* (a, m, b) proveniente da avaliação linguística feita pelos especialistas.

Assim, resultado da agregação $\tilde{R}$, em função dos coeficientes de grau de consenso (CGC_i) dos onze especialistas e dos números *fuzzy* (a, m, b) provenientes dos termos linguístico avaliados pelos especialistas para a situação de não conformidade do item 1.1 “Conexões de aterramento frouxas ou inexistentes”, conforme representados na Tabela 13, é calculado por:

$$\tilde{R} = \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} (0,079 \times 0,1875) + (0,072 \times 0) + (0,119 \times 0,5625) + (0,123 \times 0,5625) + (0,130 \times 0,5625) + \\ + (0,114 \times 0,5625) + (0,062 \times 0,0625) + (0,064 \times 0,3125) + (0,076 \times 0) + (0,076 \times 0,4375) + \\ + (0,085 \times 0,1875) \end{array} \right]; \\ \left[\begin{array}{l} (0,079 \times 0,375) + (0,072 \times 0,125) + (0,119 \times 0,75) + (0,123 \times 0,75) + (0,130 \times 0,75) + \\ + (0,114 \times 0,75) + (0,062 \times 0,25) + (0,064 \times 0,5) + (0,076 \times 0,125) + (0,076 \times 0,625) + \\ + (0,085 \times 0,375) \end{array} \right]; \\ \left[\begin{array}{l} (0,079 \times 0,5625) + (0,072 \times 0,3125) + (0,119 \times 0,9375) + (0,123 \times 0,9375) + (0,130 \times 0,9375) + \\ + (0,114 \times 0,9375) + (0,062 \times 0,4375) + (0,064 \times 0,6875) + (0,076 \times 0,3125) + (0,076 \times 0,8125) + \\ + (0,085 \times 0,5625) \end{array} \right]; \end{array} \right\}$$

$$\tilde{R} = (0,361 ; 0,540 ; 0,727)$$

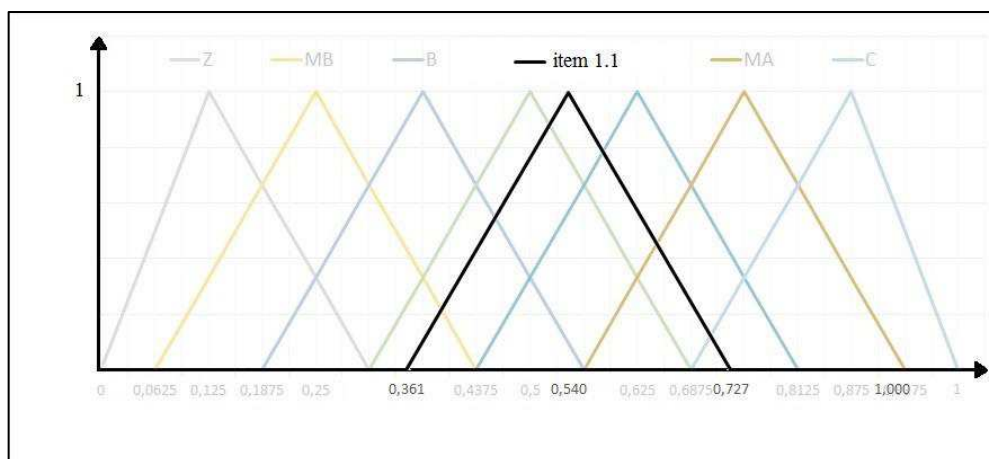
Este número *fuzzy*, que também é triangular, é representado na Figura 7.

Tabela 13 – Números *fuzzy* e coeficiente de grau de consenso (CGC_i) de cada especialista para a situação “Conexões de aterramento frouxas ou inexistentes”.

Especialista	Termo linguístico	Número <i>fuzzy</i>			CGC _i
		a	m	b	
E1	B	0,1875	0,375	0,5625	0,079
E2	Z	0	0,125	0,3125	0,072
E3	MA	0,5625	0,75	0,9375	0,119
E4	MA	0,5625	0,75	0,9375	0,123
E5	MA	0,5625	0,75	0,9375	0,130
E6	MA	0,5625	0,75	0,9375	0,114
E7	MB	0,0625	0,25	0,4375	0,062
E8	M	0,3125	0,5	0,6875	0,064
E9	Z	0	0,125	0,3125	0,076
E10	A	0,4375	0,625	0,8125	0,076
E11	B	0,1875	0,375	0,5625	0,085

Fonte: O Autor

Figura 7 – Representação do número *fuzzy* resultado de agregação das opiniões para o item 1.1 “Conexões de aterramento frouxas ou inexistentes”.



Fonte: Autor.

Os resultados de agregação de todas as situações de não conformidade dos equipamento elétricos e componentes da variável linguística "probabilidade de emissão de energia de ignição" foram calculados seguindo as etapas descritas até este momento e estão representados na Tabela 14.

Tabela 14 – Representação da agregação *fuzzy* das situações de não conformidade e *defuzzificação*.

Item	Números <i>Fuzzy</i>			Defuzzificação
	a	m	b	
1.1	0,361	0,540	0,727	0,543
1.2	0,272	0,459	0,639	0,457
1.3	0,450	0,638	0,821	0,636
1.4	0,243	0,427	0,615	0,428
1.5	0,543	0,731	0,902	0,725
1.6	0,479	0,666	0,844	0,663
1.7	0,563	0,750	0,911	0,741
1.8	0,390	0,578	0,755	0,574
1.9	0,370	0,558	0,745	0,558
1.10	0,219	0,406	0,594	0,406
1.11	0,275	0,459	0,647	0,460
2.1	0,294	0,482	0,666	0,481
2.2	0,254	0,442	0,629	0,442
2.3	0,428	0,616	0,787	0,610
2.4	0,420	0,608	0,795	0,608
3.1	0,564	0,752	0,905	0,740
3.2	0,613	0,801	0,940	0,785
3.3	0,451	0,639	0,823	0,638
3.4	0,502	0,690	0,867	0,687
3.5	0,542	0,730	0,908	0,727
3.6	0,542	0,730	0,908	0,727
3.7	0,555	0,743	0,914	0,737
3.8	0,480	0,668	0,846	0,665
3.9	0,575	0,762	0,926	0,754
3.10	0,601	0,789	0,945	0,778
3.11	0,468	0,656	0,839	0,655
3.12	0,570	0,758	0,920	0,749
4.1	0,326	0,513	0,701	0,513
4.2	0,615	0,803	0,950	0,789
4.3	0,253	0,437	0,621	0,437
4.4	0,426	0,614	0,797	0,612
4.5	0,397	0,584	0,768	0,583
5.1	0,367	0,555	0,733	0,552
6.1	0,436	0,623	0,799	0,619
7.1	0,494	0,682	0,859	0,678

Fonte: O Autor

Para obter-se um único valor numérico discreto (*crisp*) que melhor represente os valores *fuzzy* inferidos para cada item, utiliza-se o método chamado de *defuzzificação*.

Um dos métodos de *defuzzificação* mais utilizados na literatura é Centro de Gravidade, conhecido também como COG (Center of Gravity). Para números *fuzzy* do tipo triangular, uma maneira de calcular o centro de gravidade é pelo método analítico das coordenadas medianas.

Assim, a *defuzzificação* dos itens foram calculados e representados na Tabela 14.

Desta forma obteve-se a probabilidade de emissão de energia de ignição para cada situação de não conformidade dos equipamentos elétricos e componentes encontrados usualmente em áreas classificadas nas plataformas de perfuração *offshore* no ramo de óleo e gás.

Esses valores de probabilidade podem ser utilizados para ranquear as situações de não conformidade encontradas em auditorias de segurança de campo visando aplicar maior penalidade nas situações de maior probabilidade de emissão de energia de ignição, da mesma forma que a equipe de manutenção deve priorizar o ajuste das pendências de não conformidade dos equipamentos e componentes elétricos de maior probabilidade de emissão de energia de ignição.

3. Conclusão

Neste trabalho foi proposta a utilização de uma metodologia de confiabilidade *fuzzy* com a finalidade de quantificar a probabilidade de emissão de energia de ignição dos equipamentos elétricos comumente instalados em áreas classificadas nas plataformas de perfuração *offshore* na indústria do petróleo.

A metodologia foi delineada com a definição dos termos linguísticos e representação das funções de pertinência das variáveis linguísticas *fuzzy* e, levantamento e agregação dos julgamentos dos especialistas. Essa abordagem permitiu tratar, de forma matemática, medidas subjetivas sujeitas a incertezas, obtidas a partir de opiniões de especialistas e previsões.

Nesta pesquisa, a lógica *fuzzy* proveu um método de traduzir expressões verbais, vagas, qualitativas e imprecisas, comuns na comunicação humana, em uma representação formal, estruturada e lógica do conhecimento implícito na avaliação de especialistas sobre situações potenciais de emissão de energia de ignição causadas por equipamentos elétricos desconformes às normas técnicas.

Foi verificado que os itens que apresentam maior probabilidade de emissão de energia de ignição são aqueles em que há deficiência no principal requisito técnico de supressão do risco de cada tipo de proteção Ex, como por exemplo, equipamento Ex-p sem pressurização ou

equipamentos Ex-d sem capacidade de resistir à explosão interna por causa da ineficiência de seus interstícios de segurança.

REFERÊNCIAS

ABRAHAMSSON, M. **Uncertainty in quantitative risk analysis**: characterisation and methods of treatment. 2002. 88 f. Tese (Fire Safety Engineering and Systems Safety), Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 60079-17**: Atmosferas explosivas - Parte 17: Inspeção e manutenção de instalações elétricas, Rio de Janeiro, 2014.

BOSSERT, John A. **Hazardous locations**: A Guide for the Design, Construction and Installation of Equipment in Explosive Atmospheres, 3. ed., Toronto: Canadian Standards Association, 2001. 157 p.

CHEN S., Fuzzy system reliability analysis using fuzzy number arithmetic operations. **Fuzzy sets and Systems**, vol. 64, 1994, pp 31-38

DONGHAN, YU; WON, S. P. Combination and evaluation of expert opinions characterized in terms of fuzzy probabilities. **Annal of Nuclear Energy**, n. 27, p.713-726, 2000.

HIS-MEI-HSU; CHEN-TUNG-CHEN, Aggregation of fuzzy opinions under group decision making. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 79, p. 279-285., 1996.

KAUFMANN, A., GUPTA, M. M., **Introduction to fuzzy arithmetic: theory and applications**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1985.

OLIVEIRA, M. V. **Confiabilidade humana aplicada no processo de retirada de emergência em um terminal petrolífero aquaviário**. Dissertação (Mestrado) – UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

PAULA, Sergio Roberto de. **Caso 019:O fim da Piper Alpha**. 2013. Disponível em: <<http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2013/06/caso-019-o-fim-da-piper-alpha-1988.html>>. Acesso em: 31 de ago. 2017.

SUZUKI, Hélio Kanji; OLIVEIRA, Roberto Gomes. **Instruções gerais para instalações em atmosferas explosivas** (Instru-Ex), 2. Ed. [Apostila interna]. Petrobrás, 2002.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.