

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de **P&D** em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



AVALIAÇÃO DE RISCO: UMA ABORDAGEM BASEADA NA TEORIA DOS CONJUNTOS
FUZZY

Pedro Henrique Sousa Prado¹, Leonardo Vasconcelos Fregolente², Adilson Pires Afonso¹.

¹Departamento de Engenharia de Processos (DEPro), Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP.

²Departamento de Desenvolvimento de Processos e Produtos (DDPP), Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP.

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

AVALIAÇÃO DE RISCO: UMA ABORDAGEM BASEADA NA TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY

Abstract

Our history shows that negligence in safety assessments techniques of industry have been the causes of many accidents with numerous fatalities and severe damage to the environment. The leaking of methyl isocyanate gas in Bophal (1984), the nuclear accident in Chernobyl (1986) and the leakage of more than 3 million barrels of crude oil into the Gulf of Mexico (2010) are proof that the carelessness of companies regarding industrial safety can have a high price for our society. Risk assessment plays an important role in process safety as it provides a basis for proposing measures to reduce and mitigate scenarios that can cause harm to people, the environment and property. A common practice in the chemical and petrochemical industry is to define industrial risk in a qualitative way, which is composed of categories of the frequency of occurrence of a dangerous event and the severity of its consequence. Commonly, a risk matrix is used to illustrate the relationship between the categories with the actual level of risk in a process. However, we know that purely qualitative evaluations of the industrial risk create some imprecision and uncertainties, since the categories of severity and frequency are subjective and are stated in terms of linguistic variables. This may undermine the implementation of measures to increase safety, because the risk could be underestimated or overestimated in the safety process evaluation. In parallel, Fuzzy theory has been presenting good results in engineering applications model and manipulate mathematically linguistic concepts that may be vague and imprecise. In this work we use Fuzzy theory that, through the Fuzzification, Inference and Defuzzification processes, is able to mathematically manipulate the linguistic terms of severity and frequency in the calculation of the level of risk. The risk obtained with the Fuzzy theory is more sophisticated because, through the pertinence functions of Fuzzy sets, it is possible to incorporate quantitative data of the failure rate of equipment and systems in the calculation of the risk. In addition, when compared to the results obtained by the conventional risk matrix, the Fuzzy-Risk presents minor inaccuracies and uncertainties.

Introdução

A avaliação de riscos tem papel fundamental no projeto, na construção e operação das plantas industriais. O uso das técnicas de avaliação de risco permite a identificação e redução dos eventos perigosos presentes nas unidades de processo, ou seja, situações com o potencial de causar danos à vida humana, ao meio ambiente e ao patrimônio das empresas (LEES, 2012).

O risco pode ser definido como uma combinação da frequência de ocorrência e severidade da consequência de um acidente. A frequência de ocorrência de um evento, seja ele perigoso ou não, é determinada pela chance ou probabilidade de ocorrência deste evento em um dado período de tempo, que pode ser anos, meses ou tempo operacional acumulado da planta industrial. Já a severidade é a medida de como o cenário incidental impacta recursos humanos, materiais e/ou ambientais, expressada sob a forma de danos a saúde, impactos ao meio ambiente e perdas econômicas (RAUSAND, 2011).

Uma prática comum no setor industrial baseia-se na obtenção do nível de risco de maneira qualitativa. Neste caso, a avaliação de risco é realizada por uma matriz de risco criada a partir de diversas categorias do grau de severidade e da frequência do evento perigoso. Tais categorias, que usualmente são expressões verbais de magnitude, classificam os níveis de riscos às pessoas, ao meio ambiente e ao patrimônio/continuidade operacional. Exemplos de categorias de frequência, severidade e matriz de risco são apresentadas respectivamente nas tabelas 1 e 2, e figura 1.

Tabela 1 - Categorias de Frequência. Adaptado de Rausand (2011).

Categoria	Frequência (por ano)	Descrição
1 - Frequente	1 a 10^{-1}	Esperado ocorrer com frequência durante a vida útil da instalação
2 - Provável	10^{-1} a 10^{-2}	Esperado ocorrer mais de 1 vez durante a vida útil da instalação
3 - Pouco Provável	10^{-2} a 10^{-3}	Possível ocorrer até 1 vez durante a vida útil da instalação
4 - Remoto	10^{-3} a 10^{-4}	Não esperado ocorrer durante a vida útil da instalação, apesar de haver referências históricas
5 - Ext. Remoto	10^{-4} a 10^{-5}	Extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil da instalação. Sem referências históricas

Tabela 2 - Categorias de Severidade. Adaptado de Rausand (2011).

Categoria	Tipo da consequência		
	Pessoas	Meio Ambiente	Patrimônio
1-Desprezível	Acidente sem afastamento ou incidente	Pequeno dano ao meio ambiente	Pequeno danos com consequências econômicas desprezíveis
2-Marginal	Acidente com afastamento, período maior 15 dias	Dano local ao meio ambiente. Duração menor que 01 mês	Pequeno dano ao sistema. Pequena influência na produção
3-Média	Acidente com afastamento, período menor que 15 dias	Tempo para reconstrução dos recursos ecológicos ≤ 2 anos	Considerável dano ao sistema. Produção interrompida por semanas
4-Crítica	Incapacitação parcial ou de lenta reversão	Tempo para reconstrução recursos ecológicos 2 a 5 anos	Perca de grande parte do sistema. Produção interrompida por meses
5-Catastrófica	Incapacitação total definitiva ou acidente fatal	Tempo para reconstrução dos recursos ecológicos ≥ 5 anos	Perca total do sistema e grande dano as áreas externas ao sistema

Figura 1 – Matriz de risco convencional (a) e categorias de risco (b). Adaptado de Rausand (2011).

		Categorias de frequência				
		A Extremamente remota	B Remota	C Pouco provável	D Provável	E Frequente
Categorias de Severidade das Consequências	V Catastrófica	M	M	NT	NT	NT
	IV Crítica	T	M	M	NT	NT
	III Média	T	T	M	M	NT
	II Marginal	T	T	T	M	M
	I Desprezível	T	T	T	T	M

a)

Categoria de Risco	Descrição do controle necessário
Tolerável (T)	Não há necessidade de medidas adicionais. A monitoração é necessária para assegurar que os controles sejam mantidos.
Moderado (M)	Medidas adicionais devem ser avaliadas com o objetivo de obter-se uma redução dos riscos e implementadas aquelas consideradas praticáveis.
Não tolerável (NT)	Os controles existentes são insuficientes. Métodos alternativos devem ser considerados para reduzir a probabilidade de ocorrência ou a severidade do risco.

b)

Entretanto, por se tratar de uma avaliação qualitativa, os resultados obtidos com o uso da matriz de risco convencional podem apresentar grande incerteza, uma vez que depende fortemente da experiência e conhecimento prévio do profissional de segurança a cerca do sistema avaliado.

Resultados equivocados na avaliação do risco dos processos industriais podem trazer diversas consequências negativas ao projeto e operação de uma planta. A superestimação do risco faz com que medidas para prevenção e/ou mitigação sejam implementadas, o que aumenta os custos na construção e operação das plantas industriais. Por outro lado, caso seja subestimado, pode colocar a vida de pessoas e equipamentos a um risco intolerável, que será mascarado pelos resultados incorretos das técnicas de avaliação de risco. Sendo assim, o setor industrial tem apresentado um esforço contínuo no desenvolvimento de novas metodologias e procedimentos que possam reduzir as incertezas e melhorar os resultados da avaliação do risco industrial.

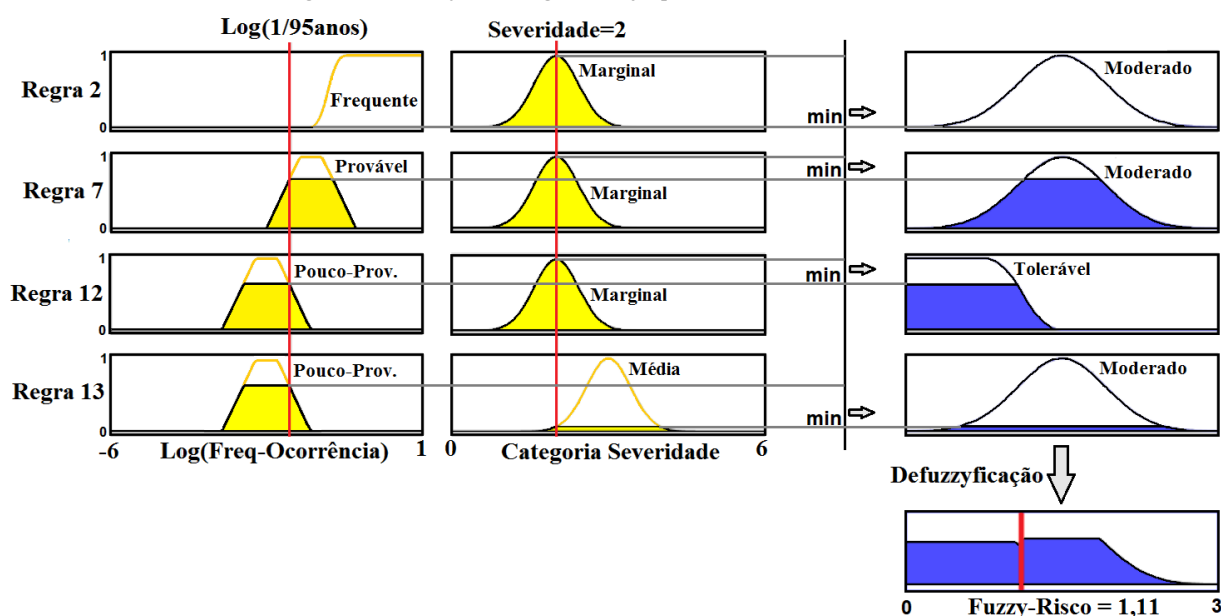
Paralelamente, nas últimas décadas evidenciou-se um grande crescimento da utilização de técnicas de Inteligência Artificial em problemas de engenharia que possuem alto grau de incertezas e subjetividade. A Lógica *Fuzzy* ou Lógica Nebulosa, uma das áreas da inteligência artificial proposta por Zadeh em 1965, nos fornece um método em que é possível traduzir expressões verbais qualitativas, vagas e imprecisas em valores numéricos e, portanto, permite a modelagem do raciocínio humano de forma estruturada e de fácil manipulação. Diferentemente da lógica clássica, que é bivalente e atribui apenas os valores de verdadeiro e falso, a Lógica Nebulosa é multivalente e capaz de reconhecer uma multitude de valores, criando um grau de certeza no intervalo de $[0,1]$ (ZADEH, 1965; SHAW & SIMÕES, 2007).

Diante disso, neste trabalho utilizou-se a teoria dos conjuntos *Fuzzy* para o cálculo dos níveis de risco industrial, uma vez que o uso da Lógica Nebulosa permite a manipulação numérica das categorias qualitativas de frequência e severidade. Ainda, o uso dos conjuntos *Fuzzy* permite que se calcule o risco de maneira semi-quantitativa, uma vez que é possível inserir as taxas de falhas de equipamentos e sistemas no cálculo do risco industrial.

Metodologia

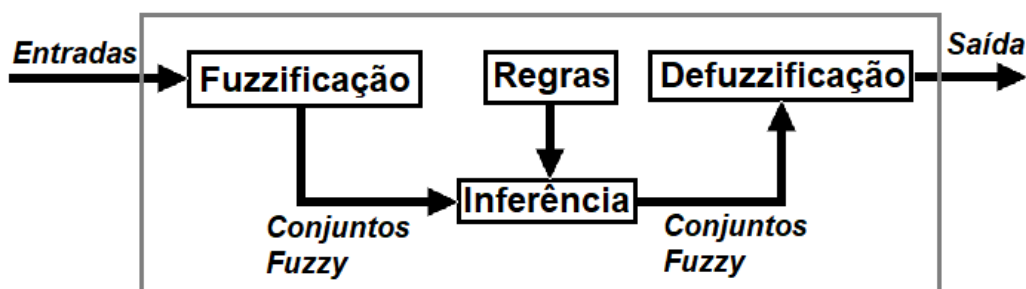
O sistema de inferência *Fuzzy* é a base da aplicação da Lógica Nebulosa. Este sistema é um conjunto de ferramentas que, por meio da utilização das regras previamente definidas, dos conceitos de conjuntos *Fuzzy*, das variáveis linguísticas e do raciocínio aproximado, avalia as entradas com o objetivo de obter conclusões (saídas). Neste trabalho, as entradas do modelo *Fuzzy* são os valores de frequência de ocorrência e severidade, enquanto a saída é o risco industrial calculado pelos conjuntos nebulosos. O processo de inferência *Fuzzy* pode ser dividido em 04 etapas, sendo elas Fuzzificação, Elaboração das Regras, Processo de Inferência e Defuzzificação (ROSS, 2010; AHN & CHANG, 2016). Apresenta-se nas figuras 2 e 3, respectivamente, a fase de avaliação das regras no Processo de Inferência e o diagrama esquemático deste processo.

Figura 2 – Avaliação das regras *Fuzzy* aplicadas ao cálculo do Risco.



A etapa de Fuzzificação consiste em, por meio das funções de pertinência, atribuir o grau de pertinência de cada entrada com cada conjunto *Fuzzy*. Neste trabalho tais funções foram associadas a rótulos linguísticos de frequência, severidade e risco industrial e possuem o valor de saída no intervalo de 0 a 1. Apresentam-se nas equações 1, 2, 3 e 4 as funções de pertinência utilizadas.

Figura 3 – Diagrama esquemático da inferência.



$$\text{Tipo "Z"} = f(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \left(\frac{x-b}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (1) \quad \text{Tipo "S"} = f(x; a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{x-b}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Trapezoidal} = f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (3) \quad \text{Gaussiana} = f(x; \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

Em relação a frequência, a unidade de entrada considerada é o logaritmo da taxa de ocorrência por ano. Com isso, pode-se vincular as taxas de ocorrência com as categorias linguísticas de frequência utilizadas na matriz de risco convencional, que garantem uma entrada contínua de frequência no modelo *Fuzzy*, permitindo assim a utilização de dados quantitativos de taxa de ocorrência no cálculo do risco industrial. Neste caso, -1 da matriz convencional equivale a taxa de ocorrência de 1 vez a cada 10 anos ($\log 1/10$) e -5 equivale a taxa de ocorrência de 1 vez a cada 100000 anos ($\log 1/100000$). Apresenta-se na tabela 3 as funções de pertinência utilizadas para cada categoria de frequência e, na figura 4, apresenta-se a representação gráfica destas funções.

Tabela 3 – Funções de pertinência *Fuzzy* utilizadas para frequência.

	Tipo Função Pertinência	Parâmetros
1 - Frequente	Tipo "S" – $f(x; a, b)$	$f(x; -1.5, -0.75)$
2 - Provável	Trapezoidal – $f(x; a, b, c, d)$	$f(x; -2.5, -1.75, -1.25, -0.5)$
3 - Pouco Provável	Trapezoidal – $f(x; a, b, c, d)$	$f(x; -3.5, -2.75, -2.25, -1.5)$
4 - Remoto	Trapezoidal – $f(x; a, b, c, d)$	$f(x; -4.5, -3.75, -3.25, -2.5)$
5 - Extremamente Remoto	Tipo "Z" – $f(x; a, b)$	$f(x; -4.25, -3.5)$

Para representar as categorias de severidade escolheu-se funções de pertinência Tipo "Z" (Desprezível), Gaussiana (Marginal, Média e Crítica) e Tipo "S" (Catastrófica). Neste caso, a entrada do modelo *Fuzzy* assume valores entre 1 (desprezível) e 5 (catastrófica). Apresenta-se na figura 5 a representação gráfica das funções de pertinência da severidade.

Em relação ao risco, que é a saída do modelo *Fuzzy*, utilizou-se funções de pertinência Tipo "Z", Gaussiana e Tipo "S", que representam respectivamente, as categorias de risco Tolerável, Moderado e Não Tolerável. Apresenta-se na figura 6 a representação gráfica das funções de pertinência do risco.

Figura 4– Funções de pertinência Fuzzy da entrada frequência.

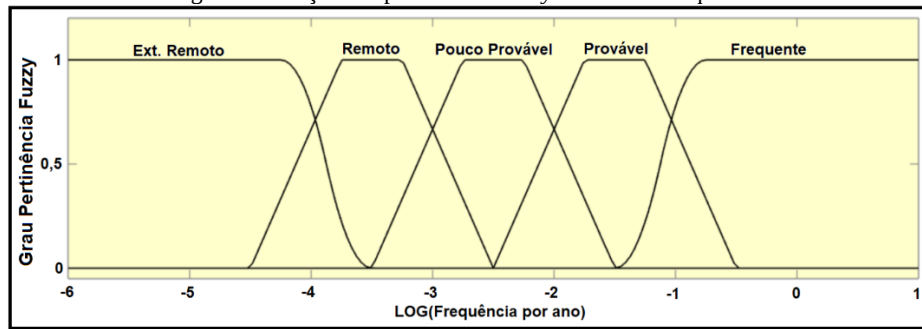


Figura 5– Funções de pertinência Fuzzy da entrada severidade.

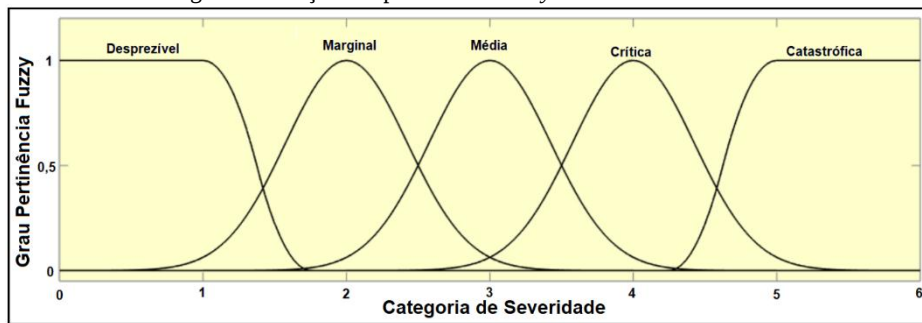
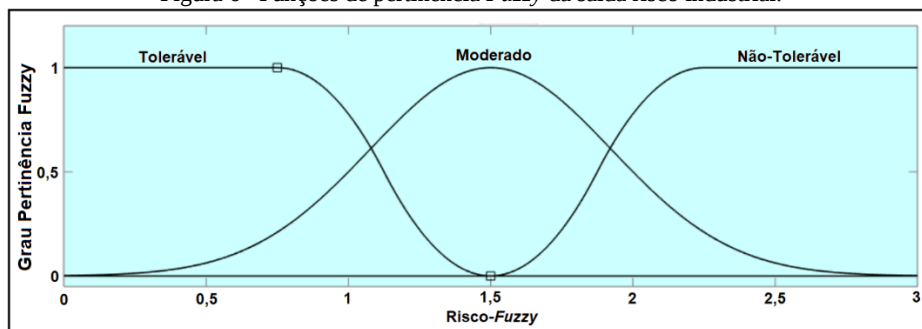


Figura 6– Funções de pertinência Fuzzy da saída risco industrial.



A etapa de Elaboração das Regras foi realizada com a proposição de 25 regras de implicação do tipo *Se-Então*, que farão parte da base do conhecimento do modelo de inferência Fuzzy. As regras, formuladas com base na matriz de risco convencional apresentada na figura 1, têm como entrada (antecedentes) as categorias de frequência e severidade e como saída (consequente) o nível de risco, sendo este categorizado em Tolerável, Moderado e Não-Tolerável. Com o objetivo de ilustrar esta fase, apresenta-se a seguir 4 das 25 regras utilizadas no presente trabalho.

Regra 2: Se (Freq.) é **Frequente** E (Sev.) é **Marginal** Então (Risco-Fuzzy) é **Moderado**.

Regra 7: Se (Freq.) é **Provável** E (Sev.) é **Marginal** Então (Risco-Fuzzy) é **Moderado**.

Regra 12: Se (Freq.) é **Pouco-Provável** E (Sev.) é **Marginal** Então (Risco-Fuzzy) é **Tolerável**.

Regra 13: Se (Freq.) é **Pouco-Provável** E (Sev.) é **Média** Então (Risco-Fuzzy) é **Moderado**.

Na etapa de Inferência as 25 regras elaboradas são aplicadas nas entradas, ou seja, nos conjuntos nebulosos de frequência e severidade do modelo Fuzzy. Isso faz com que se obtenha, por meio de cada regra, um grau de pertinência nos conjuntos nebulosos de saída, sendo estes os níveis do risco industrial. Assume-se que o operador E (AND), que realiza a operação entre os antecedentes das regras considera o valor mínimo entre o grau de pertinência dos antecedentes, garantindo assim que os

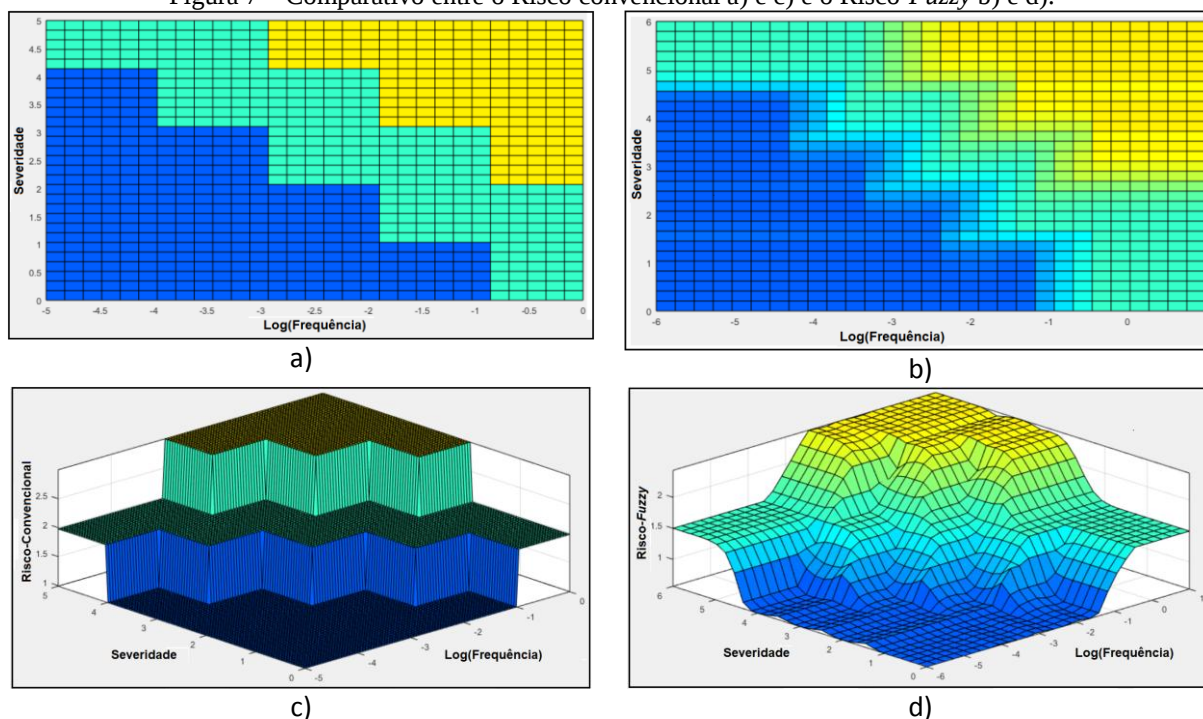
resultados estejam limitados ao intervalo (0,1). Posteriormente, realiza-se a agregação das saídas de todas as regras utilizadas no processo de inferência.

Após a etapa de Inferência, inicia-se a etapa de Defuzzificação, que tem como objetivo transformar o valor da variável linguística de saída em uma saída numérica que melhor represente os valores *Fuzzy* inferidos. Neste trabalho, utilizou-se o método do Centro-da-Área que calcula o centroide da área obtida pela agregação das saídas *Fuzzy* de todas as regras. Os processos de Inferência e de Defuzzificação são ilustrados na figura 2.

Resultados e Discussão

Uma nova matriz de risco foi gerada com base na teoria dos Conjuntos Nebulosos, uma vez que o processo de inferência *Fuzzy* nos permite calcular o risco industrial para cada par de entrada do modelo, sendo este um par de frequência de ocorrência e grau de severidade do evento perigoso. Apresenta-se na figura 7 um comparativo entre a matriz de risco convencional e a matriz de risco baseada nos conjuntos *Fuzzy*.

Figura 7 – Comparativo entre o Risco convencional a) e c) e o Risco-*Fuzzy* b) e d).



Nas figuras 7b) e 7d), pode-se observar que a matriz de risco obtida pelo modelo *Fuzzy* apresenta uma região de transição contínua e suave entre as categorias de nível de risco, sendo assim, um modelo mais sofisticado e robusto para determinar o risco industrial. Percebe-se que a matriz de risco convencional, ilustrada nas figuras 7a) e 7c), apresenta uma transição abrupta entre as categorias de risco, podendo assim causar uma ideia distorcida do nível de risco quando se trabalha próximo às regiões de fronteira. Além disso, uma grande vantagem da aplicação da teoria dos conjuntos *Fuzzy* no cálculo do risco industrial baseia-se na possibilidade de utilização de dados quantitativos de frequência de ocorrência, uma vez que uma das entradas do modelo *Fuzzy* é a logaritmo da taxa de ocorrência por ano.

Afim de ilustrar a diferença entre o risco convencional e o risco *Fuzzy* utilizou-se dois cenários hipotéticos de acidente. O primeiro cenário possui taxa de ocorrência de 1 vez a cada 95 anos e severidade II (Marginal). Já o segundo cenário tem taxa de ocorrência de 1 vez a cada 105 anos e severidade II (Marginal). Os níveis de risco calculados pela matriz de risco convencional e pela matriz de risco *Fuzzy* são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Funções de pertinência *Fuzzy* utilizadas para frequência.

	Frequência [Evento/ano]	Severidade	Risco Convencional	Risco <i>Fuzzy</i>
CENÁRIO I	1 / 95	II (Marginal)	2 (Moderado)	1,11
CENÁRIO II	1 / 105	II (Marginal)	1 (Tolerável)	1,07

A partir dos resultados apresentados na tabela 4, percebe-se que o cálculo do risco pela matriz convencional nos fornece um resultado distorcido da realidade, uma vez que ambos cenários possuem a mesma severidade com taxa de ocorrência próximas. Para o risco *Fuzzy*, percebe-se que os resultados de nível de risco para os dois cenários são próximos, sendo estes resultados menos imprecisos pois estão em concordância com a proximidade dos valores de frequência para ambos cenários.

Conclusões

O presente trabalho implementa conceitos da Lógica *Fuzzy* no processo de avaliação de risco industrial. Quando comparado à matriz de risco convencional, o risco obtido com o auxílio da teoria dos conjuntos *Fuzzy* se mostrou mais realista e preciso, posto que o Risco-*Fuzzy* apresenta uma transição gradual e contínua entre as categorias da matriz de risco.

Constata-se também que o processo de avaliação de riscos baseado na Lógica Nebulosa é capaz, por meio da manipulação das funções de pertinência e da elaboração das regras de inferência, de incorporar a experiência humana dos especialistas em segurança industrial no cálculo de risco.

Além disso, verificou-se que a metodologia de cálculo de risco proposta no presente trabalho permite a incorporação de dados reais de taxa de ocorrência de um determinado evento perigoso, o que minimiza as incertezas no cálculo do risco industrial, já que o processo deixa de ser puramente qualitativo tornando-se semi-quantitativo.

Os resultados obtidos permitem concluir que o uso da Lógica *Fuzzy* na avaliação de risco industrial gera melhorias na segurança industrial, uma vez que pode reduzir as incertezas e melhorar os resultados da avaliação do risco.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, em especial aos Departamentos de Engenharia de Processos (DEPro) e de Desenvolvimento de Processos e Produtos (DDPP).

Referências Bibliográficas

- AHN, J.; CHANG, D. Fuzzy-based HAZOP study for process industry. In: Journal of hazardous materials 317:303-311, 2016.
- LEES, F. Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control. Butterworth-Heinemann, 2012.
- RAUSAND, M. Risk assessment: theory, methods, and applications. John Wiley & Sons, 2011.
- ROSS, T. J. Fuzzy logic with engineering applications. 3. Ed., Publisher: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- SHAW, I. S. & SIMÕES M.G. Controle e Modelagem *Fuzzy*. FAPESP, Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 2010.
- ZADEH, L.A. Fuzzy sets, Information Control. 8 338–353, 1965.