



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Química

**Raphael Santana Almeida**

**AVALIAÇÃO DE RISCO UTILIZANDO MÉTODO BOWTIE:  
ABORDAGEM POR LÓGICA FUZZY**

Campinas  
2023

**Raphael Santana Almeida**

**AVALIAÇÃO DE RISCO UTILIZANDO MÉTODO BOWTIE:  
ABORDAGEM POR LÓGICA FUZZY**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título Mestre em Engenharia Química .

**Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva**  
**Coorientador: Prof. Dr. Sávio Souza Venâncio Vianna**

Este trabalho corresponde à versão final da Dissertação defendida por Raphael Santana Almeida e orientada pelo Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva.

Campinas  
2023

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

AL64a Almeida, Raphael Santana, 1993-  
Avaliação de risco utilizando método Bowtie : abordagem por lógica fuzzy /  
Raphael Santana Almeida. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva.

Coorientador: Sávio Souza Venâncio Vianna.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade  
de Engenharia Química.

1. Lógica fuzzy. 2. Avaliação de riscos. 3. Avaliação de riscos - Método. 4.  
Python (Linguagem de programação de computador). 5. Inferência. I. Silva,  
Flávio Vasconcelos da, 1971-. II. Vianna, Sávio Souza Venâncio, 1975-. III.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV.  
Título.

Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Risk assessment based on Bowtie method : a fuzzy logic approach

**Palavras-chave em inglês:**

Fuzzy Logic

Risk assessment

Risk assessment - Method

Python (Computer Programming Language)

Inference

**Área de concentração:** Engenharia Química

**Titulação:** Mestre em Engenharia Química

**Banca examinadora:**

Flávio Vasconcelos da Silva [Orientador]

Fábio Pereira dos Santos

Brunno Ferreira dos Santos

**Data de defesa:** 07-02-2023

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Química

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-3913-7453>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7285171298512990>

Folha de Aprovação da Defesa de Dissertação de Mestrado defendida por **RAPHAEL SANTANA ALMEIDA** aprovada em 07 de fevereiro de 2023, pela Comissão Examinadora composta pelos seguintes doutores:

Prof. Dr. Flavio Vasconcelos da Silva

Presidente e Orientadora

FEQ / UNICAMP

Prof. Dr. Fábio Pereira dos Santos

UFRJ - Escola de Química

Videoconferência

Prof. Dr. Brunno Ferreira dos Santos

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Videoconferência

A ATA da Defesa com as respectivas assinaturas dos membros, encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação / Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.



# Agradecimentos

...

Eu dedico este primeiro grande passo na carreira acadêmica à mulher da minha vida, minha mãe. Seu esforço e luta me trouxeram até este momento.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva, pela orientação, paciência e confiança depositada em mim. Agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Sávio Souza Venâncio Vianna, pela orientação e paciência. Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, pela dedicação e ensinamentos. Agradeço aos meus amigos e colegas de laboratório, pela ajuda e companheirismo.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

# Resumo

*Bowtie* é uma ferramenta de avaliação de risco híbrida capaz de fornecer um ambiente para análise da confiabilidade e avaliação do grau de risco de um determinado sistema. No entanto, os dados para essa análise procedem de julgamento subjetivo de um especialista ou não é funcional pela própria escassez de dados, resultando em informações imprecisas e vagas. A lógica fuzzy, capaz de se assemelhar ao raciocínio humano, oferece diversos mecanismos para superar essas incertezas. Uma estrutura bowtie será projetada para um estudo de caso de uma indústria química. Dois métodos de inferência fuzzy (Mamdani e Takagi-Sugeno) serão aplicados para calcular consequências e riscos e depois comparados. Assim, o trabalho tem o objetivo otimizar método bowtie para avaliação de risco através do uso do método de inferência fuzzy.

# Abstract

*Bowtie* is a hybrid risk assessment tool capable of providing an environment for analyzing the reliability and assessing the degree of risk of a given system. However, the data for this analysis comes from the subjective judgment of an expert or is not functional due to the scarcity of data, resulting in inaccurate and vague information. Fuzzy logic, capable of resembling human reasoning, offers several mechanisms to overcome these uncertainties. A bowtie structure will be designed for a case study of a chemical industry. Two fuzzy inference methods (Mamdani and Takagi-Sugeno) will be applied to calculate consequences and risks and then compared. Thus, the work aims to optimize the bowtie method for risk assessment through the use of the fuzzy inference method.

# Lista de Figuras

|     |                                                                                                                                                           |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Função de pertinência triangular . . . . .                                                                                                                | 19 |
| 2.2 | Exemplo ilustrativo da aplicação do Método de Inferência de Mamdani . . . . .                                                                             | 21 |
| 2.3 | Exemplo ilustrativo da aplicação do Método de Inferência de Takagi-Sugeno . . . . .                                                                       | 22 |
| 2.4 | Diagrama simples de um <i>bowtie</i> qualitativo . . . . .                                                                                                | 24 |
| 2.5 | Diagrama simples de um <i>bowtie</i> quantitativo . . . . .                                                                                               | 26 |
| 2.6 | Exemplo do diagrama do LOPA . . . . .                                                                                                                     | 27 |
| 4.1 | Lado esquerdo do <i>Bowtie</i> : Investigação da perda de contenção relacionado . . . . .                                                                 | 35 |
| 4.2 | Ilustração do sistema fuzzy para cálculo de frequência e risco . . . . .                                                                                  | 35 |
| 4.3 | Ilustração do sistema fuzzy para cálculo de frequência e risco . . . . .                                                                                  | 38 |
| 4.4 | Gráfico das Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência (Valores de Entrada) . . . . .                           | 39 |
| 5.1 | Gráfico das Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência para operador lógico “E” (Valores de Saída) . . . . .    | 46 |
| 5.2 | Gráfico das Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência para o operador lógico “OU” (Valores de Saída) . . . . . | 46 |
| 5.3 | Superfície para operador lógico ‘E’ representando a combinação de diferentes valores de frequência - Método de inferência Mamdani . . . . .               | 48 |
| 5.4 | Superfície para operador lógico ‘OU’ representando a combinação de diferentes valores de frequência - Método de inferência Mamdani . . . . .              | 48 |
| 5.5 | Matriz de Risco Fuzzificada pelo Método de Mamdani . . . . .                                                                                              | 49 |
| 5.6 | Gráfico de Superfície para operador lógico “E” representando a combinação de diferentes valores de frequência pelo método de Takagi-Sugeno . . . . .      | 52 |
| 5.7 | Gráfico de Superfície para operador lógico “OU” representando a combinação de diferentes valores de frequência pelo método de Takagi-Sugeno . . . . .     | 52 |
| 5.8 | Matriz de Risco Fuzzificada pelo Método de Takagi-Sugeno . . . . .                                                                                        | 53 |

# Lista de Tabelas

|      |                                                                                                                                                                           |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Estrutura de regras de inferência usando o cálculo de risco como exemplo . . .                                                                                            | 19 |
| 2.2  | Exemplo da estrutura de regras do métodos de inferência <i>fuzzy</i> Mamdani . . .                                                                                        | 20 |
| 2.3  | Exemplo da estrutura de regras do métodos de inferência <i>fuzzy</i> Takagi-Sugeno . . .                                                                                  | 22 |
| 2.4  | Exemplo de Matriz de Risco . . . . .                                                                                                                                      | 27 |
| 4.1  | Variáveis Linguísticas associadas a Frequência, Impacto e Risco . . . . .                                                                                                 | 36 |
| 4.2  | Avaliação de ameaças e barreiras protetivas . . . . .                                                                                                                     | 37 |
| 4.3  | Avaliação de barreiras mitigadoras . . . . .                                                                                                                              | 37 |
| 4.4  | Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência (Valores de Entrada) . . . . .                                                       | 39 |
| 4.5  | Regras definidas para o nó “E” (Inferência Mamdani) . . . . .                                                                                                             | 40 |
| 4.6  | Regras definidas para o nó “OU” (Inferência Mamdani) . . . . .                                                                                                            | 41 |
| 4.7  | Matriz de risco (Frequência x Impacto) . . . . .                                                                                                                          | 42 |
| 4.8  | Regras definidas para o cálculo do Risco das consequências (Inferência Mamdani) . . . . .                                                                                 | 42 |
| 4.9  | Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas do Impacto das Consequências . . . . .                                                             | 43 |
| 4.10 | Matriz de risco (Frequência x Impacto) apresentando os valores usados para a definição do universo de discurso das funções de pertinência que descrevem o Risco . . . . . | 43 |
| 4.11 | Valores numéricos que definem o grau de impacto de cada consequência . . .                                                                                                | 43 |
| 5.1  | Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência (Valores de Entrada pós alterações) . . . . .                                        | 45 |
| 5.2  | Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência (Valores de Saída) . . . . .                                                         | 46 |
| 5.3  | Regras definidas para o operador lógico “E” pós ajustes . . . . .                                                                                                         | 47 |
| 5.4  | Comparação entre as frequências calculadas pelo método convencional e pelo método de inferência Mamdani . . . . .                                                         | 48 |
| 5.5  | Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas do Risco . . . . .                                                                                 | 49 |
| 5.6  | Valores resultantes do cálculo de risco pela matriz de risco fuzificada pelo método de inferência Mamdani . . . . .                                                       | 50 |
| 5.7  | Regras definidas para o operador lógico “E” pós ajustes para o método de Takagi-Sugeno . . . . .                                                                          | 51 |
| 5.8  | Valores de Frequência que descrevem as constantes de cada consequente das 25 regras de inferência para os operadores lógicos de “E” e “OU” . . . . .                      | 51 |
| 5.9  | Comparação entre as frequências calculadas pelo método convencional e pelo método de inferência Takagi-Sugeno . . . . .                                                   | 52 |

|      |                                                                                                                                               |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.10 | Valores de Frequência que descrevem as constantes de cada consequente das 25 regras de inferência para cálculo dos valores de risco . . . . . | 53 |
| 5.11 | Valores resultantes do cálculo de risco pela matriz de risco fuzificada pelo método de inferência Takagi-Sugeno . . . . .                     | 54 |
| 5.12 | Valores de frequência calculados para os métodos de inferência e método convencional . . . . .                                                | 55 |
| 5.13 | Valores de risco calculados pelo método de Mamdani e Takagi-Sugeno . . . . .                                                                  | 55 |

# Lista de Abreviaturas e Siglas

|        |                                                               |
|--------|---------------------------------------------------------------|
| $C_F$  | Frequência da Consequência                                    |
| $C_I$  | Impacto da Consequência                                       |
| A      | Alto/a                                                        |
| B      | Baixo/a                                                       |
| BCAFAE | Bowtie por Combinação de Árvore de Falhas e Árvore de Eventos |
| C      | Catastrófico                                                  |
| I      | Insignificante                                                |
| LOPA   | Layer of Protection Analysis                                  |
| M      | Moderado/a                                                    |
| MA     | Muito Alto/a                                                  |
| MB     | Muito Baixo/a                                                 |
| PFD    | probabilidade de falha por demanda                            |

# Sumário

|          |                                                                                                       |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                                                                     | <b>14</b> |
| <b>2</b> | <b>Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica</b>                                                  | <b>18</b> |
| 2.1      | Lógica <i>fuzzy</i> . . . . .                                                                         | 18        |
| 2.1.1    | Função de Pertinência . . . . .                                                                       | 19        |
| 2.1.2    | Regras <i>fuzzy</i> . . . . .                                                                         | 19        |
| 2.1.3    | Método Mamdani . . . . .                                                                              | 20        |
| 2.1.4    | Método Takagi-Sugeno . . . . .                                                                        | 21        |
| 2.1.5    | Fuzificação . . . . .                                                                                 | 22        |
| 2.1.6    | Defuzificação . . . . .                                                                               | 23        |
| 2.2      | <i>Bowtie</i> . . . . .                                                                               | 23        |
| 2.3      | LOPA . . . . .                                                                                        | 26        |
| 2.4      | Matriz de Risco . . . . .                                                                             | 27        |
| 2.5      | Revisão Bibliográfica . . . . .                                                                       | 28        |
| 2.6      | Uma breve Conclusão sobre revisão bibliográfica . . . . .                                             | 31        |
| <b>3</b> | <b>Hipótese e Objetivos</b>                                                                           | <b>32</b> |
| 3.1      | Hipótese . . . . .                                                                                    | 32        |
| 3.2      | Objetivo Geral . . . . .                                                                              | 32        |
| 3.3      | Objetivos Específicos . . . . .                                                                       | 32        |
| <b>4</b> | <b>Materiais e Métodos</b>                                                                            | <b>34</b> |
| 4.1      | Definição do caso de estudo e estruturação do <i>bowtie</i> . . . . .                                 | 34        |
| 4.2      | Definição das variáveis linguísticas do sistema . . . . .                                             | 36        |
| 4.3      | Avaliação das frequências das barreiras e ameaças e o impacto de cada consequência . . . . .          | 36        |
| 4.4      | Definição do sistema fuzzy para o cálculo da frequência e do risco . . . . .                          | 38        |
| 4.5      | Definição das funções de pertinência para as variáveis de entrada . . . . .                           | 38        |
| 4.6      | Estruturação do <i>bowtie fuzzy</i> pelo método de inferência Mamdani . . . . .                       | 40        |
| 4.7      | Estruturação do <i>bowtie fuzzy</i> pelo método de inferência Takagi-Sugeno . . . . .                 | 41        |
| 4.7.1    | Estruturação da Matriz de Risco <i>fuzzy</i> . . . . .                                                | 41        |
| 4.7.2    | Software utilizado para a implementação do sistema <i>fuzzy</i> . . . . .                             | 44        |
| <b>5</b> | <b>Resultados e Discussão</b>                                                                         | <b>45</b> |
| 5.1      | Aplicação do Método de Inferência Mamdani para o cálculo da Frequência das consequências . . . . .    | 45        |
| 5.1.1    | Aplicação da Matriz de Risco <i>Fuzzy</i> no cálculo de risco das consequências por Mamdani . . . . . | 49        |



|          |                                                                                                             |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2      | Aplicação do Método de Inferência Takagi-Sugeno para o cálculo da Frequência da consequências . . . . .     | 50        |
| 5.2.1    | Aplicação da Matriz de Risco <i>Fuzzy</i> no cálculo de risco das consequências por Takagi-Sugeno . . . . . | 53        |
| 5.3      | Um breve análise sobre os dois métodos de inferência no cálculo de frequência e risco . . . . .             | 54        |
| 5.4      | BCAF AE: ABORDAGEM POR LÓGICA <i>FUZZY</i> . . . . .                                                        | 55        |
| <b>6</b> | <b>Conclusão</b>                                                                                            | <b>57</b> |
|          | <b>Referências bibliográficas</b>                                                                           | <b>59</b> |

# Capítulo 1

## Introdução

A complexidade inerente aos processos industriais com o objetivo de garantir qualidade e atender uma alta demanda de produtos gerada pelo desenvolvimento social e tecnológico reflete em: maior número de componentes dentro do sistema de produção, uma quantidade maior de pessoas envolvidas, alto volume de resíduos. Isso implica em processos industriais expostos à maiores possibilidades de grandes incidentes, e ainda mais quando seus riscos não são devidamente estudados e tratados. A negligência que resulta da falta de cuidados e busca de maior conhecimento e atenção dentro da área de segurança industrial foram responsáveis por marcar a história humana com grandes acidentes. Bophal (Índia), na fábrica da Union Carbide (atualmente, incorporada pela Dow Chemicals), considerado um dos piores desastres químicos da história. 40 mil toneladas de isocianato de metila liberados na atmosfera em apenas uma noite, matando mais de 8 mil pessoas (incluindo trabalhadores da fábrica e comunidade da entorno). O desastre produziu danos e perdas humanas, materiais e financeiras, tendo efeitos até hoje nas gerações que se seguiram. Outros desastres também podem ser citados: Copal em 1984, Seveso em 1976 ou a tragédia nuclear de Chernobyl em 1986.

A frequência de acidentes como os citados não é alta. Porém, suas consequências são desastrosas. O conceito de segurança e gerenciamento de risco estabelece sua importância a partir desse ponto. Evitar que ameaças diárias dentro da indústria acabem levando a essas consequências fatídicas que culminem em dano ambiental, humano ou econômico. O conceito envolve procedimentos e métodos matemáticos e analíticos, que podem ser classificados nas seguintes categorias: qualitativo, semi-quantitativo, quantitativo e híbrido. Podendo essas categorias serem subcategorizadas em identificação de perigo e análise de risco, avaliação de

risco e avaliação de segurança. Desse ponto, vê-se a importância do conceito de segurança de processos e gerenciamento de risco, que tem como foco a prevenção, mitigação, resposta e recuperação a grandes acidentes. Khan, Rathnayaka e Ahmed (2015) sugerem que pesquisas relacionadas com métodos quantitativos e híbridos têm se tornado mais relevantes em relação as de métodos qualitativos e semi-quantitativos.

Métodos de análise híbrida são combinações de métodos quantitativos e qualitativos. Os métodos quantitativos fornecem modelos matemáticos para estimar a frequência ou risco de acidentes. Em contrapartida, os métodos qualitativos fornecem representações gráficas e diagramas para avaliação subjetiva. Então, a abordagem pelo método híbrido possibilita aos tomadores de decisão um maior entendimento sobre a arquitetura de confiabilidade do sistema.

Um dos métodos mais conhecidos, e bastante aplicado, é o da árvore de falhas. Um método de análise dedutivo, que a partir do acidente identificado deduz-se os eventos antecedentes, relacionando-os através de portais lógicos. Através dos resultados do método, têm-se a possibilidade de propor procedimentos e estruturas físicas como forma de prevenção. Para analisar as consequências, têm-se a árvore de eventos, um método indutivo, da qual infere-se de um grande acidente os eventos subsequentes até descrever todas as possíveis consequências, que estão relacionadas a diferentes perdas: humana, patrimonial ou financeira.

Uma forma de realizar uma avaliação mais completa de um sistema, através da relação entre as causas e consequências de um determinado acidente, parte da combinação de uma árvore de falhas e uma árvore de eventos. Essa combinação visualmente lembra um gravata-borboleta, assim recebendo o seu nome na literatura como *bowtie*. Essa ferramenta de gerenciamento de risco tem se destacado bastante nos últimos 10 anos (ILIZÁSTIGUI PÉREZ, 2021). Embora, na literatura, o *bowtie* seja visto com frequência nessa estrutura combinada de árvore de falhas e árvore de eventos, o método surge como um modelo puramente qualitativo, no qual traz o conceito de camadas de proteção. Permitindo através disso, que tomadores de decisão observem melhor os componentes (físicos ou procedurais) que cumprem o papel de barreiras preventivas ou mitigadoras.

Um outro conceito de grande importância dentro da indústria, quando se fala de investimento em segurança, é a matriz de risco. É um método qualitativo que relaciona frequência e impacto das consequências de um determinado acidente. Em conjunto com o

conceito ALARP (As Low As Reasonable Practible), é possível entender se o risco foi reduzido até um ponto em que reduzi-lo ainda mais torna-se impraticável, uma vez que é impossível eliminar o risco totalmente. Assim, proporcionando uma análise de custo-benefício para aplicação de determinado sistema, que pode ser um projeto de uma nova planta ou a otimização de um sistema.

O uso desses modelos para análise de risco é frequentemente acompanhado de incertezas, classificadas em epistêmicas ou aleatórias. As incertezas epistêmicas estão relacionadas a falta de conhecimento sobre o sistema ou processo. Já as aleatórias, são descritas como a variação de dados inerente ao sistema ou processo. A análise probabilística de frequência é muito utilizada para lidar com as incertezas aleatórias, mas para as epistêmicas a mesma abordagem não é suficiente (AVEN, 2016).

Para lidar com essas questões e melhorar o processo de análise de risco, a aplicação de lógica *fuzzy* pode ser uma excelente alternativa. Desenvolvida por Zadeh na década de 60, o método lida de forma mais eficiente com a subjetividade e imprecisão, que sempre acompanham a área de segurança de processos. Da lógica *fuzzy* depreende-se o conceito de conjuntos *fuzzy*, que conferem aos números que o compõe diferentes graus de pertinência. Alguns elementos pertencendo mais ou menos a determinados grupos, assim um mesmo número podendo pertencer a dois conjuntos, tendo graus de pertinência diferentes para cada um deles. A partir dessa teoria surge a modelagem *fuzzy* muito explorada em grande parte por métodos de inferência como Mamdani e Takagi- Sugeno. Os sistemas de inferência intentam mimetizar o raciocínio humano através do uso de regras que incorporam relações causais entre diferentes variáveis classificadoras de um determinado processo. Isso permite incorporar o conhecimento humano sobre o processo de forma intuitiva, quando até não se é possível obter um modelo fenomenológico do processo.

Os projetos da área de segurança de processos desenvolvidos a partir do uso do conceito *fuzzy* até o presente momento, não incorporam lógicas de inferência. Trazem em sua estrutura o conceito de números *fuzzy*, na busca de diminuir a incerteza atrelada aos métodos de análise de risco, por exemplo, mas falham em uma melhor incorporação do conhecimento subjetivo.

Neste trabalho foi desenvolvido um método *bowtie*, incorporando os conceitos de camada de proteção, matriz de risco e lógica *fuzzy*. A introdução do conceito de camadas de proteção abre um leque para uma análise da arquitetura de confiabilidade, permitindo que os tomadores de decisão melhor observem os componentes (físicos ou procedurais) que cumprem o papel de

barreiras preventivas e mitigadoras, a partir de uma perspectiva qualitativa (visual e descritiva) e quantitativa (impacto direto na redução de risco e frequência das consequências).

## Capítulo 2

# Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

### 2.1 Lógica *fuzzy*

A lógica *fuzzy* possibilita lidar com as imprecisões decorrentes da subjetividade, variabilidade e falta de dados, ao traduzir numericamente expressões qualitativas que geralmente agregam o conhecimento subjetivo sobre determinado processo. Baseada na teoria de conjuntos *fuzzy*, é uma generalização da teoria clássica de conjuntos. Um conjunto *fuzzy* permite uma transição suave de um conjunto para outro, ao contrário da teoria clássica de conjuntos, que tem os limites de cada conjunto bem delimitados. É essa principal diferença que permite lidar com o conhecimento humano. Por exemplo, se pensarmos na noção que o ser humano tem, sobre classificar a temperatura de determinado ambiente em: frio, ameno, quente. Perguntas relacionadas a definição dos limites desses conjuntos começam a surgir: A partir de que temperatura pode se considerar que o ambiente está frio, ameno ou quente? É pela teoria *fuzzy*, que chegamos a uma definição como: o ambiente estar 70 % quente e 30 % ameno. Variáveis físicas sendo definidas por graus de pertinência a um determinado conjunto ou grupo.

Para entender a lógica *fuzzy*, alguns conceitos importantes precisam ser aqui explicitados: Função de pertinência, regras de inferência, inferência *fuzzy*, fuzificação e defuzificação. A correta aplicação de cada um desses conceitos permite uma aplicação bem sucedida de um sistema *fuzzy* baseado em regras.

### 2.1.1 Função de Pertinência

Através da função de pertinência  $\mu_A(x)$  (Figura 2.1) defini-se o grau de pertinência e delimita-se o conjunto *fuzzy*. Um determinado conjunto **A** tem **X** como sendo o seu universo de discurso e **x** como sendo um determinado elemento dentro desse universo de discurso, assim tendo o conjunto *fuzzy* definido como  $A = \{(x, \mu(x)), x \in X\}$ .

Existem diferentes tipos de função de pertinência. A mais comuns são: triangular, trapezoidal e gaussiana.

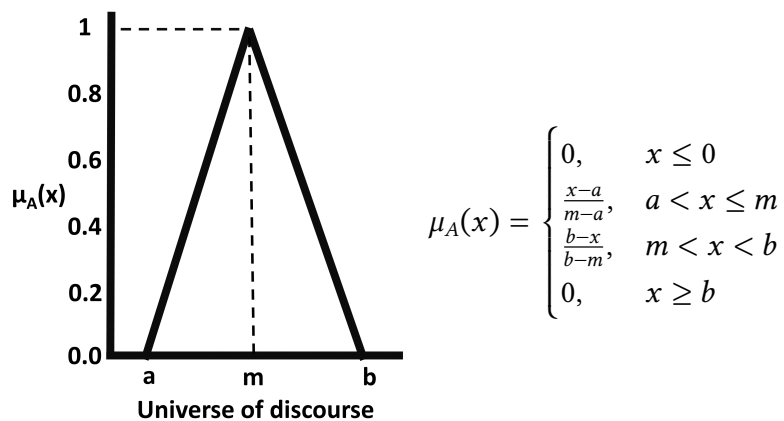


Figura 2.1: Função de pertinência triangular

O parâmetro **a** define o limite inferior da função de pertinência, o parâmetro **b** define o limite superior e o parâmetro **m** define o centro, valor de **X** no qual a função assume o valor 1.

### 2.1.2 Regras *fuzzy*

Um vez estabelecida as funções de pertinência de um sistema, pode-se então descrever o comportamento do sistema em regras, através do método heurístico, que consiste associar uma determinada tarefa a uma experiência prévia. Como exemplo prático, podemos pensar na relação impacto x frequência, ou seja o cálculo do risco que estabelece o risco de uma consequência de um acidente:

Tabela 2.1: Estrutura de regras de inferência usando o cálculo de risco como exemplo

|    | Impacto |     | Frequência |      | Risco |  |
|----|---------|-----|------------|------|-------|--|
| IF | Alta    | AND | Alta       | THEN | Alta  |  |
|    | Alta    |     | Baixo      |      | Médio |  |

As regras seguem uma estrutura, na qual apresenta-se primeiro os Antecedentes (Frequência e Impacto) e depois o Consequente (Risco). Sendo os antecedentes relacionados pelos operadores lógicos E/OU.

As regras estabelecidas podem ser avaliadas através de diferentes modelos de inferência. Os mais conhecidos e que serão aplicados neste trabalho são: Mamdani e Takagi-Sugeno. Esses modelos irão definir como antecedentes e consequentes devem ser explicitados, as funções matemáticas para os operadores lógicos (E/OU), implicação das regras (ENTÃO) e o método de agregamento do conjunto de regras.

### 2.1.3 Método Mamdani

No método Mamdani, tanto antecedente como consequente são representados através de variáveis linguísticas (Tabela 2.2). O operador lógico é representado matematicamente pela função de MIN, quando “E”, e MAX, quando “OU”. Cada regra terá uma implicação, que podemos chamar de valor de ativação. Uma vez que esses valores estão atrelados ao fato de a regra ter sido ativada ou não a depender dos valores de entrada. Esses valores devem ser posteriormente agregados, e então o resultante deve ser submetido a defuzzificação para obtenção do valor numérico final. A Figura 2.2 ilustra um exemplo do cálculo da frequência resultante de uma relação lógica de “OU” entre duas ameaças.

Tabela 2.2: Exemplo da estrutura de regras do métodos de inferência *fuzzy* Mamdani

|        |                                           |
|--------|-------------------------------------------|
| Rule 1 | Se $x_i$ é A E $y_i$ é B ENTÃO $z_i$ é C  |
| Rule 2 | Se $x_i$ é A OU $y_i$ é B ENTÃO $z_i$ é D |



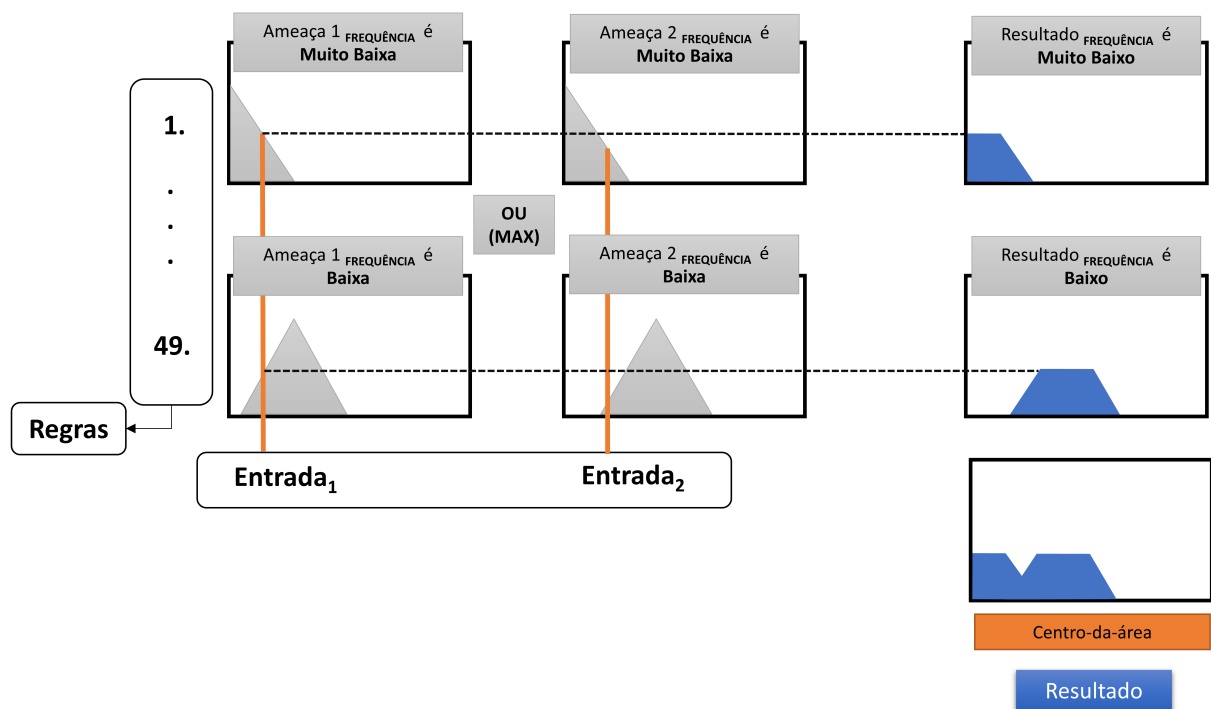


Figura 2.2: Exemplo ilustrativo da aplicação do Método de Inferência de Mamdani

### 2.1.4 Método Takagi-Sugeno

No método Takagi-Sugeno, os antecedentes são descritos por variáveis linguísticas, porém os consequentes são descritos por funções matemáticas (Tabela 2.3). Assim como o método Mamdani, os operadores lógicos “E” e “OU” são representados matematicamente pela função MIN e MÁX respectivamente. Porém, ao agregar as implicações de cada regra, o resultante não será um valor *fuzzy*, e sim, um valor numérico. Não se fazendo necessário a presença de uma etapa de defuzzificação. As implicações de cada regra podem ser agregadas através de uma média ponderada (2.1) dos valores de  $m$  regras. O  $h_i$  representa o fator de ativação de cada regra, e calcula-se pela t-norma (ou seja, a intersecção) entre os valores de pertinência das entradas em relação aos conjuntos *fuzzy* antecedentes de cada regra. A Figura 2.3 ilustra um exemplo do cálculo da frequência resultante de uma relação lógica de ‘E’ entre duas ameaças.

Tabela 2.3: Exemplo da estrutura de regras do métodos de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno

|        |                                                           |
|--------|-----------------------------------------------------------|
| Rule 1 | Se $x_i$ é A E $y_i$ é B ENTÃO $z_i = a_1.x_i + b_1.y_i$  |
| Rule 2 | Se $x_i$ é A OU $y_i$ é B ENTÃO $z_i = a_2.x_i + b_2.y_i$ |

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^m h_i.z_i}{\sum_{i=1}^m h_i} \tag{2.1}$$

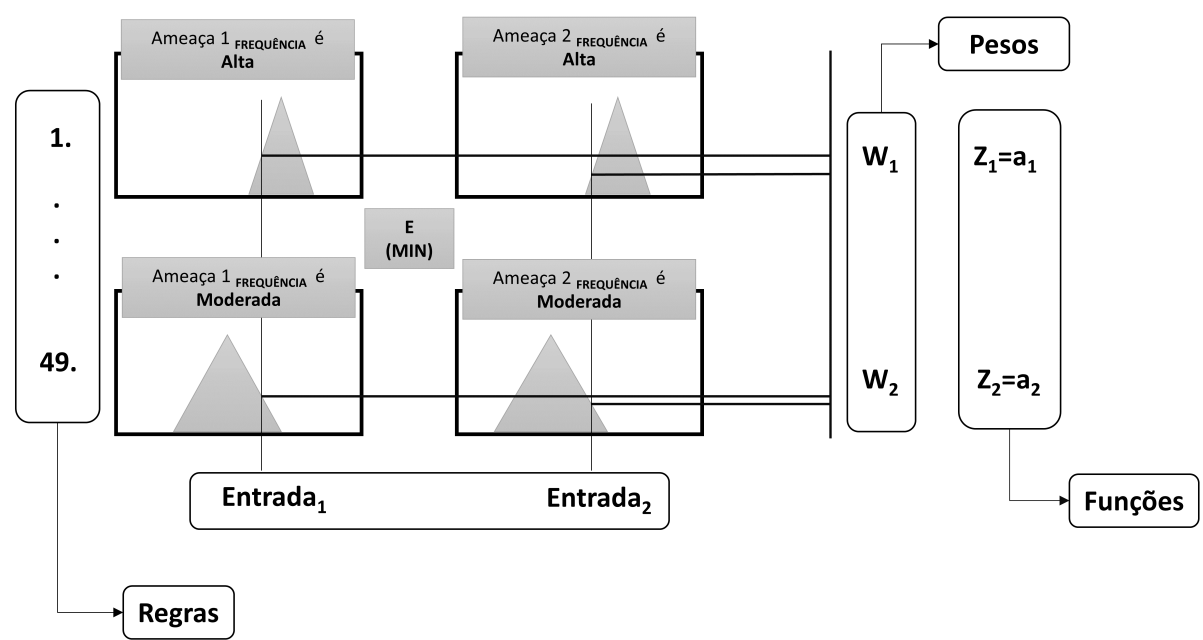


Figura 2.3: Exemplo ilustrativo da aplicação do Método de Inferência de Takagi-Sugeno

### 2.1.5 Fuzificação

Através do processo de fuzificação obtem-se o valor *fuzzy* de entrada para cada antecedente. Lembrando que o primeiro passo realizado, dentro do objetivo de desenvolver um sistema de lógica *fuzzy*, foi definir todas as variáveis linguísticas e seus conjuntos *fuzzy*. Essa estrutura já pré-estabelecida permitirá a realização do processo de fuzificação.

### 2.1.6 Defuzificação

Para a obtenção do resultado final como valor numérico é necessário realizar a defuzificação. Existem diferentes métodos, e a escolha entre um e outro irá depender da necessidade e particularidades dos sistemas que estão sendo implementados. Os métodos mais utilizados de defuzificação são: Centro-da-Área (5), Centro-do-Máximo (8) e Média-do-Máximo (9) SIMÕES e SHAWN (2007, p.52).

#### Centro-da-Área

Nesse caso,  $\mu(z_i)$  assume o valor da área da função de pertinência que será modificado pelo  $x_i$  a posição do centroide (ponto que divide  $\mu(z_i)$  em duas partes iguais).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^N X_i \cdot \mu(z_i)}{\sum_{i=1}^N \mu(z_i)} \quad (2.2)$$

#### Centro-do-Máximo

Nesse caso,  $\mu(z_i)$  indica o valor em que ocorrem os máximos de altura das funções de pertinência de saída.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^N X_i \cdot \sum_{i=1}^N \mu(z_i)}{\sum_{i=1}^N \mu(z_i)} \quad (2.3)$$

#### Média-do-Máximo

O  $u_n$  representa o n-ésimo de elemento no universo de discurso (domínio da função de pertinência) no qual a função de pertinência tenha um máximo.

$$x = \sum_{n=1}^N \frac{u_n}{N} \quad (2.4)$$

## 2.2 Bowtie

O método *bowtie* permite analisar a relação causa-consequência de um determinado acidente dentro de um sistema. Ele surge inicialmente como uma ferramenta de análise de risco qualitativa. A etapa inicial do método conta com a definição da condição perigosa, ou seja, a atividade de risco ou operação. Então, segue-se com a identificação do evento topo, o momento em que se perde o controle da atividade de risco que pode gerar prejuízos



Figura 2.4: Diagrama simples de um *bowtie* qualitativo

financeiros, humanos e ambientais. A partir do evento topo, a parte direita do diagrama é dedicada ao estudo das ameaças e as barreiras preventivas. A parte esquerda é dedicada ao estudo das consequências e suas barreiras mitigadoras. Essa estrutura define o *bowtie* em sua forma mais simplificada (Figura 2.4).

#### 1. Evento topo

O evento topo pode ser definido como o momento em que não se tem mais controle sobre a atividade perigosa. O termo evento topo é derivado de conceitos da árvore de falha (CCPS; INSTITUTE, 2018)

#### 2. Ameaças

As ameaças são eventos que podem culminar no acontecimento do evento topo. À exemplo, poderia ser: falha em algum equipamento, por estar operando fora do limite pré-estabelecido; algum desastre ambiental que afete as operações e danifique as estruturas do processo.

#### 3. Consequências

São eventos decorrentes do evento topo. Considera-se na definição das consequências as perdas materiais, impactos ambientais, impacto econômico e prejuízo a integridade física de trabalhadores.

#### 4. Barreiras

As barreiras tem como principal objetivo prevenir ameaças de se desenvolverem em acidentes ou mitigar acontecimentos decorrentes do evento topo, com o objetivo de evitar consequências desastrosas. Essas barreiras podem ser físicas ou não físicas. No diagrama *bowtie*, elas são classificadas em preventivas, quando cumprem o papel de evitar eventos de se desenvolverem ao ponto de culminarem num evento topo. E mitigadoras, quando evitam que o evento topo se desenvolva, ao ponto de culminar em consequências que podem ser desastrosas. As barreiras presentes no *bowtie* também possuem suas fraquezas. E para estudá-las acrescenta-se no diagrama os fatores de degradação dessas barreiras, que também possuem barreiras como forma de diminuir os efeitos dessa degradação. Porém, esses fatores não serão abordados nesse trabalho.

Há também uma outra forma de estruturar o *bowtie*, como uma combinação de uma árvore de falhas e uma árvore de eventos (Figura 2.5).

1. Árvore de falhas: É um método dedutivo, do qual parte-se um acidente (evento topo) para chegar as ameaças (também chamados de eventos básicos ou iniciantes). As relações entre os eventos são realizadas através de portais lógicos (“E” e “OU”). Utilizando os portais lógicos, realiza-se uma relação de união e intersecção entre os eventos para o cálculo da probabilidade do evento topo.
2. Árvore de eventos: É um método indutivo de análise sequencial da ocorrência de determinados eventos, do qual parte-se do evento topo e infere-se os possíveis caminhos que se desenvolvem nas consequências finais do acidente. Ao atribuir valores de frequência para ocorrência ou não ocorrência de determinado evento, realizando uma multiplicação desses valores, chega-se ao valor da frequência das consequências.

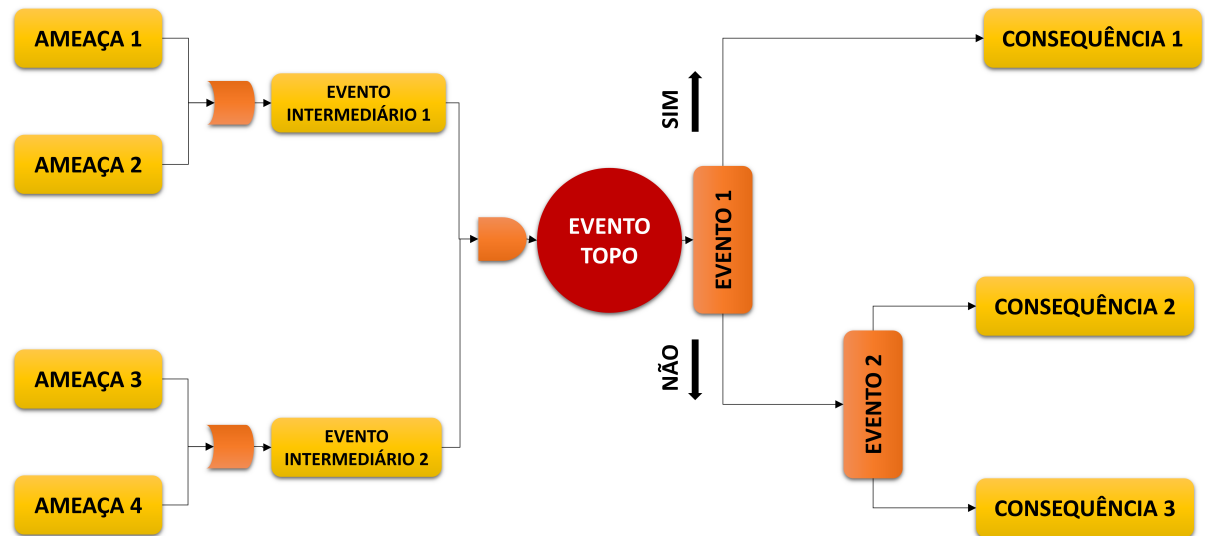


Figura 2.5: Diagrama simples de um *bowtie* quantitativo

Na intenção de realizar uma diferenciação dos dois *bowties* apresentados nessa seção, e poder referenciá-los quando necessários, cunharemos o primeiro *bowtie* apresentado como *bowtie* qualitativo e o segundo como *bowtie* quantitativo.

## 2.3 LOPA

Assim como a proposta do *bowtie* qualitativo, o método LOPA (Layer Of Protection Analysis) tem como objetivo principal determinar se existem barreiras eficientes e suficientes que evitem um determinado evento ou ameaça de se desenvolver em uma consequência indesejada. Porém o *bowtie* qualitativo não propõe nenhum uso de cálculo para analisar quantitativamente o risco dos cenários propostos.

Assim, o método LOPA pode ser considerado como semi-quantitativo. Através de uma simples multiplicação da frequência da ameaça em estudo e a probabilidade de falha por demanda (PFD) das barreiras propostas, chega-se ao valor da frequência da consequência (Figura 2.6). É importante colocar que as barreiras são dispostas no diagrama em ordem sequencial de ativação dentro de um eventual acontecimento da ameaça.

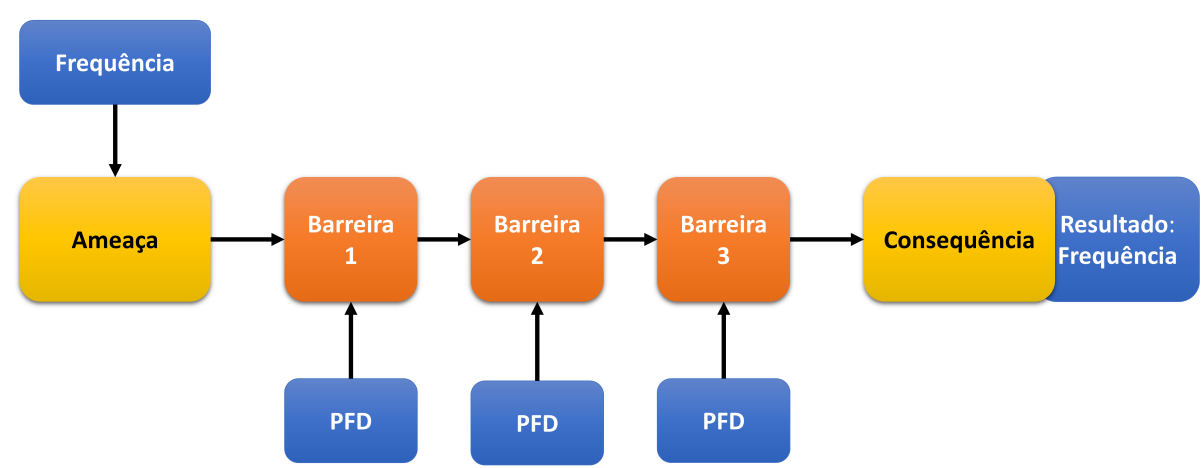


Figura 2.6: Exemplo do diagrama do LOPA

## 2.4 Matriz de Risco

É um método qualitativo para avaliar o risco das consequências relacionando frequência e impacto através de uma tabela (Tabela 2.4). O resultado revela o grau de risco da consequência em termos qualitativos. Como já comentado na introdução deste documento, os resultados da matriz de risco ajudam a orientar as decisões na busca do ALARP.

Tabela 2.4: Exemplo de Matriz de Risco

|            |                      | Impacto        |             |          |            |              |
|------------|----------------------|----------------|-------------|----------|------------|--------------|
|            |                      | Insignificante | Menor       | Moderado | Alto       | Catastrófico |
| Frequência | Impossível           | Muito Baixo    | Muito Baixo | Baixo    | Médio      | Médio        |
|            | Muito Baixo          | Muito Baixo    | Muito Baixo | Baixo    | Médio      | Médio        |
|            | Baixo                | Muito Baixo    | Baixo       | Médio    | Médio      | Alto         |
|            | Moderado             | Baixo          | Médio       | Médio    | Alto       | Alto         |
|            | Suficientemente alto | Baixo          | Médio       | Alto     | Alto       | Muito Alto   |
|            | Alto                 | Baixo          | Médio       | Alto     | Muito Alto | Muito Alto   |
|            | Muito Alto           | Baixo          | Médio       | Alto     | Muito Alto | Muito Alto   |

Ao estabelecer uma escala numérica, tanto para a frequência quanto para o impacto, é possível obter uma escala numérica que defina uma faixa de valores para o risco. Esse artifício será utilizado com a finalidade de tornar o uso da matriz de risco como um método semi-quantitativo neste trabalho, utilizando a lógica *fuzzy*.

## 2.5 Revisão Bibliográfica

O conceito de segurança de processos envolve o foco na prevenção e mitigação de incêndios, explosões ou vazamentos acidentais de químicos nas indústrias. Desse conceito provém os métodos de gestão ou avaliação de segurança de processos, que trazem consigo os passos essenciais que definem a metodologia do estudo do risco. Dentre esses passos, a identificação do perigo e gestão e a avaliação de risco se destacam como peças chaves. Na primeira, avalia-se alguma situação ou item que possa causar algum dano ou prejuízo. Na segunda, tem-se como base a medida de risco que se traduz pela combinação entre a probabilidade de um acidente acontecer e sua severidade/impacto (financeiro, humano ou patrimonial). A avaliação dessa medida pode ser realizada em termos qualitativos, quantitativos ou uma combinação de ambos (KHAN; RATHNAYAKA; AHMED, 2015).

A análise qualitativa traz uma representação não numérica através de gráficos ou diagramas. Uma ferramenta muito conhecida de identificação de perigo por análise qualitativa é o HAZOP, que possibilita identificar perigos de processos, assim como identificar problemas de operação por um estudo de diferentes cenários a partir do que é considerado normal para o processo. Dentro da avaliação de risco, têm-se a matriz de risco, que relaciona a probabilidade de determinado evento acontecer e seu grau de severidade.

A análise quantitativa trata-se de uma estimativa de risco realizada através de modelos matemáticos. Utiliza-se frequência ou probabilidade para entender o nível de risco ao qual o sistema está exposto, através do levantamento de dados mensuráveis ou avaliação de especialistas.

Khan, Rathnayaka, Ahmed (2015) notam que pesquisas relacionadas a técnicas de análise de risco quantitativas e híbridas têm aumentado significativamente em relação as qualitativas ou semi-quantitativas, demonstrando a importância de tais técnicas no cenário atual dentro da área de segurança de processos.



A técnica de análise de risco híbrida traz uma combinação da análise quantitativa e qualitativa, permitindo realizar uma análise do sistema que seja informativa do ponto de vista descritivo e gráfico, assim como do ponto de vista matemático. Por exemplo, a árvore de falhas realiza uma análise dedutiva para entender como o acontecimento de diferentes eventos levam a um determinado acidente, mostrando relações de causa consequência desses eventos usando operadores lógicos. Sendo essa uma análise qualitativa. A partir dessa estrutura cálculos podem ser realizados aproveitando os operadores lógicos, demonstrando o caráter quantitativo do método.

Uma ferramenta de análise causa-consequência muito promissora, e que tem o seu uso se tornado mais frequente, é o *bowtie*. A área de pesquisa para o desenvolvimento de modelos *bowtie* é uma área em crescimento, e já é um modelo utilizado na grande maioria das indústrias químicas (KHAN; RATHNAYAKA; AHMED, 2015). Dentre as principais vantagens do uso do *bowtie*, destaca-se o gerenciamento de barreiras, o aumento da visibilidade sobre o processo e seu sistema de segurança, e sua iteratividade (ILIZÁSTIGUI PÉREZ, 2021). Porém, como todas as ferramentas de análise de risco, traz consigo os problemas relacionados as incertezas atreladas os dados escassos e de fonte subjetiva, impactando na precisão da estimativa do risco.

O *bowtie* pode ser encontrado na literatura de duas formas. Como uma combinação de uma árvore de falhas e uma árvore de eventos ou como surgiu pela primeira vez, quando é utilizado como uma ferramenta qualitativa apenas. Inovando, Cockshott (2005) desenvolve um *bowtie* como uma ferramenta de análise de risco híbrida, mantendo a estrutura tradicional proposta pelo modelo qualitativo, mas fazendo uso do conceito do Layer of Protection Analysis (LOPA). E assim, permitido o uso de frequências/probabilidades. A partir disto, conseguiu o observar o impacto de cada barreira, seja preventiva ou mitigadora, levando em consideração valores numéricos. Ainda realizando a análise de barreiras mitigadoras e preventivas de um determinado processo, Dianous e Fiévez (2005), através do ARAMIS project, utilizaram a combinação de uma árvore de falhas e uma de eventos para desenvolver os cálculos para obtenção da frequência das consequências. O projeto permite ter uma clareza sobre quais barreiras tem uma influência maior sobre o controle de risco, e se é necessário implementar novas barreiras ou otimizar as existentes.

O *bowtie* por Combinação de Árvore de Falhas e Árvore de Eventos (BCAFAE) é predominante na literatura disponível. Diferentemente do *bowtie* apresentado por Dianous e Fiévez (2005), graficamente ignoram-se as barreiras de proteção do processo (preventivas e

mitigadoras), aproveitando apenas os conceitos já conhecidos da árvore de falhas e árvore de eventos. Mesmo tendo seus conceitos consolidados na área, ainda há um problema importante a ser resolvido: o grau de incerteza na estimativa do risco. Isso devido as informações necessárias para os cálculos da frequência do evento topo e as consequências, que são provenientes de avaliações de especialista (subjetiva), base com poucos dados colhidos do processo ou de grande sensibilidade devido as próprias condições do processo.

E para lidar com essa incerteza, alguns trabalhos apresentaram importantes soluções. Uma dessas soluções é a combinação da lógica *fuzzy* e o método BCAFAE. Aqlan & Mustafa Ali (2014) desenvolveram uma aplicação com a combinação de lógica *fuzzy*, *bowtie* e princípios de lean. Os termos (usados pelos avaliadores) qualitativos de avaliação de probabilidade (possível, improvável, muito improvável), impacto e risco (muito alto, alto, médio, etc.) foram fuzificados para que pudessem ser trabalhados matematicamente. A probabilidade das ameaças e barreiras e o impacto das consequências foram avaliados por diferentes especialistas, com suas respostas posteriormente agregadas. Utilizando uma matriz de risco para a obtenção do índice de risco, realizou-se um estudo sobre a confiabilidade do sistema e quais estratégias deveriam ser adotadas para otimizar a segurança do processo (do caso em estudo). Markowski e Kotynia (2011) a partir do mesmo método, trazem o conceito da matriz de risco que será agora apresentada como uma matriz de risco fuzzificada, dessa vez utilizando o conceito de regras de inferência presente na lógica *fuzzy*, abordado no trabalho de Markowski e Mannam (2008).

Com o objetivo de diminuir ainda mais incerteza nos cálculos e deixar o *bowtie* dinâmico, alguns autores somaram ao método BCAFAE o conceito de redes bayesianas. Bilal, Mohammed e Brahim (2017) trabalhou com conjuntos *fuzzy* inicialmente, no momento de agregar as avaliações dos diferentes experts, após isso desenvolve o trabalho com números absolutos. Os resultados são apresentados através da porcentagem de contribuição de cada evento sobre a probabilidade ocorrência das consequências. Ferdous et al. (2012) aplica o mesmo método realizando o input de novos dados a estrutura para atualizar o sistema, na qual o método proposto leva em consideração a informação anterior para a realização dos novos cálculos. O trabalho consegue mostrar como o método tem sua taxa de incertezas diminuída ao logo das atualizações.

Os artigos citados anteriormente tem uma abordagem em comum: a estrutura genérica do BCAFAE. É compreensível a preferência por essa aplicação, devido ao uso já difundido desses

métodos quantitativos na área. Porém, conforme a complexidade da estrutura de confiabilidade aumenta, o método se torna dispendioso em sua construção e carregado visualmente, o que prejudica bastante a comunicação muito necessária de da área de segurança de processos.

Um outro ponto, é o uso de conjuntos *fuzzy*. Ao contrário do trabalho apresentado por Markowski e Mannam (2008), os trabalhos apenas utilizam números *fuzzy* ao invés de valores numéricos em seus cálculos. Assim, uso do conhecimento do especialista fica restrito apenas a avaliação da frequência de eventos e falhas das barreiras. Porém, através do uso dos métodos de inferência é possível realizar um estudo mais aprofundado da relações entre eventos e barreiras, baseando-se no conhecimento prévio do especialista ao longo de sua vasta experiência sobre o processo estudado.

## 2.6 Uma breve Conclusão sobre revisão bibliográfica

A combinação do método *bowtie* com lógica *fuzzy* certamente traz avanços para área de segurança de processos, que têm que lidar constantemente com dados escassos e subjetivos para realizar uma estimativa de risco. Uma estimativa que irá influenciar decisões sobre a otimização dos processos, manutenção de componentes ou viabilidade de determinado projeto. O próximo passo para avançar na otimização da ferramenta *bowtie* está numa melhor incorporação da subjetividade presente na avaliação dos eventos que circundam o risco. Dessa forma, o uso de um método de inferência *fuzzy* se apresenta como uma boa alternativa.

# Capítulo 3

## Hipótese e Objetivos

### 3.1 Hipótese

A utilização de métodos de inferência *fuzzy* aplicada a uma técnica de análise de segurança de processos *bowtie* permitirá a obtenção de um ambiente de informação qualitativa e quantitativa para orientação de tomadas de decisão.

### 3.2 Objetivo Geral

Construir um algoritmo em linguagem *Python* que abarque um sistema *fuzzy* em conjunto com o método *bowtie*, gerando valores de frequência e risco para um caso de estudo, com saídas em números e em termos linguísticos.

### 3.3 Objetivos Específicos

- Definir caso de estudo com *bowtie* estruturado
- Definir as variáveis linguísticas do sistema
- Avaliar ameaças e barreiras por sua frequência e as consequência por sua severidade
- Definir entrada e saída do sistema *fuzzy*
- Estruturar o método de inferência Mamdani para o cálculo de frequência em linguagem *Python*

- Estruturar o método de inferência Mamdani para gerar uma matriz de risco fuzificada em linguagem Python
- Estruturar o método de inferência Takagi-Sugeno para o cálculo de frequência em linguagem Python
- Estruturar o método de inferência Takagi-Sugeno para gerar uma matriz de risco fuzificada em linguagem Python
- Analisar os dados entregues pelos métodos de inferência em comparação ao obtido pelo método convencional

# Capítulo 4

## Materiais e Métodos

### 4.1 Definição do caso de estudo e estruturação do *bowtie*

Para a definição do caso de estudo a ser utilizado nesse trabalho, buscou-se um caso já elaborado dentro de um conceito de *bowtie* qualitativo. A pesquisa foi direcionada a literatura disponível na área de segurança de processos que abarcam estudos sobre o método de análise de risco *bowtie*. Algumas adaptações foram necessárias, pensando na proposta deste trabalho.

Assim, para a implementação do método proposto por este trabalho, retirou-se um caso do livro da CCPS "Bow ties in risk management a concept book for process safety". Trata-se da perda de contenção relacionado com a atividade de transporte de hidrocarbonetos voláteis em um tubulação sob pressão. No livro, também aborda-se os fatores de degradação das barreiras, mas que serão desconsiderados nesse momento. O caso é apresentado em duas figuras (Figura 4.1 e Figura 4.2) a seguir, evidenciando os eventos iniciantes, barreiras protetivas e mitigadoras e consequências.

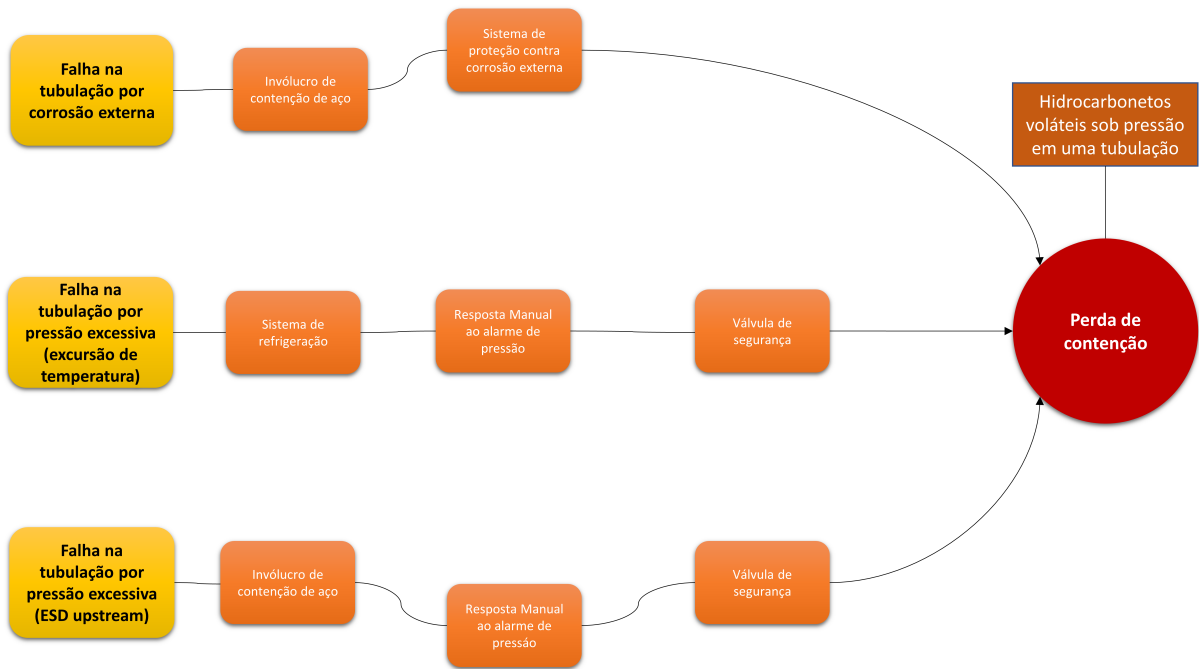


Figura 4.1: Lado esquerdo do *Bowtie*: Investigação da perda de contenção relacionado

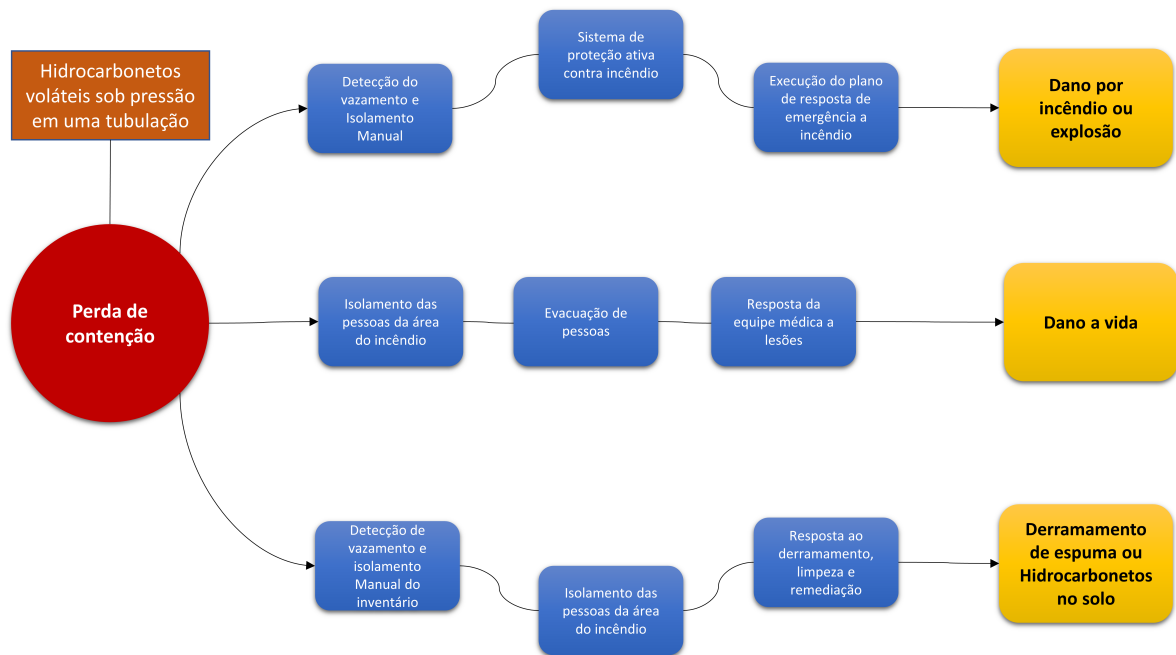


Figura 4.2: Ilustração do sistema fuzzy para cálculo de frequência e risco

A partir dessa estrutura, pensou-se na obtenção de resultados de frequência e risco das consequências a partir de uma proposta trabalhada por Cockshott (2005). Na qual eventos iniciantes e barreiras serão avaliadas quanto a frequência e PFD. Pode-se entender a proposta de Cockshott (2005) como uma combinação do *bowtie* clássico (qualitativo) com o LOPA. No

caso deste trabalho, essa combinação será implementada conjuntamente com a lógica fuzzy, utilizando dois métodos de inferência.

## 4.2 Definição das variáveis linguísticas do sistema

Após a definição do *bowtie* do processo, um importante passo para a estruturação da rotina é a definição das variáveis linguísticas do sistema. A avaliação das componentes do *bowtie* deu-se por duas variáveis: Frequência e Impacto. Ameaças e barreiras de proteção são avaliadas através da frequência. Ao passo que as consequências, uma vez que também têm seu risco avaliado, além da frequência, precisam ser classificadas também pelo seu impacto.

Tabela 4.1: Variáveis Linguísticas associadas a Frequência, Impacto e Risco

| Frequência         | Impacto            | Risco          |
|--------------------|--------------------|----------------|
| Muito Baixo/a (MB) | Insignificante (I) | Baixo/a (B)    |
| Baixo/a (B)        | Baixo/a (B)        |                |
| Moderado/a (M)     | Moderado/a (M)     | Moderado/a (M) |
| Alto/a (A)         | Alto/a (A)         |                |
| Muito Alto/a (MA)  | Catastrófico (C)   | Alto/a (A)     |

## 4.3 Avaliação das frequências das barreiras e ameaças e o impacto de cada consequência

Com as variáveis linguísticas já definidas, foi realizada uma avaliação das ameaças e das barreiras (Tabela 4.2 e Tabela 4.3) com base em informações referenciadas do livro "Process Safety Calculations" de Renato Benintendi .



Tabela 4.2: Avaliação de ameaças e barreiras protetivas

| Caminho | Ameaças                                                                    | Barreiras protetivas                  |                                                     |                              |
|---------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------|
| 1       | Falha na tubulação por corrosão externa<br>0,01                            | Invólucro de contenção de aço<br>0,01 | Sistema de proteção contra corrosão externa<br>0,02 |                              |
| 2       | Falha na tubulação por pressão excessiva (excursão de temperatura)<br>0,01 | Sistema de refrigeração<br>0,01       | Resposta manual ao alarme de pressão<br>0,1         | Válvula de segurança<br>0,01 |
| 3       | Falha na tubulação por pressão excessiva (ESD upstream)<br>0,01            | Invólucro de contenção de aço<br>0,01 | Resposta manual ao alarme de pressão<br>0,1         | Válvula de segurança<br>0,1  |

Tabela 4.3: Avaliação de barreiras mitigadoras

| Caminho | Barreiras mitigadoras                                          |                                                   |                                                                |
|---------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1       | Detecção do vazamento e Isolamento Manual<br>0,1               | Sistema de proteção ativa contra incêndio<br>0,1  | Execução do plano de resposta de emergência a incêndio<br>0,01 |
| 2       | Isolamento das pessoas da área de incêndio<br>0,1              | Evacuação de pessoas<br>0,1                       | Resposta da equipe médica a lesões<br>0,1                      |
| 3       | Detecção de vazamento e isolamento manual do inventário<br>0,1 | Isolamento das pessoas da área do incêndio<br>0,2 | Resposta ao derramamento, limpeza e remediação<br>0,02         |

## 4.4 Definição do sistema fuzzy para o cálculo da frequência e do risco

Uma vez estruturado o *bowtie*, compreendido o funcionamento do método (em relação ao uso convencional) e definidas as variáveis linguísticas a serem utilizadas, pensou-se a melhor maneira de realizar os cálculos através da lógica fuzzy. Conforme nota-se na Figura 4.1, pensando apenas o cálculo da frequência do evento topo, tem-se uma quantidade considerável de entradas. E ainda existem *bowties* bem mais complexos comparados ao deste trabalho. Então, com o objetivo de facilitar a implementação e ajuste do sistema fuzzy, considerou-se um sistema fuzzy com apenas 2 entradas (Figura 4.3). É interessante observar como o número de entradas, assim como a quantidade de variáveis linguísticas impactam no número de regras. Por exemplo, 2 entradas com o mesmo número de variáveis linguísticas iguais a 7, leva a uma quantidade de 49 regras. E com 8, 64 regras. Pelo número de variáveis linguísticas, tanto para o cálculo da frequência, quanto para o cálculo do risco, o sistema fuzzy será composto por um total de 25 regras.

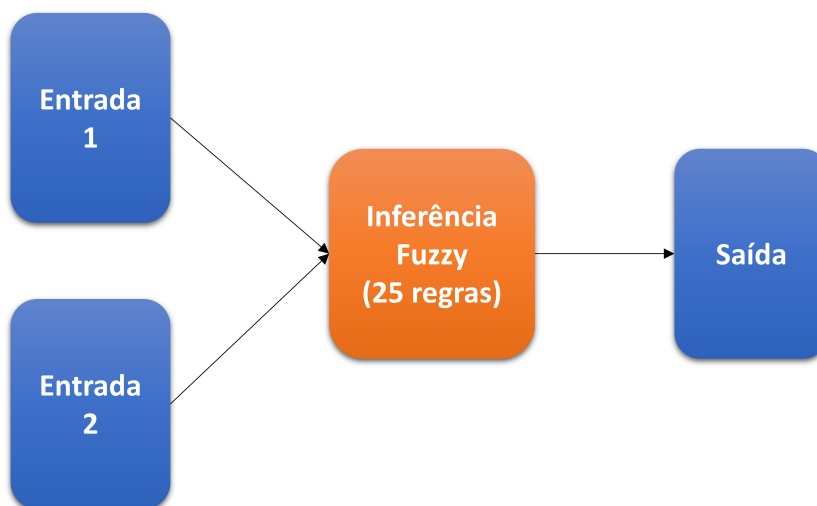


Figura 4.3: Ilustração do sistema fuzzy para cálculo de frequência e risco

## 4.5 Definição das funções de pertinência para as variáveis de entrada

Com o sistema fuzzy proposto, seguiu-se com a definição das funções de pertinência. Para esse estudo, foi proposto o uso de funções do tipo triangulares. Como os valores que definem

o universo de discurso das funções de pertinência relacionadas as frequência são de ordem muito baixa, foi aplicado o logaritmo de base 10 nesses valores. Facilitando o processo de ajuste desses parâmetros e até a representação gráfica dessas funções. Dessa forma, assumindo que o universo de discurso que define a frequência possui um valor mínimo de  $1e-12 \text{ ano}^{-1}$  e um valor máximo de  $1 \text{ ano}^{-1}$ , têm-se que a faixa de valores para o universo de discurso será entre 0 e 12.

Dito isso, foi definido os parâmetros **a** (limite inferior), **m** (centro) e **b** (limite superior) para cada uma das variáveis linguísticas que definem a frequência, no que se refere as entradas (Tabela 4.4 e Figura 4.4).

Tabela 4.4: Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência (Valores de Entrada)

| Variável Linguística | Função de Pertinência |
|----------------------|-----------------------|
| Muito Baixa (MB)     | [9 12 12]             |
| Baixa (B)            | [6 9 12]              |
| Moderada (M)         | [3 6 9]               |
| Alta (A)             | [0 3 6]               |
| Muito Alta (MA)      | [0 0 3]               |

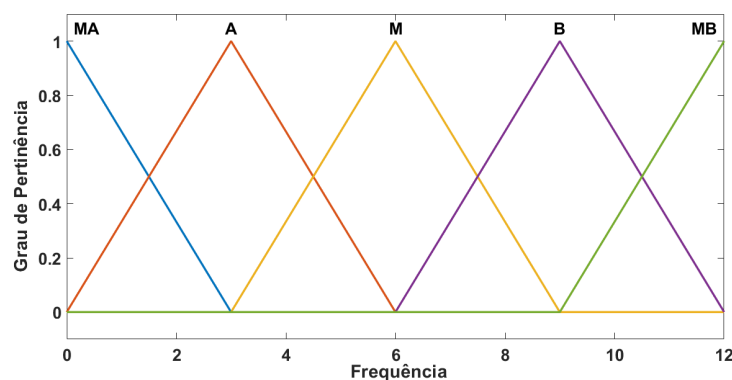


Figura 4.4: Gráfico das Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência (Valores de Entrada)

A partir da definição de todos parâmetros para as variáveis de entrada, e a proposta de regras para esse sistema, seguiu-se com o *tunning* do método ajustando os parâmetros das funções de pertinência até que se chegasse a valores próximos dos resultados obtidos através do método tradicional.

## 4.6 Estruturação do *bowtie* fuzzy pelo método de inferência Mamdani

Primeiro, definiu-se as regras que irão compor a inferência fuzzy para os operadores lógicos “E” (Tabela 4.5) e “OU” (Tabela 4.6). E ao analisar com mais atenção a Tabela 4.6 referente ao operador lógico “OU”, observa-se o uso do operador lógico “E” em cada regra. Optou-se por manter essa configuração ao buscar que o sistema *fuzzy* tenha seus resultados aproximados dos valores obtidos através do método convencional, relacionando esses antecedentes por um operador de MÍNIMO. Ambas as tabelas mostram uma proposta inicial para as regras. E a partir dessa proposta, buscou-se ajustar as funções de pertinência da variável de saída e uma nova configuração de regras. No qual a relação lógica de “E” (entre ameaças e barreiras) comporta-se como um operador de multiplicação, e a relação lógica de “OU” (entre os diferentes ramos do *bowtie*) comporta-se com um operador lógico de soma.

Tabela 4.5: Regras definidas para o nó “E” (Inferência Mamdani)

|    |    |         |   |         |       |                |
|----|----|---------|---|---------|-------|----------------|
| 1  | SE | E1 é MA | E | E1 é MA | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 2  | SE | E1 é A  | E | E1 é A  | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 3  | SE | E1 é MA | E | E1 é A  | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 4  | SE | E1 é A  | E | E1 é MA | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 5  | SE | E1 é M  | E | E1 é M  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 6  | SE | E1 é A  | E | E1 é M  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 7  | SE | E1 é M  | E | E1 é A  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 8  | SE | E1 é M  | E | E1 é MA | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 9  | SE | E1 é MA | E | E1 é M  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 10 | SE | E1 é B  | E | E1 é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 11 | SE | E1 é M  | E | E1 é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 12 | SE | E1 é B  | E | E1 é M  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 13 | SE | E1 é A  | E | E1 é B  | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 14 | SE | E1 é B  | E | E1 é A  | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 15 | SE | E1 é B  | E | E1 é MA | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 16 | SE | E1 é MA | E | E1 é B  | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 17 | SE | E1 é MB | E | E1 é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 18 | SE | E1 é B  | E | E1 é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 19 | SE | E1 é MB | E | E1 é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 20 | SE | E1 é MB | E | E1 é M  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 21 | SE | E1 é M  | E | E1 é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 22 | SE | E1 é A  | E | E1 é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 23 | SE | E1 é MB | E | E1 é A  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 24 | SE | E1 é MA | E | E1 é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 25 | SE | E1 é MB | E | E1 é MA | ENTÃO | RESULTADO é MB |

Tabela 4.6: Regras definidas para o nó “OU” (Inferência Mamdani)

|    |    |         |   |         |       |                |
|----|----|---------|---|---------|-------|----------------|
| 1  | SE | E1 é MB | E | E1 é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 2  | SE | E1 é B  | E | E1 é B  | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 3  | SE | E1 é B  | E | E1 é MB | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 4  | SE | E1 é MB | E | E1 é B  | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 5  | SE | E1 é M  | E | E1 é M  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 6  | SE | E1 é MB | E | E1 é M  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 7  | SE | E1 é M  | E | E1 é MB | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 8  | SE | E1 é M  | E | E1 é B  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 9  | SE | E1 é B  | E | E1 é M  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 10 | SE | E1 é A  | E | E1 é A  | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 11 | SE | E1 é A  | E | E1 é MB | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 12 | SE | E1 é MB | E | E1 é A  | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 13 | SE | E1 é A  | E | E1 é B  | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 14 | SE | E1 é B  | E | E1 é A  | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 15 | SE | E1 é M  | E | E1 é A  | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 16 | SE | E1 é A  | E | E1 é M  | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 17 | SE | E1 é MA | E | E1 é MA | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 18 | SE | E1 é MA | E | E1 é MB | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 19 | SE | E1 é MB | E | E1 é MA | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 20 | SE | E1 é B  | E | E1 é MA | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 21 | SE | E1 é MA | E | E1 é B  | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 22 | SE | E1 é MA | E | E1 é M  | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 23 | SE | E1 é M  | E | E1 é MA | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 24 | SE | E1 é MA | E | E1 é A  | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 25 | SE | E1 é A  | E | E1 é MA | ENTÃO | RESULTADO é MA |

## 4.7 Estruturação do *bowtie fuzzy* pelo método de inferência Takagi-Sugeno

O mesmo realizado para o método de inferência Mamdani, foi seguido para o método de inferência de Takagi-Sugeno. As regras seguem uma estrutura diferente, uma vez que os consequentes agora são constantes. Porém, pensando apenas na disposição das variáveis seguiu-se com a mesma proposta de regras já apresentadas na aplicação do método Mamdani (Tabelas 4.5 e 4.6). As funções de pertinência que definem as variáveis de entrada (Tabela 4.4), também utilizadas na aplicação anterior, estruturam esta aplicação.

### 4.7.1 Estruturação da Matriz de Risco *fuzzy*

Dado que a frequência é um dos valores de entrada para a obtenção do risco, seguiu-se com a estruturação de um sistema *fuzzy* para uma Matriz de risco. O sistema aproveita o resultado do *bowtie* (frequência das consequências) como uma de suas entradas. Para a definição das regras partiu-se da matriz ilustrada na Tabela 4.7, chegando-se assim em um total de 25 regras (Figura 4.8). As funções de pertinência que definem a entrada Frequência da Consequência

( $C_F$ ) são as mesmas propostas na Tabela 4.4. Já as funções de pertinências que descrevem o Impacto da Consequência ( $C_I$ ) são descritas na Tabela 4.9.

Tabela 4.7: Matriz de risco (Frequência x Impacto)

|            |             | Impacto        |          |          |          |              |
|------------|-------------|----------------|----------|----------|----------|--------------|
|            |             | Insignificante | Baixo    | Moderado | Alto     | Catastrófico |
| Frequência | Muito Baixa | Baixo          | Baixo    | Baixo    | Baixo    | Moderado     |
|            | Baixa       | Baixo          | Baixo    | Moderado | Moderado | Alto         |
|            | Moderada    | Baixo          | Baixo    | Moderado | Alto     | Alto         |
|            | Alta        | Baixo          | Moderado | Moderado | Alto     | Alto         |
|            | Muito Alta  | Moderado       | Moderado | Alto     | Alto     | Alto         |

Tabela 4.8: Regras definidas para o cálculo do Risco das consequências (Inferência Mamdani)

|    |    |            |   |           |       |           |
|----|----|------------|---|-----------|-------|-----------|
| 1  | SE | $C_F$ é MB | E | $C_I$ é I | ENTÃO | RISCO é B |
| 2  | SE | $C_F$ é B  | E | $C_I$ é I | ENTÃO | RISCO é B |
| 3  | SE | $C_F$ é M  | E | $C_I$ é I | ENTÃO | RISCO é B |
| 4  | SE | $C_F$ é A  | E | $C_I$ é I | ENTÃO | RISCO é B |
| 5  | SE | $C_F$ é MB | E | $C_I$ é B | ENTÃO | RISCO é B |
| 6  | SE | $C_F$ é B  | E | $C_I$ é B | ENTÃO | RISCO é B |
| 7  | SE | $C_F$ é M  | E | $C_I$ é B | ENTÃO | RISCO é B |
| 8  | SE | $C_F$ é MB | E | $C_I$ é M | ENTÃO | RISCO é B |
| 9  | SE | $C_F$ é MB | E | $C_I$ é A | ENTÃO | RISCO é B |
| 10 | SE | $C_F$ é MA | E | $C_I$ é I | ENTÃO | RISCO é M |
| 11 | SE | $C_F$ é A  | E | $C_I$ é B | ENTÃO | RISCO é M |
| 12 | SE | $C_F$ é MA | E | $C_I$ é B | ENTÃO | RISCO é M |
| 13 | SE | $C_F$ é B  | E | $C_I$ é M | ENTÃO | RISCO é M |
| 14 | SE | $C_F$ é M  | E | $C_I$ é M | ENTÃO | RISCO é M |
| 15 | SE | $C_F$ é A  | E | $C_I$ é M | ENTÃO | RISCO é M |
| 16 | SE | $C_F$ é B  | E | $C_I$ é A | ENTÃO | RISCO é M |
| 17 | SE | $C_F$ é MB | E | $C_I$ é C | ENTÃO | RISCO é M |
| 18 | SE | $C_F$ é MA | E | $C_I$ é M | ENTÃO | RISCO é A |
| 19 | SE | $C_F$ é M  | E | $C_I$ é A | ENTÃO | RISCO é A |
| 20 | SE | $C_F$ é A  | E | $C_I$ é A | ENTÃO | RISCO é A |
| 21 | SE | $C_F$ é MA | E | $C_I$ é A | ENTÃO | RISCO é A |
| 22 | SE | $C_F$ é B  | E | $C_I$ é C | ENTÃO | RISCO é A |
| 23 | SE | $C_F$ é M  | E | $C_I$ é C | ENTÃO | RISCO é A |
| 24 | SE | $C_F$ é A  | E | $C_I$ é C | ENTÃO | RISCO é A |
| 25 | SE | $C_F$ é MA | E | $C_I$ é C | ENTÃO | RISCO é A |

Tabela 4.9: Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas do Impacto das Consequências

| Variável Linguística | Função de Pertinência |
|----------------------|-----------------------|
| Insignificante       | [0 0 1]               |
| Baixo                | [0 1 2]               |
| Moderado             | [1 2 3]               |
| Alto                 | [2 3 4]               |
| Catastrófico         | [3 5 5]               |

Para definir as funções de pertinências concernentes ao risco, atribuiu-se um valor de 1 a 5, tanto para  $C_I$  quanto para  $C_F$ . Esses valores multiplicados conforme a relação proposta na matriz ( $C_F \times C_I$ ) resultou em um *range* para o risco de 1 a 25 (Figura 4.10). Com um universo de discurso definido para o Risco, obtiveram-se as funções de pertinência (Figura 5.5). A Tabela 4.11 apresenta os valores de impacto para cada consequência do evento topo no caso de estudo.

Tabela 4.10: Matriz de risco (Frequência x Impacto) apresentando os valores usados para a definição do universo de discurso das funções de pertinência que descrevem o Risco

|            |                 | Impacto            |               |               |              |                  |
|------------|-----------------|--------------------|---------------|---------------|--------------|------------------|
|            |                 | Insignificante (1) | Baixo (2)     | Moderado (3)  | Alto (4)     | Catastrófico (5) |
| Frequência | Muito Baixa (1) | Baixo (1)          | Baixo (2)     | Baixo (3)     | Baixo (4)    | Moderado (5)     |
|            | Baixa (2)       | Baixo (2)          | Baixo (4)     | Moderado (6)  | Moderado (8) | Alto (10)        |
|            | Moderada (3)    | Baixo (3)          | Baixo (6)     | Moderado (9)  | Alto (12)    | Alto (15)        |
|            | Alta (4)        | Baixo (4)          | Moderado (8)  | Moderado (12) | Alto (16)    | Alto (20)        |
|            | Muito Alta (5)  | Moderado (5)       | Moderado (10) | Alto (15)     | Alto (20)    | Alto (25)        |

Tabela 4.11: Valores numéricos que definem o grau de impacto de cada consequência

|                                                   | Impacto |
|---------------------------------------------------|---------|
| Dano por incêndio ou explosão                     | 3,5     |
| Dano a vida                                       | 4       |
| Derramamento de espuma ou hidrocarbonetos no solo | 3       |

### 4.7.2 Software utilizado para a implementação do sistema *fuzzy*

Para a implementação do sistema *fuzzy* foram utilizadas duas bibliotecas construídas em linguagem Python: Simpful (AVELAR; CASTILLO; SORIA, 2020) e FuzzyLab (SPOLAOR et al., 2020). Para o método de inferência Mamdani, o Simpful. E para o método de Takagi-Sugeno, o FuzzyLab.



## Capítulo 5

### Resultados e Discussão

#### 5.1 Aplicação do Método de Inferência Mamdani para o cálculo da Frequência das consequências

Buscando aproximar os valores de saída dos valores de frequência obtidos através método convencional, por tentativa e erro, alterou-se alguns parâmetros dos conjuntos fuzzy de entrada e saída do sistema. Esse ajuste nas funções de pertinência e regras propostas levou aos seguintes conjuntos fuzzy de saída presentes nas Tabelas 5.2 e 5.3, e aos conjuntos fuzzy de entrada que constam na Tabela 5.1. Pode-se observar nas tabelas que todos os conjuntos fuzzy tiveram alteração em seus parâmetros definidores. As regras propostas para operador lógico “OU” mantiveram-se as mesmas. As funções presentes na Tabela 5.2 podem ser também observadas nas Figuras 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência (Valores de Entrada pós alterações)

| Variável Linguística | Função de Pertinência |
|----------------------|-----------------------|
| Muito Baixa (MB)     | [7,5 12 12]           |
| Baixa (B)            | [4,947 7,5 10,5]      |
| Moderada (M)         | [2,25 4,68 7,5]       |
| Alta (A)             | [1 1,68 4,95]         |
| Muito Alta (MA)      | [0 0 2,25]            |

Tabela 5.2: Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência (Valores de Saída)

| Função de Pertinência |              |           |
|-----------------------|--------------|-----------|
| Variável Linguística  | "E"          | "OU"      |
| Muito Baixa(MB)       | [5,9 12 12]  | [7 12 12] |
| Baixa (B)             | [4 7 8]      | [3 6,2 7] |
| Moderada (M)          | [2,23 4 5,9] | [2 3,6 6] |
| Alta (A)              | [1 2 4]      | [1 1,5 3] |
| Muito Alta (MA)       | [0 0 2,167]  | [0 0 2]   |

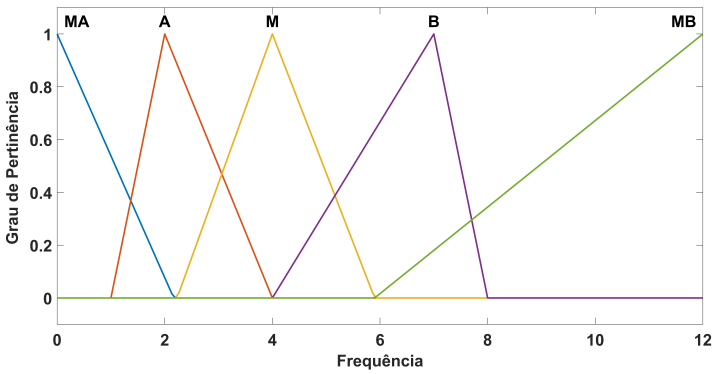


Figura 5.1: Gráfico das Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência para operador lógico “E” (Valores de Saída)

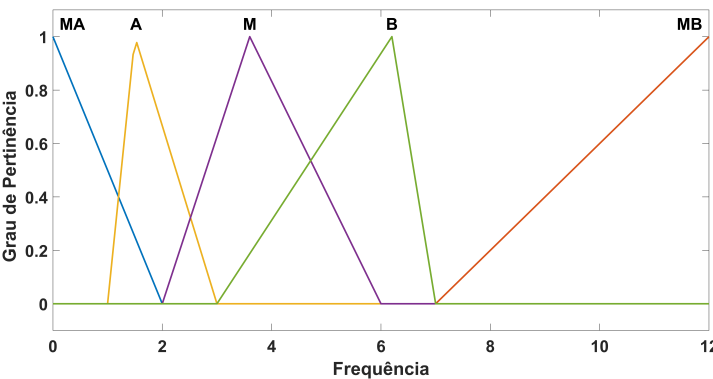


Figura 5.2: Gráfico das Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas da Frequência para o operador lógico “OU” (Valores de Saída)

Tabela 5.3: Regras definidas para o operador lógico “E” pós ajustes

|    |    |            |   |            |       |                |
|----|----|------------|---|------------|-------|----------------|
| 1  | SE | $E_1$ é MA | E | $E_2$ é MA | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 2  | SE | $E_1$ é A  | E | $E_2$ é A  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 3  | SE | $E_1$ é MA | E | $E_2$ é A  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 4  | SE | $E_1$ é A  | E | $E_2$ é MA | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 5  | SE | $E_1$ é M  | E | $E_2$ é M  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 6  | SE | $E_1$ é A  | E | $E_2$ é M  | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 7  | SE | $E_1$ é M  | E | $E_2$ é A  | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 8  | SE | $E_1$ é M  | E | $E_2$ é MA | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 9  | SE | $E_1$ é MA | E | $E_2$ é M  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 10 | SE | $E_1$ é B  | E | $E_2$ é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 11 | SE | $E_1$ é M  | E | $E_2$ é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 12 | SE | $E_1$ é B  | E | $E_2$ é M  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 13 | SE | $E_1$ é A  | E | $E_2$ é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 14 | SE | $E_1$ é B  | E | $E_2$ é A  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 15 | SE | $E_1$ é B  | E | $E_2$ é MA | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 16 | SE | $E_1$ é MA | E | $E_2$ é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 17 | SE | $E_1$ é MB | E | $E_2$ é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 18 | SE | $E_1$ é B  | E | $E_2$ é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 19 | SE | $E_1$ é MB | E | $E_2$ é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 20 | SE | $E_1$ é MB | E | $E_2$ é M  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 21 | SE | $E_1$ é M  | E | $E_2$ é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 22 | SE | $E_1$ é A  | E | $E_2$ é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 23 | SE | $E_1$ é MB | E | $E_2$ é A  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 24 | SE | $E_1$ é MA | E | $E_2$ é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 25 | SE | $E_1$ é MB | E | $E_2$ é MA | ENTÃO | RESULTADO é MB |

Para observar o comportamento do sistema *Fuzzy* nessa aplicação foi gerado um gráfico de superfície para ambos os operadores lógicos. (Figuras 5.3 e 5.4). Ao realizar uma comparação entre a superfície gerada antes das alterações com a superfície posterior as alterações, pode-se observar que a falta de sensibilidade para quando ambas as entradas possuem entradas restritas a valores aproximadamente entre 8 e 12, se mantém com algumas flutuações. Porém, após os ajustes, podemos ver que essa falta de sensibilidade apresenta-se também num momento em que ambas as entradas encontram-se com valores entre 10 e 12 (referentes ao conjunto fuzzy “Muito Baixo”).

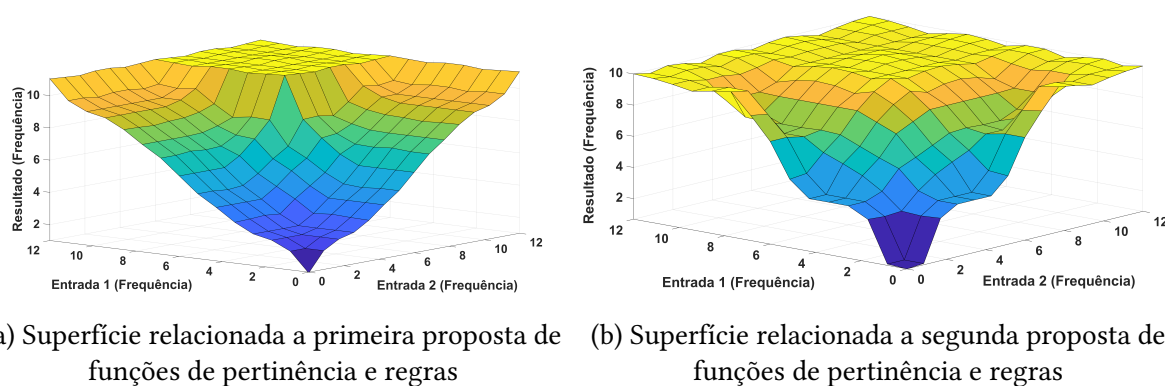


Figura 5.3: Superfície para operador lógico 'E' representando a combinação de diferentes valores de frequência - Método de inferência Mamdani

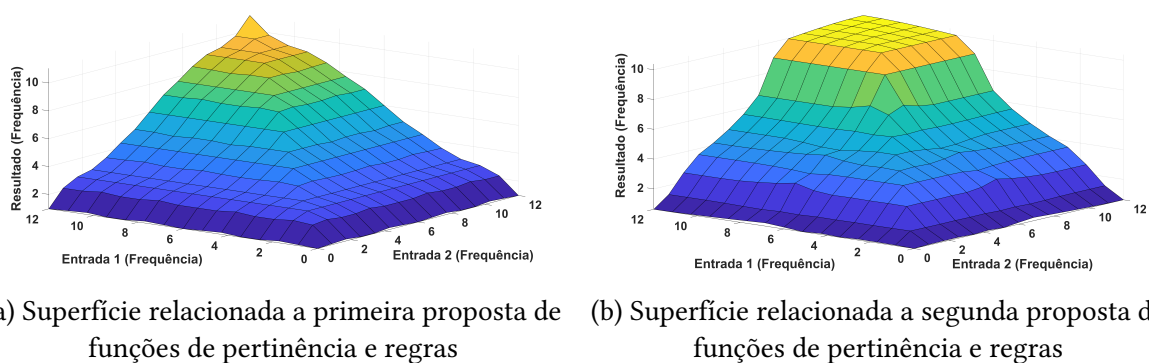


Figura 5.4: Superfície para operador lógico 'OU' representando a combinação de diferentes valores de frequência - Método de inferência Mamdani

Na Tabela 5.4, encontra-se uma comparação entre os valores de frequência das consequências obtidos pelo método convencional e o método bowtie utilizando Mamdani. Apresentando também os termos linguísticos de saída para o evento topo e suas consequências. Esses termos são definidos conforme o grau de pertinência dos valores de saída em relação aos conjuntos fuzzy de entrada.

Tabela 5.4: Comparação entre as frequências calculadas pelo método convencional e pelo método de inferência Mamdani

| Descrição      |                                                   | Método Convencional | Método de Inferência Mamdani | Termo Linguístico |
|----------------|---------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------|
| Evento Topo    | Perda de Contenção                                | 2,20e-06            | 2,745e-06                    | Baixo             |
| Consequência 1 | Dano por incêndio ou explosão                     | 2,20E-10            | 1,189e-10                    | Muito Baixo       |
| Consequência 2 | Dano a Vida                                       | 2,20e-09            | 2,033e-10                    | Muito Baixo       |
| Consequência 3 | Derramamento de espuma ou hidrocarbonetos no solo | 8,80e-10            | 1,245e-10                    | Muito Baixo       |

5.1.1 Aplicação da Matriz de Risco *Fuzzy* no cálculo de risco das consequências por Mamdani

Se tratando do cálculo do risco, definiu-se as funções de pertinência (Tabela 5.5). Uma vez utilizada a lógica *fuzzy* para realizar os cálculos, gera-se uma matriz de risco fuzzificada (Figura 5.5). Os valores de risco calculados com a matriz de risco *fuzzy* são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.5: Funções de Pertinência que definem cada uma das Variáveis Linguísticas do Risco

| Função de Pertinência |              |
|-----------------------|--------------|
| Baixo/a (B)           | [0 0 7,44]   |
| Moderado/a (M)        | [5 7,143 12] |
| Alto/a (A)            | [10 25 25]   |

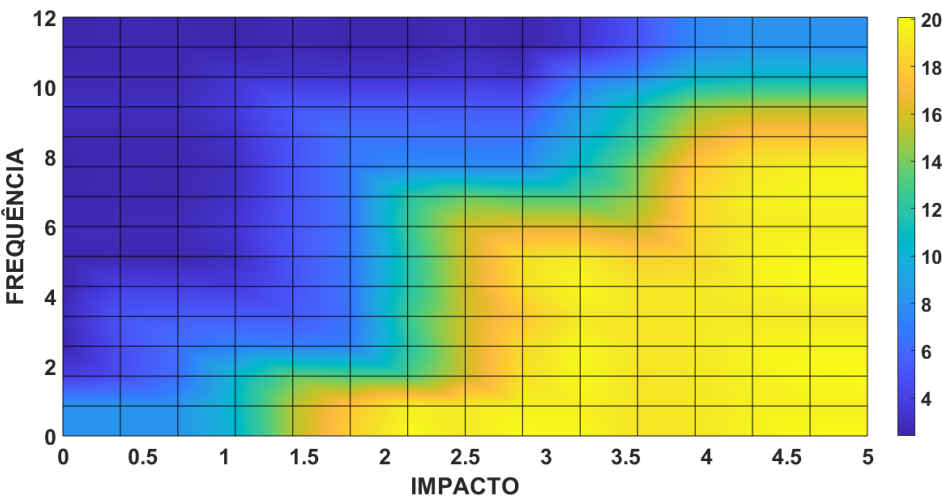


Figura 5.5: Matriz de Risco Fuzzificada pelo Método de Mamdani

Tabela 5.6: Valores resultantes do cálculo de risco pela matriz de risco fuzificada pelo método de inferência Mamdani

|                |                                                      | Risco          |                   |
|----------------|------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
|                | Descrição                                            | Valor numérico | Termo Linguístico |
| Consequência 1 | Dano por incêndio ou explosão                        | 10,9           | Moderado          |
| Consequência 2 | Dano a Vida                                          | 17,4           | Alto              |
| Consequência 3 | Derramamento de espuma<br>ou hidrocarbonetos no solo | 5,88           | Moderado          |

## 5.2 Aplicação do Método de Inferência Takagi-Sugeno para o cálculo da Frequência da consequências

Os ajustes no sistema *fuzzy* pelo método de Takagi-Sugeno levaram a um conjunto de regras (Tabela 5.7) para o operador lógico “E” diferente das apresentadas na Tabela 4.5. As constantes que definem os consequentes dessas regras são apresentadas na Tabela 5.8. Os conjuntos fuzzy que definem as entradas desse sistema são os mesmos obtidos como resultado das entradas para o método Mamdani (Tabela 5.1).

Tabela 5.7: Regras definidas para o operador lógico “E” pós ajustes para o método de Takagi-Sugeno

|    |    |            |   |            |       |                |
|----|----|------------|---|------------|-------|----------------|
| 1  | SE | $E_1$ é MA | E | $E_2$ é MA | ENTÃO | RESULTADO é MA |
| 2  | SE | $E_1$ é A  | E | $E_2$ é A  | ENTÃO | RESULTADO é M  |
| 3  | SE | $E_1$ é MA | E | $E_2$ é A  | ENTÃO | RESULTADO é H  |
| 4  | SE | $E_1$ é A  | E | $E_2$ é MA | ENTÃO | RESULTADO é H  |
| 5  | SE | $E_1$ é M  | E | $E_2$ é M  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 6  | SE | $E_1$ é A  | E | $E_2$ é M  | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 7  | SE | $E_1$ é M  | E | $E_2$ é A  | ENTÃO | RESULTADO é B  |
| 8  | SE | $E_1$ é M  | E | $E_2$ é MA | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 9  | SE | $E_1$ é MA | E | $E_2$ é M  | ENTÃO | RESULTADO é A  |
| 10 | SE | $E_1$ é B  | E | $E_2$ é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 11 | SE | $E_1$ é M  | E | $E_2$ é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 12 | SE | $E_1$ é B  | E | $E_2$ é M  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 13 | SE | $E_1$ é A  | E | $E_2$ é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 14 | SE | $E_1$ é B  | E | $E_2$ é A  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 15 | SE | $E_1$ é B  | E | $E_2$ é MA | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 16 | SE | $E_1$ é MA | E | $E_2$ é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 17 | SE | $E_1$ é MB | E | $E_2$ é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 18 | SE | $E_1$ é B  | E | $E_2$ é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 19 | SE | $E_1$ é MB | E | $E_2$ é B  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 20 | SE | $E_1$ é MB | E | $E_2$ é M  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 21 | SE | $E_1$ é M  | E | $E_2$ é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 22 | SE | $E_1$ é A  | E | $E_2$ é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 23 | SE | $E_1$ é MB | E | $E_2$ é A  | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 24 | SE | $E_1$ é MA | E | $E_2$ é MB | ENTÃO | RESULTADO é MB |
| 25 | SE | $E_1$ é MB | E | $E_2$ é MA | ENTÃO | RESULTADO é MB |

Tabela 5.8: Valores de Frequência que descrevem as constantes de cada consequente das 25 regras de inferência para os operadores lógicos de “E” e “OU”

|                  | Constantes |      |
|------------------|------------|------|
|                  | “E”        | “OU” |
| Baixa (B)        | 10         | 11   |
| Muito Baixa (MB) | 6,5        | 9    |
| Moderada (M)     | 5,5        | 5    |
| Alta (A)         | 4,6        | 4    |
| Muito Alta (MA)  | 1          | 1    |

Para também observar o comportamento do sistema *Fuzzy* pelo método de Takagi-Sugeno, apresenta-se o gráfico de superfície para ambos os operadores lógicos. (Figuras 5.6 e 5.7).

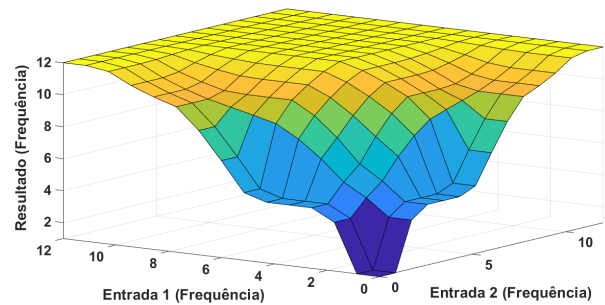


Figura 5.6: Gráfico de Superfície para operador lógico “E” representando a combinação de diferentes valores de frequência pelo método de Takagi-Sugeno

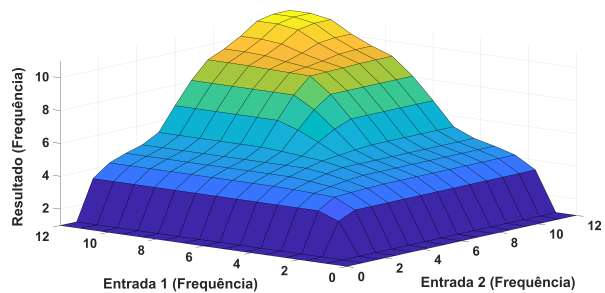


Figura 5.7: Gráfico de Superfície para operador lógico “OU” representando a combinação de diferentes valores de frequência pelo método de Takagi-Sugeno

Na Tabela 5.9, encontra-se uma comparação entre os valores de frequência das consequências obtidos pelo método convencional e o método *bowtie* utilizando Takagi-Sugeno.

Tabela 5.9: Comparação entre as frequências calculadas pelo método convencional e pelo método de inferência Takagi-Sugeno

| Descrição      |                                                      | Método       | Método de                | Termo Linguístico |
|----------------|------------------------------------------------------|--------------|--------------------------|-------------------|
|                |                                                      | Convencional | Inferência Takagi-Sugeno |                   |
| Evento Topo    | Perda de CONTENÇÃO                                   | 2,20E-06     | 2,005e-06                | Baixo             |
| Consequência 1 | Dano por incêncio ou explosão                        | 2,20E-10     | 1e-10                    | Muito Baixo       |
| Consequência 2 | Dano a Vida                                          | 2,20E-09     | 1e-10                    | Muito Baixo       |
| Consequência 3 | Derramamento de espuma<br>ou hidrocarbonetos no solo | 8,80E-10     | 1e-10                    | Muito Baixo       |

Assim como observado na superfície resultante para o método Mamdani (Figura 5.3b), quando ambos os valores de entrada se aproximam de valores entre 10 e 12, o sistema perde



em sensibilidade. Inclusive, podemos observar até menos flutuações em comparação com o que foi obtido no método Mamdani.

5.2.1 Aplicação da Matriz de Risco *Fuzzy* no cálculo de risco das consequências por Takagi-Sugeno

Para a matriz de risco fuzzificada utilizando o método de Takagi-Sugeno, definiu-se as constantes consequentes das regras (Tabela 5.10). A matriz de risco fuzzificada está representada na Figura 5.8. Os valores de risco para cada consequência encontra-se na Tabela 5.11.

Tabela 5.10: Valores de Frequência que descrevem as constantes de cada consequente das 25 regras de inferência para cálculo dos valores de risco

| Variável Linguística | Constante |
|----------------------|-----------|
| Baixo/a (B)          | 2         |
| Moderado/a (M)       | 10        |
| Alto/a (A)           | 25        |

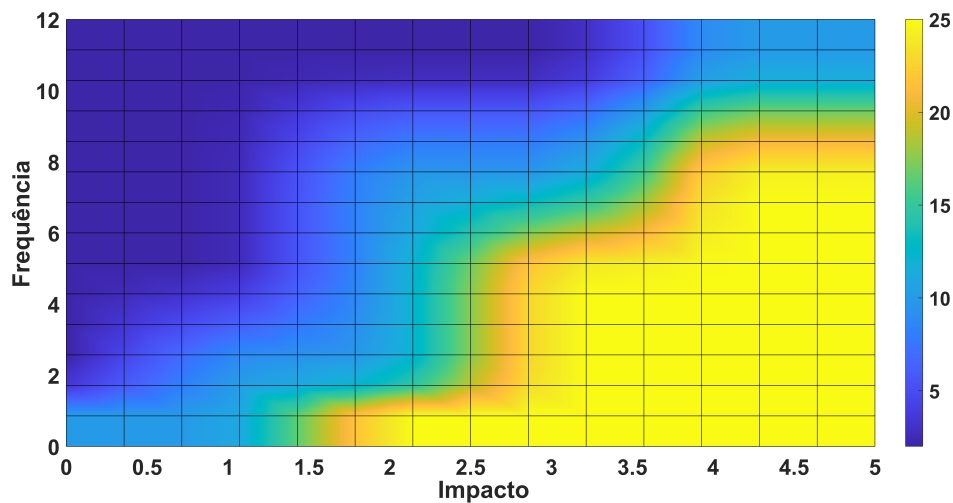


Figura 5.8: Matriz de Risco Fuzzificada pelo Método de Takagi-Sugeno

Tabela 5.11: Valores resultantes do cálculo de risco pela matriz de risco fuzificada pelo método de inferência Takagi-Sugeno

|                |                                                      | Risco          |                   |
|----------------|------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
|                | Descrição                                            | Valor numérico | Termo Linguístico |
| Consequência 1 | Dano por incêndio ou explosão                        | 7,1            | Baixo             |
| Consequência 2 | Dano a Vida                                          | 13,5           | Alto              |
| Consequência 3 | Derramamento de espuma<br>ou hidrocarbonetos no solo | 3,88           | Baixo             |

### 5.3 Um breve análise sobre os dois métodos de inferência no cálculo de frequência e risco

Analisando na dificuldade de ajuste dos dois modelos (Tabela 5.12), o método Mamdani apresentou um maior desafio. A quantidade de parâmetros a serem ajustados se torna relativamente maior pela característica do consequente de suas regras. Se pensarmos além dos ajuste das regras, cada variável linguística com sua função de pertinência específica carrega três parâmetros (tratando-se de uma função triangular) a serem ajustados. O que não acontece com o método de Takagi-Sugeno, pelo menos na configuração sugerida neste trabalho, na qual o consequente de cada regra é uma constante representando cada variável linguística de frequência ou de risco. A consequência 2 (Dano a Vida) foi uma questão para ambos os métodos. Seu valor de  $2,20\text{e-}9$  não foi aproximado por nenhum dos dois métodos. Nos testes realizados com o método de Takagi-Sugeno, percebeu-se que o método não possuía muita sensibilidade para valores nessa ordem de magnitude, diferente do método de Mamdani. Para esse último, um melhor ajuste através de algoritmo de otimização pode trazer melhores resultados.

Tabela 5.12: Valores de frequência calculados para os métodos de inferência e método convencional

|                |                                                      | Frequência              |                     |                     |
|----------------|------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
|                | Descrição                                            | Mamdani                 | Takagi-Sugeno       | Método Convencional |
| Evento Topo    | Perda de Contenção                                   | 2,745e-6 (Baixo)        | 2,005e-6 (Baixo)    | 2,20e-6             |
| Consequência 1 | Dano por incêndio ou explosão                        | 1,189e-10 (Muito Baixo) | 1e-10 (Muito Baixo) | 2,20e-10            |
| Consequência 2 | Dano a Vida                                          | 2,033e-10 (Muito Baixo) | 1e-10 (Muito Baixo) | 2,20e-9             |
| Consequência 3 | Derramamento de espuma<br>ou hidrocarbonetos no solo | 1,245e-10 (Muito Baixo) | 1e-10 (Muito Baixo) | 8,80e-10            |

As matrizes de risco obtidas por ambos os métodos também possuem um perfil aproximado (Figura 5.5 e 5.8). Os valores de risco obtidos pelo método de Mamdani são relativamente maiores, mesmo possuindo valores de frequência menores que os apresentados pelo método de Takagi-Sugeno (Tabela 5.13). Essa diferença está associada a configuração de ambos os sistemas. Porém, se verificarmos o grau de pertinência dos valores numéricos obtidos pelo método de Takagi-Sugeno, fazendo uso dos conjuntos fuzzy da saída do sistema pelo método Mamdani, observamos que ambos os sistemas concordam-se no resultado.

Tabela 5.13: Valores de risco calculados pelo método de Mamdani e Takagi-Sugeno

|                |                                                      | Risco           |                |
|----------------|------------------------------------------------------|-----------------|----------------|
|                | Descrição                                            | Mamdani         | Takagi-Sugeno  |
| Consequência 1 | Dano por incêndio ou explosão                        | 10,9 (Moderado) | 7.1 (Moderado) |
| Consequência 2 | Dano a Vida                                          | 17,4 (Alto)     | 13,5 (Alto)    |
| Consequência 3 | Derramamento de espuma<br>ou hidrocarbonetos no solo | 5,88 (Moderado) | 3.88 (Baixo)   |

Essas diferenças entre os valores podem ser melhor estudadas por especialistas, principalmente utilizando métodos de análise de sensibilidade e ou índices de medida crítica. Podendo ser, inclusive, uma sugestão para próximos trabalhos.

## 5.4 BCAFAE: ABORDAGEM POR LÓGICA FUZZY

As aplicações apresentadas anteriormente envolveram a combinação do método convencional do *Bowtie* com o método LOPA, alinhados ao uso de dois métodos de

inferência: Mamdani e Takagi-Sugeno. Duas outras aplicações foram geradas envolvendo o uso do BCAFAE alinhado também ao uso de um sistema *fuzzy* baseado em regras, resultando em duas publicações. Ambas as aplicações fizeram uso de um estudo de caso proposto por Markowski (2009), a ruptura de um tanque de armazenamento de isobuteno. Os artigos encontram-se no Apêndice deste trabalho.

## Capítulo 6

### Conclusão

Este trabalho, no objetivo de melhorar um método de análise de risco, buscou combinar uma ferramenta de análise que vem sendo muito utilizada na indústria Óleo e Gás com um método matemático muito conhecido na área de controle de processos. O *bowtie* cresce como uma opção de cálculo de risco dentro das indústrias. Essa ferramenta, quando utilizada na sua versão tradicional diferente do BCAFAE, no quesito comunicação, cumpre o propósito de deixar clara a estrutura de confiabilidade do processo. Uma vez que apresenta claramente os componentes que compõe o conjunto de barreiras de proteção responsáveis tanto pela prevenção quanto pela mitigação de determinados eventos. A avaliação de um sistema como esse agrega muita informação subjetiva advinda de anos de experiência de variados especialistas no processo. Essa informação carrega uma incerteza que precisa ser levada em consideração na estimativa do risco. A alternativa foi implementar um método de inferência *fuzzy* englobando as variáveis linguísticas utilizados dentro da área de segurança para realizar a avaliação de ameaças e barreiras de proteção. Os trabalhos até então propostos nas revistas da área não levam em consideração métodos de inferência como Mamdani e Takagi-Sugeno para o cálculo de frequência, embora utilizem números *fuzzy* para avaliar cada componente do sistema. Neste trabalho focou-se em realizar uma aproximação dos resultados do sistema *fuzzy* (para ambos os métodos) com os resultados obtidos pelo método convencional. Ao mostrar como essa aproximação pôde ser realizada através dos métodos de inferência, deixa-se claro a possibilidade de agregar outras informações sobre as diferentes relações entre barreiras e ameaças. Abordando mais relações além das tradicionais relações lógicas de 'E' e 'OU'. O mesmo pode ser comentado sobre a proposta da matriz de risco fuzzificada. A matriz de risco é uma ferramenta que tem como entradas avaliações carregadas

de imprecisões, que podem ter sua incerteza melhor trabalhado com uso da lógica *fuzzy*, conforme proposto neste trabalho.

## Referências bibliográficas

AQLAN, F.; MUSTAFA ALI, E. Integrating lean principles and fuzzy bow-tie analysis for risk assessment in chemical industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 29, p. 39–48, 2014. ISSN 0950-4230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.01.006>.

AVELAR, E.; CASTILLO, O.; SORIA, J. Fuzzy Logic Controller with Fuzzylab Python Library and the Robot Operating System for Autonomous Robot Navigation: A Practical Approach. In: **Intuitionistic and Type-2 Fuzzy Logic Enhancements in Neural and Optimization Algorithms: Theory and Applications**. Edição: Oscar Castillo, Patricia Melin e Janusz Kacprzyk. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 355–369. ISBN 978-3-030-35445-9. DOI: [10.1007/978-3-030-35445-9\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35445-9_27).

AVEN, T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. **European Journal of Operational Research**, v. 253, n. 1, p. 1–13, 2016. ISSN 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>.

Chapter 14 - Layer of Protection Analysis. In: BENINTENDI, R. (Ed.). **Process Safety Calculations (Second Edition)**. Second Edition. [S.l.]: Elsevier, 2021. p. 687–719. ISBN 978-0-12-823516-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823516-4.00001-7>.

BILAL, Z.; MOHAMMED, K.; BRAHIM, H. Bayesian network and bow tie to analyze the risk of fire and explosion of pipelines. **Process Safety Progress**, v. 36, n. 2, p. 202–212, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/prs.11860>.

CCPS; INSTITUTE, E. The Bow Tie Model. In: BOW Ties in Risk Management. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2018. cap. 2, p. 15–52. ISBN 9781119490357. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119490357.ch2>.

COCKSHOT, J. Probability Bow-Ties: A Transparent Risk Management Tool. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 83, n. 4, p. 307–316, 2005. 7th World Congress of Chemical Engineering. ISSN 0957-5820. DOI: <https://doi.org/10.1205/psep.04380>.

DE DIANOUS, V.; FIÉVEZ, C. ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance. **Journal of Hazardous Materials**, v. 130, n. 3, p. 220–233, 2006. Outcome of the ARAMIS Project: Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the Framework of the SEVESO II Directive. ISSN 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.010>.

FERDOUS, R. et al. Handling and updating uncertain information in bow-tie analysis. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 25, n. 1, p. 8–19, 2012. ISSN 0950-4230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.06.018>.

ILIZÁSTIGUI PÉREZ, F. Writing ‘usable’ Nuclear Power Plant (NPP) safety cases using bowtie methodology. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 149, p. 850–857, 2021. ISSN 0957-5820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.022>.

KHAN, F.; RATHNAYAKA, S.; AHMED, S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 98, p. 116–147, 2015. ISSN 0957-5820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.005>.

MARKOWSKI, A. S.; KOTYNIA, A. “Bow-tie” model in layer of protection analysis. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 89, n. 4, p. 205–213, 2011. ISSN 0957-5820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.04.005>.

MARKOWSKI, A. S.; MANNAN, M. S. Fuzzy risk matrix. **Journal of Hazardous Materials**, v. 159, n. 1, p. 152–157, 2008. Papers Presented at the 2006 Annual Symposium of the Mary Kay O’Connor Process Safety Center. ISSN 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.055>.

MARKOWSKI, A. S.; MANNAN, M. S.; BIGOSZEWSKA, A. Fuzzy logic for process safety analysis. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 22, n. 6, p. 695–702, 2009. Papers Presented at the 2007 and 2008 International Symposium of the Mary Kay O’Connor Process Safety Center and Papers Presented at the WCOGI 2007. ISSN 0950-4230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.11.011>.

SPOLAOR, S. et al. Simpful: A User-Friendly Python Library for Fuzzy Logic. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, v. 13, p. 1687–1698, 1 2020. ISSN 1875-6883. DOI: <https://doi.org/10.2991/ijcis.d.201012.002>.