

## RESUMO

Sabe-se que Avaliações Comparativas baseadas em Risco são função de uma série de fatores que interagem entre si, muitos dos quais com campo de atuação e importância relativa discutíveis. No entanto, a definição e o papel de cada um desses fatores formam um panorama complexo, de fronteira nebulosa, demandando a aplicação do julgamento e da experiência de analistas de diversas áreas de conhecimento, objetivando compor tal Avaliação através de uma abordagem multidisciplinar e geralmente demandando longas e inúmeras reuniões ou Workshops. A Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) se mostra como uma metodologia de inteligência artificial bastante indicada na abordagem de casos onde os parâmetros envolvidos e/ou seus papéis em uma determinada resposta não estão bem definidos, são vagos ou incompletos, assim como quando os modelos já desenvolvidos para abordar o problema são incipientes ou pouco maduros. Neste trabalho em específico, o objeto da Avaliação Comparativa vem a ser cenários de destinação de estruturas submarinas a serem descomissionadas, o que reforça ainda mais o contexto estabelecido acima e, portanto, a aderência da Lógica Difusa no ataque ao problema, mesclando embasamento teórico e subjetivo. Assim, pretende-se aqui demonstrar de maneira simplificada o potencial de aplicação desta metodologia nas referidas Avaliações Comparativas, através do estabelecimento de um modelo *fuzzy* simplificado, utilizando dados hipotéticos.

**Palavras-chave:** Descomissionamento. Projetos. Sistemas Submarinos. Análise de Risco. Análise Comparativa. Lógica Difusa.

## ABSTRACT

Risk-Based Comparative analysis are function to a series of factors that interact with each other. These factors' relative importance and field of action are debatable, and their interaction creates complex panoramas, with nebulous borders, involving various fields of knowledge. The analysis of such panoramas relies upon multidisciplinary teams of experienced analysts, usually requiring several meetings and workshops. Fuzzy logic is an artificial intelligence methodology quite indicated in approaching cases whose parameters involved and/or their roles in a given response are not well defined, are vague or incomplete, as well as in cases in which the phenomena existing models are incipient or immature. In this work, scenarios for the destination of submarine structures to be decommissioned are submitted to Risk-Based Comparative Assessment. The context established above reinforces the choice of using Fuzzy Logic to approach the problem, combining theoretical and subjective knowledge in order to find a solution. The intention of this work is to demonstrate, in a simplified way, the potential and adherence of Fuzzy Logic in approaching the referred Comparative Assessment, through the establishment of a simplified fuzzy model using hypothetical data.

**Keywords:** Decommissioning. Projects. Subsea Systems. Risk Analysis. Comparative Assessment. Fuzzy Logic.

## 1 INTRODUÇÃO

A atividade de descomissionamento, no âmbito da indústria de óleo e gás, é relativamente recente, e gradativamente vem ganhando maturidade com a crescente demanda mundial por projetos deste tipo.

Neste cenário, a regulação é incipiente, inclusive não existindo em muitos países. No âmbito mundial, o Mar do Norte tem sido uma região que tem estabelecido referências para a indústria, possuindo maior histórico de projetos e regulação mais madura.

Evidente que a simples transposição de normas e regulamentos já existentes para novas realidades e cenários se mostra indevida, dado que é imperativo se considerar as particularidades de cada região produtora, assim como as características dos sistemas de produção locais, de modo a adequar a regulação às características e necessidades regionais.

Assim, considerando os sistemas *offshore* de produção, um dos objetos de grande discussão diz respeito à definição de critérios e regramentos que indiquem a adequada destinação das estruturas que compõem o sistema submarino de produção.

Neste sentido, uma das abordagens que mais tem tido aceitação na indústria é a Avaliação Comparativa Baseada em Riscos (*Comparative Assessment Risk-Based*).

Esta abordagem consta no Guia publicado pelo Departamento de Energia e Mudança Climática do Reino Unido (DEPARTMENT, 2011), intitulado *Decommissioning of Offshore Oil and Gas Installations and Pipelines under the Petroleum Act 1998*. Por sua vez, o *Petroleum Act 1998* vem a ser a publicação que estabelece as diretrizes e requisitos principais para descomissionamento na Plataforma Continental do Reino Unido (DEPARTMENT, 2011).

Já as obrigações internacionais do Reino Unido nesta matéria são estabelecidas pela *Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic* (OSPAR), importante órgão regulador na Europa, que tem, no âmbito do Reino Unido, o *Department of Energy and Climate Change* (DECC) como seu representante, sendo o próprio DECC "a autoridade competente em descomissionamento no Reino Unido para os propósitos da OSPAR" (DEPARTMENT, 2011, tradução nossa). Já a OSPAR, ou *OSPAR Commission*, vem a ser a Comissão estabelecida por meio da Convenção para a Proteção do Ambiente Marinho do Atlântico Nordeste (OSPAR Convention), ocorrida em 1992.

No caso da Avaliação Comparativa (de opções) para destinação de estruturas submarinas, tem-se um grande número de variáveis envolvidas, cada uma delas contribuindo com maior ou menor grau de importância, e ainda com fronteiras de atuação imprecisas, além de pouco histórico para projetos desta tipologia. Os projetos estabelecem demandas não ou pouco executadas, o que desafia as técnicas convencionais e equipe envolvida, gerando muitas incertezas para todas as partes interessadas do Projeto.

Faltam referências e métricas de Projeto, tais como as publicadas pela *Independent Project Analysis* (IPA), ou as que existem possuem baixa consistência, visto que há poucos dados históricos e compilados a respeito desta tipologia de projeto.

O DECC (DEPARTMENT, 2011), com base na OSPAR (CONVENTION, 1998), estabelece critérios para serem considerados na avaliação comparativa (de opções) para destinação de estruturas submarinas e, para cada um destes critérios, seu documento sugere fatores a serem considerados.

No entanto, a lista de fatores a ser adotada na avaliação, assim como sua importância relativa constitui um exemplo típico e inicial que nos evidencia as incertezas, domínios vagos ou mal estabelecidos relacionados ao problema, o que não é raro na Engenharia.

Neste sentido, pode-se dizer que a tomada de decisão baseada em informações incompletas tem sempre sido um desafio na vida profissional de um engenheiro. Mesmo o mais sofisticado modelo ou técnica empreendida dificilmente poderá levar em conta em sua plenitude todos os pontos envolvidos que norteiem a tomada de decisão. Isso não ocorre apenas devido a nossa falta do entendimento completo dos fenômenos envolvidos, mas principalmente devido a limitada quantidade de informações disponíveis (CHAMEAU et al., 1983), além de sua inexatidão.

A Lógica Difusa foi desenvolvida a partir da necessidade em se transportar para o campo matemático o conceito da imprecisão decorrente de informações vagas ou incompletas. Na Lógica Booleana as informações são tratadas através de operadores "verdadeiro" e "falso", isto é, o conceito de "quanto é verdadeiro" ou "quanto é falso" um conjunto de informações ou a relação entre elas, não pode ser modelado. Isto traduz a incapacidade, por parte da Lógica Booleana, de tratar "verdades parciais".

Na Lógica Difusa, a pertinência de um dado conceito pode, em um determinado universo de discurso, assumir qualquer valor entre 0 e 1. Assim, naturalmente, a utilização de termos linguísticos na modelagem e aplicação da Lógica Difusa é corrente.

Desta forma, uma das principais características da Lógica Difusa é poder modelar variáveis linguísticas tais como baixo, velho, quente, forte, através das chamadas funções de pertinência. Estas funções têm o papel de descrever como determinado conceito se "comporta" no seu campo de verdades parciais. E isto se aproxima da forma como o cérebro humano lida com os problemas e suas complexidades relacionadas.

No campo da Engenharia, decisões são geralmente baseadas no conhecimento científico (objetivo) e na experiência traduzida no julgamento do engenheiro (subjetivo). Este, por muitas vezes, se vê obrigado a tomar decisões baseadas em informações imprecisas e subjetivas. Daí a teoria da Lógica Difusa surgir como ferramenta adequada para englobar informações de

forma racional e sistemática, assim como seu grau de imprecisão (incerteza).

Neste cenário, a Lógica Difusa se apresenta como uma importante ferramenta capaz de agregar não apenas postulados teóricos, mas também o julgamento humano, cognitivo, inclusive na avaliação comparativa (de cenários) para destinação de estruturas submarinas.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é demonstrar, através de um modelo *fuzzy* simplificado, o alto potencial que a aplicação desta metodologia de inteligência artificial possui enquanto ferramenta a ser utilizada na abordagem das avaliações comparativas baseadas em risco para definição de opção de destinação de estruturas submarinas a serem descomissionadas.

## 3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA BASEADA EM RISCOS E A LÓGICA DIFUSA

### 3.1 A COMPARATIVE ASSESSMENT RISK BASED

Conforme já dito, no âmbito dos Projetos de Descomissionamento de sistemas offshore de produção, um dos objetos de grande discussão diz respeito à definição de critérios e regramentos que indiquem a adequada destinação das estruturas que compõem o sistema submarino de produção, sendo a Avaliação Comparativa Baseada em Riscos (*Comparative Assessment Risk-Based*) uma das abordagens que mais tem tido aceitação na indústria.

O DECC (DEPARTMENT, 2011), com base na OSPAR (CONVENTION, 1998), estabelece os seguintes critérios para serem considerados na avaliação comparativa (de opções) para destinação de estruturas submarinas, conforme a Figura 1, critério de segurança, critério ambiental, critério técnico, critério social e critério econômico. Para cada um destes critérios, há aspectos a serem considerados, tais como: risco para outros usos no mar (segurança), impactos no ambiente marinho (ambiental), impacto às comunidades costeiras (social), impacto na viabilidade econômica de novos projetos (econômico).

O formato e conteúdo estabelecidos pelo DECC (DEPARTMENT, 2011) representam um guia para a aplicação da indústria, servindo, portanto, de trilha, e não de trilho, para os analistas. Desta forma, aplicações têm sido desenvolvidas com maior ou menor grau de adaptação às necessidades locais, tais como Perenco (2014) e Maersk Oil (2016), no entanto baseadas nas referências estabelecidas pela publicação do DECC.

ASSESSMENT CRITERIA	Matters to be considered	DECOMMISSIONING OPTIONS			
		Complete removal to land	Partial removal to land	Leave wholly in place	Disposal at sea *
		█	█	█	█
Safety	risk to personnel				
	risk to other users of the sea				
	risk to those on land				
Environmental	marine impacts				
	other environmental compartments (including emissions to the atmosphere)				
	energy/resource consumption				
	other environmental consequences (including cumulative effects)				
Technical	risk of major project failure				
Societal	fisheries impacts				
	amenities				
	communities				
Economic					
		█	█	█	

\* Although under OSPAR Decision 98/3 the disposal of the substructure of a concrete installation at a deep-water licensed site is still an option this must be considered against the UK Government announcements at the time of the Decision when Ministers stated that there would be no toppling and no local or remote dumping of offshore installations.

Figura 1 – Critérios e Fatores de Avaliação.  
Fonte: DEPARTMENT, 2011, p. 62.

A Figura 2 mostra a aplicação para uma das estruturas do escopo do Projeto Thames da Perenco (2014).

No entanto, a importância relativa de cada um desses critérios e fatores na avaliação comparativa constitui um exemplo típico de julgamento subjetivo. Antes disto, a própria definição das variáveis que comporão a avaliação já é objeto de discussão. Quais serão consideradas? Quais serão excluídas?

Prosseguindo, que valores serão atribuídos à probabilidade e ao impacto de cada opção de descomissionamento considerada para a estrutura em avaliação? Estas definições são subjetivas e, numa condição convencional, são abordadas em longos e desgastantes Workshops de Risco com inúmeros participantes. No entanto, há uma metodologia de inteligência artificial que pode suportar a implementação de um modelo para abordar esta questão de forma mais efetiva: trata-se da Lógica Difusa, que veremos em mais detalhes na seção a seguir.

### 3.2 LÓGICA DIFUSA

A Lógica Difusa foi primeiramente proposta por Zadeh (1965) para representação de informações vagas. Ao contrário da Lógica Clássica Booleana, onde um elemento é considerado pertencer ou não a um determinado

Table 4.2: Comparative Assessment of Bure 'O' to Thames AW (PL371 and PL374) and Bure West to Thames AR (PL1635 and PL1636) Decommissioning Options

Assessment Criteria	Decommissioning Options <sup>(Note 1)</sup>															
	1			2			3			4			5			
	L	I	R	L	I	R	L	I	R	L	I	R	L	I	R	
<b>1. Safety</b>																
1.1 Risk to other users of the sea (post ops)	1	1	1	2	1	2	2	2	2	4	2	1	2	3	2	6
1.2 Risk to those offshore (during ops)	3	3	9	2	3	6	1	1	1	3	3	9	1	1	1	
1.3 Risk to 3rd party assets/vessels (during ops)	2	2	2	2	2	4	1	2	2	2	2	2	1	1	1	
1.4 Level of Diving Intervention	2	4	8	1	1	1	1	1	1	1	4	5	20	1	1	1
1.5 Risk to those onshore (during ops)	3	3	9	1	2	2	1	1	1	2	2	4	1	1	1	1
Average Safety Value:	5.8			3.0			1.8			7.4			2.0			
<b>2. Environmental</b>																
2.1 Chemical Discharge	2	2	4	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4	1	1	1
2.2 Hydrocarbon discharge	2	2	4	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4	1	1	1
2.3 Seabed Disturbance	5	5	25	2	3	6	2	3	6	2	3	6	1	1	1	1
2.4 Energy Usage	5	5	25	5	5	25	5	5	25	5	5	25	1	1	1	1
2.5 Estimated Discard to Sea (% of total material)	1	1	1	5	5	25	5	5	25	5	5	25	5	5	25	25
2.6 Estimated Discard to Landfill (% of total material)	5	5	25	1	1	1	1	1	1	1	2	5	10	1	1	1
2.7 Estimated % of total area of SAC which is impacted	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Average Environmental Value:	12.1			8.6			8.9			10.7			4.4			
<b>3. Technical</b>																
3.1 Technical Challenge	3	3	9	1	1	1	1	1	1	1	3	3	9	1	1	1
3.2 Weather Sensitivity	3	3	9	3	3	9	2	3	6	4	3	12	1	1	1	1
3.3 Risk of Major Project failure	2	4	8	2	2	4	2	3	6	2	3	6	1	1	1	1
Average Technical Value:	8.7			4.7			4.3			9.0			1.0			
<b>4. Societal</b>																
4.1 Fisheries and Shipping Access (post ops)	1	1	1	3	4	12	3	4	12	3	4	12	3	4	12	12
4.2 Communities (onshore)	2	3	6	1	1	1	1	1	1	1	2	3	6	1	1	1
Average Societal Value:	3.5			6.5			6.5			9.0			6.5			
<b>5. Commercial</b>																
5.1 Economic	5	5	25	2	1	2	2	2	4	5	2	10	1	1	1	1
5.2 Ongoing Responsibility	1	1	1	3	3	9	3	3	9	3	3	9	3	3	9	9
Average Commercial Value:	13.0			5.5			6.5			9.5			5.0			
<b>Overall Comparative Score</b>	<b>8.6</b>			<b>5.6</b>			<b>5.6</b>			<b>9.1</b>			<b>3.8</b>			

Note 1: Decommissioning Options  
 1. Completely remove the line;  
 2. Trench and bury the approximate 9.5% of exposed line(s) (PL374);  
 3. Rock dump the line in specific areas where the line is uncovered (ca. 9.5%);  
 4. Partial removal of uncovered sections of the line;  
 5. Leave in situ with monitoring.

Figura 2 – Avaliação Comparativa para duto do Projeto de Descomissionamento do Campo de Thames.  
Fonte: PERENCO, 2014, p. 23.

conjunto, a Lógica Difusa cria um grau de pertinência deste elemento em relação aos conjuntos considerados. Isto é, um elemento pode pertencer a um conjunto dentro de um intervalo de pertinência de 0 a 1, onde os extremos representam a Lógica Booleana (Figura 3).

Essa característica da Lógica Difusa constitui-se em uma poderosa ferramenta matemática para lidar com sistemas pouco definidos, modelando o papel do cérebro humano no gerenciamento de informações inexatas. Predicados como velho, quente, alto, podem se constituir em informações extremamente vagas cujas fronteiras são áreas nebulosas.

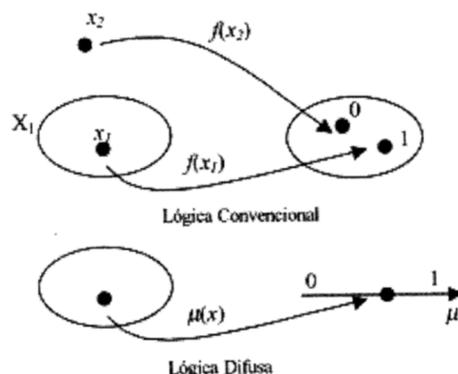


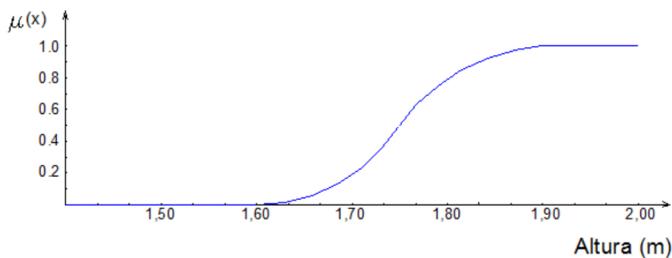
Figura 3 – Lógica Convencional e Lógica Difusa  
Fonte: BUENO; STEMMER; BORGES, 2000, p. 31.

No caso da Avaliação Comparativa, as fronteiras entre os fatores que estão intimamente ligados aos riscos associados são inexatas e suas informações idem. Por exemplo, qual o impacto para as comunidades *onshore*, no caso de recolhimento de um duto flexível de produção de 8"? Pode-se dizer que esse valor é alto ou baixo? A informação é, portanto, vaga e ganha maior complexidade quando avaliada por diferentes *stakeholders*. O mesmo se aplicaria a outros fatores como desafio técnico-operacional, sensibilidade ambiental, ou impacto ambiental *onshore*.

### 3.2.1 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

As funções de pertinência são o ponto chave no estabelecimento de uma modelagem baseada em Lógica Difusa e representam um conjunto de ambiguidades às quais uma variável está sujeita, traduzidas na linguagem natural. Elas relacionam, através de pares ordenados, a variável linguística com a ambiguidade da informação.

Ao se dizer que uma determinada pessoa é alta, pode-se estabelecer uma função de pertinência para representar um conjunto de valores que define o que é uma pessoa alta através da variável Altura, conforme o Gráfico 1.



**Gráfico 1 – Função de Pertinência "Altura".**

Fonte: O AUTOR, 2017.

Assim, pode-se estabelecer uma função que nos diz que com 1,60m de altura a pessoa é considerada alta com uma pertinência de 0,0. Já uma pessoa com 1,70m é alta com pertinência de 0,2 e com 1,90m a pessoa é considerada alta (pertinência 1,0). No entanto se a função objetivo fosse altura para jogador de basquete a função de pertinência deveria ser refeita.

Utiliza-se, portanto, uma função contínua ou não para definir o grau de pertinência de uma determinada variável nebulosa. Essa função pode assumir uma infinidade de formas, porém as mais usadas são as funções sino (distribuição normal), trapezoidal e triangular.

### 3.2.2 MODELO BASEADO EM LÓGICA DIFUSA

Segundo Alvarez Grima e Verhoef (1999), a construção de um modelo baseado em Lógica Difusa deve apresentar essencialmente quatro estágios, descritos a seguir.

#### 3.2.2.1 Primeiro estágio: seleção das variáveis de entrada e de saída

Nesta etapa as variáveis envolvidas no fenômeno a ser estudado são selecionadas baseadas não apenas no conhecimento científico, mas também no julgamento do analista.

#### 3.2.2.2 Segundo estágio: estabelecimento da relação entre as variáveis de entrada (antecedentes) e de saída (consequentes) - Base de Regras

Cada regra estabelecida no modelo consiste basicamente de duas partes: a parte SE com uma ou várias premissas e a parte ENTÃO com uma consequência.

Esta etapa define a dependência da variável de saída às relações estabelecidas entre as variáveis de entrada através de regras do tipo "SE-ENTÃO" hierarquicamente organizadas.

#### 3.2.2.3 Terceiro estágio: definição do tipo das funções de pertinência

Os tipos mais comuns de função de pertinência são triangulares e trapezoidais. No entanto, quando análises probabilísticas estão envolvidas no processo, utilizam-se as funções de distribuição. A função triangular, pela sua simplicidade é a mais utilizada. Porém em análises complexas a definição do tipo de função de pertinência pode ser igualmente complexa.

#### 3.2.2.4 Quarto estágio: defuzzificação

A defuzzificação é a etapa de transformação das variáveis linguísticas dos conjuntos difusos de saída em um valor numérico de inferência. Vários métodos de defuzzificação são propostos na literatura (JAGER, 1995; BABUSKA, 1996), sendo o mais utilizado o Método do Centro de Gravidade (CoG), cujo resultado é proveniente da maior pertinência correspondente à abscissa do centro de gravidade do conjunto difuso de saída.

No que tange à modelagem do cérebro humano, os modelos *fuzzy* embarcarão tanto mais valor agregado quanto mais for refletido no modelo o conhecimento de especialistas no problema objeto da análise, conhecimento este incorporado fundamentalmente na definição dos fatores e sua importância relativa, assim como no estabelecimento das funções de pertinência e base de regras. Desta forma, quanto mais o conhecimento e julgamento de engenharia de especialistas de uma dada área de conhecimento for apropriado no modelo *fuzzy*, melhores serão seus resultados e comportamento.

## 4 UM ENSAIO DE MODELO FUZZY INICIAL

Como descrito anteriormente, vários fatores estão envolvidos na avaliação comparativa (de opções) para destinação de estruturas submarinas. Alguns inerentes ao material, tais como fluido transportado, diâmetro, vida útil, integridade do duto submarino; outros inerentes à condição ambiental, tais como sensibilidade do fundo marinho, lâmina d'água; já outros relacionados ao impacto ambiental, tais como emissão de gases de efeito estufa (GEE, *offshore e onshore*), volume ocupado *onshore*; havendo ainda fatores sociais, econômicos, dentre outros.

No entanto, para a montagem do modelo em Lógica Difusa, torna-se necessário o estabelecimento de relação entre as variáveis (base de regras) através de regras pré-determinadas. Como a complexidade da modelagem aumenta exponencialmente com o aumento do número de fatores envolvidos, para exemplificar, consideraremos apenas três fatores que influenciam na avaliação comparativa, baseada em risco, para destinação de estruturas submarinas: lâmina d'água, vida útil do duto e diâmetro do duto.

Nesta mesma linha, consideraremos a opção de descomissionamento como sendo a "remoção completa para terra", segundo opções contempladas no *DECC Guidance Notes* (DEPARTMENT, 2011).

Para o estabelecimento das funções de pertinência, usaremos diagramas triangulares e/ou trapezoidais que são de baixa complexidade e bastante utilizados em análises mais simplificadas.

### 4.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA

Para o estabelecimento e análise de cada variável do modelo, é importante entender que quando da exploração de seu comportamento, assume-se o "congelamento" de todas as demais variáveis.

#### 4.1.1 LÂMINA D'ÁGUA

Parece consenso que quanto maior a lâmina d'água, maior será o risco global de remoção completa para terra, da estrutura associada. Adota-se aqui os seguintes termos linguísticos para essa variável de entrada: muito rasa, rasa, média, profunda, ultraprofunda. Assim, propõem-se a função de pertinência conforme Gráfico 2.

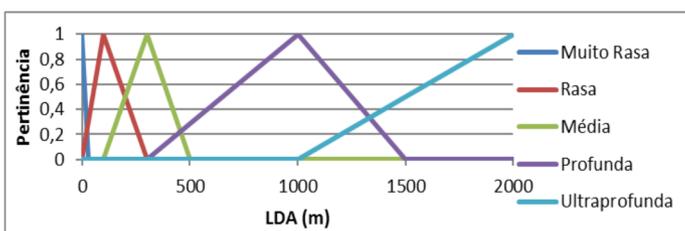


Gráfico 2 – Função de Pertinência Lâmina D'água (LDA).

Fonte: O AUTOR, 2017.

#### 4.1.2 VIDA ÚTIL REMANESCENTE DO DUTO

Considera-se aqui a vida útil remanescente da estrutura, ou seja, sua vida útil de projeto diminuída de sua idade. Não são aqui considerados possíveis períodos fora de operação do duto, o que aumentaria sua vida útil remanescente.

Assim, inversamente à variável anterior, quanto maior a vida útil remanescente do duto, menor será o risco global de remoção completa para terra, da estrutura associada. Adota-se aqui os seguintes termos linguísticos para essa variável de entrada: muito curta, curta, média, longa, muito longa. Propõem-se a função de pertinência conforme Gráfico 3.

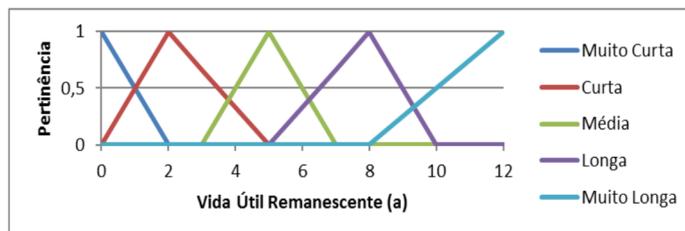


Gráfico 3 – Função de Pertinência Vida Útil do Duto.

Fonte: O AUTOR, 2017.

#### 4.1.3 DIÂMETRO DO DUTO

Neste caso, quanto maior o diâmetro da estrutura associada, maior será o risco global de remoção completa para terra já que seu recolhimento envolve maiores cargas.

Adota-se aqui os seguintes termos linguísticos para essa variável de entrada: muito baixo, baixo, médio, alto, muito alto. Assim, propõem-se a função de pertinência conforme Gráfico 4.

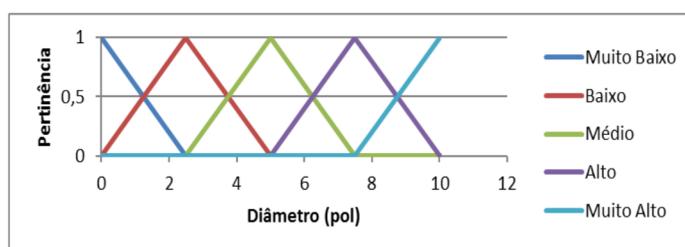


Gráfico 4 – Função de Pertinência Diâmetro do Duto.

Fonte: O AUTOR, 2017.

### 4.2 VARIÁVEIS DE SAÍDA

De forma alinhada ao estabelecido com a metodologia de *Comparative Assessment Risk-Based* (DEPARTMENT, 2011), denominaremos como variável de saída o *Risco Global*. Tal denominação vem do entendimento de que, na avaliação, há presença de riscos de diversos tipos (operacionais, ambientais, sociais, econômicos) e que, portanto, o risco obtido é composto por estes diversos aspectos, sendo aqui denominado *Risco Global*.

## 4.2.1 RISCO GLOBAL

Para a variável de saída dividiu-se o Risco Global em três diferentes graus, conforme adotado em Perenco (2014): baixo, médio e alto, utilizando-se uma escala hipotética de 0 a 25, sendo 0 (zero) um Risco Global completamente baixo e 25 (vinte e cinco) um Risco Global completamente alto. Vale ressaltar que aqui não se adotará a obtenção do risco por meio da probabilidade e impacto. Assim, no âmbito deste trabalho, esta classificação na Figura 4 tem o objetivo apenas de proporcionar uma referência de escala para a variável de saída Risco Global, suportando sua função de pertinência.

Vale ainda dizer que, para sistemas mais complexos e robustos, a variável Risco Global poderia ser dividida em um número maior de termos linguísticos.

Assim, propõem-se a função de pertinência conforme Gráfico 5.

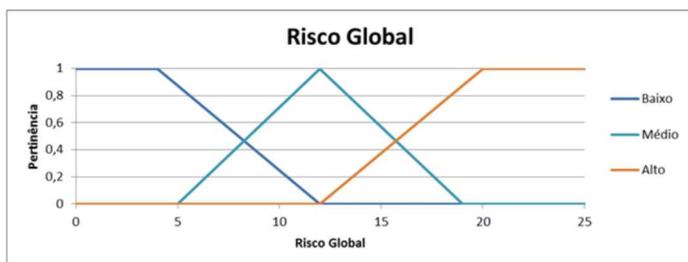


Gráfico 5 – Função de Pertinência Risco Global.

Fonte: O AUTOR, 2017.

## 4.3 BASE DE REGRAS

Uma vez estabelecidas as funções de pertinência das variáveis de entrada, deve-se então atrelá-las às variáveis de saída através de regras de relação ou base de regras. As regras de relação são basicamente inspiradas na experiência do avaliador e no conhecimento técnico científico. É nesta fase que as variáveis linguísticas tomam um papel importante nas análises subjetivas.

Para as regras de risco global de alternativas de descomissionamento de estruturas submarinas, de maneira simplificada, pode-se definir:

- se lâmina d'água é rasa e vida útil do duto é média **então** risco global é médio;
- se vida útil do duto é muito curta e diâmetro do duto é muito alto **então** risco global é alto;
- se lâmina d'água é profunda e diâmetro do duto é muito alto **então** risco global é alto;
- se vida útil do duto é longa **ou** lâmina d'água é rasa **então** risco global é baixo;
- se diâmetro do duto é baixo **ou** lâmina d'água é rasa **então** risco global é baixo.

As regras podem ser inúmeras e hierarquicamente distribuídas dando maior complexidade, consistência e robustez ao modelo, aumentando o esforço computacional. No exemplo mostrado neste trabalho a intenção é simplificar ao máximo para apresentar o método em si.

Durante o processo de inferência *fuzzy* os números *fuzzy* de saída são redefinidos, obedecendo a associação aos consequentes das regras. A combinação de tais números *fuzzy* forma o conjunto difuso de saída.

Neste nosso modelo simplificado, adotaremos como método de inferência o Operador Max-Min, em que se "corta" a função de pertinência do consequente no valor de pertinência indicado pelo antecedente (Min) e se combina (união) os números *fuzzy* ativados pelos consequentes das regras, estabelecendo o conjunto *fuzzy* de saída, que então é definido pela união dos números *fuzzy* ativados, cada qual com suas maiores pertinências respectivas (Max).

Além disso, vale destacar o papel dos operadores lógicos "E" e "OU". Tais operadores, utilizados nos antecedentes das regras, tem papel de minimização e maximização, respectivamente. Assim, quando utilizado o operador lógico "E" nos antecedentes (variáveis de entrada), o menor valor de ativação é transferido para o consequente (variável de saída). E quando utilizado o operador lógico

Likelihood / Uncertainty	Impact				
	1 (Very Low)	2 (Low)	3 (Medium)	4 (High)	5 (Very High)
1 (Very Low)	1	2	3	4	5
2 (Low)	2	4	6	8	10
3 (Medium)	3	6	9	12	15
4 (High)	4	8	12	16	20
5 (Very High)	5	10	15	20	25
Key:	High Risk	Medium Risk	Low Risk		

Figura 4 – Matriz de Classificação de Risco.

Fonte: PERENCO, 2014, p. 40.

“OU”, o maior valor de ativação dos antecedentes é transferido para o consequente.

Quanto ao Método de Defuzzificação, adotaremos o Método do CoG que consiste no cálculo da abscissa do centro de gravidade do conjunto difuso de saída.

## 4.4 SIMULAÇÃO

A seguir, apresenta-se 3 exemplos de aplicação, com 3 estruturas e condições de contorno, conforme descrito a seguir:

- estrutura 1*: duto flexível de gás lift de 6” e 425m, disposto no leito marinho a uma profundidade de 150m, com vida útil remanescente de 5 anos;
- estrutura 2*: UEH de 2,5” e 250m, numa lâmina d’água de 120m, com vida útil remanescente de 8 anos;
- estrutura 3*: duto flexível de produção de 8” e 810m, numa lâmina d’água de 900m e vida útil remanescente de 1 ano.

### 4.4.1 ESTRUTURA 1

Duto flexível de gás *lift* de 6” e 425m, disposto no leito marinho a uma profundidade de 150m, com vida útil remanescente de 5 anos.

Neste caso, tem-se os seguintes valores de inferência:

- se** lâmina d’água é rasa (0,75) **e** vida útil do duto é média (1,00) **então** risco global é médio (0,75);
- se** vida útil do duto é muito curta (0,00) **e** diâmetro do duto é muito alto (0,00) **então** risco global é alto (0,00);
- se** lâmina d’água é profunda (0,00) **e** diâmetro do duto é muito alto (0,00) **então** risco global é alto (0,00);
- se** vida útil do duto é longa (0,00) **ou** lâmina d’água é rasa (0,75) **então** risco global é baixo (0,75);
- se** diâmetro do duto é baixo (0,00) **ou** lâmina d’água é rasa (0,75) **então** risco global é baixo (0,75).

Vale reforçar, neste primeiro exemplo, o papel dos operadores lógicos “E” e “OU”, funcionando como operadores de minimização e maximização, respectivamente, conforme já colocado na seção 4.3 acima. Assim, na primeira regra, frente aos valores 0,75 e 1,00 nos antecedentes, é transferido para o consequente o valor 0,75, face à presença do operador lógico “E” (minimização). De forma similar, na quarta e quinta regras, constata-se a transferência do valor de ativação 0,75 para o consequente, apesar dos antecedentes apresentarem valores de ativação 0,00 e 0,75, face à presença do operador lógico “OU” (maximização).

Portanto, no exemplo 1, tem-se os seguintes resultados para a variável de saída Risco Global: Risco Global Baixo: 0,75; Risco Global Médio: 0,75; Risco Global Alto: 0,00.

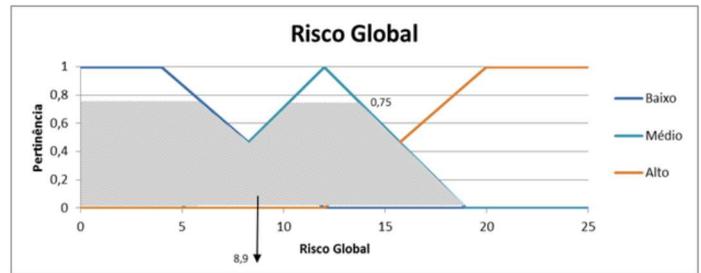


Gráfico 6 – Conjunto Difuso de Saída – Estrutura 1.

Fonte: O AUTOR, 2017.

Após a defuzzificação, tem-se como resultado, para a Estrutura 1, um risco global de 8,9, que representa a abscissa do centro de gravidade do conjunto difuso de saída. Este valor indica um risco global *médio* para a opção de “remoção completa para terra” desta Estrutura 1.



### 4.4.2 ESTRUTURA 2

UEH de 2,5” e 250m, numa lâmina d’água de 120m, com vida útil remanescente de 8 anos.

Neste caso, tem-se os seguintes valores de inferência:

- se** lâmina d’água é rasa (0,90) **e** vida útil do duto é média (0,00) **então** risco global é médio (0,00);
- se** vida útil do duto é muito curta (0,00) **e** diâmetro do duto é muito alto (0,00) **então** risco global é alto (0,00);
- se** lâmina d’água é profunda (0,00) **e** diâmetro do duto é muito alto (0,00) **então** risco global é alto (0,00);
- se** vida útil do duto é longa (1,00) **ou** lâmina d’água é rasa (0,90) **então** risco global é baixo (1,00);
- se** diâmetro do duto é baixo (1,00) **ou** lâmina d’água é rasa (0,90) **então** risco global é baixo (1,00).

Portanto, no exemplo 2, tem-se os seguintes resultados para a variável de saída Risco Global: Risco Global Baixo: 1,00; Risco Global Médio: 0,00; Risco Global Alto: 0,00.

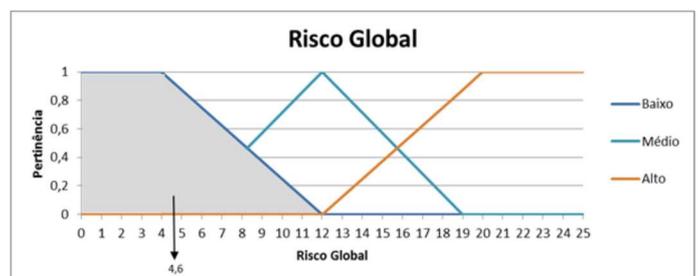


Gráfico 7 – Conjunto Difuso de Saída – Estrutura 2.

Fonte: O AUTOR, 2017.

Após a defuzzificação, tem-se como resultado, para a Estrutura 2, um risco global de 4,6, que representa a abscissa do centro de gravidade do conjunto difuso de saída. Este valor indica um risco global *baixo* para a opção de “remoção completa para terra” desta Estrutura 2.



### 4.4.3 ESTRUTURA 3

Duto flexível de produção de 8" e 810m, numa lâmina d'água de 900m e vida útil remanescente de 1 ano.

Neste caso, tem-se os seguintes valores de inferência:

- se lâmina d'água é rasa (0,00) e vida útil do duto é média (0,00) **então** risco global é médio (0,00);
- se vida útil do duto é muito curta (0,50) e diâmetro do duto é muito alto (0,20) **então** risco global é alto (0,20);
- se lâmina d'água é profunda (0,86) e diâmetro do duto é muito alto (0,20) **então** risco global é alto (0,20);
- se vida útil do duto é longa (0,00) **ou** lâmina d'água é rasa (0,00) **então** risco global é baixo (0,00);
- se diâmetro do duto é baixo (0,00) **ou** lâmina d'água é rasa (0,00) **então** risco global é baixo (0,00).

Portanto, no exemplo 3, tem-se os seguintes resultados para a variável de saída Risco Global: Risco Global Baixo: 0,00; Risco Global Médio: 0,00; Risco Global Alto: 0,20.

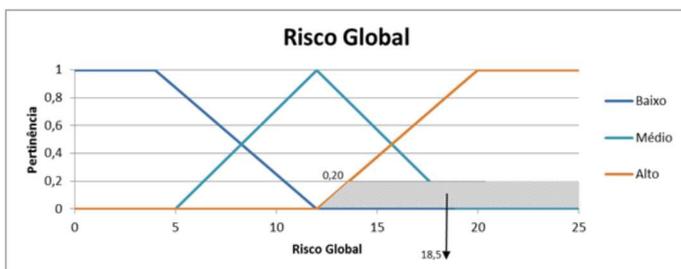


Gráfico 8 – Conjunto Difuso de Saída – Estrutura 3.

Fonte: O AUTOR, 2017.

Após a defuzzificação, tem-se como resultado, para a Estrutura 3, um risco global de 18,5, que representa a abscissa do centro de gravidade do conjunto difuso de saída. Este valor indica um risco global *alto* para a opção de "remoção completa para terra" desta Estrutura 3.

## 5 SUGESTÃO DE NOVOS TRABALHOS

Tendo em visto o caráter e abordagem introdutórios do presente trabalho (com foco na apresentação da metodologia em si) diversos outros trabalhos podem ser desdobrados, avançando no desenvolvimento do tema aqui introduzido. Neste sentido, pode-se destacar:

- trabalho focando na realização de pesquisa de opinião com especialistas das áreas relacionadas, objetivando definir variáveis de entrada, funções de pertinência e pesos relativos entre variáveis, segundo a visão destes especialistas, provendo assim insumos para um modelo *fuzzy* mais robusto e calibrado;
- trabalho aplicando modelo *fuzzy* definido em sistemas submarinos específicos, gerando um Estudo de Caso;
- trabalho aplicando resultado do modelo *fuzzy* em cartografia submarina, atribuindo às estruturas submarinas o risco obtido com o modelo *fuzzy* e

representando este resultado espacialmente. Esta abordagem pode gerar retroalimentações, com características espaciais (tais como cruzamentos) servindo de entrada para o modelo e provendo a geração de um mapa de risco de remoção das estruturas, apontando regiões de maior e menor risco no sistema submarino a ser descomissionado.

## 6 CONCLUSÃO

O uso da Lógica Difusa constitui-se em uma útil ferramenta a ser utilizada em casos onde as informações são incompletas ou vagas. Esta situação é prática comum em problemas de engenharia onde as decisões são geralmente baseadas na combinação do conhecimento científico (objetivo) e julgamento embasado na experiência (subjetiva). A teoria da Lógica Difusa vem fornecer subsídios racionais e sistemáticos às formulações matemáticas para tomadas de decisão ou previsão de algum fenômeno.

O uso desta metodologia tem se mostrado promissor, com aplicações em diversas áreas, porém o grau de complexidade do modelo aumenta consideravelmente de acordo com o número de variáveis, o número de regras de relação e grau de descrição das funções de pertinência (número de termos linguísticos).

No caso aqui apresentado, o objetivo principal foi despertar para as potencialidades da metodologia, como uma alternativa interessante para abordar e entregar avaliações comparativas de riscos de alternativas de descomissionamento, produto este com alto grau de subjetividade e que demanda trabalhos multidisciplinares habitualmente produzidos por meio de inúmeras reuniões e/ou Workshops de Risco.

A implementação de um modelo *fuzzy* que, em algum grau, possa refletir a experiência e julgamento de engenharia de especialistas nas diversas áreas envolvidas na avaliação, tem o potencial de dar consistência e maturidade ao modelo, facilitando inclusive sua validação junto às partes interessadas.

Desta forma, um considerável trabalho seria necessário na implementação do modelo *fuzzy*, é verdade, considerando este formato agregador com a participação de diversos especialistas. No entanto, após sua implementação, o modelo serviria de produto validado para novas aplicações, tirando o foco e necessidade de novos trabalhos com grandes equipes e longas análises multidisciplinares, e passando a focar na compilação de dados servindo de insumo ao modelo já estabelecido. Isso sem falar na padronização que tal abordagem geraria, já que ao longo dos Workshops é habitual e esperada a alteração nos integrantes das equipes.

Com isto, parece haver grande e interessante potencial para aplicações da Lógica Difusa no objeto aqui abordado, em diversos níveis e frentes, conforme os trabalhos sugeridos.

## REFERÊNCIAS

ALVAREZ GRIMA, M.; VERHOEF, P. N. W. Forecasting rock trencher performance using fuzzy logic. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Amsterdam, v. 36, n. 4, p. 413-432, June 1999.

BUENO, Marcelo Lemes; STEMMER, Marcelo Ricardo; BORGES, Paulo Sérgio da Silva. Inspeção visual automática de peças cerâmicas via inteligência artificial. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 5, n. 5, p. 29-37, out. 2000. Disponível em: <[http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n05/v5n5\\_5.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n05/v5n5_5.pdf)>. Acesso em: 06 jul. 2017.

CHAMEAU, J. L. A. et al. Potencial applications of fuzzy sets in Civil Engineering. **International Journal of Man-Machine Studies**, London, v. 19, n. 1, p. 9-18, July 1983.

CONVENTION for the protection of the marine environment of the North-East Atlantic (OSPAR). Londres, 1998. Text as amended on 24 July 1998, updated 9 May 2002, 7 February 2005 and 18 May 2006. Amendments to Annexes II and III adopted at OSPAR 2007. Disponível em: <[https://www.ospar.org/site/assets/files/1290/ospar\\_convention\\_e\\_updated\\_text\\_in\\_2007\\_no\\_revs.pdf](https://www.ospar.org/site/assets/files/1290/ospar_convention_e_updated_text_in_2007_no_revs.pdf)>. Acesso em: 06 jul. 2017.

DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE. **Guidance Notes: decommissioning of offshore oil and gas installations and pipelines under the Petroleum Act 1998**. Version 6. Aberdeen, 2011.

MAERSK OIL. **Janice, James and Affleck Decommissioning Programmes**. Rev. B6. Aberdeen, 2016. Disponível em: <[https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/562398/Janice\\_James\\_and\\_Affleck\\_Decommissioning\\_Programmes\\_Final.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/562398/Janice_James_and_Affleck_Decommissioning_Programmes_Final.pdf)>. Acesso em: 31 ago. 2017.

PERENCO UK LIMITED; TULLOW OIL SK LIMITED. **Thames area decommissioning comparative assessment report**. Rev. 02. Aberdeen, 2014. Disponível em: <<https://www.tulloil.com/Media/docs/default-source/operations/thames-comparative-assessment.pdf?sfvrsn=4>>. Acesso em: 06 jul. 2017.

SABOYA JÚNIOR, Fernando; PINTO, Wendell Dias. Avaliação da compressibilidade de enrocamentos através da lógica difusa. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 24., 2002, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2002. p. 55-63.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, London, v. 8, n. 3, p. 338-353, June 1965.

**Wendell Dias Pinto**

Graduação (1999) em Engenharia Civil pela UENF. Mestrado (2002) em Ciências de Engenharia (Geotecnia) pela UENF. Especialização (2008) em Gerenciamento de Projetos pela FIA/USP - Petrobras. SUB/IPSUB/PROJSUB-III/PDES – Macaé, RJ – E-mail: [wendelldias@petrobras.com.br](mailto:wendelldias@petrobras.com.br)

**Giovanni Alessandro Fiorentini**

Graduação (2007) em Engenharia Elétrica pela Unicamp. Mestrado (2008) em Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica pela Unicamp. Petrobras – SUB/IPSUB/PROJSUB-III/PDES – Macaé, RJ – E-mail: [gaflorentini@petrobras.com.br](mailto:gaflorentini@petrobras.com.br)