

**IVAIR RAFAEL COSTA DOS SANTOS**

**MODELAGEM FUZZY PARA DEFINIÇÃO DE POTENCIAL DE  
CORROSIVIDADE EM DUTOS DE PETRÓLEO**

**MANAUS – AM**  
**2023**

**IVAIR RAFAEL COSTA DOS SANTOS**

**MODELAGEM FUZZY PARA DEFINIÇÃO DE POTENCIAL DE  
CORROSIVIDADE EM DUTOS DE PETRÓLEO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental - PPG.EGPSA, do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia- ITEGAM, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

**Orientador:** Prof. Dr. Manoel Henrique Reis Nascimento

**MANAUS – AM  
2023**

**IVAIR RAFAEL COSTA DOS SANTOS**

**MODELAGEM FUZZY PARA DEFINIÇÃO DE POTENCIAL DE  
CORROSIVIDADE EM DUTOS DE PETRÓLEO**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de Mestre do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia – ITEGAM.

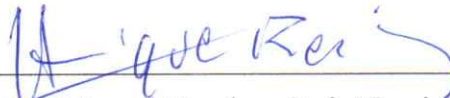
Manaus-AM, 08 de fevereiro de 2023



**Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite**

Coordenador do PPG.EGPSA - ITEGAM

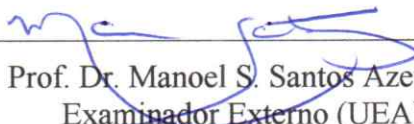
**BANCA EXAMINADORA**



**Prof. Dr. Manoel Henrique Reis Nascimento**  
Orientador (PPG.EGPSA/ITEGAM)



**Prof. Dr. David Barbosa de Alencar**  
Examinador Interno (PPG.EGPSA/ITEGAM)



**Prof. Dr. Manoel S. Santos Azevedo**  
Examinador Externo (UEA)

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Biblioteca do ITEGAM**

---

Santos, Ivair Rafael Costa dos, 2023 - MODELAGEM FUZZY PARA DEFINIÇÃO DE POTENCIAL DE CORROSIVIDADE EM DUTOS DE PETRÓLEO / Ivair Rafael Costa dos Santos - 2023. 67 f., il: Colorido

Orientador: Dr(a). Manoel Henrique Reis Nascimento

Dissertação: Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental (PPG-EGPSA), Manaus - AM, 2023.

1. Duto 2. Integridade 3. Corrosão 4. Lógica Fuzzy

CDD - 1001.ed.2023.45

---

## AGRADECIMENTOS

Sem dúvida, agradeço em primeiro lugar a DEUS por ter me trazido até aqui.

Agradeço a minha mãe que sempre me disse que o estudo era o único caminho honesto para uma vida melhor.

A meu pai (*in memoriam*) que, em meio as dificuldades, nunca exigiu que eu trabalhasse para ajudar nas contas domésticas, e desta forma pude me dedicar integralmente aos estudos.

Agradeço a minha esposa Cláudia, companheira desde 1999, que sempre me incentiva a continuar estudando e compreende a ausência que essa atividade propõe.

A minha amada filha Manuella, em quem sempre penso. Que essa dissertação seja um incentivo à sua incipiente vida escolar.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Manoel Henrique Reis Nascimento, pela disposição e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também a todos os professores do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM), em especial ao Prof. Dr. Jandecy, um entusiasta da ciência e da tecnologia.

Às equipes administrativas do Instituto agradeço por todo o apoio prestado.

Agradeço a TRANSPETRO que autorizou o uso das informações necessárias para desenvolver o modelo proposto nesta dissertação.

Agradeço ao IFAM - CMDI (INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS – CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL) que reduziu minha carga horária pra que eu me dedicasse um pouco mais ao Programa de Mestrado.

*Epígrafe*

“Não somos invencíveis. Também não somos uns pobres diabos que jamais atingirão a grandeza, este valor tão relativo, com tendência a evaporar-se.”

Carlos Drummond de Andrade

### *Dedicatória*

À minha esposa Cláudia e à minha filha Manuella, meus grandes amores. A elas, que me suportam todos os dias, um “obrigado” não seria suficiente.

## RESUMO

SANTOS, Ivair Rafael Costa dos. MODELAGEM FUZZY PARA DEFINIÇÃO DE POTENCIAL DE CORROSIVIDADE EM DUTOS DE PETRÓLEO. 2023. P.67. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental (EGPSA), Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM), Manaus, 2023.

Os dutos constituem o principal modal para transporte deste produto. A possibilidade de transporte de grandes volumes de petróleo a um baixo custo é um dos motivos. Porém, os dutos trazem consigo riscos de acidentes ambientais caso sua integridade estrutural não seja bem monitorada, também no que diz respeito ao fenômeno da corrosão, à qual é a principal causa de danos à sua integridade. Com esta preocupação, este trabalho foi desenvolvido a fim de criar um modelo utilizando lógica Fuzzy que permita inferir a taxa de corrosão interna no duto, e conseqüentemente, o potencial de corrosividade atuante naqueles cujo mecanismo da corrosão é predominantemente provocada pela ação microbiológica. Com o modelo criado, utilizando parâmetros operacionais de um duto operado pela companhia operadora Petrobras Transporte (TRANSPETRO), foi possível obter resultados de taxa de corrosão, e conseqüente potencial de corrosividade, que em sua maioria, quando comparados com os obtidos pelas técnicas convencionais, foram bem coerentes, mas com a vantagem de possibilitar a antecipação de ações mitigatórias, visto que os processos de monitoramento convencional exigem um tempo maior para sua realização e análise de resultados. Desta forma, o modelo mostrou-se adequado ao que se propôs.

**Palavras-Chave:** Duto; Integridade; Corrosão; Lógica Fuzzy.



## ABSTRACT

SANTOS, Ivair Rafael Costa dos. FUZZY MODELING FOR DEFINITION OF CORROSIVITY POTENTIAL IN PETROLEUM PIPELINES. 2023. P.67. Dissertation of the postgraduate program in Engineering, Process, Systems and Environmental Management (EGPSA), Galileo Institute of Technology and Education of the Amazon (ITEGAM), Manaus, 2023.

Pipelines, in the global context of the oil industry, are the main modal for transport of this product. The possibility of transporting large volumes of oil at a low cost is one of the reasons. However, the pipelines carry with them risks of environmental accidents if their structural integrity is not well monitored, also with regard to the phenomenon of corrosion, to which it is the main cause of damage to its integrity. With this concern, this work was developed in order to create a model using Fuzzy logic that allows inferring the internal corrosion rate in the pipeline, and consequently, the potential of corrosiveness acting in those whose corrosion mechanism is predominantly caused by microbiological action. With the model created, using operational parameters of a pipeline operated by the operating company Petrobras Transporte (TRANSPETRO), it was possible to obtain results of corrosion rate, and consequent potential of corrosiveness, which in most cases, when compared with those obtained by conventional techniques, were very coherent, but with the advantage of enabling the anticipation of mitigating actions, since conventional monitoring processes require a longer time for their performance and analysis of results. Thus, the model proved to be adequate to what was proposed.

**Keywords:** Pipeline; Integrity; Corrosion; Fuzzy logic.

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 2.1</b> – Corrosão uniforme .....	20
<b>Figura 2.2</b> – Corrosão em placa.....	21
<b>Figura 2.3</b> – Corrosão alveolar .....	21
<b>Figura 2.4</b> – Corrosão por <i>pitting</i> .....	21
<b>Figura 2.5</b> – Cupom de perda de massa.....	26
<b>Figura 2.6</b> – Dispositivo de fixação do cupom.....	27
<b>Figura 2.7</b> – Seção “em corte” do cupom instalado no duto .....	27
<b>Figura 2.8</b> – Tipo de sondas de resistência elétrica .....	28
<b>Figura 2.9</b> – Estação coletora de dados da sonda ( <i>logger</i> ).....	28
<b>Figura 2.10</b> – Sonda instalada no duto .....	28
<b>Figura 2.11</b> – Esquemático da ação do inibidor de corrosão.....	29
<b>Figura 2.12</b> – Pig de limpeza.....	30
<b>Figura 2.13</b> – Esquemático de arraste de água .....	31
<b>Figura 2.14</b> – Sistema de inferência Fuzzy .....	32
<b>Figura 2.15</b> – Função triangular .....	35
<b>Figura 2.16</b> – Função gaussiana .....	35
<b>Figura 2.17</b> – Função trapezoidal .....	35
<b>Figura 3.1</b> – Variáveis de entrada e saída do modelo proposto.....	39
<b>Figura 3.2</b> – Fuzzyficação da variável inibidor de corrosão (INIBIDOR).....	40
<b>Figura 3.3</b> - Fuzzyficação da Variável Frequência de Limpeza (F.LIMPEZA).....	40
<b>Figura 3.4</b> – Fuzzyficação da variável velocidade (VELOCIDADE).....	41
<b>Figura 3.5</b> – Fuzzyficação da variável basic sediment water (BSW).....	41
<b>Figura 3.6</b> - Fuzzyficação da variável de saída da taxa de corrosão ( TAXA DE CORROSÃO).....	42

<b>Figura 4.1</b> - Algumas das regras do modelo Fuzzy e resultado para os parâmetros da campanha 1 – taxa de corrosão.....	45
<b>Figura 4.2</b> - Algumas das regras do modelo Fuzzy e resultado para os parâmetros da campanha 2 – taxa de corrosão.....	47
<b>Figura 4.3</b> - Algumas das regras do modelo Fuzzy e resultado para os parâmetros da campanha 3 – taxa de corrosão.....	48
<b>Figura 4.4.</b> - Algumas das regras do modelo Fuzzy e resultado para os parâmetros da campanha 4 – taxa de corrosão.....	50

## LISTA DE TABELAS

---

<b>Tabela 3.1</b> – Informações técnicas do duto Orsol I .....	36
<b>Tabela 3.2</b> – Informações do produto bombeado .....	36
<b>Tabela 3.3</b> – Diferença de potencial de corrosividade NACE 0775 x N-2785 .....	37
<b>Tabela 3.4</b> – Parâmetros e variáveis linguísticas.....	38
<b>Tabela 3.5</b> – Variáveis linguísticas de saída.....	38
<b>Tabela 3.6</b> – Regras Fuzzy.....	42
<b>Tabela 4.1</b> – Informações gerais de cupons na campanha 1 .....	44
<b>Tabela 4.2</b> – Resultados técnica perda de massa por cupons de corrosão – campanha 1....	44
<b>Tabela 4.3</b> – Parâmetros de entrada “inputs” do modelo Fuzzy – campanha 1.....	44
<b>Tabela 4.4</b> – Informações gerais de cupons na campanha 2.....	46
<b>Tabela 4.5</b> – Resultados técnica perda de massa por cupons de corrosão – campanha 2....	46
<b>Tabela 4.6</b> – Parâmetros de entrada “inputs” do modelo Fuzzy – campanha 2.....	46
<b>Tabela 4.7</b> – Resultados de monitoramento com sondas de resistência - campanha 3.....	48
<b>Tabela 4.8</b> – Parâmetros de entrada “inputs” do modelo Fuzzy – campanha 3.....	48
<b>Tabela 4.9</b> – Informações gerais dos cupons na campanha 4.....	49
<b>Tabela 4.10</b> – Resultados técnica perda de massa por cupons de corrosão – campanha 4..	49
<b>Tabela 4.11</b> – Resultados de monitoramento com sondas de resistência - campanha 4.....	50
<b>Tabela 4.12</b> – Parâmetros de entrada “inputs” do modelo fuzzy – campanha 4 .....	50
<b>Tabela 4.13</b> – Quadro comparativo técnicas de monitoramento x modelo Fuzzy .....	51

## SUMÁRIO

---

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>16</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2.1 Geral</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2.2 Específicos</b> .....	<b>18</b>
<b>1.3 ESCOPO DO TRABALHO</b> .....	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>20</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 DUTOS</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2 CORROSÃO E SUAS FORMAS</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.1 Corrosão uniforme</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.2 Corrosão por placa</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2.3 Corrosão alveolar</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2.4 Corrosão puntiforme ou localizada (<i>pitting</i>)</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3 MECANISMOS TÍPICOS DE CORROSÃO EM DUTOS DE PETRÓLEO</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.1 Corrosão por CO<sub>2</sub></b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.2 Corrosão por H<sub>2</sub>S</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3.3 Corrosão pelo O<sub>2</sub></b> .....	<b>23</b>
<b>2.3.4 Corrosão microbiológica (MIC- microbiologically influenced corrosion)</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4 GERENCIAMENTO DA CORROSÃO INTERNA EM DUTOS</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4.1 Monitoramento da corrosão interna (MCI)</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4.1.1 Técnicas de monitoramento</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4.1.1.1 Cupom de perda de massa</b> .....	<b>26</b>
<b>2.4.1.1.2 Sonda de resistência elétrica</b> .....	<b>27</b>

2.4.2	Inibidores de corrosão.....	28
2.4.2.1	Inibidores anódicos.....	29
2.4.2.2	Inibidores catódicos.....	29
2.4.2.3	Inibidores de adsorção (fílmicos).....	29
2.4.3	Ferramentas de limpeza – Pig’s de limpeza.....	30
2.5	VELOCIDADE DE ARRASTE DA ÁGUA EM DUTOS DE PETRÓLEO.....	30
2.6	BSW (BASIC SEDIMENT AND WATER).....	31
2.7	LÓGICA FUZZY.....	32
2.7.1	Conceito da lógica Fuzzy.....	32
2.7.1.1	Fuzzyficação.....	32
2.7.1.2	Base de conhecimento.....	32
2.7.1.3	Unidade de inferência Fuzzy.....	33
2.7.1.4	Defuzzyficação.....	34
2.7.2	Funções de pertinência.....	34
2.7.2.1	Função Triangular.....	34
2.7.2.2	Função Gaussiana.....	35
2.7.2.3	Função Trapezoidal.....	35
CAPÍTULO 3	.....	36
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1	MATERIAIS.....	36
3.2	MÉTODOS.....	36
3.2.1	Definição dos parâmetros operacionais.....	37
3.2.1.1	N-2785.....	37
3.2.1.2	Parâmetros operacionais de entrada.....	38
3.2.2	Modelo Fuzzy.....	39
a)	Inibidor de corrosão (INIBIDOR).....	39
b)	Ferramenta de limpeza ( F.LIMPEZA).....	40

c) Velocidade de Escoamento ( VELOCIDADE).....	40
d) Basic Sediment and Water (BSW) .....	41
3.2.3 Experimento do Modelo .....	42
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>43</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>43</b>
<b>4.1 CAMPANHAS DE MONITORAMENTOS</b> .....	<b>43</b>
<b>4.1.1 Campanha 1: 6 e 7 de dezembro de 2021</b> .....	<b>43</b>
<b>4.1.1.1 Técnica de monitoramento por perda de massa em cupom de corrosão</b> .....	<b>43</b>
<b>4.1.1.2 Modelo de inferência Fuzzy</b> .....	<b>44</b>
<b>4.1.2 Campanha 2: 6 e 7 de abril de 2022</b> .....	<b>45</b>
<b>4.1.2.1 Técnica de monitoramento por perda de massa em cupom de corrosão</b> .....	<b>45</b>
<b>4.1.2.2 Modelo de inferência Fuzzy</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1.3 Campanha 3: 4 e 5 de julho de 2022</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1.3.1 Técnica de monitoramento por sonda de resistência elétrica</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1.3.2 Modelo de inferência Fuzzy</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1.4 Campanha 4: 24 a 27 de agosto de 2022</b> .....	<b>49</b>
<b>4.1.4.1 Técnica de monitoramento por perda de massa em cupom de corrosão</b> .....	<b>49</b>
<b>4.1.4.2 Técnica de monitoramento por sonda de resistência elétrica</b> .....	<b>50</b>
<b>4.1.4.3 Modelo de inferência Fuzzy</b> .....	<b>50</b>
<b>4.1.5 Quadro Comparativo</b> .....	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>53</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>53</b>
<b>5.1 CONCLUSÕES</b> .....	<b>53</b>
<b>5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>59</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>64</b>

# CAPÍTULO 1

---

## 1 INTRODUÇÃO

Os dutos são os meios de transporte mais seguros, em termos operacionais, e mais econômicos quando se trata de substâncias perigosas, entre as quais se enquadra o Petróleo (BIEZMA *et al*, 2018).

Porém, um potencial dano na estrutura de um duto poderá contribuir para aumentar riscos de vazamentos com grande impacto ao meio ambiente e pessoas. Desta forma, a integridade estrutural do duto é de grande importância para as companhias operadoras de óleo e gás, comunidade próximas a estes dutos, governos e demais partes interessadas, devido a possibilidade de perdas ambientais, de infraestrutura e financeira em caso de falha na sua integridade (BADIDA *et al*, 2019).

Os estudos desenvolvidos a respeito do tema integridade de dutos tem abordado de uma forma geral análises de riscos à integridade, envolvendo todas as ameaças ao longo do seu ciclo de vida. Um exemplo disso é possível ser visto na pesquisa de KRAIDI *et al* (2020), que abordou fatores de riscos durante a elaboração de projeto de dutos de petróleo e dutos de gás. Outro trabalho, foi de DAWUDA *et al* (2021), que em suas pesquisas criaram um modelo probabilístico, para avaliar a influência da ação microbiológica na taxa de corrosão em dutos em operação.

Aliás, conforme o trabalho KHAN *et al* (2021), que tratou de gerenciamento da integridade de dutos baseados em riscos, a corrosão, depois de ação de terceiros, é a principal causa de danos a integridade estrutural dos dutos.

De fato, a corrosão é uma das maiores razões para danos na integridade estrutural em dutos, pois pode levar a perda de espessura de suas paredes. Nesse contexto, sabe-se que a prevenção da corrosão e sua previsão é crucial para garantir uma operação eficiente do duto (ZHOU *et al*, 2016; SEGHIER *et al*, 2022).

Diante disso, esse fator de risco tem sido objeto de estudo, como visto também no trabalho de WASIM *et al* (2022), onde foi realizado uma revisão de todos os mecanismos de corrosão externa nos dutos; e no trabalho de ZHOU *et al* (2016), que fez uma estimativa de falha devido a corrosão em dutos de petróleo e dutos de gás.

No que diz respeito, especificamente a corrosão interna, a taxa de corrosão depende da pressão operacional, das propriedades dos fluidos transportados e dos inibidores injetados SEGHIER *et al* (2022), sendo o mecanismo de corrosão por ação microbiológica (MIC) a



grande ameaça de corrosão interna no duto de petróleo, especialmente em bolsões de água em seções baixas do gasoduto, conforme ASKARI *et al* (2019), citando CHEVROT *et al* (2011)

Atualmente os sistemas de monitoramento da corrosão interna nos dutos podem variar, desde exposições de simples cupons de perda de massa (corpos de prova metálicos) até sondas corrossimétricas que fornecem dados de perda de material continuamente. Estas são as técnicas convencionais que se caracterizam pela necessidade deslocamento de equipes aos locais de instalação dos cupons e/ou sondas a fim de coletar as informações para análise, o que implica em tempo com deslocamentos de equipes e riscos de acidente visto serem técnicas invasivas.

Esse trabalho, visto que ciência de dados pode permitir ferramentas de assistência muito poderosas para a tomada de decisões (SEGHIER *et al* 2022), propõe um modelo desenvolvido em lógica Fuzzy estruturado em parâmetros operacionais de bombeamento de petróleo, que auxilie na avaliação do fenômeno da corrosão interna em dutos, cujo mecanismo de corrosão predominante seja o microbiológico, inferindo o potencial de corrosividade naquele equipamento.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO

Os dutos, no contexto mundial, são os meios de transporte mais seguros, em termos operacionais, e mais econômicos quando se trata de substâncias perigosas, entre as quais se enquadra o Petróleo (BIEZMA *et al*, 2018).

Porém, um potencial dano na estrutura de um duto poderá contribuir para aumentar riscos de vazamentos com grande impacto ao meio ambiente e pessoas. Desta forma, a integridade estrutural do duto é de grande importância para as companhias operadoras de óleo e gás, comunidade próximas a estes dutos, governos e demais partes interessadas, devido a possibilidade de perdas ambientais, de infraestrutura e financeira em caso de falha na sua integridade (BADIDA *et al*, 2019).

Desenvolver um modelo em lógica Fuzzy, estruturado em parâmetros operacionais de bombeamento de petróleo, que auxilie na avaliação do fenômeno da corrosão interna em dutos, de maneira a conseguir respostas mais rápidas que as técnicas convencionais, se apresenta bastante relevante visto que o mecanismo de corrosão é sobretudo produto do tempo e do meio.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Geral

- Desenvolver um modelo de inferência Fuzzy para estimar a taxa de corrosão interna existente em dutos de petróleo cujo mecanismo preponderante de corrosão seja o microbiológico, e a partir dessa estimativa inferir seu potencial de corrosividade, conforme normas internas da companhia que o opera.

### 1.2.2 Específicos

- Identificar variáveis do modelo de inferência Fuzzy as quais influenciam na taxa de corrosão interna do duto;
- Simular o modelo proposto usando os valores dos parâmetros operacionais presentes durante o monitoramento da corrosão interna;
- Comparar os resultados obtidos pelo modelo Fuzzy desenvolvido e os valores obtidos nas técnicas convencionais;

### 1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O trabalho foi organizado em 5 capítulos, sendo que o capítulo 1 apresenta a introdução, a justificativa, os objetivos e o escopo do trabalho.

O capítulo 2, apresenta uma revisão bibliográfica que aborda formas de corrosão e mecanismos; o gerenciamento da corrosão interna e os métodos consagrados de monitoramento, o uso da ferramenta PIG de Limpeza, a aplicação de inibidores de corrosão e influência do BSW (*Basic Sediment and Water*) no petróleo. Ao término do capítulo, a lógica Fuzzy será apresentada para compreensão do modelo proposto.

O capítulo 3, traz materiais e métodos. Apresenta o duto onde modelo proposto foi demonstrado; e a metodologia, apresentando as regras aplicadas para o modelo proposto, obtenção das informações e considerações necessárias para desenvolvimento do modelo; e de que forma os resultados obtidos pela inferência Fuzzy pode indicar o potencial de corrosividade do duto.

O capítulo 4, resultados e discussões do modelo propostos, apresenta o quanto o modelo se mostrou adequado para estimar as taxas de corrosão, e por conseguinte, identificar o potencial de corrosividade no duto, comparando-os com resultados obtidos a partir das análises da perda de massa e/ou sondas de resistência elétrica.

O capítulo 5 traz as considerações finais com as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

---

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1- DUTOS

Segundo KRAIDI *et al* (2020), os dutos de petróleo são eficientes modais devido as vantagens de transporte de grande quantidade de produto a um baixo custo. Porém, uma vez que falhas na estrutura desse duto aconteçam, grandes acidentes podem ocorrer, com vazamento e consequentes contaminações ambientais.

O fenômeno da corrosão tem a natureza da incerteza (ZHOU *et al*, 2016). Para mitigar essa corrosão e reduzir perdas econômicas é necessário monitorar o potencial de corrosividade existente no duto por meio de sua taxa de corrosão.

#### 2.2. CORROSÃO E SUAS FORMAS

O conceito universalmente aceito para corrosão é “a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliado ou não a esforços mecânicos” (GENTIL, 2021).

##### 2.2.1. Corrosão Uniforme

De acordo com WU *et al* (2019) a corrosão uniforme é apontada como uma forma de corrosão encontrada comumente em dutos de petróleo e dutos de gás que provoca uma redução na espessura (parede) do duto.

A figura 2.1 ilustra essa forma de corrosão, a qual se processa em toda extensão da superfície.

Figura 2.1 – Corrosão uniforme



Fonte: PETROBRAS (2019)

### 2.2.2. Corrosão por Placa

Conforme figura 2.2., a corrosão se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações.

Figura 2.2 – Corrosão em placa



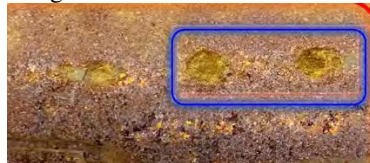
Fonte: PETROBRAS (2019)

### 2.2.3. Corrosão Alveolar

A corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro.

A figura 2.3 ilustra um exemplo de corrosão alveolar.

Figura 2.3 – Corrosão alveolar



Fonte: – PETROBRAS(2019)

### 2.2.4. Corrosão Puntiforme ou Localizada (*pitting*)

A corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que seu diâmetro. É chamado também de corrosão por pite ou *pitting*.

A figura 2.4. apresenta a corrosão em forma de *pitting*.

Figura 2.4 – Corrosão por *pitting*



Fonte: PETROBRAS (2019)

SEGHIER *et al* (2020) em seu trabalho a respeito da previsão da profundidade de *pittings* de corrosão cita A.Valor (2012) que afirma que nos dutos do México, 60% das falhas devido a corrosão externa são ocasionadas por *pittings*.

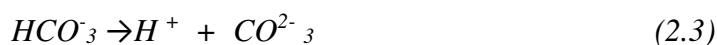
### 2.3. MECANISMOS TÍPICOS DE CORROSÃO EM DUTOS DE PETRÓLEO

ALAMRI (2020), em sua pesquisa a respeito da corrosão localizada, afirma que o petróleo bruto, bem como o gás natural, geralmente carrega muitas impurezas que são corrosivas em várias circunstâncias. Essas impurezas podem incluir água livre, sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Superfícies internas de dutos de petróleo e gás que estão expostos à água livre, H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub> são suscetíveis a danos de corrosão. Além disso, acessórios e linhas podem sofrer de degradação devido a diferentes composições de fluidos e mudanças nas condições de operação. A degradação de metais é geralmente seguido pela deterioração de propriedades mecânicas como ductilidade e força. Isso resulta no esgotamento de materiais e espessuras e eventual falha. Estes resultados severos do processo de corrosão começaram a ser um fardo para a indústria global de petróleo e gás.

#### 2.3.1. Corrosão pelo CO<sub>2</sub>

A respeito deste mecanismo, OLVERA-MARTÍNEZ *et al* (2015) afirmam que, juntamente com o mecanismo de corrosão H<sub>2</sub>S, são ambos fenômenos bem conhecidos na indústria de petróleo e gás, e são de particular importância no transporte através de duto de aço.

A corrosão sofrida pelo aço carbono em oleodutos rígidos devido a ação de gases dissolvidos como o CO<sub>2</sub> podem ser críticas para a integridade dos dutos. O CO<sub>2</sub> dissolvido sofre hidratação formando ácido carbônico, que reduz o pH da fase do fluido, e passa por duas etapas de dissociação na etapa catódica da reação, conforme reações representadas nas fórmulas 2.1 a 2.3:



Segundo LI *et al* (2022), o mecanismo de corrosão por CO<sub>2</sub> em dutos é tópico controverso visto que se comporta de maneira diferente quando não há bombeio dentro do duto

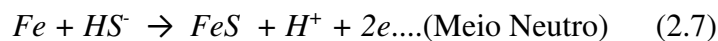
e quando há escoamento, sendo marcante que em escoamento bolhas de CO<sub>2</sub> são geradas e promovem cavitação no duto.

### 2.3.2. Corrosão pelo H<sub>2</sub>S

O produto de corrosão neste caso é o sulfeto de ferro (FeS) e a camada formada por este composto é catódica em relação a parede metálica do duto, aumentando a agressividade do processo corrosivo, caso sua aderência apresente alguma instabilidade. As fórmulas 2.4 e .25 apresentam a dissociação do gás sulfídrico H<sub>2</sub>S:



A etapa anódica da reação ilustra a formação do sulfeto de ferro e as reações variam de acordo com o pH do meio. As fórmulas 2.6, 2.7 e 2.8 apresentam as reações.



Apesar do aumento da agressividade da corrosão provocada pelo produto da corrosão, a depender do nível de saturação de H<sub>2</sub>S na solução e o material do duto ser de baixa liga, a corrosividade pode diminuir com o tempo (LI *et al* ,2022).

### 2.3.3. Corrosão pelo O<sub>2</sub>

Este mecanismo, nos oleodutos, ocorre quando o petróleo está contaminado com água. A presença de oxigênio aumenta significativamente a corrosividade da água e é o ponto mais crítico relacionado a corrosão.

Este mecanismo é caracterizado pela redução catódica do O<sub>2</sub> molecular e a velocidade da corrosão dependerá da reação catódica.



#### 2.3.4. Corrosão Microbiológica (MIC - *Microbiologically Influenced Corrosion*)

A corrosão microbiológica é definida como a corrosão influenciada pela presença e atividade de microorganismos, incluindo bactérias e fungos, e usualmente promove a forma de corrosão por pitting (WEI *et al*, 2022). Wei ainda em seu trabalho a respeito da corrosão microbiológica em dutos de gás, cita JAVAHERDASHTI *et al* (2008) que afirma que entre 20-40% das falhas em dutos era devido corrosão microbiológica interna.

SINGH e POKHREL (2017), afirmaram que a MIC é um dos mecanismos de degradação em dutos de petróleo e gás e que, como em qualquer processo de corrosão, a previsão de seu início é difícil de modelar com precisão. DAWUDA *et al* (2021) cita LITTLE and LEE (2007) que afirmam ser a predição da corrosão microbiológica muito desafiadora devido a complexidade que envolve o estudo microbiológico, além das reações eletroquímicas que envolvem o processo.

WANG *et al* (2020), afirma que a MIC acelerará rapidamente a taxa de corrosão de equipamentos e instalações, resultando em falha de equipamento e perda de produto, então a MIC tornou-se um foco da indústria de petróleo e gás. Afirma ainda que em estudos relevantes, tem sido apontado que a MIC é causada principalmente por bactérias, fungos e outros microrganismos anaeróbios, e que o sedimento é uma importante indução. Portanto, a previsão da deposição de partículas sólidas tornou-se uma importante medida de gestão para a prevenção eficaz da MIC.

#### 2.4. GERENCIAMENTO DA CORROSÃO INTERNA EM DUTOS

DA SILVA (2011), em seu trabalho sobre avaliação da corrosão em dutos, citando MAGALHÃES (2005), afirma que o gerenciamento da corrosão pode ser definido como uma forma sistemática de medição da corrosão ou da degradação de equipamentos e instalações, com o objetivo de auxiliar a compreensão do processo corrosivo e/ou obter informações úteis para o controle da corrosão e suas consequências. Com estas informações, o responsável por um equipamento ou uma instalação pode tomar uma melhor decisão sobre o tipo, o custo e a urgência de medidas corretivas. Certas características do monitoramento da corrosão de uma estrutura a ser construída ou já existente podem conduzir a uma melhor seleção de materiais, ao emprego de revestimentos protetores resistentes e a escolha de medidas de controle de corrosão.



### 2.4.1. Monitoramento da Corrosão Interna (MCI)

A corrosão em dutos utilizados para transporte de óleo ( petróleo e derivados) e gás, pode afetar a segurança, a confiabilidade destes sistemas, causando acidentes todo anos; e a corrosão interna é uma das principais causas que afetam a integridades destes dutos. Nos Estados Unidos, a corrosão interna foi responsável por 3% de falhas em dutos nos últimos 20 anos (WANG *et al*, 2020).

A prática de monitoramento de corrosão interna mais determinante baseia-se em grande parte no uso de cupons de perda de massa e sondas de resistência elétrica (ER). Há uma suposição implícita de que estes são as únicas técnicas disponíveis para avaliar a perda de metais devido a condições corrosivas e que tal instrumentação é o equipamento de monitoramento 'padrão' (COX, 2014).

#### 2.4.1.1 Técnicas de Monitoramento

DA SILVA (2011), cita FERREIRA *et al* (2000), que afirma que o bom entendimento das limitações de cada técnica e suas vantagens são fundamentais para que possamos selecionar as técnicas adequadas, de acordo com o objetivo a ser alcançado. Também cita que existem no mercado diversos recursos que podem ser usados na monitoração da corrosão interna de dutos e que basicamente procuram monitorar a corrosão da seguinte forma:

- avaliação da tendência da corrosividade do fluido ao longo do tempo (cupons, sensores de resistência elétrica, sensores eletroquímicos, etc.);
- avaliação das características da composição do fluido (kit's de análise química da água, cromatografia do gás, etc.);
- Avaliação química dos resíduos/sólidos (FRX – Fluorescência de Raios-X, DRX – Difractometria de Raios-X, etc.)

Serão revisadas apenas as técnicas abordadas nesta dissertação:

Cupom de Perda de Massa

Sonda de Resistência Elétrica

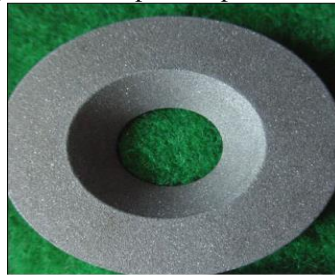
#### 2.4.1.1.1. Cupom de Perda de Massa

Consiste na avaliação da corrosão interna por meio de cupons de perda de massa instalados em provadores de corrosão.

A figura 2.5 ilustra um cupom de corrosão, antes de ser instalado, os quais consistem de amostras de materiais colocados em um determinado meio corrosivo para a verificação de seu comportamento.

A velocidade de desenvolvimento do processo corrosivo - taxa de corrosão - é usualmente expressa pela variação de massa por unidade de tempo. A taxa de corrosão é calculada com base nos dados obtidos do cupom de perda de massa antes da sua instalação no provador e após a retirada dos mesmos.

Figura 2.5 – Cupom de perda de massa



Fonte: PETROBRAS (2022)

Para o cálculo da taxa de corrosão, é utilizado a Eq. (2.1), estabelecida pela NACE ( National Association Corrosion Engineers International ) SP 0775- 2018.

$$T = \Delta m. \frac{365.1000}{S.t.d} \quad (2.1)$$

onde, T = taxa de corrosão (mm/ano),  $\Delta m$  = perda de massa (g), S = área da superfície do cupom exposta ( $\text{mm}^2$ ), d = densidade ( $\text{g/cm}^3$ ), t = tempo de exposição (dias).

Na figura (2.6) é possível observar o dispositivo de fixação do cupom, e na figura (2.7), numa imagem, em corte, um cupom instalado num duto.

Figura 2.6 – Dispositivo de fixação do cupom



Fonte: PETROBRAS (2022)

Figura 2.7 – Seção “em corte” do cupom instalado no duto



Fonte: PETROBRAS (2022)

#### 2.4.1.1.2. Sonda de Resistência Elétrica

Sonda de resistência elétrica é uma das mais comuns técnicas para monitoramento da corrosão interna. Constitui-se de um dispositivo robusto e pode operar em meios aquosos, líquidos não aquosos, bem como gasosos. Eles funcionam pelo monitoramento das mudanças na resistência de um elemento sensor de pequena espessura, o qual vai tendo sua espessura reduzida devido a ação corrosiva.

Método está fundamentado na Eq. (2.2):

$$R = \rho \cdot l \cdot \frac{1}{A} \quad (2.2)$$

onde:  $R$  = resistência (ohm);  $l$  = comprimento (cm);  $A$  = área seção transversal (cm<sup>2</sup>);  $\rho$  = resistividade do material (ohm.cm)

A figura 2.8 ilustra os tipos mais comuns de sondas de resistência elétricas.

Figura 2.8 – Tipo de sondas de resistência elétrica



Fonte – PETROBRAS (2022)

A figura 2.9 ilustra o elemento coletor de dados obtidos pelas sondas de resistência elétrica conhecido como *Logger*.

Figura 2.9 – Estação coletora de dados da sonda (*Logger*)



Fonte: PETROBRAS (2019)

Na figura 2.10, é possível observar uma sonda instalada em um duto.

Figura 2.10 – Sonda instalada no duto



Fonte: PETROBRAS (2019)

#### 2.4.2. Inibidores de Corrosão

Inibidores de corrosão apresentam papel importante no controle da corrosão em todos os processos de produção de óleo e gás e, por isso, a pesquisa e desenvolvimento de inibidores

adequados em custo e eficiência é de grande relevância sendo escopo de vários estudos nas últimas décadas (DA SILVA, 2013).

#### 2.4.2.1. Inibidores anódicos

Retardam ou impedem as reações anódicas.

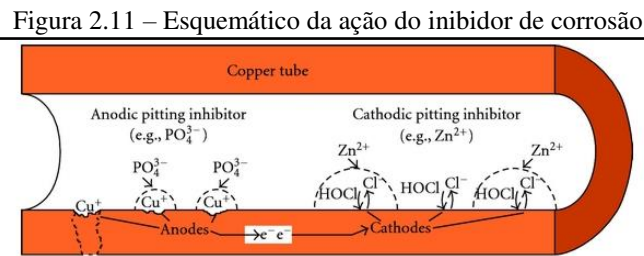
Reagem com o produto de corrosão formando um óxido mais aderente e insolúvel no meio, passivando assim a superfície do metal, entre os quais podemos citar: Carbonatos, Hidróxidos, Silicatos, Boratos, Fosfatos e Cromatos, Nitrito.

#### 2.4.2.2. Inibidores catódicos

São substâncias que atuam na área catódica reprimindo as reações catódicas.

São substâncias que fornecem íons metálicos capazes de reagir com a alcalinidade catódica, produzindo compostos insolúveis. Entre os quais podemos citar: sais de Zinco, Magnésio e Níquel.

A figura 2.11 ilustra o desenho esquemático de atuação do inibidor anódico e catódico.



Fonte – PETROBRAS (2019)

#### 2.4.2.3. Inibidores de adsorção (FÍLMICOS)

Funcionam como uma película protetora formando uma barreira entre o metal e o meio corrosivo. Em geral são substâncias orgânicas, por exemplo: aminas, aldeídos, sabões de metais pesados.

Segundo ASKARI *et al* (2021), em seu trabalho de revisão técnica a respeito de inibidores formadores de filme, este tipo de inibidor é pontuado o mais econômico e confiável método de controle de corrosão interna.

### 2.4.3. Ferramenta de Limpeza - PIG's de Limpeza

Durante a operação dos dutos é normal o acúmulo de detritos, seja em razão dos processos corrosivos internos, seja em função do processo a que foi submetido o fluido antes de ser bombeado.

PIG (*Pipeline Inspection Gauge*) é o termo geral para designar a ferramenta responsável pela manutenção, inspeção e limpeza interna do duto, existindo diferentes tipos de PIGs (ZHOU *et al*, 2022); e conforme o trabalho de LI *et al* (2021), em sua abordagem analítica da velocidade de PIG's em dutos, a frequência de limpeza do duto com PIG promove um arraste considerável de condensados que eventualmente venha a se acumular.

A figura 2.12 ilustra, de maneira esquemática, um pig de limpeza limpando o duto internamente.

Figura 2.12 – Pig de limpeza



Fonte: PETROBRAS (2022)

### 2.5. VELOCIDADE DE ARRASTE DA ÁGUA EM DUTOS DE PETRÓLEO

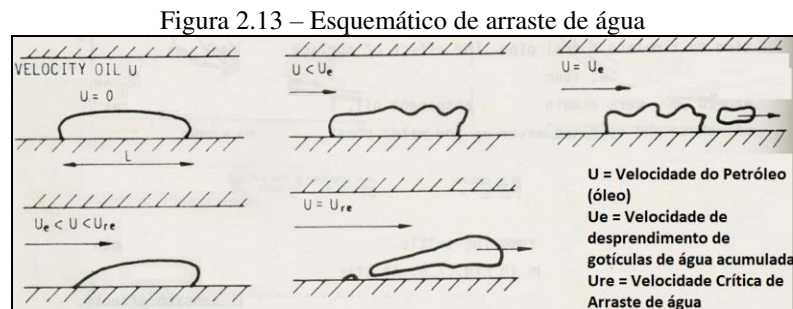
Normalmente, os produtos transportados têm um teor de água livre ou emulsionada. Durante os períodos de parada, em operação intermitente, ou mesmo durante as transferências em baixas vazões esta água tende a decantar acumulando-se ao longo da geratriz inferior do duto.

Em seu trabalho a respeito da característica de um escoamento intermitente AKHLAGHI *et al* (2020) afirma que o fluxo intermitente é um desafio na operação de sistemas de transporte de hidrocarbonetos, daí ele afirmar que sua influência é mais perceptível em trechos curtos e não trechos longos.

Para agitação moderada a separação se dá em poucas horas e dependendo da velocidade de escoamento o acúmulo de água no interior do duto pode ser permanente ou não. Mas existe uma velocidade crítica, acima da qual se dá o arraste de água e abaixo da qual o acúmulo de água é permanente.

Esta velocidade crítica para arraste de água está relacionada com o com o diâmetro interno do duto e quanto maior o diâmetro interno, maior a velocidade crítica. O simples fato de que um escoamento se dê no regime turbulento não significa que o acúmulo de água deve ser arrastado. É necessário que a velocidade crítica seja superada. Portanto, uma visão, em termos qualitativos do mecanismo de arraste de água em um duto pelo produto escoado é a seguinte:

- a) havendo escoamento em velocidade suficiente formam-se ondulações na interface produto-água;
- b) em velocidades maiores ocorre a formação de gotas a partir das cristas dessas ondulações, sendo que estas gotas ainda podem retornar à água acumulada devido ao seu grande tamanho;
- c) em velocidades ainda maiores, formam-se gotas de menor tamanho e quando a velocidade supera a velocidade crítica o tamanho das gotas é tão pequeno que elas são carreadas pelo produto, eliminando-se o leito de água após um certo período de tempo. A figura 2.13 traz um desenho esquemático deste processo.



Fonte: PETROBRAS (2019)

## 2.6. BSW (*BASIC SEDIMENT AND WATER*)

BSW (*Basic Sediment and Water*) é uma especificação técnica de certas impurezas no petróleo bruto. Quando extraído de um reservatório de petróleo, o petróleo bruto conterá alguma quantidade de água e sólidos suspensos da formação do reservatório. A matéria particulada é conhecida como sedimento ou lama. O teor de água pode variar muito em cada campo de extração do petróleo e pode estar presente em grandes quantidades para campos mais antigos, ou se a extração de óleo for aprimorada usando a tecnologia de injeção de água. A maior parte da água e dos sedimentos geralmente é separada no campo para minimizar a quantidade que precisa ser transportada. O conteúdo residual dessas impurezas indesejadas é medido como BSW. As refinarias de petróleo podem comprar petróleo bruto numa determinada especificação

de BSW ou podem, alternativamente, ter unidades iniciais de desidratação e outros processos que reduzem o BSW a limites aceitáveis, ou uma combinação disso.

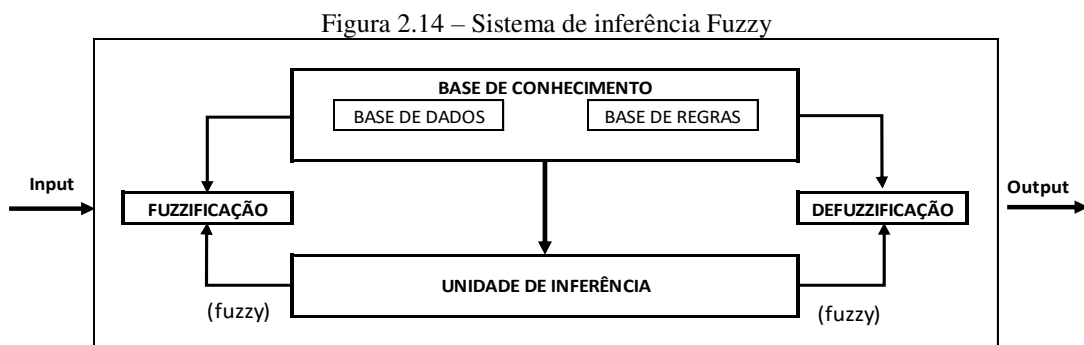
O nível de BSW no petróleo bombeado no duto é um parâmetro relevante, e especial naqueles cujo mecanismo de corrosão microbiológica são determinantes. Isto porque, um petróleo com elevado BSW favorece a formação de cenário no duto, adequado a formação de colônias de bactérias que promovem a corrosão.

## 2.7. LÓGICA FUZZY

### 2.7.1. Conceito da Lógica Fuzzy

A lógica booleana (clássica) é famosa por definir claramente a pertinência de determinado elemento a algum conjunto, tendo como característica principal a exatidão. Numa linha oposta está a lógica Fuzzy (também chamada de lógica difusa ou nebulosa), que está baseada no tratamento de termos onde, principalmente nas fronteiras dos conjuntos, existe dúvida, incerteza, sobre a pertinência de elementos a um conjunto (SILVA, 2018).

Um típico sistema de inferência Fuzzy está esquematicamente apresentado na figura 2.14 abaixo. Este inclui 04 partes principais: (1) fuzzificação, (2) base de conhecimento, (3) unidade de inferência, e (4) defuzzificação (JAMSHIDI *et al*, 2013).



Fonte: adaptado de (Jamshidi et al.,2013)

#### 2.7.1.1. Fuzzyficação

As operações de fuzzyficação são usadas para combinar os valores de entrada, ou valores nítidos, com a informação das funções de pertinência armazenadas para produzir valores nebulosos de entrada. Isto é, para cada valor de entrada é aplicada uma função de pertinência, a qual retornará o grau de pertinência da entrada. Esse valor deve estar necessariamente limitado entre 0 a 1 (JAMSHIDI *et al*, 2013).



### 2.7.1.2. Base de Conhecimento

A Base de Conhecimento tem como propósito caracterizar a estratégia de controle e as metas. Na base de dados ficam armazenadas as definições dos conjuntos Fuzzy que descrevem os predicados de cada variável de entrada (parâmetros de entrada) e saída (parâmetro de saída) com suas respectivas funções de pertinência as quais podem ser discretas ou contínuas. Já, a base de regras é formada por um conjunto de regras Fuzzy que definem a estratégia de controle do sistema (JAMSHIDI *et al*, 2013).

Ainda a respeito da base de regras, conhecidas com regras “*if-then*” (“se-então”, em português), podemos dizer que elas estabelecem a relação entre entradas e saídas (input-output) do modelo Fuzzy, sendo essas regras geralmente construídas por premissas (também chamadas antecedentes) e conclusões (chamadas consequentes). Por exemplo:

*“se x é alto (premissa), então y é baixo (consequente)”*

onde os termos *alto* e *baixo* podem ser representados pelas funções de pertinência (JAMSHIDI *et al*, 2013).

### 2.7.1.3. Unidade de Inferência Fuzzy

O terceiro módulo do mecanismo de inferência refere-se aos procedimentos computacionais usados para avaliar descrições linguísticas Fuzzy e relaciona os fatos nebulosos das entradas com os padrões dos antecedentes das regras Fuzzy. No âmbito da inferência, os valores de verdade de cada antecedente em cada uma das regras são calculados e aplicados na conclusão de cada uma das regras correspondentes. O resultado é um subconjunto Fuzzy que deverá ser atribuído a cada variável de saída e para cada regra (NOGUEIRA, 2021)

Existem vários Sistemas de inferência que têm sido aplicados em diferentes aspectos das aplicações da ciência e da engenharia. O modelo (MAMDANI,1974) é um dos algoritmos populares.

Este método usa os conceitos de conjuntos Fuzzy e lógica Fuzzy para traduzir um conjunto totalmente não estruturado em um algoritmo.

O modelo Mamdani será utilizado neste trabalho.

A forma geral da regra *if-then* ("se-então" em português) do Algoritmo Mamdani é dada na seguinte:

*Se  $x_1$  é  $A_{i1}$  and  $x_2$  é  $A_{i2}$  and ... $x_r$  é  $A_{ir}$  então  $y$  é  $B_i$  ( para  $i = 1,2,...k$ )*

Onde  $x_i$  é a variável de entrada (input),  $A_{ir}$  e  $B_i$  são termos linguísticos (possibilidades),  $y$  é a variável de saída (output), e  $k$  é o número de regras.

Diferentes métodos de composição podem ser aplicados para estabelecer a modelo Mamdani. Neste trabalho, max-min, o método mais comum aplicado, é utilizado.

Esta técnica é matematicamente definida da seguinte forma:

$$\mu_{ck}(Z) = \max[\min[\mu_{Ak}(\text{input}(x)), \mu_{Bk}(\text{input}(y))]] \quad K=1,2,\dots,r$$

Onde  $\mu_{ck}$ ,  $\mu_{Ak}$  e  $\mu_{Bk}$  são as funções de pertinência de saída (output) “z” para regra “k”, entrada (input) “x”, e “y”, respectivamente (JAMSHIDI *et al*, 2013).

#### 2.7.1.4. Defuzzyficação

A defuzzyficação é usada para transformar conjuntos fuzzy em valores notáveis. Na literatura é possível encontrar vários tipos de métodos para defuzzyficação. Centróide da Área (COA) é um dos mais populares métodos para o processo de defuzzyficação.

A vantagem do método COA é que todas as funções de pertinência ativadas das conclusões (todas as regras ativas) participam do processo de defuzzyficação.

### 2.7.2 - Funções de Pertinência

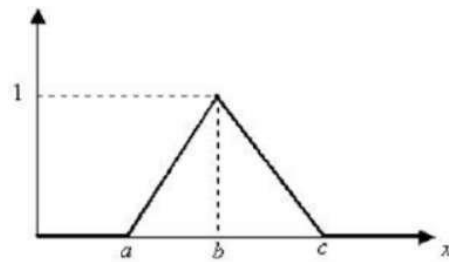
A pertinência de um determinado atributo na Lógica Fuzzy depende do conhecimento que o especialista tem no assunto e essas funções de pertinência podem ser demonstradas de diversas formas, sendo as mais comuns classificadas em: Triangular, Gaussiana e Trapezoidal (SLUCE, 2021).

#### 2.7.2.1 – Função Triangular

Na função Triangular são necessário 3 pontos (x,y,z). Esses valores devem atender a regra  $a < b < c$ . Deve existir algum valor cuja pertinência é 1. Abaixo a equação que representa e seu gráfico visto na figura 2.15 (SLUCE, 2021).

$$\text{trimf}(x;a,b,c) = \max \{ \min [(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)], 0 \}$$

Figura 2.15 -Função triangular



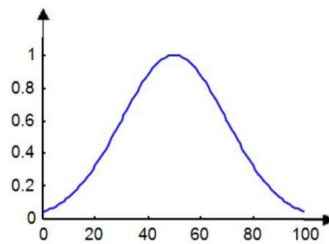
Fonte: (SLUCE, 2021)

#### 2.7.2.2 – Função Gaussiana

A construção de pertinência Gaussiana utiliza três parâmetros: X, média e desvio padrão. Abaixo a equação que representa e seu gráfico na figura 2.16 (SLUCE, 2021).

$$\text{gaussmf}(x;a,b,c) = e^{-1/2 [(x-c)/\sigma]^2}$$

Figura 2.16 -Função gaussiana



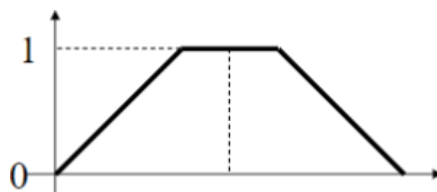
Fonte: Fonte: (SLUCE, 2021)

#### 4.6.2.3 – Função Trapezoidal

Na função Trapezoidal de pertinência uma característica é permitir um intervalo de pertinência de 100% . Abaixo a equação que representa e seu gráfico na figura 2.17 (SLUCE, 2021).

$$\text{trapmf}(x;a,b,c,d) = \max \{ \min [(x-a)/(b-a), 1, (d-x)/(d-c)], 0 \}$$

Figura 2.17 -Função trapezoidal



Fonte: (SLUCE, 2021)

# CAPÍTULO 3

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. MATERIAIS

O duto ORSOL I, responsável pela transferência de petróleo produzido no Pólo Petrolífero de Urucu (AM) até o Terminal Aquaviário de Coari (AM), operado pela Companhia PETROBRAS TRANSPORTE S/A (TRANSPETRO), foi utilizado como estudo de caso da aplicação do modelo baseado na lógica Fuzzy, onde será estimada sua taxa de corrosão interna, e a partir desta, será inferido o potencial de corrosividade existentes neste duto. Sua escolha ocorreu em virtude deste duto apresentar um mecanismo de corrosão interna cuja causa é a microbiológica, conforme documento CT BIO 003/2016 e CT BIO 007/2017 ambos elaborados pelo CENPES -PETROBRAS (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguel de Mello)

As informações técnicas do duto estão ilustradas na tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Informações técnicas do duto ORSOL I**

DUTO	COMPRIMENTO (km)	DIÂMETRO (pol)	ESPESSURA (pol)	MATERIAL	CUPONS /SONDAS (km)
ORSOLI	0-281,18	14"	0,250/0,281	API 5LX - 65	0,9 - 35 -278

O petróleo extraído no Pólo de Urucu e bombeado no duto, possui as propriedades apresentadas na tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Informações do produto bombeado**

PRODUTO	PV (kgf/cm <sup>2</sup> ) (38°C)	FAIXA DE DENSIDADE (@15oC)	VISCOSIDADE (cts) (20°C)
PETRÓLEO	0,54	0,77-0,79	5,1

### 3.2 - MÉTODO

O método empregado no desenvolvimento do modelo para identificação do potencial de corrosividade do duto consistiu em três etapas: 1. Definição dos parâmetros operacionais; 2. O modelo Fuzzy e seu detalhamento; 3. Experimento do modelo proposto.

### 3.2.1. Definição dos Parâmetro Operacionais

Para definição dos parâmetros operacionais para compor o modelo a desenvolver, é necessário apresentar a norma interna da companhia operadora do duto. Norma que estabelece critérios de monitoramento e controle da corrosão interna

#### 3.2.1.1. N-2785

É a norma Petrobras para monitoramento, interpretação e controle da corrosão interna em dutos, sendo essa norma elaborada com base nos critérios da norma Internacional NACE (*THE NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS*) - *SP 0775 - Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations*.

A N-2785 estabelece os critérios para execução da monitoração, interpretação e controle da corrosão interna em dutos para transporte, coleta e transferência de gás natural, água, etanol, petróleo e seus derivados com diâmetro igual ou superior a 6 polegadas.

Objetivos da norma são: determinação do potencial de corrosividade no duto; indicar as medidas de controle do processo corrosivo em função do potencial de corrosividade ; monitorar a eficácia das medidas de controle, atualizando a classificação do potencial de corrosividade.

A N-2785 se baseou na NACE 0775, porém adotou uma diferença ao estabelecer os critérios do potencial de corrosividade, suprimindo o conceito de potencial *HIGH* e adotando apenas os conceitos de Potencial *Low* (BAIXO), *Moderate* (MODERADO) e *Severe* (SEVERO).

A Tabela 3.3 ilustra a diferença nos critérios entre as normas N-2785 e NACE 0775.

**Tabela 3.3 – Diferença de potencial de corrosividade NACE 0775 x N 2785**

POTENCIAL DE CORROSIVIDADE			
NACE 0775		N-2785	
AVERAGE CORROSION RATE (mm/y)		TAXA UNIFORME (CUPOM/SONDA)(mm/ano)	
< 0,025	LOW	< 0,025	BAIXO
0,025 a 0,12	MODERATE	0,025 a 0,125	MODERADO
0,13 a 0,25	HIGH	> 0,125	SEVERO
> 0,25	SEVERE		

### 3.2.1.2. Parâmetros Operacionais de Entrada

Nesta etapa, os parâmetros operacionais para composição do modelo a desenvolver foram definidas baseadas na norma N-2785. Nessa pesquisa foram definidos 4 parâmetros que estão relacionados ao controle do mecanismo de corrosão microbiológica no duto. São eles: injeção de inibidor de corrosão no duto de petróleo, frequência de limpeza do duto com ferramenta PIG, velocidade de escoamento do petróleo no duto e BSW (*Basic Sediment and Water*) do petróleo.

Ainda baseado na norma N-2785, as variáveis linguísticas dos parâmetros foram também definidas.

Na tabela 3.4 constam os parâmetros operacionais e as suas variáveis linguísticas

**Tabela 3.4 – Parâmetros e variáveis linguísticas**

PARÂMETROS	VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS
INIBIDOR DE CORROSÃO	L - LOW
	M- MEDIUM
	H - HIGH
FERAMENTA DE LIMPEZA (PIG)	L - LOW
	M- MEDIUM
	H - HIGH
VELOCIDADE DE ESCOAMENTO	L - LOW
	M- MEDIUM
	H - HIGH
BSW ( BASIC SEDIMENT AND WATER)	L - LOW
	M- MEDIUM
	H - HIGH

Para a “saída” do modelo (*output*), ficou definido o mesmo critério existente na norma N-2785, já visto na tabela 3.3, isto é, a taxa de corrosão definindo o potencial de corrosividade. A figura tabela 3.5 apresenta parâmetros e variáveis linguísticas:

**Tabela 3.5 – Variáveis linguísticas de saída**

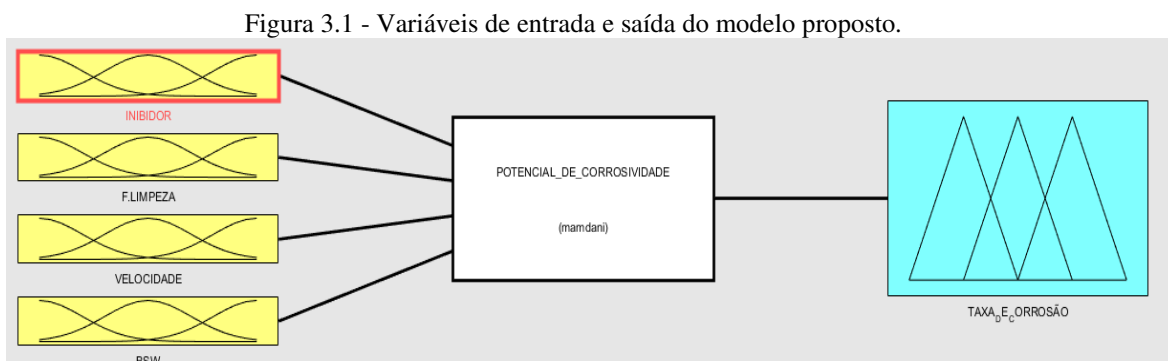
PARÂMETRO	VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS
TAXA DE CORROSÃO	B - potencial BAIXO
	M - potencial MODERADO
	S - potencial SEVERO

### 3.2.2. Modelo Fuzzy

Para facilitar a modelagem do problema em lógica Fuzzy, utilizou-se a Fuzzy Logic Toolbox™ do software MATLAB®. Os passos seguidos para a formulação do modelo de inferência Fuzzy do tipo Mamdani foram: 1. Elaboração das regras Fuzzy – o modelo conta com 81 regras; 2. fuzzificação das entradas e definição das saídas. O modelo possui 04 (quatro) entradas (inibidor de corrosão, uso da Ferramenta PIG de limpeza, velocidade de escoamento e BSW – Basic Sediment and Water) e uma saída (taxa de corrosão).

Os resultados obtidos com as técnicas convencionais utilizadas durante os monitoramentos (campanhas), foram comparados com os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido.

Os valores dos parâmetros operacionais utilizados no modelo, foram àqueles presentes durante as campanhas realizadas. Todas estas informações foram obtidas junto à Companhia operadora do duto. A Figura 3.1 ilustra a implementação do modelo.



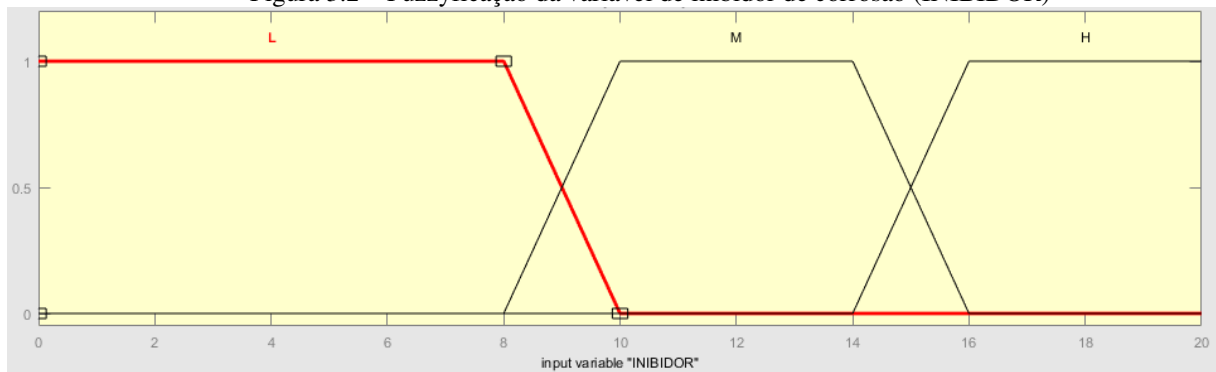
As variáveis de entrada adotados, são parâmetros operacionais do processo de bombeamento de petróleo e de acordo com a norma interna N-2785.

As variáveis do sistema podem ser descritas da seguinte forma:

- a) Inibidor de Corrosão (INIBIDOR): Nesta variável analisa-se a quantidade em ppm (parte por milhão) de inibidor de corrosão aplicado durante o bombeamento do petróleo, a fim de eliminar ação corrosiva das bactérias que promovem a corrosão microbiológica. Para que ocorra uma proteção efetiva do duto, a quantidade recomendada pelos especialistas é a partir de 18 ppm ( *H- HIGH*). Uma quantidade de até 8 ppm é considerada uma quantidade baixa ( *L-LOW*); entre 8 e 16 ppm uma quantidade média ( *M-MEDIUM*).

A Figura 3.2 ilustra que a fuzzificação desta variável é a função Trapezoidal.

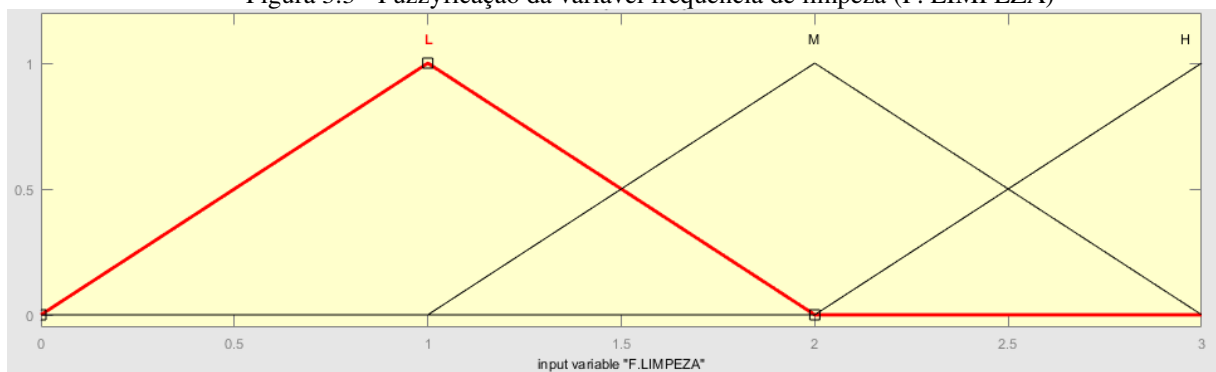
Figura 3.2 – Fuzzyficação da variável de inibidor de corrosão (INIBIDOR)



b) Frequência de Limpeza (F. LIMPEZA): a frequência do uso da Ferramenta PIG de limpeza em dutos garante o arraste de resíduos prejudiciais que se acumulam ao longo do duto, além de eliminar colônias de bactérias que se formam ao longo de toda a sua extensão, favorecendo o mecanismo de corrosão microbológica. A frequência que promova uma limpeza efetiva (H-*HIGH*) no duto é de 3 (três) “passagens” de PIG de limpeza num período de 30 dias. Quando é possível 2 (duas) “passagens”, temos uma efetividade *MEDIUM* - M. Apenas a passagem de 01 (um) pig num intervalo de 30 dias é considerada *LOW* – L.

A Figura 3.3 ilustra que a fuzzyficação desta variável é triangular.

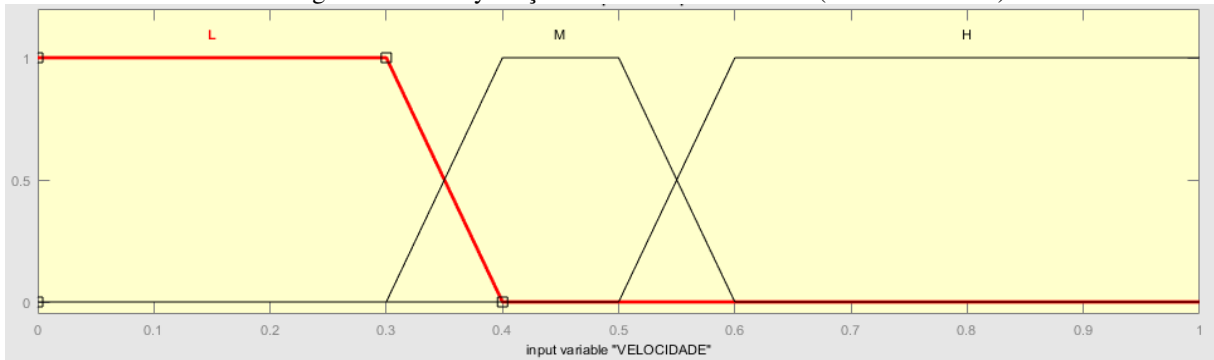
Figura 3.3 - Fuzzyficação da variável frequência de limpeza (F. LIMPEZA)



c) Velocidade de Escoamento (VELOCIDADE): é um parâmetro importante que deve ser considerado pois é necessário que o escoamento ocorra numa velocidade crítica mínima que promova arrastes de depósitos de água que se formam no duto. Para o modelo consideramos até 0,4 m/s uma velocidade baixa (L-*LOW*); entre 0,4 a 0,5 uma velocidade média (M-*MEDIUM*); e uma velocidade alta (H-*HIGH*) a partir de 0,6 m/s. A Figura 3.4 ilustra que a fuzzyficação desta variável é a função Trapezoidal.

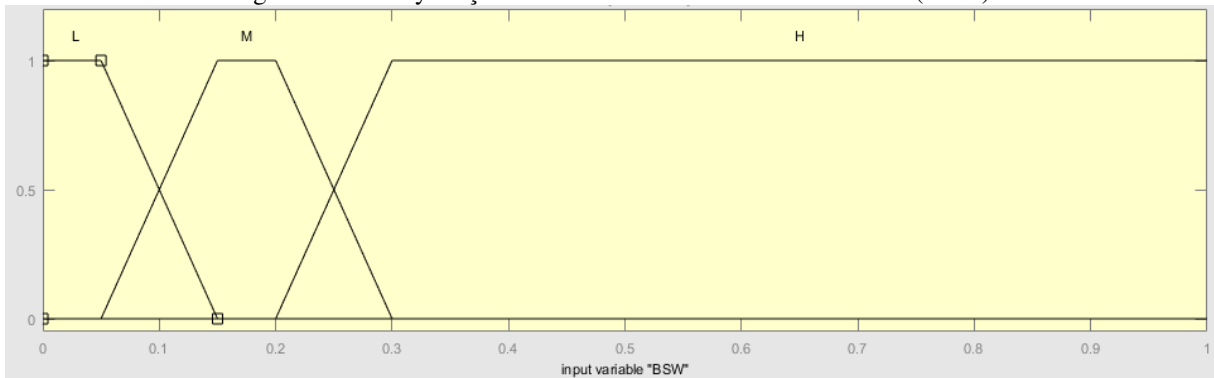


Figura 3.4 - Fuzzyficação da variável velocidade (VELOCIDADE)



d) *Basic Sediment and Water (BSW)*: Este parâmetro define a quantidade água existente na composição do petróleo que está sendo bombeado. Abaixo de 15%, o BSW não favorece a corrosão, e consideramos um percentual L-*LOW*. Acima de 15% e abaixo de 30 %, o BSW indica uma quantidade de água que pode tender a decantar na geratriz inferior duto, se a velocidade de escoamento for muito baixa, daí classificarmos esse percentual em M-*MEDIUM*. Um percentual acima de 30%, é H-*HIGH*, e favorece muito a decantação de água na geratriz inferior do duto. A Figura 3.5 ilustra que a fuzzificação desta variável é a função Trapezoidal.

Figura 3.5 - Fuzzyficação da variável *basic sediment and water (BSW)*

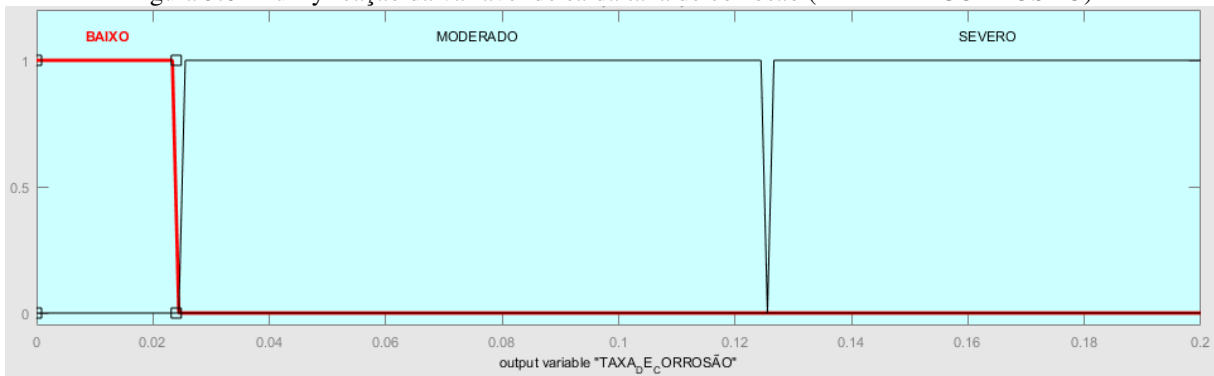


Para variável de saída, o modelo adota a taxa de corrosão (*TAXA DE CORROSÃO*) pois a partir dele será possível definir o potencial corrosivo existente no duto.

No modelo, para variável de saída, consideramos o critério utilizado na norma interna N-2785, conforme visto na tabela 3.3.

A Figura 3.6 ilustra que a fuzzificação desta variável é a função Trapezoidal.

Figura 3.6 - Fuzzificação da variável de saída taxa de corrosão (TAXA DE CORROSÃO)



A demonstração da principal base de regras de inferência das variáveis linguísticas resultou em 81 regras, aplicadas nesta solução Fuzzy, onde parte dela poder observada na tabela 3.6.

**Tabela 3.6 – Regras Fuzzy**

1. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is SEVERO)
2. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is SEVERO)
3. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is SEVERO)
4. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
5. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is SEVERO)
6. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
...

Todas as regras do modelo podem ser verificadas no Apêndice deste trabalho

### 3.2.3. Experimento do Modelo

O modelo Fuzzy desenvolvido foi aplicado com uso de dados de entrada das campanhas de monitoramento de corrosão interna do duto de petróleo ORSOL I, onde foi utilizado a técnica de perdas de massa por cupom de corrosão e/ou a técnica de sondas de resistência elétrica. Os resultados do modelo foram então comparados àqueles obtidos pelas técnicas citadas, a fim de concluir a respeito da coerência do modelo desenvolvido.

# CAPÍTULO 4

---

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados de 04 (quatro) campanhas de monitoramento da corrosão interna realizado no duto ORSOL I - já apresentado no capítulo anterior - durante o período entre os meses de dezembro de 2021 e agosto de 2022. Nas duas primeiras campanhas foi utilizada a técnica de monitoramento por perdas de massa em cupom corrosão; na terceira, a técnica empregada foi a leitura de sondas de resistência elétrica; na quarta campanha de monitoramento foram utilizadas as duas técnicas.

Os resultados destas 04 (quatro) campanhas serão comparados com os resultados obtidos pelo modelo de inferência Fuzzy, sendo neste utilizados os parâmetros operacionais envolvidos naquelas campanhas, isto é, a quantidade de inibidor aplicado, o número de limpezas promovidas no duto com uso da ferramenta PIG, a velocidade de escoamento do petróleo no duto e o percentual de BSW no petróleo bombeado.

O duto citado possui ao longo de seus 280,1 km de extensão, 03 cupons de corrosão e 03 sondas de resistência elétrica, instalados uma sonda ao lado de cada cupom, ou seja, temos 03 (três) pares desses elementos, todos objetivando favorecer o monitoramento do potencial de corrosividade no duto. Os trechos nos quais estes elementos estão instalados são nos km's 0,9, 35 e 278 do duto.

### 4.1. CAMPANHAS DE MONITORAMENTO

#### 4.1.1. CAMPANHA 1: 6 e 7 dezembro de 2021

A campanha 1 foi realizada com o uso da técnica de monitoramento por perda de massa em cupom de corrosão.

##### 4.1.1.1. Técnica de Monitoramento por Perda de Massa em Cupom de Corrosão

A tabela 4.1 ilustra informações gerais dos cupons na campanha 1.

**Tabela 4.1 – Informações gerais dos cupons na campanha 1**

DADOS	km 0,9	km 35	km 278
DATA DE INSTALAÇÃO	04/05/2021	04/05/2021	29/04/2021
NÚMERO DO CUPOM	B6788	B6786	B6785
MASSA INICIAL (g)	17,9598	17,7889	17,515
MATERIAL	AÇO CARBONO	AÇO CARBONO	AÇO CARBONO
DIÂMETRO EXTERNO (mm)	31,8	31,8	31,8
ESPESSURA (mm)	3,2	3,2	3,2
DATA DE RETIRADA	06/12/2021	06/12/2021	07/12/2021
TEMPO DE EXPOSIÇÃO (DIA)	216,0	216,0	222,0
PERDA DE MASSA (g)	0,0610	0,0071	0,0257

Para o cálculo da taxa de corrosão foi utilizado a eq. 2.1 e o critério de potencial de corrosividade a ser observado é aquele visto na tabela 3.3, conforme N-2785. A tabela 4.2 apresenta os resultados de taxa de corrosão e potencial de corrosividade no duto, de acordo com a técnica utilizada na campanha.

**Tabela 4.2 – Resultados técnica perda de massa por cupons de corrosão – campanha 1**

RESULTADOS	km 0,9	km 35	km 278
TAXA DE CORROSÃO (mm/ano)	0,0082	0,0010	0,0034
POT. CORROSIVIDADE (N-2785)	BAIXO	BAIXO	BAIXO

#### 4.1.1.2. Modelo de Inferência Fuzzy

A tabela 4.3 ilustra os valores dos parâmetros operacionais presentes na campanha 1 e exigidos no modelo Fuzzy:

**Tabela 4.3 – Parâmetros de entrada “inputs” do modelo Fuzzy– campanha 1**

PERÍODO DE MONITORAMENTO	PARÂMETROS OPERACIONAIS	
dezembro de 2021	INIBIDOR (ppm)	15
	FERRAMENTA DE LIMPEZA (qtd)	2
	VELOCIDADE (m/s)	0,45
	BSW (%)	0,05

A fig. 4.1. ilustra visualização de algumas das regras do modelo e o resultado de taxa de corrosão alcançado com os *inputs* da campanha 1.

Figura 4.1 – Algumas das regras do modelo Fuzzy e resultado para os parâmetros da campanha 1 – taxa de corrosão



A simulação no modelo Fuzzy para os valores de entrada: INIBIDOR=15; FERRAMENTA DE LIMPEZA=2; VELOCIDADE= 0,45; BSW=0,05, teve como resultado, um valor de taxa de corrosão igual a 0,012 mm/ano, no duto. Para esse valor de taxa de corrosão, a norma N-2785 estabelece um potencial de corrosividade BAIXO para o duto. Portanto, o modelo apresentou coerência com o resultado obtido pela técnica de monitoramento por perda de massa em cupom de corrosão, técnica empregada na campanha 1. Portanto, ambos, a técnica convencional e modelo Fuzzy indicaram o mesmo potencial de corrosividade existente no duto.

#### 4.1.2. CAMPANHA 2: 6 e 7 de abril de 2022

Nesta campanha de monitoramento da corrosão interna, novamente foi utilizado a técnica de cupom de perda de massa, isto é, o mesmo processo da campanha anterior, com os cupons sendo pesados após processo de decapagem, para cálculo de sua taxa de corrosão e por conseguinte definir o potencial de corrosividade conforme a N-2785.

##### 4.1.2.1. Técnica de Monitoramento por Perda de Massa em Cupom de Corrosão

A tabela 4.4 ilustra informações gerais dos cupons e parâmetros relacionados a eles nesta campanha.

**Tabela 4.4 – Informações gerais dos cupons na campanha 2**

DADOS	km 0,9	km 35	km 278
DATA DE INSTALAÇÃO	06/12/2021	06/12/2021	07/12/2021
NÚMERO DO CUPOM	B6796	B6797	B6798
MASSA INICIAL (g)	18,0279	17,9195	17,8391
MATERIAL	AÇO CARBONO	AÇO CARBONO	AÇO CARBONO
DIÂMETRO EXTERNO (mm)	31,8	31,8	31,8
ESPESSURA (mm)	3,2	3,2	3,2
DATA DE RETIRADA	06/04/2022	06/04/2022	07/04/2022
TEMPO DE EXPOSIÇÃO (DIA)	120,9	120,9	120,9
PERDA DE MASSA (g)	0,1255	0,1072	0,119

Para o cálculo da taxa de corrosão foi utilizado a eq. 2.1 e o critério de potencial de corrosividade a ser observado é aquele visto na tabela 3.3, conforme N-2785.

Na tabela 4.5 é ilustrado os resultados de Taxa de Corrosão e Potencial de corrosividade no duto, de acordo com a técnica utilizada na campanha.

**Tabela 4.5 – Resultados técnica perda de massa por cupom de corrosão – campanha 2**

RESULTADOS	km 0,9	km 35	km 278
TAXA DE CORROSÃO (mm/ano)	0,0301	0,0257	0,029
POT. CORROSIVIDADE (N-2785)	MODERADO	MODERADO	MODERADO

#### 4.1.2.2. Modelo de Inferência Fuzzy

A tabela 4.6 apresenta os valores dos parâmetros operacionais presentes na campanha 2 e exigidos no modelo Fuzzy:

**Tabela 4.6 – Parâmetros de entrada “inputs” do modelo Fuzzy– campanha 2**

PERÍODO DE MONITORAMENTO	PARÂMETROS OPERACIONAIS	
abril de 2022	INIBIDOR (ppm)	0
	FERRAMENTA DE LIMPEZA (qtd)	0
	VELOCIDADE (m/s)	0,22
	BSW (%)	0,05

A fig. 4.2. ilustra visualização de algumas das regras do modelo e o resultado de taxa de corrosão alcançado com os *inputs* da campanha 2.

Figura 4.2 – Algumas das regras do modelo Fuzzy e resultado para os parâmetros da campanha 2 – taxa de corrosão



A simulação no modelo Fuzzy para os valores de entrada: INIBIDOR=0; FERRAMENTA DE LIMPEZA=0; VELOCIDADE= 0,22; BSW=0,05, teve como resultado, um valor de taxa de corrosão igual a 0,1 mm/ano, no duto. Para esse valor de taxa de corrosão, a norma N-2785 estabelece um potencial de corrosividade MODERADO. Portanto, o modelo apresentou coerência com o resultado obtido pela técnica de monitoramento por perda de massa em cupom de corrosão, cuja técnica foi empregada na campanha 2. Ambas as técnicas, convencional e modelo Fuzzy, indicaram o mesmo potencial de corrosividade existente no duto.

#### 4.1.3. CAMPANHA 3: 4 e 5 de julho de 2022

Nesta campanha 3, ao contrário das outras duas anteriores, para monitoramento da corrosão interna foi utilizado a técnica de sonda de resistência elétrica para avaliar a taxa de corrosão e por conseguinte definir o potencial de corrosividade conforme a N-2785.

##### 4.1.3.1. Técnica de Monitoramento por Sonda de Resistência Elétrica

A tabela 4.7 ilustra os resultados em cada uma das sondas de resistência elétrica, extraídos de suas *logger*:

**Tabela 4.7 - Resultados de monitoramento com sondas de resistência elétrica**

DADOS	km 0,9	km 35	km 278
TEMPO DE EXPOSIÇÃO (DIA)	89,5	89,5	87,5
TAXA DE CORROSÃO(mm/ano)	0,0143	0,0020	0,00318
POT. CORROSIVIDADE	BAIXO	BAIXO	MODERADO

4.1.3.2. Modelo de Inferência Fuzzy

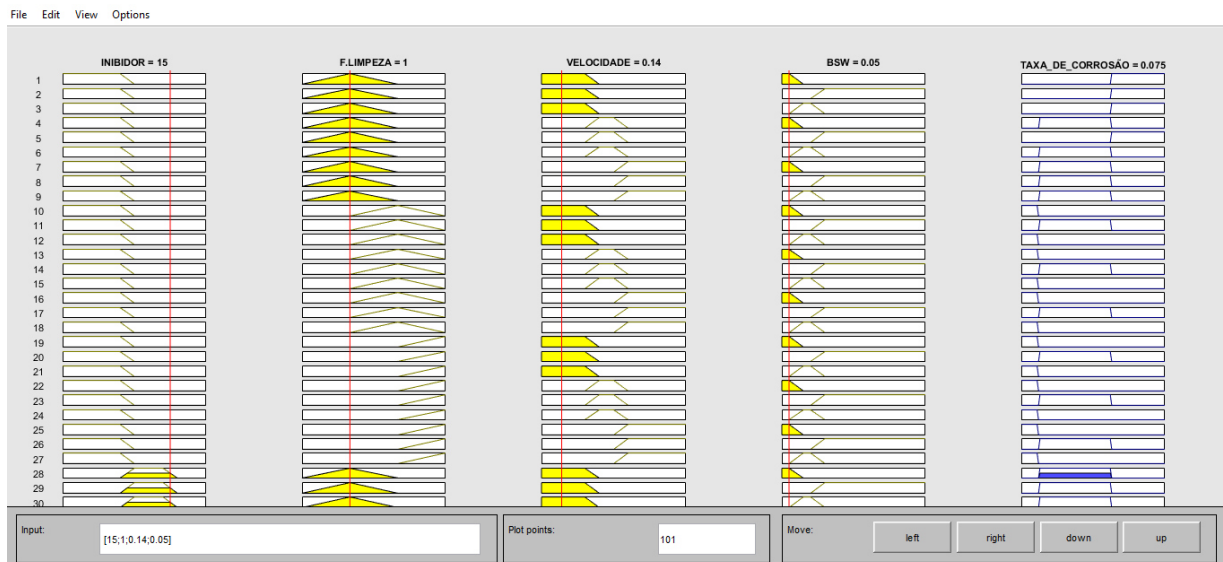
A tabela 4.8 ilustra os valores dos parâmetros operacionais presentes na campanha 3 e exigidos no modelo Fuzzy:

**Tabela 4.8 – Parâmetros de entrada “inputs” do modelo Fuzzy– campanha 3**

PERÍODO DE MONITORAMENTO	PARÂMETROS OPERACIONAIS	
julho de 2022	INIBIDOR (ppm)	15
	FERRAMENTA DE LIMPEZA (qtd)	1
	VELOCIDADE (m/s)	0,14
	BSW (%)	0,05

A fig. 4.3. ilustra visualização de algumas das regras do modelo e o resultado de taxa de corrosão alcançado com os *inputs* da campanha 3.

Figura 4.3 – Algumas das regras e resultado do modelo Fuzzy para os parâmetros da campanha 3



A simulação no modelo Fuzzy para os valores de entrada: INIBIDOR=15; FERRAMENTA DE LIMPEZA=1; VELOCIDADE= 0,14; BSW=0,05, teve como resultado, um valor de taxa de corrosão igual a 0,075 mm/ano no duto. Para esse valor de taxa de corrosão



a norma N-2785 estabelece um potencial de corrosividade MODERADO. Este resultado está de acordo com o resultado obtido por meio das sondas de resistência de elétrica no km 278, porém difere dos resultados das sondas do km 0,9 e 35, os quais indicam, conforme a tabela 4.7, potenciais corrosivos BAIXO no duto.

#### 4.1.4. CAMPANHA 4: 24 e 27 de agosto de 2022

Na campanha 4 foram utilizadas as duas técnicas de monitoramento: por perda de massa em cupom de corrosão e por sonda de resistência elétrica

##### 4.1.4.1. Técnica de Monitoramento por Perda de Massa em Cupom de Corrosão

A tabela 4.9 ilustra informações gerais dos cupons e parâmetros relacionados a eles nesta campanha.

**Tabela 4.9 – Informações gerais dos cupons na campanha 4**

DADOS	km 0,9	km 35	km 278
DATA DE INSTALAÇÃO	06/04/2022	06/04/2022	07/04/2021
NÚMERO DO CUPOM	1848	1849	1847
MASSA INICIAL (g)	17,6320	17,9199	17,8650
MATERIAL	AÇO CARBONO	AÇO CARBONO	AÇO CARBONO
DIÂMETRO EXTERNO (mm)	31,8	31,8	31,8
ESPESSURA (mm)	3,2	3,2	3,2
DATA DE RETIRADA	24/08/2022	25/08/2022	27/08/2022
TEMPO DE EXPOSIÇÃO (DIA)	140,0	140,0	142,0
PERDA DE MASSA (g)	0,0998	0,0606	0,0759

Para o cálculo da taxa de corrosão foi utilizado a eq. 2.1 e o critério de potencial de corrosividade a ser observado é aquele visto na tabela 3.3, conforme N-2785.

Na tabela 4.10 é ilustrado os resultados de taxa de corrosão e potencial de corrosividade no duto, de acordo com a técnica com uso do cupom de perda de massa.

**Tabela 4.10 - Resultados técnica perda de massa por cupons de corrosão – campanha 4**

RESULTADOS	km 0,9	km 35	km 278
TAXA DE CORROSÃO (mm/ano)	0,0212	0,0128	0,0159
POT. CORROSIVIDADE (N-2785)	BAIXO	BAIXO	BAIXO

#### 4.1.4.2. Técnica de Monitoramento por Sonda de Resistência Elétrica

A tabela 4.11 apresenta os resultados nas sondas de resistência elétrica:

**Tabela 4.11 -Resultado de monitoramento com sondas de resistência elétrica**

DADOS	km 0,9	km 35	km 278
TEMPO DE EXPOSIÇÃO (DIA)	138,5	139,0	140,5
TAXA DE CORROÇÃO(mm/ano)	0,0142	0,0017	0,0230
POT. CORROSIVIDADE	BAIXO	BAIXO	BAIXO

#### 4.1.4.3. Modelo de Inferência Fuzzy

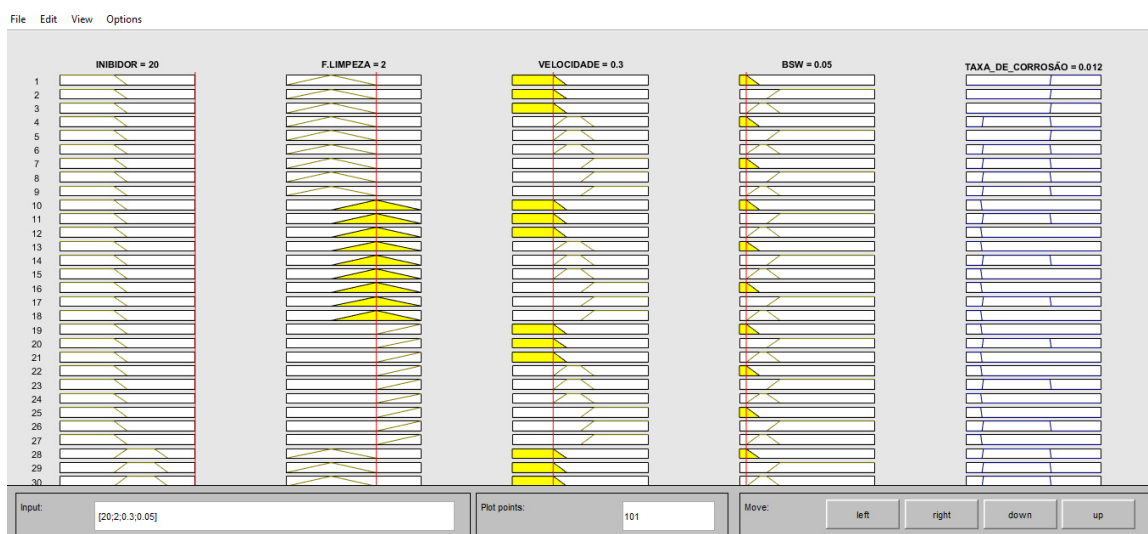
A tabela 4.12 apresenta os parâmetros presentes na campanha e exigidos no modelo:

**Tabela 4.12 – Parâmetro de entrada “inputs” do modelo Fuzzy– campanha 4**

PERÍODO DE MONITORAMENTO	PARÂMETROS OPERACIONAIS	
agosto de 2022	INIBIDOR (ppm)	20
	FERRAMENTA DE LIMPEZA (qtd)	2
	VELOCIDADE (m/s)	0,3
	BSW (%)	0,05

A fig. 4.4. ilustra regras do modelo e o resultado de taxa com os *inputs* da campanha.

Figura 4.4 – Algumas das regras e resultado do modelo Fuzzy para os parâmetros da campanha 4



Para esta campanha onde foi possível realizar as duas técnicas convencionais de monitoramento, em todos os cupons e sondas, foi classificado o potencial de corrosividade no duto como BAIXO. A simulação no modelo Fuzzy para os valores de entrada: INIBIDOR=20;

FERRAMENTA DE LIMPEZA=2; VELOCIDADE= 0,30; BSW=0,05, também indicaram uma taxa de corrosão de 0,012 mm/ano, que define um potencial de corrosividade BAIXO.

#### 4.1.5. Quadro Comparativo

A Tabela 4.13 ilustra um quadro dos resultados obtidos pelas técnicas convencionais de monitoramento da corrosão interna do duto com os resultados obtidos pelo modelo Fuzzy.

**Tabela 4.13 – Quadro comparativo técnicas de monitoramento x modelo Fuzzy**

PERÍODO DE MONITORAMENTO (CAMPANHA)	TÉCNICA DE MONITORAMENTO	KM DO DUTO	TAXA DE CORROSÃO (mm/ano)		POTENCIAL DE CORROSIVIDADE	
			TÉCNICA DE MONITORAMENTO	MODELO FUZZY	TÉCNICA DE MONITORAMENTO	MODELO FUZZY
CAMPANHA 1 - dezembro de 2021	CUPOM DE PERDA DE MASSA	0.900	0,008	0,012	BAIXO	BAIXO
	CUPOM DE PERDA DE MASSA	35	0,001		BAIXO	
	CUPOM DE PERDA DE MASSA	278	0,003		BAIXO	
CAMPANHA 2 - abril de 2022	CUPOM DE PERDA DE MASSA	0.900	0,030	0,100	MODERADO	MODERADO
	CUPOM DE PERDA DE MASSA	35	0,026		MODERADO	
	CUPOM DE PERDA DE MASSA	278	0,029		MODERADO	
CAMPANHA 3 - julho de 2022	SONDA DE RESIST.ELÉTRICA	0.900	0,014	0,075	BAIXO	MODERADO
	SONDA DE RESIST.ELÉTRICA	35	0,002		BAIXO	
	SONDA DE RESIST.ELÉTRICA	278	0,032		MODERADO	
CAMPANHA 4 - agosto de 2022	CUPOM DE PERDA DE MASSA	0.900	0,021	0,012	BAIXO	BAIXO
	CUPOM DE PERDA DE MASSA	35	0,013		BAIXO	
	CUPOM DE PERDA DE MASSA	278	0,016		BAIXO	
CAMPANHA 4 - agosto de 2022	SONDA DE RESIST.ELÉTRICA	0.900	0,014	0,012	BAIXO	BAIXO
	SONDA DE RESIST.ELÉTRICA	35	0,002		BAIXO	
	SONDA DE RESIST.ELÉTRICA	278	0,023		BAIXO	

Em 15 (quinze) resultados de medição da corrosão interna, obtidos nas 4(quatro) campanhas, em 13 (treze) deles o modelo desenvolvido em lógica Fuzzy mostrou o mesmo resultado para potencial de corrosividade.

Quando comparamos os resultados do modelo Fuzzy com cada uma das técnicas, em separado, o modelo teve 100 % de acertos quando comparado com a técnica de monitoramento da corrosão interna com uso de cupom de perda de massa; e 66,7% de acertos com a técnica de monitoramento por sonda de resistência elétrica.

Quanto aos valores das taxas de corrosão obtidas pelo modelo em lógica Fuzzy, é possível verificar que apenas na campanha 4, em 5 (cinco) medições das 6 (seis) realizadas, estas taxas de corrosão foram menores que as taxas de corrosão obtidas com as técnicas convencionais. Para as demais campanhas, os valores obtidos pelo modelo desenvolvido, foram superiores aos valores encontrados pelas técnicas convencionais.

Em todas as campanhas, os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido em lógica Fuzzy, apresentaram resultado em décimos ou centésimos de milímetros, o que é coerente com os resultados das campanhas, quer pela técnica de perda de massa por cupom de corrosão, quanto pelos resultados com a técnica com uso de sonda de resistência elétrica.

Conforme o trabalho LI *et al* (2021) afirmou, a frequência de PIG de limpeza de fato é muito relevante para eliminação de condensados, vindo então a desfavorecer a formação de colônias de bactérias que poderão promover o mecanismo de corrosão microbiana. Os resultados demonstram que 2 (duas) passagens de PIG contribuem para potencial de corrosividade BAIXO.

Conforme o trabalho de ASKARI *et al* (2021) afirmou, o uso de inibidor de fato promove um maior controle da corrosão. Naquele trabalho, vimos que uma injeção de inibidor é pontuado o mais econômico e confiável método de controle de corrosão interna. Os resultados demonstraram que, de fato, o uso do inibidor mantém em nível BAIXO o potencial de corrosividade.

# CAPÍTULO 5

---

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido se mostrou viável como proposta de monitoramento da taxa de corrosão interna e seu consequente potencial de corrosividade, num duto cujo mecanismo de corrosão é predominantemente devido à corrosão microbiana.

As variáveis de entrada adotadas (inibidor de corrosão, frequência limpeza, velocidade de escoamento e BSW), bem como suas funções de pertinência, se mostraram adequadas ao modelo pois permitiu que a variável de saída estivesse muito próxima dos valores reais obtidos pelos métodos de monitoramento.

Os parâmetros inibidores de corrosão e frequência de limpeza, associados, se mostraram determinantes para um controle da corrosão em níveis BAIXO de potencial, especialmente quando as avaliações se deram em relação aos resultados por perda de massa em cupom de corrosão. Isso é bem ratificado na campanha 2.

O modelo desenvolvido em lógica Fuzzy foi totalmente assertivo quando seus resultados de potencial de corrosividade do duto são comparados aos resultados obtidos nas campanhas realizadas com o uso da técnica de monitoramento por cupons de perda de massa.

Para inferir potencial de corrosividade, o modelo desenvolvido em lógica Fuzzy teve uma pequena discordância em seus valores de taxa de corrosão em relação àquelas obtidos pela técnica por sonda de resistência elétrica, em especial na campanha 3, o que levou a uma definição diferente entre a técnica e o modelo. Essa pequena divergência, porém, não inviabiliza o modelo, visto que o modelo definiu um potencial mais crítico.

O modelo desenvolvido em lógica Fuzzy é conservativo. Isto é, predominantemente, o modelo infere sempre uma taxa de corrosão maior que a existente. Mesmo quando apresentou uma taxa menor que as encontradas nas medições pelas técnicas convencionais, os resultados foram muito próximos dos valores encontrado pelas técnicas convencionais.

O modelo em lógica Fuzzy desenvolvido pode ser utilizado para auxiliar no monitoramento da corrosão interna em dutos de petróleo cujo principal mecanismo de corrosão seja o microbiana, apresentando informações coerentes às equipes responsáveis pela integridade daqueles equipamentos.

## 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir deste trabalho surgem possibilidades de trabalhos futuros, como:

Incrementar ao modelo desenvolvido, o parâmetro operacional regime de escoamento, a fim de avaliar qual a influência do regime contínuo, ou intermitente, na taxa de corrosão e consequente potencial de corrosividade no duto;

Adaptar o modelo desenvolvido para dutos que operam com derivados de petróleo onde o potencial de corrosividade é definido por quantificação de resíduos coletados na saída do duto e/ou inspeção por PIG Instrumentado;

Desenvolver um modelo em lógica Fuzzy em que seja possível inferir a corrosão externa em dutos, para isso adotando parâmetros do solo, no qual este duto esteja enterrado.

## REFERÊNCIAS

AKHLAGHI, M.; TAHERKHANI, M.; NOURI, N.M. Study of Intermittent Flow Characteristics Experimentally and Numerically in a Horizontal Pipeline. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. 79, 103326, jul 2020. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103326. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103326>.

ALAMRI, A.H. Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview. **Journal Engineering Failure Analysis**. 116, 104735, oct 2020. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104735. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104735>.

ASKARI, M.; ALIOFHKAZRAEI, M.; AFROUKHTEH, S. A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. 71, 102971, nov 2019. DOI 10.1016/j.jngse.2019.102971. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102971>.

BADIDA, P.; BALASUBRAMANIAM, Y.; JAYAPRAKASH, J. Risk Evaluation of oil and natural gas pipelines due to natural hazards using fuzzy fault tree analysis. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. 66, p.284-292, jun 2019. DOI 10.1016/j.jngse.2019.04.010. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.010>.

BIEZMA, V.M.; AGUDO, D.; BARRON, G. A fuzzy logic method: Predicting pipeline external corrosion rate. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**. 163, p.55-62, jun 2018. DOI 10.1016/j.ijpvp.2018.05.001. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.05.001>.

COX, W. A Strategic Approach to Corrosion Monitoring and Corrosion Management. **Journal Procedia Engineering**. 86, p. 567-574, nov 2014.. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.082. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.082>.

DA SILVA, A. A. R. **Avaliação da corrosão em dutos por técnica gravimétrica e de resistência Elétrica**. 2011.93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Centro de Ciências Exatas e da Terra (CCET), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

DA SILVA, A. B. **Avaliação de inibidores de corrosão para aço carbono em ambientes de elevada salinidade contendo CO<sub>2</sub>**. 2013. 89p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Alberto Luiz Coimbra (COPPE) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

DAWUDA, A-W.; BERROUANE-TALEB, M.; KHAN, F. A probabilistic model to estimate microbiologically influenced corrosion rate. **Process Safety and Environmental Protection**. 148, p.908-926, february 2021. DOI 10.1016/j.psep.2021.02.006. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.02.006>

GAVIDIA, J. J. Z. **Um sistema de intervenção computacional para rastreamento e monitoramento de leitura em uma proposta de RTI**. 2017. 137p.Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas de Computação) – Instituto Alberto Luiz Coimbra (COPPE) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

GENTIL, V.; CARVALHO, J.L. **Corrosão**. 7 ed. São Paulo: LTC. 2021. 453p.

JAMSHIDI, A.; YASDANI, A.; YAKHCHALI, S.; KHALEGHI, S. Developing new fuzzy inference system for pipeline risk assessment. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. 26, p.197-208, oct 2013. DOI /10.1016/j.jlp.2012.10.010. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2012.10.010>

KHAN,F.; YARVEISY,R.; ABBASSI,R. Risk-based pipeline integrity management: A road map for the resilient pipelines. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. p.74-87, feb 2021. DOI /10.1016/j.jpse.2021.02.001. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpse.2021.02.001>

KRAIDI, L.; SHAH, R.; MATIPA, W.; BORTHWICK, F. Using stakeholder's judgement and fuzzy logic theory to analyze the risk influencing factors in oil and gas pipelines projects: Case study in Iraq, stage II. **International Journal of Critical Infrastructure protection**. 28, 100337, mar 2020. DOI 10.1016/j.ijcip.2020.100337. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcip.2020.100337>

LI, K.; HE, L.; ZENG, Y.; LUO, J-L. Influence of H<sub>2</sub>S on the general corrosion and sulfide stress cracking of pipelines steels for supercritical CO<sub>2</sub> transportation. **Journal Corrosion Science**. 190, 109639, sep 2021. DOI 10.1016/j.corsci.2021.109639. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109639>

LI, X.; HE, L.; LUO, X.; LIU, H.; HE, S.; LI, Q. Transient pigging dynamics in gas pipelines: Models, experiments, and simulations. **Journal Ocean Engineering**. 232, 109126, may 2021. DOI 10.1016/j.oceaneng.2021.109126. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109126>

MAMDANI, E. H. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. **Proc. Iee**. v. 121, p. 1585-1588, 1974.



NACE - National Association Corrosion Engineers International - **SP0775-2018**: Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations. Texas: NACE, 2018. 20p.

NOGUEIRA, E.L. **Modelo de inferência Fuzzy para avaliação da análise Swot como apoio na tomada de decisão organizacional**. 2021. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/13583>.

OLVERA-MARTÍNEZ, M. E.; MENDOZA-FLORES, J.; GENESCA, J.; CO<sub>2</sub> corrosion control in steel pipelines. Influence of turbulent flow on the performance of corrosion inhibitors. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. 35, p. 19-28, october 2019. DOI 10.1016/j.jlp.2015.03.006. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.03.006>

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro - **N-2785-2018**: Monitoramento, Interpretação e Controle da Corrosão Interna em Dutos, Rev. C. Rio de Janeiro. PETROBRAS, 2018, 75p.

SEGHER, M. E. A.B.; HÖCHE, D.; ZHELUDKEVICH, M. Prediction of the internal corrosion rate for oil and gas pipeline: Implementation of ensemble learning techniques. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. 99, 104425, mar 2022. DOI 10.1016/j.jngse.2022.104425. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104425>.

SILVA, C.R.P. **Lógica fuzzy: uma perspectiva para avaliações**. 2018. 69p. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional - PROFMAT) – Universidade Federal de Alagoas, Maceio, 2018.

SILVEIRA, C.J.G.; SOUZA.M.P.; AKAMINE, R.N.; **Avaliação da corrosão microbiológica do oleoduto Orsol I**. 16, p. Rio de Janeiro, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello - CENPES, 2016 (CT BIO 003/2016).

SILVEIRA, C.J.G.; AKAMINE, R.N.; **Avaliação da corrosão microbiológica do oleoduto Orsol I – Parte III**. 20, p. Rio de Janeiro, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello - CENPES, 2016 (CT BIO 007/2017).

SLUCE, P. **Proposta de avaliação de risco em prensas hidráulica com lógica fuzzy**. 2021. 46p. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Processos) – Instituto de Tecnologia - Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

SINGH, M.; POKHREL, M. A Fuzzy Logic-Possibilistic Methodology for Risk-Based Inspection (RBI) Planning of Oil and Gas Piping Subjected to Microbiologically Influenced Corrosion (MIC). **International Journal of Pressure Vessels and Piping**. 159, p.45-54, jan

2018. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2017.11.005. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.11.005>.

WANG, Q.; AI, M.; SHI, W. LYU, W.; YU, W. Study on corrosion mechanism and its influencing factors of a short distance intermittent crude oil transmission and distribution pipeline. **Journal Engineering Failure Analysis**. 118, 104892, dec 2020. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104892. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104892>

WANG, Z.; ZHOU, Z.; XU, W. LYU, W.; YANG, L.; ZHANG,B.; LI,Y. Study on inner corrosion behavior of high strength product oil pipelines. **Journal Engineering Failure Analysis**. 115, 104659, jun 2020. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104659. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104659>

WASIM, M.; DJUKIC, M. B. External corrosion of oil and gas pipelines: A review of failure mechanisms and predictive preventions. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. 100, 104467, apr 2022. DOI 10.1016/j.jngse.2022.104467. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104467>.

WEI, B.; XU, J.; SUN, C.; CHENG, Y.F. Internal microbiologically influenced corrosion of natural gas pipelines: A critical review. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. 26, p.197-208, jun 2022. DOI 10.1016/j.jngse.2022.104581. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104581>

WU K-Y.; MOSLEH, A. Effect of temporal variability of operating parameters in corrosion modelling for natural gas pipelines subject to uniform corrosion. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. 69, 102930, Sep 2019. DOI 10.1016/j.jngse.2019.102930. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102930>

ZHOU, Q.; WU, W.; LIU, D.; LI, K.; QIAO, Q. Estimation of corrosion failure likelihood of oil and gas pipeline based on fuzzy logic approach. **Engineering Failure Analysis**. 70, p.48-55, dec 2016. DOI 10.1016/j.engfailanal.2016.07.014. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.07.014>

## APÊNDICE

### I. REGRAS (“RULES”)

1. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is SEVERO)
2. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is SEVERO)
3. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is SEVERO)
4. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
5. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is SEVERO)
6. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
7. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
8. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
9. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
10. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
11. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
12. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
13. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
14. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
15. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
16. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)

17. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
18. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
19. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
20. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
21. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
22. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
23. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is SEVERO)
24. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
25. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
26. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
27. If (INIBIDOR is L) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
28. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
29. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
30. . If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
31. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
32. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
33. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)

34. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
35. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
36. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
37. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
38. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
39. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
40. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
41. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
42. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
43. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
44. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
45. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
46. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
47. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
48. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
49. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
50. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)


51. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
52. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
53. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
54. If (INIBIDOR is M) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
55. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
56. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
57. . If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
58. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
59. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
60. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
61. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
62. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
63. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is L) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
64. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
65. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
66. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
67. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)

68. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
69. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
70. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
71. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is MODERADO)
72. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is M) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
73. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
74. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
75. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is L) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
76. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
77. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
78. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is M) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
79. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is L) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
80. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is H) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)
81. If (INIBIDOR is H) and (F.LIMPEZA is H) and ( VELOCIDADE is H) and (BSW is M) then (TAXA DE CORROSÃO is BAIXO)



## ANEXOS

### I. AUTORIZAÇÃO PARA USO DE INFORMAÇÕES DO DUTO OPERADO PELA PETROBRAS TRANSPORTE S/A - TRANSPETRO



## Assessoria de Conformidade

Informações da assessoria			
Assunto:	Conflito de Interesses – Dissertação contendo informações NP1		
Gerência solicitante:	TP/DOP/DTNNESE/UO-NORTE/SIE		
Gerência responsável:	TP/PRES/GRC/CONF	Número da assessoria:	ID 146/2022

**1) Consulta**

*“Boa tarde!*  
*Estou cursando um Mestrado Profissional no Instituto Galileo do Amazonas , no tema Otimização de Processos Industriais.*  
*Como trabalho final do Curso, estou escrevendo uma Dissertação cujo objeto de investigação é a corrosão interna em dutos.*  
*Como caso prático a abordar no mencionado trabalho, tenho em mente aplicar um modelo desenvolvido no Software MatLab para inferir a taxa de corrosão no duto ORSOL I, operado pela Transpetro, aqui no Amazonas.*  
*Gostaria de autorização para, na Dissertação supracitada, apresentar informações NP1 a respeito da corrosão interna no ORSOL I. Informações às quais me refiro são os valores de taxa de corrosão existente no ORSOL I, em apenas 3 dos 278 KM que o duto possui.”*

**2) Contexto normativo**

A Assessoria de Conformidade é realizada com base no escopo definido pelo padrão SINPEP PE-0TP-00447, onde o escopo de análise desta assessoria está, para este caso, circunscrito à análise de conflito de interesses e à observância ao Programa Petrobras de Prevenção à Corrupção, aos acordos e tratados internacionais de combate à fraude e à corrupção nos quais o Brasil é signatário, às legislações anticorrupção brasileira e estrangeiras aplicáveis à Transpetro, não se imiscuindo aos demais casos previstos no padrão.

Especificamente em relação a consulta apresentada tem se como base, por se tratar de consulta acerca de eventual Conflito de Interesses, a Diretriz DI-0TP-00022 - Prevenção ao Conflito de Interesses.

**3) Análise**

Cabe inicialmente esclarecer que, o meio adequado para se realizar uma consulta sobre Conflito de Interesses de empregados é através do sistema SeCI da CGU, porém devido a peculiaridade do caso em questão foi formalizada a solicitação por e-mail.

A equipe de Conformidade recebeu em 02/09/2022, por meio de e-mail, enviado pelo próprio empregado, consulta acerca de possível conflito de interesses.

Com relação ao conflito de interesses, a lei nº 12.813/2013, regulamentada pela Portaria Interministerial 333/2013, tem como objetivo prevenir a ocorrência de conflito de interesses abrangendo empresas estatais federais, definindo-o como “a situação gerada pelo confronto entre interesses públicos e privados, que possa comprometer o interesse coletivo ou influenciar, de maneira imprópria o desempenho da função pública” (art. 3º, I).

Cabe acrescentar que segundo a Diretriz DI-0TP-00022-0 – PREVENÇÃO AO CONFLITO DE INTERESSES, aprovada no dia 16/03/2022, o conflito de interesses “ocorre quando o colaborador decide agir em favor de



## Assessoria de Conformidade

ID 146/2022

*interesses particulares ou de terceiros, contrários aos interesses da companhia ou que possam causar qualquer tipo de dano à Transpetro e as suas Participações Societárias”.*

Alinhado à legislação aplicável, bem como à Diretriz mencionada, o Código de Conduta Ética da Companhia, no item “6.4.7. Prevenção De Conflitos de Interesses”, elenca, em especial, como deveres de todos os seus colaboradores:

*“a) Conhecer e evitar as hipóteses de conflito de interesses previstas na legislação em vigor, seja durante ou após o respectivo exercício do emprego público;*

*b) Não se envolver direta ou indiretamente em qualquer atividade que seja conflitante com os interesses da Transpetro;*

*c) Buscar a imparcialidade, exercendo suas atividades de forma isenta, sem utilizar a condição de colaborador para obter vantagens para Transpetro ou para terceiros;*

*d) Reportar imediata e formalmente a ocorrência de qualquer conflito de interesses, ou a aparência de sua existência, ao superior hierárquico ou à Ouvidoria da Transpetro por meio dos canais disponíveis;*

*e) Declarar-se impedido de decidir ou de realizar determinadas atividades sempre que o respectivo ato for capaz de gerar um conflito de interesses real ou em potencial;*

*f) Eximir-se de desempenhar atividades externas cujos promotores, contratantes ou patrocinadores tenham interesse direto ou indireto nas decisões afetas ao exercício das funções do empregado;*

*g) Conhecer e cumprir as normas internas e legais aplicáveis que tratam da vedação do nepotismo;*

*h) Não nomear, designar ou contratar cônjuge, companheiro (a) ou parente em linha reta ou colateral, por consanguinidade ou afinidade, até o terceiro grau”.*

Ressaltamos, ainda, o item 6.4.5, do Código de Conduta Ética, que indica como dever de todos os empregados:

*“a) Cumprir as normas e diretrizes de Segurança da Informação da Transpetro referentes à proteção das informações corporativas e tratamento de informação, estabelecidas em normativo interno;*

*b) Usar as informações corporativas exclusivamente para desempenho de suas respectivas atividades profissionais;*

*c) Adotar, principalmente em ambientes não corporativos, as cautelas necessárias ao tratar de informações da Transpetro, principalmente aquelas que sejam relevantes ao processo de decisão, com repercussão econômica, financeira, de imagem e de reputação;*

*d) Respeitar o sigilo profissional, guardar segredo e não dividir, transmitir ou compartilhar as informações a que tenham acesso em razão do exercício de suas atividades, que não tenham sido previamente autorizadas pela alçada competente ou que estejam em desacordo com as normas e diretrizes de Segurança da Informação;*

*e) Cuidar para que as informações inseridas em documentos e comunicações sejam verdadeiras e compatíveis com as normas e diretrizes de Segurança da Informação da Transpetro.*

*f) Não utilizar informações a que tenham acesso, em razão do exercício de suas atividades, para negociar valores mobiliários ou ainda para obter vantagens pessoais ou para terceiros, nem compartilhar informações dessa natureza com terceiros com tais propósitos;*

## Assessoria de Conformidade

ID 146/2022

*g) Reportar imediatamente ao superior hierárquico qualquer não conformidade de Segurança da Informação, desaparecimento ou suspeita de perda de informação e/ou de equipamentos que contenham informações sensíveis;*

*h) Não alterar ou destruir voluntariamente documentos originais de valor probatório, mantendo-os em arquivo, preferencialmente em formato digital, na forma e pelos prazos definidos em lei.”*

Transcreve-se novamente parte da Diretriz de Conflito de Interesses, a qual traz as situações ou relacionamentos possíveis de conflito. No caso em tela entendemos que se aplica especialmente a de nº 1:

*“6.1.2. Situações de conflito de interesses*

*Quanto aos tipos de conflitos de interesses, esta Diretriz se ocupa, em especial, das seguintes situações ou relacionamentos no exercício de cargo ou emprego na Transpetro ou suas participações societárias:*

- 1. uso ou divulgação de informações privilegiadas;*
- 2. nepotismo;*
- 3. relações de parentesco;*
- 4. participações em sociedades que transacionam com a Transpetro;*
- 5. exercício de atividade privada;*
- 6. concessão e/ou recebimento de presentes e hospitalidades;*
- 7. pessoas expostas politicamente – PEP”.*

Com relação ao exercício da atividade apresentada, cabe mais uma vez apresentar o que diz a Diretriz DI-OTP-00022-0 – PREVENÇÃO AO CONFLITO DE INTERESSES:

*“Nesse contexto, sem prejuízo de outros deveres previstos nos demais normativos aplicáveis, é dever de todos os colaboradores da Transpetro:*

- 1. resguardar as informações privilegiadas a que teve acesso, durante e após o exercício do cargo público;*
- 2. conhecer e cumprir as normas internas e legais aplicáveis que tratam da vedação do nepotismo e de conflito de interesses;*
- 3. não nomear, designar ou contratar cônjuge, companheiro (a) ou parente em linha reta ou colateral, por consanguinidade ou afinidade, até o terceiro grau;*
- 4. não se constituir administrador ou sócio detentor de mais de 5% (cinco por cento) do capital social em qualquer entidade que participe de licitações ou transacione com a Transpetro;*
- 5. não exercer atividades que possam interferir na sua completa capacidade de atuar no melhor interesse da Transpetro”;*

Os itens destacados acima são os que apresentam maior risco de Conflito de Interesses no caso apresentado.

Apesar de o empregado informar que apresentará informações NP1 da Transpetro, entende-se que eventualmente ele pode ter acesso a alguma informação que possa ser sensível para a Transpetro, sendo assim cabe-se atentar para o risco relacionado ao item 1 apresentado acima. Deve então o empregado garantir

## Assessoria de Conformidade

ID 146/2022

que nenhuma informação sigilosa/privilegiada da Transpetro ou que afete os interesses da Transpetro seja usada de forma direta ou indireta na atividade que pretende exercer.

Cabe informar que a classificação das informações (NP-1, NP-2, NP-3) é de responsabilidade do gestor da informação, não cabendo a esta conformidade se imiscuir na classificação das mesmas. O empregado deve atuar junto ao gestor das informações para garantir que nenhuma informação sigilosa/privilegiada ou que possa afetar os interesses da Transpetro seja utilizada e/ou divulgada no referido trabalho.

#### 4) Conclusão

Nesses termos, com base no artigo 5º da Lei 12.813/2013 e nos itens 6.4.5 e 6.4.7 do Código de Conduta Ética da Companhia, esta Conformidade se posiciona no seguinte sentido:

A atividade objeto do pedido, a princípio, não conflita com os interesses da Transpetro, devendo o empregado, no decorrer da execução da atividade em questão, atentar para a ocorrência de quaisquer circunstâncias que possam representar afronta aos itens acima elencados e, identificando-os, retornar a esta Conformidade para esclarecimento

Data de elaboração:	11/10/2022
Elaborado por:	Gerência de Conformidade