

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
GABRIEL MENDES RUIZ RODRIGUES**

**A EXCELÊNCIA NA MANUTENÇÃO PREDITIVA E
CORRETIVA EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
DUTOS PETROLÍFEROS E GÁS NATURAL EM
USINAS DE REFINO.**

**Taubaté – SP
2023**

GABRIEL MENDES RUIZ RODRIGUES

**A EXCELÊNCIA NA MANUTENÇÃO PREDITIVA E
CORRETIVA EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
DUTOS PETROLÍFEROS E GÁS NATURAL EM
USINAS DE REFINO.**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Certificado de Graduação do
curso de Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté

Orientadora: Prof. Msc. Maria Regina
Hidalgo de Oliveira Lindgren

Coorientador: Prof. Msc. Paulo Cesar
Corrêa Lindgren

**Taubaté – SP
2023**

Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi
Universidade de Taubaté - Unitau

R696a Rodrigues, Gabriel Mendes Ruiz
A excelência na manutenção preditiva e corretiva em linhas de distribuição de dutos petrolíferos e gás natural em usinas de refino / Gabriel Mendes Ruiz Rodrigues. -- 2023.
114 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2023.
Orientação: Prof. Me. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren, Departamento de Engenharia Mecânica.
Coorientação: Prof. Me. Paulo Cesar Corrêa Lindgren, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Manutenção Preditiva. 2. Manutenção corretiva. 3. Dutos petrolíferos. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. Graduação em Engenharia de Mecânica. II. Título.

CDD – 658.5

GABRIEL MENDES RUIZ RODRIGUES

**A EXCELÊNCIA NA MANUTENÇÃO PREDITIVA E CORRETIVA EM LINHAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE DUTOS PETROLÍFEROS E GÁS NATURAL EM USINAS DE
REFINO.**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

DATA: 14/12/2023

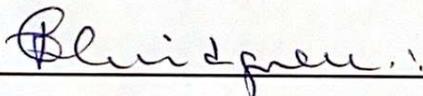
RESULTADO: APROVADO

BANCA EXAMINADORA:

Profª Me. Maria Regina Hidalgo O. Lindgren

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura:



Prof. Me. Paulo Cesar Corrêa Lindgren

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura:



Prof. Me. Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura:



Taubaté – SP
2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família. Meu pai Estevem, pelas oportunidades de ingresso ao trabalho e estudo na área da engenharia, pelo apoio e suporte sempre cedidos, pelos valores e princípios ensinados por um homem que tenho profunda admiração e orgulho.

Minha mãe Sheila, por todo cuidado, toda instrução e proteção a mim dada, pela paciência e calma na minha transformação de menino para homem.

Minha irmã Julia, pelo carinho, as vezes duvidoso, e pelo amor em todas as etapas cumpridas até então.

A minha namorada Gabriella, pela cumplicidade e parceria de sempre, pela dedicação, empenho a nossa relação, nosso futuro e por todas as vezes que precisei de sua ajuda.

A Deus, pelo destino que Ele me escreveu, aos sucessos, as derrotas, aos aprendizados em minha vida e em particular a fé singular que Ele me deu e a proteção divina que me acompanha por onde vou.

A minha orientadora Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren e meu coorientador Paulo Cesar Corrêa Lindgren pelo apoio, carinho e atenção na jornada da Engenharia Mecânica e do presente trabalho.

“Leva o tempo que for pra perceber qual é a tua praia, leva o tempo que for pra perceber qual é o teu lugar. Mas depois que você descobriu, não recue ante nenhum pretexto.”

Clovis de Barros Filho

RESUMO

O complexo de uma usina de refino, operando em sua ideal condição, certifica o condicionamento e transformação do petróleo bruto em seus distintos subprodutos de importância. Este fluxo intermitente, intrínseco a integridade do cumprimento da manutenção, é fundamental para o progresso da sociedade e das nações. Especialmente a de caráter preditivo, deve garantir que as etapas de transporte e refino, ocorram de maneira fluida e controlada, a fim de prevenir eventualidades imprevistas, ocasionadas por falhas na infraestrutura das linhas de distribuição. Através de uma revisão bibliográfica, o presente trabalho procura evidenciar a excelência da manutenção preditiva e corretiva em oleodutos e gasodutos de parques industriais de refinarias. Bem como as ferramentas e técnicas utilizadas na obtenção de informações relevantes para sua plena implementação

Palavras-chave: Manutenção Preditiva. Manutenção Corretiva. Dutos Petrolíferos.

ABSTRACT

The complex of a refining plant, operating in its ideal condition, certifies the conditioning and transformation of crude oil into its different important by-products. This intermittent flow, intrinsic to the integrity of maintenance compliance, is fundamental to the progress of society and nations. Especially the predictive nature, it must ensure that the transportation and refining stages occur in a fluid and controlled manner, in order to prevent unforeseen eventualities, caused by failures in the infrastructure of the distribution lines. Through a bibliographical review, this work seeks to highlight the excellence of predictive and corrective maintenance in oil and gas pipelines in refinery industrial parks. As well as the tools and techniques used to obtain relevant information for its full implementation

KEYWORDS: Predictive. Corrective maintenance. Oil Pipelines.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- PRINCIPAIS DERIVADOS DO PETRÓLEO E SUAS UTILIZAÇÕES	21
TABELA 2- GASTOS COM PROBLEMAS DE CORROSÃO	50
TABELA 3- RESUMO PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS CORRENTES PARASITAS	73
TABELA 4- TH EM OLEODUTOS	91
TABELA 5- PRESSÕES MÁXIMAS ADMISSÍVEIS	91
TABELA 6- REQUISITOS DE TESTE PARA TUBULAÇÕES DE AÇO QUE TERMINAM NA TENSÃO CIRCUNFERENCIAL PARA OPERAR COM TENSÕES CIRCULARES DE 30% OU MAIS DO LIMITE DE ESCOAMENTO MÍNIMO ESPECIFICADO DO TUBO.....	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PRINCIPAIS FLUXOS COMERCIAIS DO PETRÓLEO A NÍVEL GLOBAL	23
FIGURA 2- ESTADO DA REFINARIA HUMBER APÓS ACIDENTE.....	40
FIGURA 3- ESTADO DA REFINARIA HUMBER APÓS ACIDENTE.....	41
FIGURA 4- ACIDENTES EM DECORRÊNCIA DE CORROSÃO EM REFINARIAS. A) REFINARIA GOLDEN EAGLE, B) REFINARIA RICHMOND, (C) E (D) REFINARIA CHEVRON	42
FIGURA 5 - LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO <i>ONSHORE</i>	43
FIGURA 6- LIMITES DE INTERAÇÃO ENTRE NORMAS <i>ASME</i> B31.3, B31.4 E B31.8.....	48
FIGURA 7- CORROSÃO ATMOSFÉRICA EM UMA LINHA DE GLP PRÓXIMA A UMA TORRE DE RESFRIAMENTO	52
FIGURA 8- CORROSÃO GALVÂNICA DE UMA UNIÃO DE AÇO-CARBONO EM UM VASO DE AÇO .	54
FIGURA 9- CORROSÃO FILIFORME SOBRE ALUMÍNIO	55
FIGURA 10- CORROSÃO-EROSÃO DE UM FLANGE EM AÇO 1 1/4 EM UMA LINHA DA UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDO.....	58
FIGURA 11 - FALHA POR CORROSÃO-FADIGA EM TUBO DE ALTA TEMPERATURA E PRESSÃO ...	59
FIGURA 12- PRINCIPAIS FERRAMENTAS UTILIZADAS NA INSPEÇÃO VISUAL.....	61
FIGURA 13- LIMPEZA DA PEÇA	62
FIGURA 14- APLICAÇÃO DE LÍQUIDO PENETRANTE	63
FIGURA 15- REMOÇÃO DO EXCESSO DE LÍQUIDO	63
FIGURA 16- APLICAÇÃO DO REVELADOR	64
FIGURA 17 - AVALIAÇÃO E INSPEÇÃO.....	64
FIGURA 18- FORMAÇÃO DA INDICAÇÃO DA TRINCA	65
FIGURA 19– ENSAIO DE LP EM TUBULAÇÃO FLANGEADA.....	66
FIGURA 20- PRINCÍPIO ENSAIOS CORRENTES PARASITAS	66
FIGURA 21 - PERTURBAÇÃO DO FLUXO DE CORRENTES PARASITAS PROVOCADO PELA PRESENÇA DE UMA TRINCA.....	67
FIGURA 22– MOSTRADOR CORRENTES PARASITAS	69
FIGURA 23- LINHAS DE FLUXO DAS CORRENTES PARASITAS EM UM CONDUTOR REPRESENTANDO O EFEITO DE BORDA	70
FIGURA 24- INTENSIDADE DAS CORRENTES PARASITAS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO NO MATERIAL.....	71
FIGURA 25- PROPAGAÇÃO DA ONDA LONGITUDINAL	75

FIGURA 26- PROPAGAÇÃO DA ONDA TRANSVERSAL	76
FIGURA 27- TRANSDUTOR ANGULAR	76
FIGURA 28- CRISTAIS COM SINAL EM FASE	78
FIGURA 29- CRISTAIS COM SINAL DEFASADO NO TEMPO	78
FIGURA 30- ESQUEMA DE FOCALIZAÇÃO ELETRÔNICA	79
FIGURA 31- DEFLEXÃO ELETRÔNICA.....	80
FIGURA 32- <i>PHASED ARRAY</i> EM TUBULAÇÃO DE PROCESSO	80
FIGURA 33- PRINCÍPIO DO ENSAIO DE PARTÍCULA MAGNÉTICA	81
FIGURA 34- TIPOS DE PIGS DE LIMPEZA.....	83
FIGURA 35- <i>PIG LAUNCHER</i>	84
FIGURA 36- EXEMPLO DE <i>PIG</i> INSTRUMENTADO INSERIDO NO DUTO	86
FIGURA 37- <i>PIG</i> GEOMÉTRICO	86
FIGURA 38- <i>PIG</i> DE CORROSÃO 16"	87
FIGURA 39- <i>PIG MFL</i>	87
FIGURA 40- CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME PELA PAREDE DO DUTO.....	88
FIGURA 41- DETECÇÃO DE ANOMALIA PELA FUGA DE CAMPO MAGNÉTICO	89
FIGURA 42- VISTA DO TUBO QUE ROMPEU (LINHA DE LCO 12").....	93
FIGURA 43- TERMOGRAMA EM MANCAL DE UMA MÁQUINA DE FLUXO	96

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1- CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIAS PRIMÁRIAS	20
GRÁFICO 2- PROJEÇÕES DE LONGO PRAZO DE DEMANDA POR PETRÓLEO.....	24
GRÁFICO 3- EVOLUÇÃO DAS RESERVAS PROVADAS DE PETRÓLEO NO BRASIL	26
GRÁFICO 4- EVOLUÇÃO DAS RESERVAS PROVADAS DE GÁS NATURAL NO BRASIL	27
GRÁFICO 5- MATURIDADE DA MANUTENÇÃO PREDITIVA	32
GRÁFICO 6- PERFIL DO DUTO E GRADIENTE HIDRÁULICO EM REGIME PERMANENTE	44
GRÁFICO 7- PERFIL DO DUTO E GRADIENTE HIDRÁULICO EM REGIME ESTÁTICO	44
GRÁFICO 8- <i>SET</i> DE PRESSÃO NO RECEBIMENTO PARA MANTER A COLUNA CHEIA DO OLEODUTO EM REGIME PERMANENTE	46
GRÁFICO 9- <i>SET</i> DE PRESSÃO NO RECEBIMENTO PARA MANTER A COLUNA CHEIA DO OLEODUTO EM REGIME ESTÁTICO	46
GRÁFICO 10- SÉRIE GALVÂNICA	53
GRÁFICO 11- PLANO DE IMPEDÂNCIA MOSTRANDO INDICAÇÕES OBSERVADAS EM MATERIAIS MAGNÉTICOS E NÃO MAGNÉTICOS	70
GRÁFICO 12- REPRESENTAÇÃO DE A, B E C	74
GRÁFICO 13- GRÁFICO DE PRESSURIZAÇÃO (PRESSÃO X TEMPO).....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Δt	Variação de Tempo (s)
$1/\sigma$	<i>Resistividade Elétrica</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil
API	<i>American Petroleum Institute</i> (Instituto Americano de Petróleo)
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros Mecânicos dos Estados Unidos)
BP	<i>British Petroleum</i>
BPD	Barris por Dia
CEITEC	Centro Nacional de Tecnologia Eletrônica Avançada
CO₂	Gás Carbonico
Cr	Cromo
dØB	Taxa de Variação da Densidade de Fluxo Magnético Induzido
DN	Diâmetro Nominal
DP	<i>Design Pressure</i> (Pressão de Projeto)
END	Ensaio Não Destrutivo
GLP	Gás Liquefeito do Petróleo
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
KPIs	<i>Key Performance Indicators</i> (Indicadores-chave de Desempenho)
LCO	Linha de Continuidade
LP	Líquido Penetrante
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MFL	<i>Magnetic Flux Leakage</i> (Fuga de Fluxo Magnético)
Mo	Molibdênio
MOP	<i>Maximum Operating Pressure</i> (Pressão Máxima de Operação)
MSS	<i>Manufactures Standardization Society</i> (Sociedade de Padronização de Fabricantes)
NBR	Normas Brasileiras

Ni-Cr-Mo Níquel-Cromo-Molibdênio

O&G *Oil and Gas*

OPEC *Organization of the Petroleum Exporting Countries*

OPEP Organização dos Países Exportadores de Petróleo

P&G Petróleo e Gás Natural

PIB Produto Interno Bruto

PIG *Pipeline Inspection Gauge* (Medidor de Inspeção de Dutos)

PMOA Pressão Máxima de Operação Admissível

PMTA Pressão Máxima de Trabalho Admissível

PTH Pressão de Teste Hidrostático

SMYS *Specified Minimum Yield Strength* (Rendimento Mínimo Especificado)

TH Teste Hidrostático

TP *Test Pressure* (Pressão de Teste)

UPGNs Uídades de Processamento de Gás Natural

VRF Volume Final Recuperável

ΔH Variação de Gradiente Hidráulico

ε Força Eletromotriz (em volts)

λ Comprimento de Onda

σ Condutividade Elétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. OBJETIVOS GERAIS.....	15
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.2. DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	16
1.3. RELEVÂNCIA DO ESTUDO	16
1.4. ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO	16
2. METODOLOGIA.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. A INDÚSTRIA DE GÁS E ÓLEO.....	19
3.1.1. MERCADO INTERNACIONAL	20
3.1.2. MERCADO NACIONAL	25
3.2. MANUTENÇÃO	28
3.2.1. DEFINIÇÕES DE MANUTENÇÃO.....	28
3.2.2. DESENVOLVIMENTO DA MANUTENÇÃO.....	31
3.2.3. TIPOS DE MANUTENÇÃO.....	34
3.2.4. GERENCIAMENTO INDEVIDO DOS PROCESSOS MANUTENTIVOS.....	40
3.3. INFRAESTRUTURA DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO	42
3.4. CORROSÃO.....	49
3.4.1. CORROSÃO ATMOSFÉRICA.....	50
3.4.2. CORROSÃO GALVÂNICA.....	52
3.4.3. CORROSÃO POR FRESTA	54
3.4.4. CORROSÃO POR EROÇÃO	57
3.4.5. CORROSÃO POR FADIGA.....	58
3.5. TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS DA MANUTENÇÃO	59
3.5.1. METODOLOGIAS PREDITIVAS	60
3.5.2. MANUTENÇÃO CORRETIVA.....	96
4. DISCUSSÃO.....	99
5. CONCLUSÃO.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

1. INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo e gás, assume responsabilidade de destaque na matriz energética do Brasil e do mundo. Evidentemente a notoriedade do setor, causa influências significativas na infraestrutura econômica, tecnológica e comercial de todo o globo. Devido a estas, torna-se imprescindível o excelente e contínuo funcionamento de equipamentos e instalações do referido setor.

A disponibilidade e produtividade, quase que ininterruptas, evidenciam o papel chave da manutenção.

Seu conceito estrutural, de forma simplificada, planejamento, gestão e execução, permite regência otimizada do parque de equipamentos, no complexo produtivo das usinas de refino. A que este trabalho se refere com mais veemência, chamamos de quarta geração, implementada após os anos 2000, com escopo de mitigar a intervenção na planta ao nível que seu conceito preditivo monitore e controle os equipamentos, por meio de inspeções sistemáticas seguidas de diagnósticos com alto grau de confiabilidade, evitando interferência de manutenções corretivas não planejadas, que passa a ser um indicador de ineficácia da manutenção como um todo.

As ferramentas de diagnóstico, como sensores acelerômetros, transdutores de vibração, termografia infravermelha e análises visuais avançadas possibilitam maneiras variadas de diagnóstico de possíveis erros nas linhas de distribuição.

Diante disto, cabe a engenharia de manutenção, a responsabilidade de garantir a continuidade do fluxo nas usinas, minimizando intervenções e paragens de máquinas e perdas de produção e lucro.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo em referência a obras bibliográficas, realizado a partir de artigos científicos, livros e revistas, a fim de demonstrar a excelência na manutenção preditiva e corretiva em linhas de distribuição de dutos petrolíferos e gás natural em usinas de refino.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo específico deste trabalho é evidenciar o papel chave da manutenção preditiva e corretiva nas usinas de refino de petróleo e gás, trazendo uma visão ampla sobre indústria nacional e internacional do petróleo, bem como suas perspectivas futuras. Os perigos de negligenciar processos corrosivos, e as ferramentas utilizadas no controle do referido fenômeno para garantia e certificação da longevidade de máquinas e processos, a fim de manter escopos de processos bem definidos e planejados.

1.2. DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Este trabalho é delimitado ao setor energético do petróleo e gás natural, com ênfase nas definições de manutenção, bem como suas ferramentas e técnicas para diagnóstico de implementação da mesma em caráter preditivo e corretivo, direcionado para parques industriais de usinas de refino.

1.3. RELEVÂNCIA DO ESTUDO

O estudo da manutenção preditiva é crucial para prever e evitar falhas em linhas de distribuição de petróleo e gás, reduzindo custos e prolongando a vida útil dos equipamentos. A manutenção corretiva é essencial para lidar com emergências e garantir intervenções imediatas em casos de falhas inesperadas, minimizando o tempo de inatividade e impactos negativos nas operações. A integração de ambas as abordagens forma uma estratégia abrangente para otimizar a confiabilidade e eficiência operacional nas refinarias.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO

Esse estudo está estruturado em cinco capítulos:

No primeiro capítulo apresenta-se a Introdução, contendo Objetivos Gerais, Objetivos Específicos, Delimitação do Estudo, Relevância do Estudo e Organização do Estudo.

No segundo capítulo, evidencia-se a Metodologia implementada com fins de desenvolvimento deste trabalho.

No terceiro capítulo, tem-se a Revisão Bibliográfica, onde é retratado a indústria nacional e internacional do petróleo, definições, desenvolvimento da manutenção como função estratégica para o devido fluxo do referido setor, bem como a infraestrutura das linhas de

distribuição além das ferramentas e tecnologias envolvidas para obtenção de dados confiáveis para execução dos planos de manutenção.

No quarto e quinto capítulo, apresentam-se a discussão e a conclusão, respectivamente, e por fim, as referências bibliográficas.

2. METODOLOGIA

Esse estudo tem por objetivo descrever, por meio da revisão de obras bibliográficas e utilizando como base publicações em revistas nacionais e internacionais, a excelência na manutenção preditiva e corretiva em linhas de distribuição de dutos petrolíferos e gás natural, mais especificamente em usinas de refino.

Na elaboração deste trabalho foram consultadas várias literaturas relativas ao assunto em estudo, artigos publicados na internet e que possibilitaram que este trabalho tomasse forma para ser fundamentado.

Segundo Marconi e Lakatos (1992), a pesquisa bibliográfica é o levantamento de toda a bibliografia já publicada, em forma de livros, revistas, publicações avulsas e imprensa escrita. A sua finalidade é de fazer com que o pesquisador entre em contato direto com todo o material escrito sobre um determinado assunto, auxiliando o cientista na análise de suas pesquisas ou na manipulação de suas informações. Ela pode ser considerada como o primeiro passo de toda a pesquisa científica.

Entende-se por pesquisa bibliográfica o ato de arquivar, ler, referenciar, fazer resumo com assuntos relacionados com a pesquisa em questão. Esse tipo de pesquisa tem por finalidade investigar as diferentes contribuições científicas sobre determinado tema, de forma que o pesquisador possa utiliza-la para confirmar, confrontar ou enriquecer suas proposições.

Devido a alta qualidade existente em seus produtos e processos, aliada à característica de ter que operar em jornadas intensivas, de 24x7 (24h por dia, durante sete dias por semana), os parques industriais de refinarias necessitam de programas de manutenção preditiva e corretiva altamente eficazes e eficientes, praticamente sem margens para erros.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A INDÚSTRIA DE GÁS E ÓLEO

A categoria da indústria de petróleo e gás natural é caracterizada como aquela que engloba toda a estrutura essencial para a geração, captação, tratamento ou refino, e distribuição de gás natural e derivadas de petróleo para o mercado. Em outras palavras, abrange desde a origem do poço (ou fonte de petróleo e gás natural) até o local de comercialização destinado ao consumidor final (IPCC, 2016).

O MCTI do Brasil, por meio do Departamento de Energia e Recursos Naturais, coordena as atividades da indústria de petróleo e gás natural em três segmentos distintos. A fase inicial engloba a produção de petróleo e gás natural, que consiste na remoção de recursos de formações subterrâneas, utilizando poços tanto em ambientes onshore quanto offshore. No contexto brasileiro, é comum a extração simultânea desses recursos de uma mesma formação geológica, seguida pelo processo de separação.

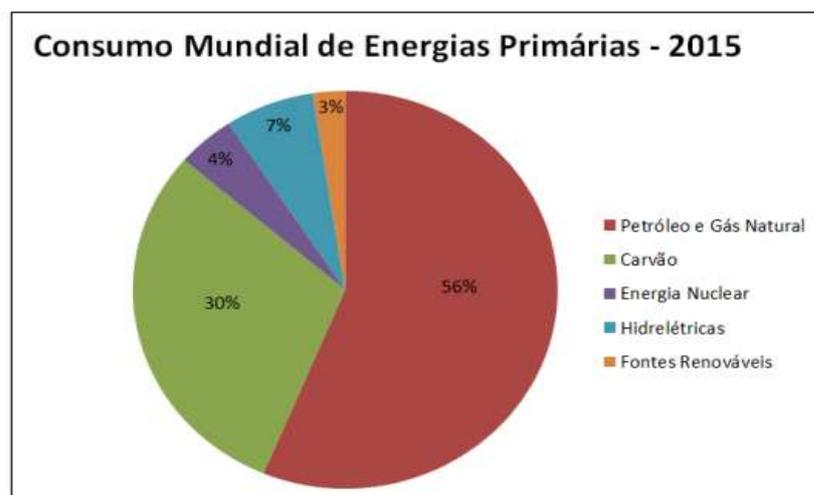
As etapas subsequentes compreendem o refino de petróleo e o processamento de gás natural. As refinarias desempenham um papel crucial na divisão do petróleo em produtos energéticos, como gasolina, diesel e querosene, além de produtos não energéticos. O gás natural, após passar pelo tratamento primário durante a produção, é transportado para UPGNs por meio de gasodutos. Nessas unidades, o gás é separado da fase líquida, desidratado, resfriado e dividido em produtos específicos para distribuição ao consumidor final (MCTI, 2015).

A terceira categoria abrange o transporte de petróleo e gás natural, compreendendo a distribuição desses recursos das instalações de produção até as refinarias e UPGNs, assim como o transporte dos produtos refinados até os terminais de distribuição. No cenário brasileiro, o petróleo é frequentemente transportado por navios e dutos até as refinarias, enquanto o gás natural é predominantemente movido por gasodutos de alta pressão, que podem ser subaquáticos, terrestres ou de superfície. O transporte ocorre em fase gasosa, com estações de precisão ao longo do percurso do gasoduto. A entrada na rede de distribuição acontece em postos de gasolina, onde a pressão é reduzida para possibilitar a distribuição nas cidades. Ainda segundo o MCTI, essas operações são integradas para garantir a segurança adequada e eficiente na indústria do petróleo e gás natural.

3.1.1. MERCADO INTERNACIONAL

O petróleo e o gás natural representam as principais fontes de energia utilizadas globalmente nas sociedades contemporâneas. Aproximadamente 56% da demanda total de energia primária em todo o mundo é atendida pela exploração de petróleo e gás. Esse dado evidencia a significância desses recursos para a economia global, revelando-se indispensáveis para a continuidade da humanidade, conforme o Gráfico 1 a seguir. Contudo é importante ressaltar que tais recursos são finitos e não renováveis, conferindo-lhes um valor substancial, especialmente pela ausência, até o momento, de uma alternativa energética capaz de substituí-los integralmente no cenário atual. O diagrama evidencia a demanda mundial, predominantemente vinculada ao petróleo e ao gás natural. Logo após, o carvão também exibe uma relevância específica. As demais fontes foram desenvolvidas de forma conjunta com 14% do consumo, mantendo uma representação modesta no contexto global (BP, 2015).

Gráfico 1- Consumo Mundial de Energias Primárias



Fonte: BP (2015)

A projeção indica que os recursos fósseis manterão uma presença ainda mais notável, mesmo diante do aumento da participação dos recursos renováveis. Isso deve à previsão de um acréscimo superior a trinta por cento na demanda global por energia primária entre os anos de 2010 e 2035 (IEA, 2012).

Os produtos gerados pela indústria do petróleo representam insumos de elevada complexidade para a estrutura produtiva de qualquer nação, sendo elementos essenciais para os padrões de produção e consumo observados em nossa sociedade. O petróleo e suas

peculiaridades derivadas permeiam a rotina das comunidades contemporâneas, destacando-se, primordialmente, pela sua aplicação como combustível em motores de combustão interna, exemplificados pela gasolina e pelo diesel, empregados em veículos destinados aos serviços de transporte, como mostrado na Tabela 1 a seguir (Canelas, 2007).

Tabela 1- Principais derivados do petróleo e suas utilizações

Tipo	Derivado	Principal Uso
Combustíveis	Gasolina	Combustível automotivo
	Óleo diesel	
	Óleo combustível	Industrial, naval, geração de eletricidade
	Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	Cocção
	Querosene de Aviação	Combustível aeronáutico
	Querosene Iluminante	Iluminação
Insumos Petroquímicos	Nafta	Matéria prima da indústria petroquímica
	Propeno (de refinaria)	Matéria prima do polipropileno (para fabricação de plásticos) e acrilatos (usado em tintas)
Outros	Óleos Lubrificantes	Lubrificação de máquinas e motores
	Parafina	Velas, indústria alimentícia
	Asfalto	Pavimentação

Fonte: Cardoso (2005)

Através da análise do quadro anterior, é observável a enumeração dos principais subprodutos derivados do petróleo, juntamente com as suas respectivas aplicações, ressaltando a relevância destes elementos para o consumidor e para a economia global. No âmbito dos setores que demandam insumos petroquímicos, destaca-se, de maneira proeminente, a indústria de transformação de polímeros, que emprega materiais primários fornecidos pela petroquímica para a produção de embalagens, componentes automotivos, brinquedos, eletrodomésticos, peças eletrônicas, calçados e materiais para construção (Santos, 2008).

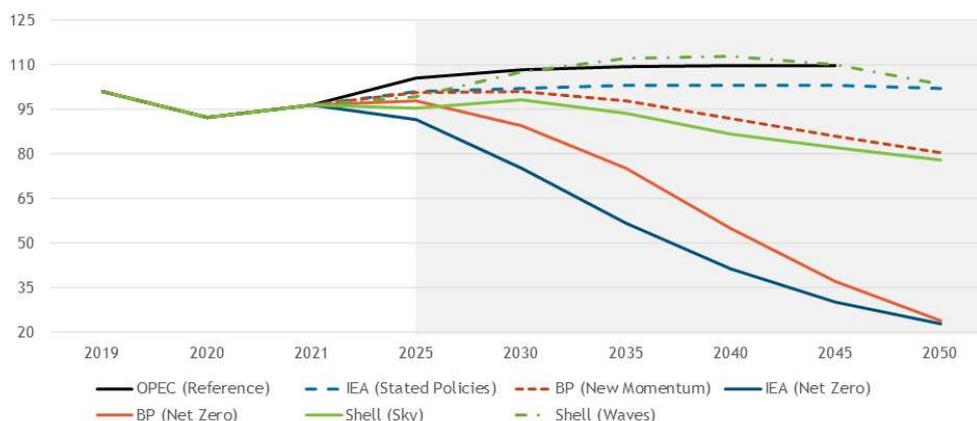
A indústria petrolífera atualmente apresenta dois desafios consideráveis em relação ao seu desenvolvimento futuro, tanto em um horizonte de curto quanto médio prazo: a necessidade de substituição das reservas petrolíferas e a abordagem ao ponto máximo de produção. Estes elementos exercem uma influência direta sobre o preço do barril, ocasionando efeitos de relevância na determinação dos níveis de atividade, investimentos e exportações de nações produtoras de grande porte. Isso se aplica especialmente a países especializados principalmente

na produção deste recurso, como é o caso da Arábia Saudita e da Venezuela, dentre outros (Canelas, 2007).

No comércio internacional de petróleo e gás natural, destaca-se uma configuração notável de discrepância histórica. Os países consumidores, em sua maioria, caracterizam-se por serem ricos e desenvolvidos, apresentando escassez de petróleo no subsolo ou com consumo muito superior à sua produção, com relativa estabilidade geoeconômica. Do outro lado, encontram-se os países produtores, na sua maioria pobres, periféricos e em desenvolvimento, enfrentando graves problemas de instabilidade social e geoeconômica (Souza, 2006).

O substancial fluxo de exportações de nações africanas, descrito por economias em estágio subdesenvolvido e abundância de recursos petrolíferos, para grandes potências como os Estados Unidos e países europeus, os quais, por sua vez, são consideravelmente mais prósperos e possuem reservas de petróleo significativamente inferiores em seus subsolos, ou até mesmo carecem de depósitos deste recurso. O petróleo, portanto, emerge como um componente vital para o sistema econômico internacional contemporâneo e para as dinâmicas das relações internacionais em si, como pode-se observar na Figura 1 a seguir. Este se consolidou como um instrumento crucial de poder, tanto econômico quanto diplomático, para diversos agentes econômicos, notadamente empresas multinacionais e Estados produtores de petróleo. Esses atores buscam o domínio desse recurso essencial por meio de estratégias organizacionais no mercado e na esfera política internacional, além de maximizar a influência por meio do controle na produção e comercialização de petróleo (Marmelo, 2009).

Gráfico 2- Projeções de Longo Prazo de Demanda por Petróleo



Fonte: IBP (2023)

Quatro cenários assumem a continuidade das políticas já existentes ou anunciadas: *New Momentum*, da BP, *Waves*, da Shell, ambos com projeção até 2050; *Reference*, da OPEP, até 2045; e *Stated Policies*, da IEA, também até 2050. O modelo denominado “*New Momentum*” foi concebido pela BP (2023) com o propósito de embarcar na trajetória abrangente que o sistema global de energia está atualmente trilhando. Destaca-se nesse modelo o notório aumento na ambição global para a descarbonização nos últimos anos, bem como a maneira e velocidade com que a descarbonização tem ocorrido no passado recente. No cenário “*New Momentum*”, as emissões de CO_{2e} (equivalentes de dióxido de carbono) atingem seu ápice na década de 2020 e, até 2050, registram uma redução de aproximadamente 30% em relação aos níveis de 2019 (IBP, 2023).

O contexto denominado “*Sky 2050*” adota uma perspectiva normativa ao estabelecer uma trajetória a partir de qual o panorama global poderia alcançar dois objetivos primordiais: a consecução de emissões líquidas zero até 2050 e a contenção do aquecimento global a 1,5°C até o termo. do século (IBP, 2023).

O cenário denominado de “*Reference*” da OPEP, representa um modelo de para projeção e análise das tendências prospectivas da indústria petrolífera. Este cenário fundamenta-se em premissas específicas concernentes a variáveis-chave, tais como o crescimento econômico global, políticas energéticas, avanços tecnológicos e padrões de consumo energético, fornecendo uma perspectiva abrangente das expectativas de demanda e oferta de petróleo, produção, preços e outros aspectos pertinentes ao mercado global de energia (IBP, 2023).

O contexto denominado de “*Stated Policies*” oferece uma perspectiva cautelosa sobre o futuro, sem presumir que os governos atingirão todos os objetivos de redução de gases de efeito

estufa anunciados. Em vez disso, adota uma abordagem mais detalhada, analisando setor por setor o que foi efetivamente implementado para alcançar tais metas e outras relacionadas à energia. Consideremos não apenas as políticas e medidas já em vigor, mas também aquelas em fase de desenvolvimento. Esse cenário explora as possibilidades que o sistema de energia poderia seguir sem uma intervenção significativa adicional por parte de políticas (IBP, 2023).

O cenário de *Net Zero* da *IEA* até 2050 é um cenário normativo que mostra um caminho para o setor de energia alcançar emissões líquidas zero de CO₂ até 2050, com as economias avançadas alcançando emissões líquidas zero antecipadamente em relação às demais (IBP, 2023).

O conceito "*Net Zero*" da *BP* investiga a possibilidade de transformações em diversos componentes do sistema de energia para viabilizar uma redução significativa nas emissões de carbono. Examinar quais aspectos do sistema energético podem exigir alterações, caso haja uma ação coletiva global afeta a redução de aproximadamente 75% das emissões de dióxido de carbono até 2050, em comparação aos níveis de 2019 (IBP, 2023).

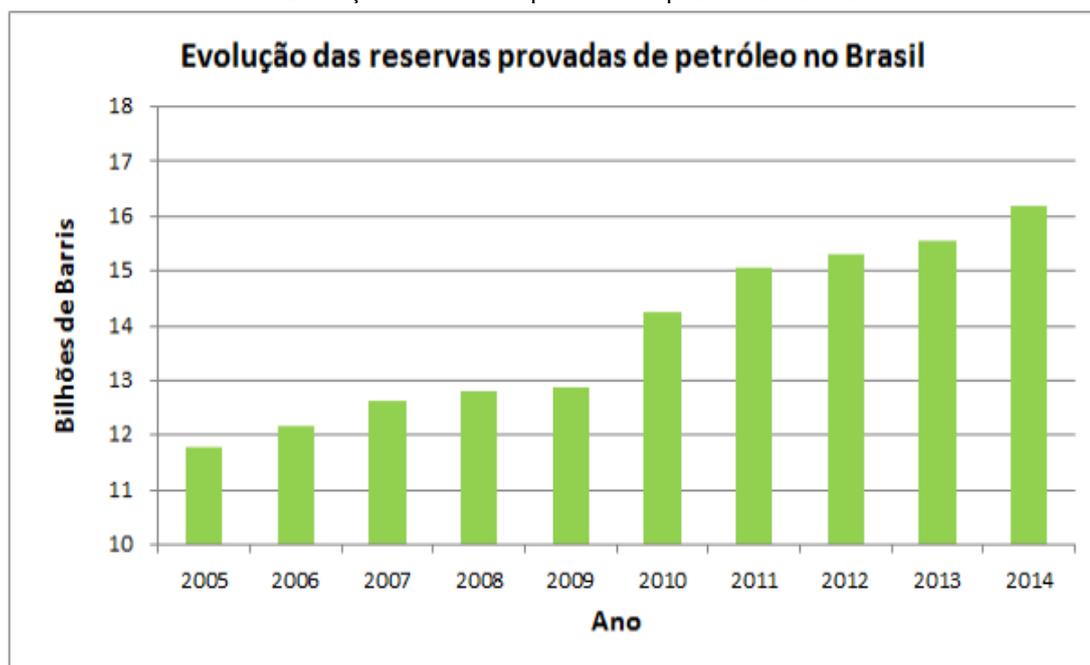
A maioria dos cenários mostra um ponto de inflexão no quinquênio 2025-2030 e as linhas cheias projetam uma queda mais acentuada da demanda, considerando o cumprimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris em 2015 (IBP, 2023).

3.1.2. MERCADO NACIONAL

Conforme relato da ANP (2013), até o ano de 2007, o Brasil possuía uma presença modesta no cenário global de petróleo e gás, com uma produção e consumo aproximados de 1,75 milhão de BPD, importação de 437 mil BPD e exportação de 421 mil BPD. Entretanto, no final desse mesmo ano, surgiu a descoberta da nova província petrolífera do pré-sal, revelando um VRF estimado entre cinco a oito bilhões de barris de petróleo. Esta constitui a segunda maior revelação de reservas de petróleo e gás nas últimas três décadas, conforme o Gráfico 3 a seguir, sendo superada apenas pelo campo *Kashagan*, no Cazaquistão, com um potencial de 15 bilhões de barris (Bicalho, 2009).

A identificação das reservas do pré-sal provocou uma alteração substancial na posição do Brasil no contexto global do mercado petrolífero, conferindo-lhe o estatuto de um dos principais candidatos a exportadores de petróleo a nível mundial (Ohara, 2014).

Gráfico 3– Evolução das reservas provadas de petróleo no Brasil

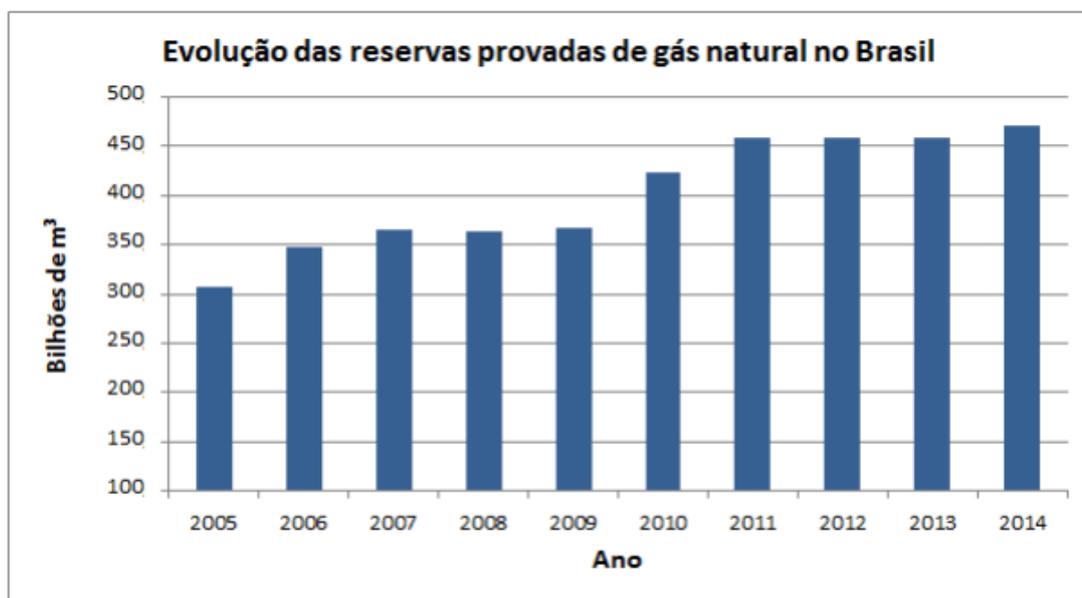


Fonte: ANP (2015)

O incremento na produção e nas exportações de petróleo pode consolidar a posição do Brasil como uma potência econômica relevante. Tal manifestação resultará no reconhecimento por parte de outras nações, que passarão a identificá-lo como um interveniente significativo na geopolítica do comércio de petróleo e seus compromissos, contribuindo, assim, para a sua proeminência no cenário do setor energético global (Coelho, 2015).

Com o intuito de fomentar o crescimento do P&G e atender à crescente demanda interna por produtos derivados, prevê-se que os investimentos nesse setor alcancem aproximadamente R\$ 509 bilhões no período compreendido entre 2015 e 2018. Destaca-se este segmento da economia nacional será o principal beneficiário desses transportes ao longo desse intervalo temporal. O segmento brasileiro de petróleo e gás atravessa um período singular, de aumento de suas reservas nas últimas décadas, este aumento é expresso no Gráfico 4 a seguir. Ao longo do tempo, verifica-se um acréscimo em seu peso relativo e em sua relevância para a economia (Mendes e Teixeira, 2014).

Gráfico 4– Evolução das reservas provadas de gás natural no Brasil



Fonte: ANP (2015)

“[...] o caráter inovador da descoberta em uma área considerada fronteira exploratória, porém, exige um imenso esforço de inovação tecnológica. Contudo, o desafio da superação tecnológica deve ser acompanhado de um desafio igual a nível institucional e regulatório.” (IPEA, 2010).

Grandes empresas globais, concorrentes como operadoras, fornecedoras e integradas no setor de exploração e produção de petróleo e gás em águas profundas e ultra profundas, desempenham um papel crucial no cenário brasileiro. Estas organizações destacam-se pela sua substancial capacidade de investimento, gestão financeira eficaz, presença internacional e robustos apoios em iniciativas de investigação e desenvolvimento. Nesse contexto, a exploração e produção nessas áreas, caracterizadas por elevada complexidade e ambientes desafiadores, requerem investimentos contínuos em atividades de pesquisa e desenvolvimento. O objetivo é aprimorar ou introduzir no mercado novos equipamentos, impulsionando a inovação para enfrentar os desafios específicos associados a tais operações (IPEA, 2010).

Embora exista um equilíbrio relativo entre o volume de produção e consumo nas refinarias, o Brasil exporta um percentual produtivo. E para fins de ajuste de carga em seus parques de refino, importa uma porcentagem de um outro petróleo, não produzido por ele mesmo. (ANP, 2013).

Segundo a *IEA*, O aumento previsto na produção de petróleo no Brasil até 2035, estimando mais que dobrar a produção atual para atingir seis milhões de BPD, aponta para

perspectivas futuras significativas. Estes dados indicam a existência provável de excedentes petrolíferos nos próximos anos, representando um impulso substancial para o setor nacional de *O&G*. A expansão da capacidade instalada e o conseqüente crescimento na produção e nos excedentes petrolíferos estão intimamente ligados à capacidade da indústria em fornecer os equipamentos e a mão de obra necessária (Ohara, 2014).

3.2. MANUTENÇÃO

3.2.1. DEFINIÇÕES DE MANUTENÇÃO

Manutenção é uma palavra derivada do latim *manus tenere*, que significa manter o que se tem (Viana, 2002).

Para Simei (2012), "Manutenção pode ser definida como um conjunto de tratativas e ações técnicas, intervencionistas, indispensáveis ao funcionamento regular e permanente das máquinas, equipamentos, ferramentas e instalações. Esses cuidados envolvem a conservação, a adequação, a restauração, a substituição e a prevenção".

A performance e desempenho das empresas está revestida de desafios nos panoramas atuais. A competitividade, que não para de seguir numa crescente, torna o contínuo aperfeiçoamento, uma exigência frente a necessidade de se adaptar a gestão ou mesmo a produção e utilização de menos recursos, logo, reduzindo custos e produzindo mais, garantindo ainda que a qualidade e eficiência dos processos sejam mantidas. O possível aumento de produtividade unido a redução de custos é bastante intenso nas áreas de manutenção. A manutenção "é hoje uma função estratégica no ambiente industrial, quando sendo uma atividade bem elaborada garante a disponibilidade e produtividade dos equipamentos e instalações". A manutenção possui contribuição direta na excelência operacional e tem relação se devidamente aplicada a visão estratégica (Queiroz, 2015).

A importância da manutenção tem sido muito notada/percebida pelas organizações. Ela, afinal, assegura que instalações, equipamentos e processos estejam disponíveis e desempenhem corretamente suas funções. Elaborar um plano de manutenção é fundamental diante de todas essas questões, considerando que seja capaz, inclusive, de gerenciar adequadamente todas as variáveis envolvidas. A programação/planejamento de manutenção tem por objetivo proporcionar maior confiabilidade, sustentação e conseqüentemente disponibilidade ao equipamento (Fabro, 2003).

Produção e manutenção devem estar alinhadas quanto a seus objetivos e políticas, para que seja possível a otimização dos resultados obtidos. O planejamento estratégico deve contemplar em seu contexto, os planos de manutenção e o processo de gestão que devem ser revistos sempre sob a ótica de readequação para o atendimento as flexibilidades do processo produtivo (Fabro, 2003).

Um bom controle é tão necessário quanto um bom planejamento pois estão adequados a necessidade de medir a qualidade da manutenção e manter o processo constantemente aperfeiçoado conforme as ferramentas utilizadas pela qualidade. A qualidade e suas ferramentas, possuem os objetivos de tornar possível a visualização e compreensão do problema, sintetizar conclusões e conhecimento, habilitar a criatividade, tornar o processo conhecido e oferecer elementos que permitam medições do processo (Oliveira, 1995).

A relação entre a satisfação do cliente e o bom desempenho da empresa só é possível quando os princípios se pautam a uma gestão voltada para a qualidade. A qualidade envolve fazer e superar expectativas dos clientes sob bens e serviços oferecidos (Heizer e Render, 2008).

A qualidade se transformou na mais importante arma para competir e está muito além de garantir a qualidade do serviço ou produto ofertado, sendo capaz de gerenciar processos da empresa em prol da satisfação de seus clientes (Oakland, 1994).

Garantir a qualidade é uma função que a empresa deve assumir de modo que estejam asseguradas, as condições das atividades conforme os requisitos estabelecidos (Campos, 1992).

As metas empresariais, inclusive a qualidade dos produtos e serviços, a manutenção deve: fazer a coordenação dos diversos subsistemas fornecedores, tais como a engenharia e o suprimento de materiais, entre outros, de modo que o cliente interno principal, que é a operação, tenha a instalação de acordo com as necessidades da organização para atingir suas metas empresariais, entre elas a qualidade dos produtos e serviços (Kardec e Nascif, 2001).

Os objetivos próprios de uma gerência de manutenção moderna são: maximizar a produção com menor custo e a mais alta qualidade sem infringir normas de segurança e causar danos ao meio ambiente (Mirshawka e Olmedo, 1993).

A indústria do Petróleo, setor de destaque na economia mundial, vê a importância significativa da manutenção em seu contexto. Se considerado que no setor petroquímico as demandas de produção são contínuas, a manutenção tem um papel chave (Fabro, 2023).

Há um grande esforço da indústria petrolífera para melhorar o planejamento, gestão e execução das atividades de manutenção. O setor petroquímico vem buscando melhorar seus processos de manutenção. Tem a característica de ser intensivo em capital, estando a sua competitividade diretamente associada a economias de escala (Pasa e Rodrigues, 2009).

O objetivo é garantir a disponibilidade e conservação dos equipamentos, proporcionando continuidade do processo. As intervenções devem ser minimizadas e preferencialmente planejadas, evitando custos desnecessários com pessoal, paragens de máquinas e perdas de produção. Na indústria do petróleo, o descomissionamento de unidades de processo, devido a paradas programadas para manutenção, impacta negativamente o resultado econômico do negócio. Portanto, é importante que estas paragens sejam realizadas no menor tempo possível e que a duração da intervenção ocorra conforme previsto no seu planejamento (Moreira, 2008).

Num cenário competitivo, as empresas procuram continuamente aumentar o tempo de campanha entre paragens de manutenção e reduzir tempos de inatividade e custos. Para atingir esses objetivos, há uma evolução contínua de técnicas e melhores práticas que são aplicadas no processo de planejamento e gerenciamento de paradas (Vendrame, 2005).

No entanto, muitas indústrias ainda não praticam estas premissas de forma adequada. Muitas vezes possuem planejamento satisfatório, porém a gestão e execução não são realizadas de forma eficaz, resultando em resultados insatisfatórios. A falta de envolvimento de toda a organização, conhecimento, liderança e controle rotineiro dos resultados de eficiência são exemplos que contribuem para o fracasso do plano. Melhorar um plano de manutenção existente através da utilização de ferramentas da qualidade representa um grande desafio e um esforço significativo na busca de resultados que possam otimizar o processo, proporcionando aumento de competitividade e melhorando o desempenho da organização (Moraes, 2004).

O desempenho correto de equipamentos e/ou produtos é impactado progressivamente por um processo de desgaste. Esse importante, se não gerenciado especificamente, compromete a funcionalidade do dispositivo. Evitar esse desgaste implica a implementação de ações específicas, pois tais desgastes exercem uma influência negativa específica sobre diversos aspectos, incluindo desempenho, qualidade, segurança, poluição e produtividade. A manutenção é uma prática essencial, fundamentada na necessidade de fornecer serviços de reparo de alta qualidade. Esses serviços visam mitigar as consequências do desgaste, garantindo a eficácia contínua dos equipamentos e produtos (Branco Filho, 2008).

A responsabilidade atribuída à manutenção é garantir a capacidade operacional do equipamento, garantindo um estado superior, conforme previamente especificado, de equipamentos e instalações. Anteriormente, a missão de manutenção limitava-se a restabelecer as condições originais dos equipamentos/sistemas, sendo que muitas empresas ainda estão nessa situação. A missão atual da manutenção visa "garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações", com o objetivo de atender a um processo de produção ou serviço

de forma confiável, segura, ambientalmente sustentável e com custo adequado (Kardec e Nascif, 2013).

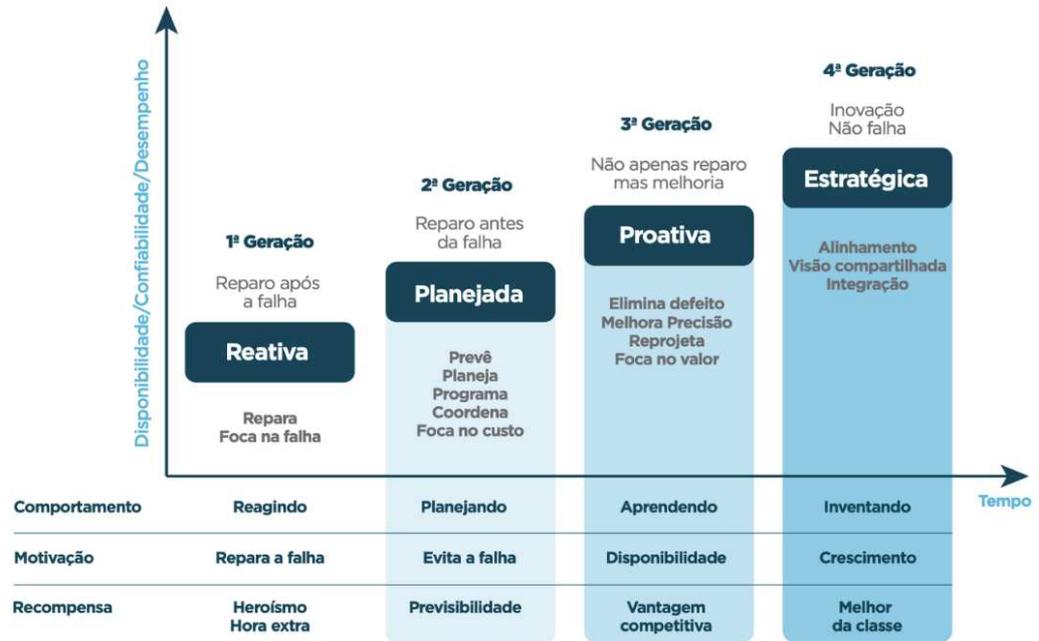
Em organizações bem-sucedidas, os profissionais responsáveis pela manutenção foram prontidão em se adaptar às transformações do setor. Essa postura inovadora engloba uma consciência crescente sobre o impacto das falhas nos equipamentos na segurança e no meio ambiente. Além disso, há uma maior compreensão da interligação entre atividades de manutenção e a qualidade do produto, intensificada pressão para atingir elevada disponibilidade e confiabilidade das instalações, simultaneamente à busca por redução de custos. Tais alterações exigiram novas posturas e competências por parte da equipe de manutenção, abrangendo desde gestores e engenheiros até supervisores e trabalhadores (Kardec e Nascif, 2009).

3.2.2. DESENVOLVIMENTO DA MANUTENÇÃO

Ao longo dos anos, a atividade de manutenção passou por transformações significativas, influenciadas por diversos fatores. Entre eles, destacam-se o avanço da tecnologia e automação, a ampliação da variedade de componentes/equipamentos que as organizações buscam preservar, a crescente demanda dos clientes por elevada qualidade do produto e uma maior conscientização sobre a inter-relação entre qualidade e atividades de manutenção (Silva et al., 2015).

Na literatura observa-se que a manutenção foi evoluindo, possuindo características particulares em certos períodos, ilustrados no Gráfico 5 a seguir. Segundo Kardec e Nascif (2009), a evolução da manutenção pode ser dividida em quatro gerações:

Gráfico 5- Maturidade da Manutenção Preditiva



Fonte: LEDET (2008)

Geração I: Refere-se ao período que antecede a Segunda Guerra Mundial, caracterizada por uma indústria simples, superdimensionada, com pouca ênfase na produtividade e baixo nível de mecanização. Nessa fase, as atividades de manutenção eram restritas aos serviços básicos, como limpeza, lubrificação e reparos após falhas, ou seja, manutenções corretivas não planejadas.

Uma combinação de, entre outras, práticas de gestão, finanças e engenharia aplicadas a ativos físicos para reduzir custos ao longo do ciclo de vida econômico; trata da especificação e projeto visando a confiabilidade e manutenibilidade de plantas industriais, equipamentos, edifícios e estruturas, levando em consideração sua instalação, comissionamento, manutenção, modificação e substituição, e o retorno de informações sobre projeto, desempenho e custos (Corder, 1976).

Geração II: Desenvolvida entre as décadas de 1950 e 1970, após a Segunda Guerra Mundial, essa fase foi influenciada pelas demandas geradas durante o período de guerra, que passaram a buscar por diversos tipos de produtos. Como resultado, observou-se um aumento na mecanização e na complexidade das instalações industriais. A necessidade crescente de confiabilidade, disponibilidade e, conseqüentemente, maior produtividade começou a se manifestar. Esse contexto levou à concepção de que as falhas nos equipamentos poderiam e deveriam ser evitadas, dando origem ao conceito de manutenção preventiva.

A manutenção é a função empresarial a quem compete o controle constante das instalações, bem como o conjunto de obras de reparação e revisão necessárias para garantir o regular funcionamento e o bom estado de conservação das instalações produtivas, serviços e instrumentação das empresas (Baldin, 1982).

Geração III: Após a década de 1970, observou-se um acelerado processo de transformação na indústria, intensificando a preocupação generalizada com o tempo de inatividade das máquinas. Este cenário foi associado à redução na produção e ao aumento dos custos. À medida que as falhas tiveram consequências ambientais e de segurança mais graves, os padrões e requisitos nessas áreas devem ser elevados rapidamente. A não conformidade com tais padrões resultou na impossibilidade de operação das instalações. Com o avanço da inovação, tecnologia da informação e mecanização, a confiabilidade e disponibilidade oferecem fatores cruciais em diversos setores. Foi nesse contexto que o conceito e a implementação da manutenção preditiva ganharam maior ênfase.

A função manutenção é definida como uma função estratégica que busca a maior disponibilidade e confiabilidade das instalações através da diminuição de quebras e falhas nos equipamentos e sistemas, otimizando o uso dos recursos disponíveis. O objetivo básico da manutenção é garantir a continuidade operacional da planta, maximizando a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos e das instalações industriais, ao menor custo possível e preservando a integridade do homem e do meio ambiente. Esta definição genérica tem sido detalhada segundo diferentes enfoques, conforme se trate de uma abordagem mais centrada na questão técnica, gerencial ou econômica da manutenção (Cavalcante, 1998).

Geração IV: Após os anos 2000, a ênfase passou a ser a intervenção cada vez mais reduzida nas instalações, enquanto as práticas de manutenção preditiva e monitoramento do estado de equipamentos e processos se fortaleceram. Esse cenário resultou em uma diminuição da aplicação de manutenções preventivas ou programadas, uma vez que estas causam paralisações em equipamentos e sistemas, impactando qualidades na produção. O mesmo raciocínio-se à manutenção corretiva não planejada, que passa a ser considerado um indicador de ineficiência na gestão da manutenção. Por outro lado, a interação entre as áreas de engenharia, manutenção e operação tornou-se um elemento crucial para garantir o alcance das metas. Uma mudança significativa nesta geração foi o aprimoramento da terceirização, buscando relacionamentos colaborativos de longo prazo.

Garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção e a preservação do meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custos adequados (Kardec e Nascif, 2009).

3.2.3. TIPOS DE MANUTENÇÃO

Existem seis tipos de manutenção, as quais se diferem tanto por diferentes métodos de intervenção quanto por diferentes paradas nos equipamentos, máquinas, instalações ou sistemas integrantes da planta (Kardec e Nascif, 2009).

Na literatura, não há uma concordância sobre o número exato de tipos, com alguns estudiosos considerando três categorias fundamentais, conforme definido por Slack et al. (2002), enquanto outros optam por uma classificação mais abrangente, incluindo seis tipos diferentes. Para obter uma compreensão mais abrangente desse tópico e seguir a classificação proposta por Kardec e Nascif (2009), são observadas as seguintes categorias: manutenção corretiva não planejada, manutenção corretiva planejada, manutenção preventiva, manutenção preditiva, manutenção detectiva e engenharia de manutenção.

A sensibilização e treinamento contínuo dos funcionários são igualmente importantes para assegurar a eficácia dos programas de manutenção. Os trabalhadores devem estar cientes dos procedimentos de segurança, protocolos de emergência e da importância de relatar quaisquer irregularidades observadas durante suas atividades diárias. O envolvimento ativo da equipe é essencial para criar uma cultura de segurança em toda a usina (Affonso, 2006).

3.2.3.1. MANUTENÇÃO CORRETIVA NÃO PLANEJADA

Consiste na correção imediata de uma falha ou desempenho abaixo do esperado logo após sua ocorrência. Não há tempo para planejar o uso de mão-de-obra, ferramentas ou, se necessário, material de reposição. Esse tipo de manutenção é caracterizado pela presença de duas condições: o desempenho inadequado da máquina ou equipamento e a ocorrência da falha propriamente dita (Kardec e Nascif, 2009).

A manutenção corretiva não planejada envolve a correção de uma falha ou de um desempenho inferior ao esperado, sendo sempre realizada após a ocorrência do evento, sem acompanhamento ou planejamento prévio, de maneira praticamente planejada. Este tipo de abordagem resulta em custos elevados e baixa confiabilidade na produção, já que provoca períodos de inatividade e danos mais significativos aos equipamentos, muitas vezes irreversíveis (Otani e Machado, 2008).

Quando a maioria das atividades de manutenção de uma empresa se baseia em ações corretivas não planejadas, o departamento de manutenção acaba ficando dependente da equipe.

Em vez de estar no controle, acaba sendo liderado por eventos imprevistos, o que compromete a competitividade do desempenho empresarial da organização (Kardec e Nascif, 2009).

Por outro lado, a manutenção corretiva é realizada em resposta a uma falha ou quebra de equipamento. Essa abordagem é muitas vezes reativa, exigindo intervenção imediata para restaurar a funcionalidade do componente comprometido (Djurdjanovic, 2003).

A velocidade e a eficiência do monitoramento em tempo real são essenciais para a tomada de decisões rápidas e ações corretivas imediatas. A transmissão instantânea de dados permite uma resposta ágil a eventos não planejados, minimizando o tempo de inatividade e reduzindo os impactos operacionais. Essa capacidade de reação rápida é particularmente crucial em ambientes industriais, onde as interrupções na produção podem ter implicações significativas (Diniz, 2013; Bousdekis, 2018).

3.2.3.2. MANUTENÇÃO CORRETIVA PLANEJADA

A manutenção corretiva planejada difere da manutenção não programada por ser uma determinação gerencial. Consiste, igualmente, na correção de falhas ou desempenho abaixo do esperado, contudo, fundamenta-se na alteração dos parâmetros de condição identificados pela manutenção preditiva (Kardec e Nascif, 2009).

De acordo com a norma NBR 5462-1994, a manutenção corretiva ocorre posteriormente à manifestação de uma falha, atualizando um elemento às condições específicas para selecionar sua função. Este tipo é considerado o mais básico e elementar, envolvendo a continuidade da operação das instalações até que ocorra uma falha, momento em que são realizados os trabalhos de manutenção (Slack et al., 2002).

A manutenção corretiva planejada pode ser delineada como uma intervenção nas condições dos equipamentos devido a desempenho inferior, falha ou decisão gerencial. Esse tipo requer menos recursos, sendo mais ágil, seguro e de qualidade superior em comparação com a manutenção não programado (Souza, 2004).

Apesar da escolha gerencial da manutenção corretiva, a manifestação de defeitos não deve ser simplesmente aceita como um evento natural esperado. É essencial esforçar-se para identificar com precisão as causas raízes das falhas e bloqueá-las para evitar recorrências autor (Xenos, 1998).

3.2.3.3. MANUTENÇÃO PREVENTIVA

De acordo com as especificações da NBR 5462-1994, a manutenção preventiva refere-se à realização de intervenções em intervalos previamente propostos ou de acordo com critérios especificados, com o propósito de diminuir a probabilidade de falha ou operação no funcionamento de um componente. Essa abordagem busca prevenir a ocorrência de falhas, implementando manutenções em períodos predefinidos. Além disso, visa eliminar ou reduzir a possibilidade de falhas decorrentes da ausência de manutenção, incluindo atividades como limpeza, lubrificação, substituição e revisão das instalações (Slack et. al, 2002).

Ao optar por esse tipo de abordagem, a incidência de falhas é reduzida, a disponibilidade dos equipamentos aumenta e as interrupções inesperadas na produção são minimizadas. Considerando o custo total, em várias situações, a manutenção preventiva revela-se mais econômica do que a manutenção corretiva, uma vez que as paradas dos equipamentos são programadas, em vez de ocorrerem de maneira imprevista (Xenos, 1998).

Se, por um lado, a abordagem de manutenção preventiva proporciona uma gestão eficaz das atividades, equilíbrio de recursos e previsibilidade no consumo de materiais e peças de reposição, por outro lado, implica na paralisação de equipamentos ou sistemas operacionais para a realização de atividades programadas. Assim, é crucial ponderar os fatores para garantir que a aplicação dessa estratégia seja adaptada à realidade das máquinas, sistemas ou instalações (Kardec e Nascif, 2009).

Os desafios mais frequentes na adoção da manutenção preventiva incluem a realização de reparos temporários ou prematuros, bem como a ocorrência de falhas imprevistas (Almeida, 2000).

Nem sempre os fabricantes fornecem informações precisas para implementar planos de manutenção preventiva. É fundamental considerar que as condições ambientais e operacionais exercem uma influência significativa na manipulação dos equipamentos, razão pela qual a definição de frequência e substituição deve ser adaptada a cada instalação (Kardec e Nascif, 2009).

É comum haver negligência por parte das empresas na execução dos pontos de manutenção preventiva, resultando no desperdício de tempo que poderia ser dedicado a essa prática enquanto trabalham em falhas que surgem no cotidiano da produção. A ausência de uma manutenção sólida preventiva pode levar ao aumento das falhas, consumindo todo o tempo da equipe de manutenção (Xenos, 1998).

3.2.3.4. MANUTENÇÃO PREDITIVA

Executada através de uma análise dos dados adquiridos durante as inspeções, antecipa a evolução das condições dos equipamentos e das falhas intrínsecas ao processo. Engloba todas as atividades de acompanhamento ou monitoramento das condições de um sistema, seus parâmetros operacionais e sua manipulação possível, sendo conduzidas por meio de determinação ou inspeções que não impactam na operação do sistema (Kardec e Nascif, 2009).

Seu objetivo primordial é evitar falhas em equipamentos ou sistemas por meio do acompanhamento de diversos parâmetros, mantendo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível. Dessa forma, a Manutenção Preditiva prioriza a disponibilidade, já que não implica intervenção direta em equipamentos ou sistemas; em vez disso, realizamos medições e verificações junto aos equipamentos em operação. A manutenção preditiva otimiza a utilização das peças, maximizando sua vida útil e estendendo os intervalos entre as atividades de manutenção. O monitoramento técnico do componente permite identificar alterações próximas ao limite de sua vida útil, abrangendo condições como variação de vibração, lubrificação e desgaste da estrutura dos elementos mecânicos (Xenos, 1998).

O objetivo da manutenção preditiva é monitorar a máquina ou peças por meio de observação, orientação ou controle estatístico, buscando prever a proximidade de ocorrência de falhas. Essa abordagem visa determinar o momento ideal para uma intervenção de manutenção, evitando desmontagens para inspeção e maximizando a utilização do componente ao longo de sua vida útil (Slack et al., 2008).

A implementação desse modelo de política requer um sistema de informação eficiente sobre o estado dos equipamentos. A eficácia do processo está intrinsecamente vinculada à validade das informações, à periodicidade das inspeções, que devem ser sistemáticas e à alta confiabilidade dos diagnósticos (Baldin, 1982).

As condições essenciais para adotar a Manutenção Preditiva incluem: a capacidade do equipamento/sistema permitir algum tipo de monitoramento/medição; a justificativa econômica do equipamento, sistema ou instalação para essa política de manutenção, levando em consideração os custos envolvidos; as falhas têm origem em causas monitoráveis e em sua evolução; estabelecimento de um programa sistematizado de monitoramento, análise e diagnóstico (Kardec e Nascif, 2009).

A manutenção preditiva tem uma vantagem adicional na redução do desgaste excessivo dos componentes, pois permite a substituição programada de peças antes que atinjam o final de

sua vida útil. Isso não apenas evita falhas inesperadas, mas também otimiza o uso dos recursos, garantindo que os equipamentos estejam operando em condições ideais (Affonso, 2006).

A antecipação de falhas pela manutenção preditiva não apenas minimiza os custos diretos associados à substituição de peças, mas também contribui para a redução de custos indiretos, como paradas de produção não programadas. Isso resulta em uma eficiência operacional aprimorada, aumentando a disponibilidade dos equipamentos e, conseqüentemente, melhorando a produtividade da usina (Vendrame, 2005; Chillarege e Bowen, 1989).

3.2.3.5. MANUTENÇÃO DETECTIVA

Este tipo específico de manutenção teve seu início a partir da década de 90 e tem como propósito a detecção de falhas ocultas ou não perceptíveis pelas equipes de operação e manutenção. A identificação de falhas ocultas desempenha um papel crucial na garantia de previsibilidade em sistemas complexos. A execução dessas ações deve ser exclusiva de profissionais da área de manutenção, devidamente treinados e executados para essa finalidade, com o suporte do pessoal da operação (Kardec e Nascif, 2009).

A Manutenção Detectiva engloba verificações funcionais, muitas vezes relacionadas a sistemas de proteção, para avaliar sua efetividade. Inclui, por exemplo, tarefas que envolvem testes com lâmpadas de sinalização e alarmes identificados por sensores (Ahuja e Khamba, 2008).

Em sistemas automatizados, a identificação de falhas ocultas é necessária para garantir a confiabilidade. Nessas configurações complexas, essas atividades devem ser conduzidas exclusivamente por profissionais de manutenção devidamente capacitados, em colaboração com a equipe de operações. Especialistas realizam verificações no sistema sem interrupção de suas operações, identificando essas falhas ocultas e, preferencialmente, corrigindo a situação para manter o sistema em pleno funcionamento (Kardec e Nascif, 2009).

3.2.3.6. MANUTENÇÃO HÍBRIDA

A manutenção preditiva e corretiva são abordagens fundamentais na gestão de ativos em ambientes industriais, cada uma com definições e objetivos distintos. A manutenção preditiva é uma estratégia proativa que se concentra na antecipação de falhas em equipamentos. Ela se baseia na coleta contínua de dados em tempo real, utilizando técnicas avançadas como análise

de vibração, termografia e inspeções visuais. O principal objetivo da manutenção preditiva é identificar padrões de desgaste e realizar intervenções programadas antes que ocorram falhas, visando minimizar o tempo de inatividade e otimizar a eficiência operacional. Essa abordagem busca uma gestão eficiente de ativos, redução de custos operacionais e maior confiabilidade dos equipamentos (Bosa, 2009).

Em última análise, a escolha entre manutenção preditiva e corretiva, ou a adoção de uma abordagem híbrida, dependerá das necessidades operacionais, dos objetivos financeiros e da criticidade dos equipamentos em uma usina de refino. A gestão eficaz de ativos é uma questão complexa que exige uma abordagem adaptativa e estratégica para otimizar a segurança, eficiência e confiabilidade operacional ao longo do tempo (Chen, Chua e Lim, 2022).

É crucial reconhecer que, muitas vezes, a eficiência da gestão de ativos reside na adoção de uma abordagem híbrida, combinando elementos de manutenção preditiva e corretiva. A integração dessas estratégias permite aproveitar as vantagens de ambas, mitigando suas desvantagens (CEITEC, 2018).

A implementação de manutenção preditiva pode ser seletiva, direcionada aos equipamentos mais críticos, onde a prevenção de falhas é crucial. Essa abordagem se alinha particularmente bem com a necessidade de otimizar a vida útil de componentes específicos e reduzir os custos associados a paradas não programadas. No entanto, a manutenção corretiva ainda desempenha um papel importante, especialmente em situações imprevisíveis ou em equipamentos menos críticos, onde os custos de implementação da manutenção preditiva podem superar os benefícios (Clark e Pradhan; 1995).

3.2.3.7. ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO

Adota abordagens contemporâneas para análise e prevenção de falhas, gerando uma transformação cultural na perspectiva de manutenção. Isso envolve ações como a investigação das causas fundamentais das quebras, a alteração de condições permanentes no desempenho de máquinas e equipamentos, e o aprimoramento dos padrões e procedimentos sistemáticos para o cuidado e controle de equipamentos (Kardec e Nascif, 2009).

A Engenharia de Manutenção representa o esforço em "buscar referências, aplicar técnicas modernas e equipar-se aos padrões de manutenção do Primeiro Mundo". Com esse propósito, visa, entre outros fatores, ampliar a confiabilidade, disponibilidade, segurança e manutenibilidade; solucionar problemas clássicos e desafios tecnológicos; aprimorar a gestão de pessoal, materiais e peças de reposição; contribuir para novos projetos e apoiar sua execução;

realizar análises e estudos de falhas; desenvolver planos de manutenção, conduzir análises críticas e monitorar indicadores, garantindo a documentação técnica (Kardec e Nascif, 2009).

Algumas características distintivas da manutenção de engenharia incluem a busca pelas causas raízes das falhas, modificações e situações crônicas de desempenho inadequadas; a prevenção de problemas recorrentes; o aprimoramento contínuo das técnicas e o fornecimento de *feedback* aos gestores; a intervenção técnica nas aquisições por meio de *benchmarking*; e a aplicação de métodos modernos (Yamaguchi, 2005).

3.2.4. GERENCIAMENTO INDEVIDO DOS PROCESSOS MANUTENTIVOS

Nas instalações de refino, existem processos e condições do petróleo que expõem os equipamentos a condições adversas, tais como incrustação, abrasão e corrosão. Portanto, medidas preventivas devem ser adotadas desde a fase inicial do projeto, com monitoramento contínuo conforme as variações matemáticas. Caso contrário, há o risco de ocorrer incidentes, incluindo paradas não planejadas de unidades, vazamentos de produtos, perda de eficiência, contaminação e até mesmo incêndios de ocorrências catastróficas, como exemplificado pelo incidente na Refinaria *Humber* da *Phillips Conoco* Ltda, em 2002, na costa leste da Inglaterra, conforme ilustrado na Figura 2 (Gentil e Carvalho, 2022).

Figura 2- Estado da Refinaria *Humber* Após Acidente



Fonte: Inspeção de Equipamentos (2023)

O estudo determinou que uma curvatura se reduz devido à espessura reduzida do metal, resultante da corrosão, e disposições uma deficiência por parte da *Phillips Conoco* na implementação de um sistema de inspeção eficaz, adequada às condições do processo. Na Figura 3, é possível observar a imagem da curvatura danificada, evidenciando uma região extensa com espessura reduzida, conforme constatado durante a investigação (Carter, Dawson e Nixon, 2006).

Figura 3- Estado da Refinaria Humber Após Acidente



Fonte: Carter, Dawson e Nixon (2006)

O incidente na Refinaria Humber não é um incidente único. Outros eventos catastróficos em todo o mundo foram atribuídos à corrosão. Esses incidentes importantes para o montante impressionante de 2,3 trilhões de dólares gastos globalmente em 2013 devido a problemas relacionados à corrosão (Al-Moubaraki e Obot, 2021).

Figura 4- Acidentes em Decorrência de Corrosão em Refinarias. a) Refinaria *Golden Eagle*, b) Refinaria *Richmond*, (c) e (d) Refinaria *Chevron*



Fonte: Al-Moubaraki e Obot (2021)

3.3. INFRAESTRUTURA DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

A infraestrutura de linhas de distribuição em usinas de refino de petróleo e gás natural é um componente crítico para a eficiência operacional e a segurança. Essas linhas de distribuição, frequentemente referidas como "oleodutos" para petróleo e "gasodutos" para gás natural, são sistemas de transporte projetados para transferir produtos refinados desde a unidade de processamento até os pontos de armazenamento ou terminais de distribuição (Vendrame, 2005).

Os dutos são classificados de acordo com a sua função na rede de distribuição: dutos de coleta, que transportam petróleo bruto ou gás natural dos campos de produção para as instalações de tratamento ou refinamento; dutos de transmissão, que movem os produtos entre as refinarias e os mercados ou centros de armazenamento; e dutos de distribuição, responsáveis por entregar produtos finais aos consumidores finais (Sweldens, 1998).

A construção de um sistema de dutos envolve uma série de componentes essenciais, incluindo:

Tubulação: Podem ser conceituadas como condutos fechados, destinados principalmente ao transporte de fluidos líquidos ou gasosos, tendo a capacidade de também se empregar na condução de materiais pastosos e na manipulação de fluidos contendo sólidos em

suspensão. Essa funcionalidade abrange uma ampla gama variações termobáricas (Telles, 2001).

Todos têm seção transversal circular e trabalham geralmente como condutos forçados.

Figura 5 - Linhas de Distribuição *OnShore*

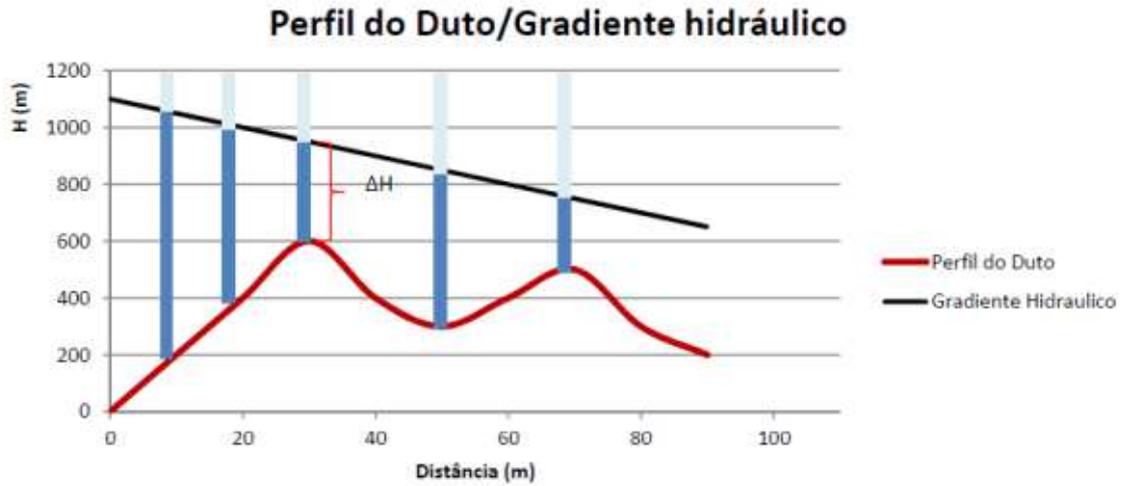


Fonte: Petrobras (2023)

Estação de compressão: O transporte por dutos, a fim de preservar o limite de pressão previamente determinado e mitigar as perdas de carga resultantes do consumo e do atrito entre o gás e a superfície interna do duto, diversos sistemas de atualizações são aprimorados e implantados de maneira distribuída ao longo da malha tubular. Esses sistemas, por sua vez, podem adotar a forma de turbinas a gás ou motores elétricos (Cardoso, 2005).

Na condução operacional de óleos, é imperativo adotar o princípio de operação sob condições de coluna completamente preenchida, detalhadas pela ausência de produto na fase vapor. Esta prática assume relevância primordial para aprimorar o controle na detecção de vazamentos no fluido transportado. O Gráfico 6 exemplifica uma operação, mantendo uma coluna completamente preenchida em um estado estacionário, onde o gradiente hidráulico é consistentemente superior à altura do perfil do duto, por um ΔH (Souza, 2016).

Gráfico 6- Perfil do Duto e Gradiente Hidráulico em Regime Permanente

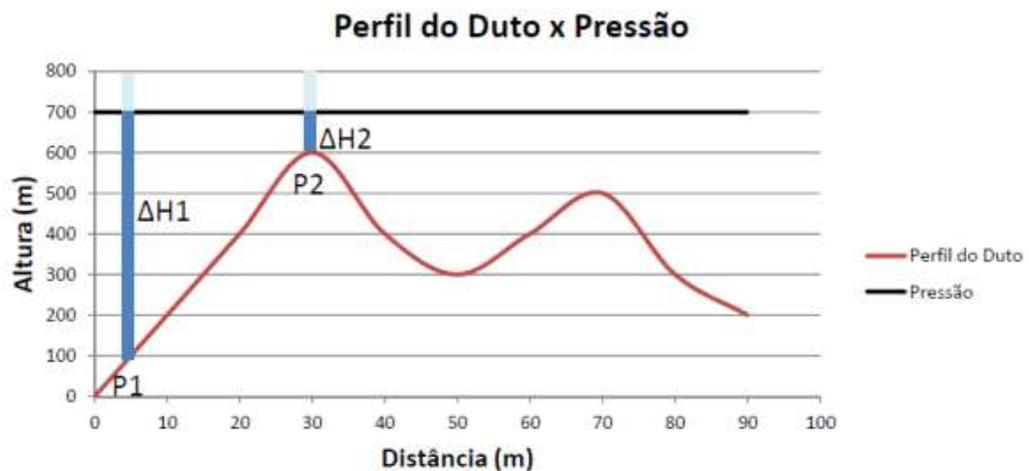


Fonte: Souza (2016)

Quando o oleoduto está parado também é importante manter o produto na fase líquida em todo o perfil do oleoduto conforme ilustra o gráfico 7, no qual observa-se um valor de ΔH acima da altura do perfil do duto.

Na situação de inatividade do óleo, é igualmente essencial preservar o produto na fase líquida ao longo de todo o perfil do duto. Neste contexto, é possível observar um valor de ΔH que permanece acima da altura do perfil do oleoduto.

Gráfico 7- Perfil do Duto e Gradiente Hidráulico em Regime Estático



Fonte: Souza (2016)

Válvulas: Utilizadas para controlar o fluxo de produto, permitindo a manutenção e o isolamento de segmentos do duto para reparos ou em casos de emergência. Válvulas de alívio de pressão e sistemas de detecção de vazamentos.

A função de cada categoria de válvula é diferente, mas todas relacionadas à característica essencial de fluxo regular. Para ilustrar, uma válvula globo regula a quantidade de líquido em uma artéria. Em contrapartida, uma válvula de bloqueio impede o retorno do fluido. Este último tipo de válvula tem a capacidade de evitar danos ao equipamento localizado em jusante (Cardoso, 2005).

Estação de redução de pressão e de medição: As instalações em questão consistem em conjuntos constituídos por válvulas destinadas à redução de pressão, bloqueio automático e/ou interrupção de pressão. Sua instalação é realizada com o propósito de ajustar a pressão para fins específicos, delimitando-a dentro de uma faixa preestabelecida entre os valores máximos e mínimos contratados. Algumas destas instalações incorporam medidores de vazão, usadas para o registro do volume de gás consumido.

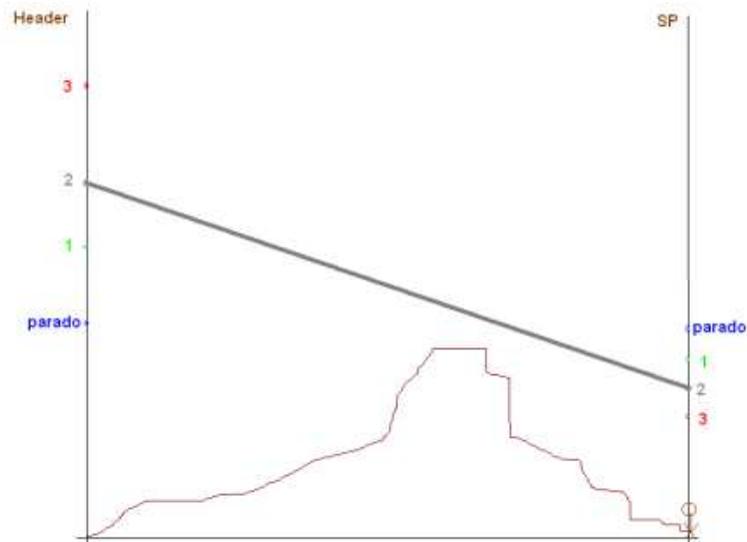
Sistema Supervisório – Ainda segundo Cardoso (2005) o sistema de supervisão e controle pode ser simples ou complexo, dependendo do grau de importância da rede de tubos. As informações das grandezas monitoradas e os acionamentos dos comandos podem ser disponíveis somente no local, ou também à distância, através de sistemas criados que possibilitam interferir em sua configuração por meio de comandos acionados remotamente.

O sistema de medição e controle empregado em óleo desempenha a função de realizar a medição das variáveis de processo, tais como vazão, pressão, temperatura e densidade. Essas especificações são utilizadas em sistemas especializados de detecção de vazamentos. Além disso, o referido sistema é responsável por manter a pressão no ponto de coleta em um valor que assegure a preservação da coluna completamente preenchida ao longo do duto (Braz, 2009).

A representação do Gráfico 8 a seguir ilustra, no eixo vertical esquerdo, os valores de *Head* na origem do bombeamento, sendo os números 1, 2 e 3 indicativos dos seus valores correspondentes para configurações de bombeamento com 1, 2 ou 3 bombas operando na origem em regime permanente. O eixo vertical à direita retrata o *Head* no ponto de destino, com os números 1, 2 e 3 referentes ao conjunto de pressão aplicada à válvula de controle para os respectivos arranjos de bombardeio.

Ainda segundo Braz (2009), na operação com três bombas em regime permanente, observa-se que o valor de pressão necessário na válvula de controle para manter o óleo com coluna completamente preenchida é inferior ao valor de pressão prescrito na válvula de controle durante a operação com apenas uma bomba.

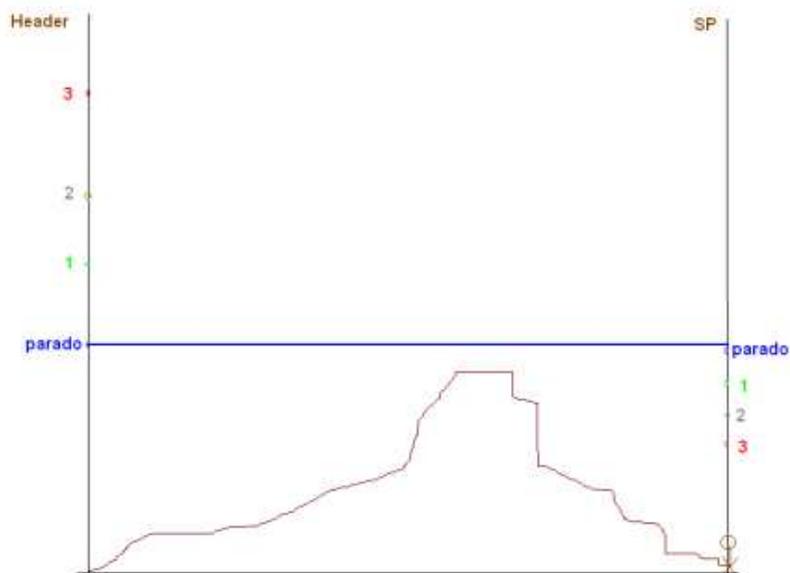
Gráfico 8- Set de Pressão no Recebimento para Manter a Coluna Cheia do Oleoduto em Regime Permanente



Fonte: Braz (2009)

A ilustração do Gráfico 9 a seguir apresenta, no eixo vertical esquerdo, o valor de *Head* na origem do bombeamento em um estado estático, ou seja, quando o óleo se encontra sem entrega de produto. O eixo vertical à direita retrata o *Head* no ponto de destino sob condição de estado estático. Nesse contexto estático, verifica-se que o valor do conjunto de pressão na válvula de controle necessário para manter o óleo com coluna completamente preenchida é superior aos conjuntos de pressão estabelecidos para regimes permanentes em qualquer configuração de bombardeio (Braz, 2009).

Gráfico 9- Set de Pressão no Recebimento para Manter a Coluna Cheia do Oleoduto em Regime Estático



Fonte: Braz (2009)

Os dutos utilizados na indústria de petróleo e gás são diferenciados principalmente pela substância que transportam, pelo material de que são feitos, e pelo ambiente em que estão instalados. No setor de refinamento, os dutos são estruturados para atender às demandas específicas de transporte de hidrocarbonetos, seja em estado líquido ou gasoso, e cada tipo possui características construtivas que otimizam seu desempenho e segurança (ABNT,1994).

Os dutos *Onshore*, instalados em terra, são os mais comuns na indústria. Eles variam em tamanho e espessura dependendo da pressão e do volume do produto a ser transportado. A tubulação de aço é amplamente utilizada devido à sua força e durabilidade, especialmente para o transporte de petróleo bruto e produtos refinados sob alta pressão. O aço carbono é um material preferido devido à sua capacidade de suportar as exigências operacionais severas e a corrosão que pode ser exacerbada pela presença de hidrocarbonetos e outros produtos químicos. Os dutos de aço também podem ser revestidos interna e externamente para aumentar sua resistência à corrosão (Chaouadi e Fabry, 2002).

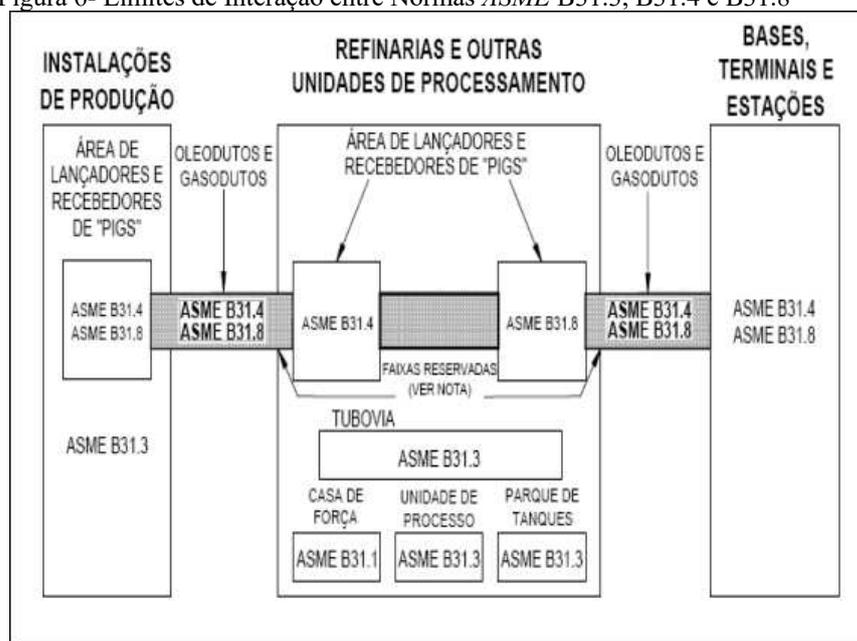
Para o transporte de gás natural, os dutos muitas vezes são feitos de aço de alta resistência que pode suportar as baixas temperaturas associadas ao gás natural pressurizado. Além disso, as ligas de aço inoxidável ou materiais compostos são usadas em aplicações especiais onde podem ocorrer reações químicas ou onde se requer uma resistência superior à corrosão (Diniz, 2013).

Os dutos *Offshore*, que atravessam corpos d'água, são projetados para resistir a ambientes marinhos corrosivos e ao estresse físico de ondas e correntes. Eles geralmente são ancorados ao leito marinho e protegidos por camadas de concreto ou revestimentos especiais para prevenir danos mecânicos e corrosão. Além dos materiais tradicionais, a indústria também utiliza dutos flexíveis e compostos, que podem ser mais econômicos e fáceis de instalar em determinadas condições. Esses tipos de dutos são particularmente úteis em áreas de difícil acesso ou onde a instalação de dutos rígidos seria desafiadora (Piccoli, 2018).

O dimensionamento e a especificação do duto dependem da análise de diversos fatores, incluindo a vazão desejada, as propriedades do fluido a ser transportado, as condições ambientais e operacionais, bem como considerações de segurança e ambientais. A integração eficaz destes diferentes tipos de dutos na infraestrutura de uma usina de refino é vital para o sucesso contínuo das operações e a segurança a longo prazo, o que torna a escolha adequada do tipo de duto um elemento fundamental no design e na manutenção de qualquer sistema de distribuição de petróleo e gás natural (Boyes, 2018).

Os elementos técnicos e as diretrizes de excelência no âmbito da engenharia pertinentes aos projetos de dutos e tubulações na esfera industrial são regulamentados pelas normativas da *ASME*. Os parâmetros e alcances dessas normas podem ser representados visualmente conforme delineado na Figura 6 a seguir.

Figura 6- Limites de Interação entre Normas *ASME* B31.3, B31.4 e B31.8



Fonte: Normas Petrobras, N1673 – Critérios de Cálculo Mecânico de Tubulação

Assim, os empreendimentos destinados ao transporte de gás natural seguem as diretrizes da normativa *ASME B 31.8 - Gas Transmission and Distribution Piping Systems*. Esta norma engloba as fases de fabricação, instalação, inspeção, testes e considerações relativas à segurança durante a operação e manutenção dos sistemas.

A Petrobras, para a padronização dos seus projetos de gasodutos, adota diversas normas internacionais, destacando-se, em particular, a norma N-464 - Diretrizes para Construção, Montagem e Condicionamento de Dutos Terrestres.

Os dutos estão constantemente sujeitos a condições extremas, como pressão, temperatura e substâncias corrosivas. Sem uma manutenção regular, esses fatores podem levar a danos significativos, colocando em risco toda a operação da usina. Além disso, a falha de um único componente pode desencadear uma cascata de eventos indesejados, resultando em paradas não programadas, perdas financeiras substanciais e, o mais preocupante, potenciais incidentes ambientais (Chaouadi e Fabry, 2002).

A integridade dos dutos não é apenas crucial para a segurança dos trabalhadores, mas também para a segurança do suprimento energético. Qualquer interrupção nas operações de

uma usina de refino pode ter impactos significativos no fornecimento de produtos petrolíferos essenciais. A manutenção, portanto, desempenha um papel fundamental na garantia da continuidade operacional, evitando interrupções que poderiam afetar não apenas a empresa, mas toda a cadeia de abastecimento (Chaouadi e Fabry, 2002).

3.4. CORROSÃO

Define-se corrosão como a deterioração dos materiais metálicos pela ação química ou eletroquímica do ambiente, podendo ou não estar vinculada a impactos físicos. Esse fenômeno ocorre quando um metal ou liga metálica, utilizados como materiais de construção, passam do estado metálico para uma forma combinada (produto de corrosão) devido à interação com o meio circundante, podendo resultar em falhas durante o serviço. A interação entre o metal e o meio pode assumir características químicas ou eletroquímicas, podendo estar relacionada a esforços mecânicos. Em linhas gerais, a corrosão representa o processo oposto ao procedimento metalúrgico extrativo. Inicia-se com o metal e culmina na formação, por interação com o ambiente, do produto de corrosão, uma forma combinada do metal. Este processo é espontâneo e pode envolver a liberação de energia, uma vez que o conteúdo energético do produto de corrosão é inferior ao do metal inicial (Nunes e Lobo, 1990).

A deterioração dos equipamentos nas indústrias de petróleo e petroquímica é predominantemente atribuída à corrosão, representando uma das principais causas. Conforme essas indústrias evoluem e incorporam métodos modernos, incluindo alguns que envolvem o uso de substâncias químicas corrosivas, os desafios relacionados à corrosão se intensificam, tornando-se mais numerosos e complexos (IBP, 2021).

Tabela 2- Gastos com Problemas de Corrosão

PAÍS	PIB	CORROSÃO
Alemanha	1873,00	65,55
Argentina	285,50	9,99
Brasil	594,20	20,79
Canadá	688,80	24,10
China	1100,00	38,50
Espanha	558,60	19,55
Estados Unidos	9896,40	346,37
França	1294,20	45,29
Índia	479,40	16,77
Itália	1074,00	37,59
Japão	4749,60	166,23
México	574,50	20,10
Reino Unido	1414,60	49,51

(PIB - Valores em Bilhões de Dólares)

Fonte: Banco Mundial (2000)

De acordo com análises, aproximadamente 30% da produção global de ferro e aço resulta em perdas devido à corrosão, e os custos associados correspondem a uma porcentagem entre 1% e 5% do PIB dos países, citadas anteriormente na Tabela 2. Em 2019, como exemplo, o Brasil destinou recursos equivalentes a 4% do PIB, totalizando R\$ 290 bilhões, para a manutenção contra os efeitos da corrosão. A corrosão de metais representa um ônus econômico expressivo para os Estados Unidos, totalizando quase US\$ 300 bilhões anualmente em termos atuais. Aproximadamente um terço desses custos poderia ser mitigado por meio da adoção mais difundida de materiais resistentes à corrosão e da implementação de melhores práticas técnicas associadas ao controle da corrosão (Brasilmining, 2020).

As ocorrências de falhas em oleodutos são frequentes devido ao desenvolvimento de poços de petróleo em ambientes altamente corrosivos, caracterizados por níveis significativos de salinidade, pressões elevadas e temperaturas extremas (Ossai et al, 2015, López, 2003; Bruschi et al, 2015).

3.4.1. CORROSÃO ATMOSFÉRICA

A atmosfera é composta por umidade, partículas de sais, emissões de gases industriais, poeira, entre outros elementos. O eletrólito é formado pela água que se condensa sobre a superfície metálica, em conjunção com sais ou gases presentes no ambiente. Outros componentes, como partículas de poeira e diversos poluentes, têm o potencial de acelerar o

processo corrosivo. No contexto atmosférico industrial, a principal fonte de contaminação consiste em compostos de enxofre, amônia ou partículas sólidas. Em instalações localizadas em regiões costeiras, a principal fonte de contaminação ocorre por meio de partículas salinas contendo cloreto de sódio. O íon cloro demonstra ser agressivo em relação aos aços inoxidáveis, desencadeando o fenômeno corrosivo conhecido como corrosão por pite (Thomas, 2004).

Essa modalidade de corrosão, provavelmente a mais prejudicial, caracteriza-se pela sua complexidade de detecção, dado que frequentemente se desenvolve subterraneamente à corrosão generalizada. Além disso, a perda percentual de peso da estrutura afetada é bastante reduzida. Esse tipo de corrosão distingue-se da forma alveolar, uma vez que, ao contrário dos alvéolos, a profundidade da corrosão é superior ao diâmetro da cratera resultante. A presença de cloretos no ambiente propicia a sua ocorrência, sendo possível preveni-la por meio do polimento da superfície e da adição de 2% de molibdênio (IBP, 2021).

Diversos elementos desempenham um papel crucial na influência do processo corrosivo atmosférico, incluindo a umidade relativa, presença de substâncias poluentes (como particulados e gases), temperatura e a duração do contato do eletrólito com a superfície metálica. Outros fatores, como condições meteorológicas, também podem influenciar de maneira significativa a corrosão atmosférica. Entre esses, destacam-se a intensidade e direção dos ventos, variações cíclicas relacionadas à temperatura e umidade, incidência de chuvas e exposição à radiação ultravioleta. Equipamentos ou estruturas que apresentam características que propiciam a estagnação da água ou a presença de umidade em fendas são mais suscetíveis a sofrer danos corrosivos. Até mesmo a presença de excrementos de aves pode acelerar esse processo corrosivo, como evidenciado em ambientes rurais ou regiões portuárias. (IBP, 2021).

Na ausência de medidas protetivas, como pintura ou revestimento, a corrosão e a consequente redução da espessura podem ocorrer de maneira generalizada. Nos casos em que equipamentos foram previamente pintados ou revestidos e apresentam falhas, a corrosão tende a ocorrer preferencialmente nessas áreas (Nunes e Lobo, 1990).

Em diversas situações, a perda de espessura não é facilmente perceptível durante inspeções visuais, devido à presença do produto de corrosão que se forma na região. Os principais materiais suscetíveis a esse fenômeno incluem aços-carbono, aços de baixa liga e ligas de cobre com alumínio.

As regiões e acessórios mais propensos a serem afetados abrangem:

- Áreas com pintura ou revestimento com integridade comprometida;
- Frestas ou regiões que propiciem o acúmulo de umidade;
- Suportes de tubulações;

- Regiões com orientação suscetível a ventos e chuvas (IBP, 2021).

Figura 7- Corrosão Atmosférica em uma Linha de GLP Próxima a uma Torre de Resfriamento



Fonte: API 571/2020

3.4.2. CORROSÃO GALVÂNICA

A corrosão galvânica refere-se ao dano corrosivo causado quando há a interação entre dois materiais distintos em um eletrólito corrosivo (Figura 8). Esse fenômeno ocorre quando dois ou mais metais diferentes entram em contato elétrico em um meio que atua como eletrólito, como ambientes úmidos ou aquosos. Quando ocorre o acoplamento galvânico, um dos metais se torna o ânodo, sofrendo corrosão a uma taxa mais elevada do que se estivesse isolado. Nesse contexto, é relevante introduzir o conceito de acoplamento galvânico como a associação entre dois metais distintos que apresentam, como propriedade intrínseca, potenciais elétricos diferentes (Gentil, 2003).

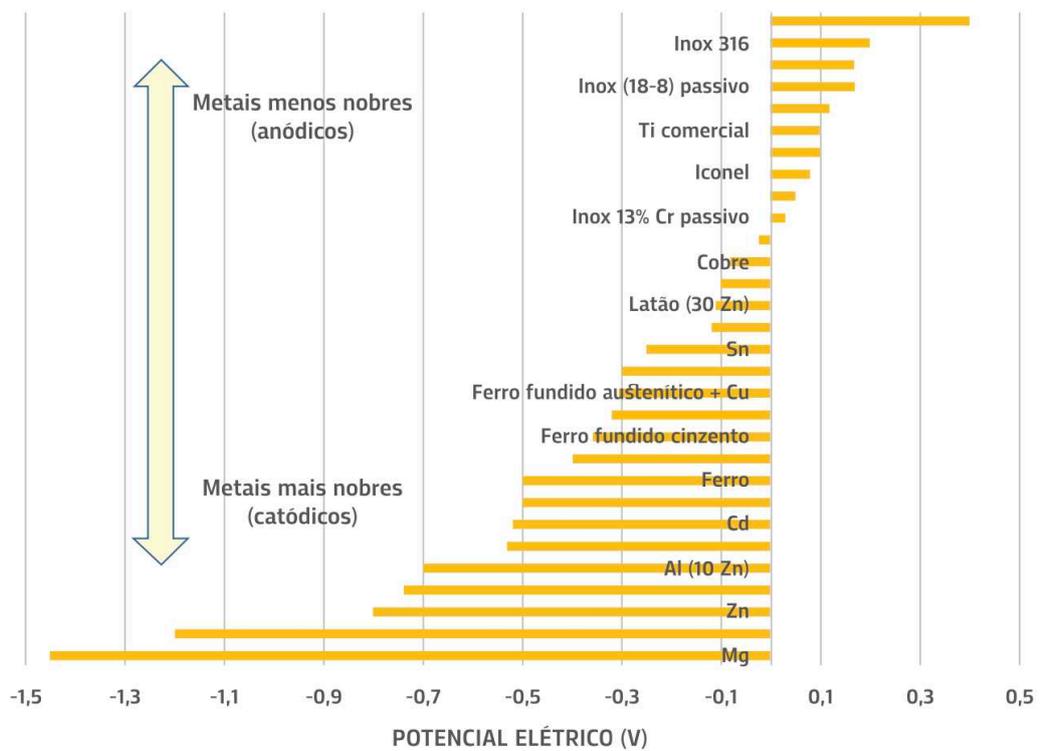
De maneira concisa, existem três condições necessárias para que ocorra o dano provocado pela corrosão galvânica:

- A presença de um fluido em um determinado estado físico que atue como eletrólito, permitindo a condução de corrente elétrica entre os metais.
- A existência de dois materiais ou ligas que desempenhem os papéis de anodo e catodo quando em contato com o eletrólito.
- A presença de corrente elétrica entre os materiais em questão.

Outro fator crucial que influenciará a taxa de corrosão galvânica é a área superficial relativa exposta entre o catodo e o anodo. Se a relação entre a superfície do anodo e a do catodo for elevada, indicando que a área do anodo é maior do que a do catodo, a corrosão preferencial ocorrerá no anodo, que é o metal menos nobre. Essa condição é considerada desejável. Se a razão entre a área do anodo e a área do catodo for alta, a taxa de corrosão no anodo será maior (Popoole et al., 2013; Groysman, 2017; Askari et al., 2018).

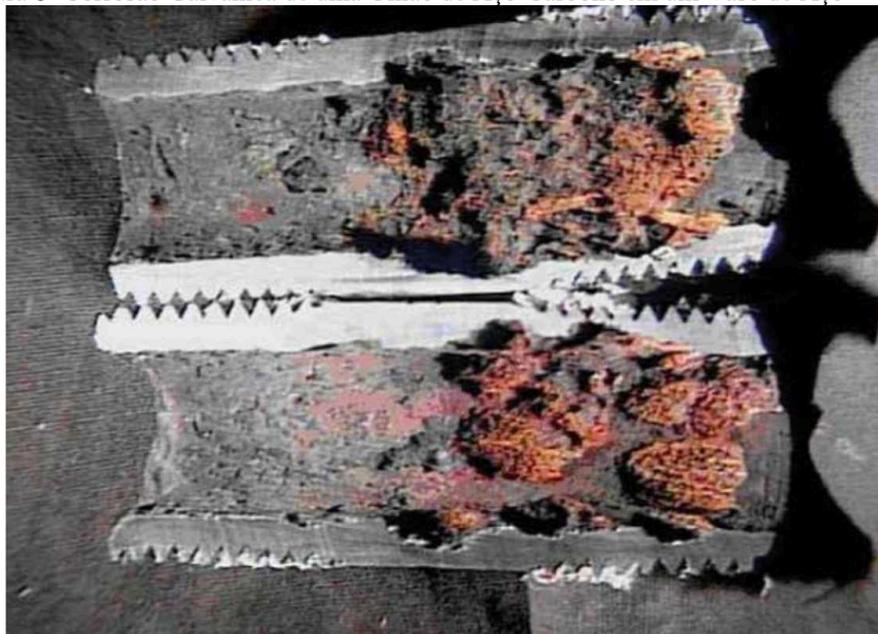
Na série galvânica, ilustrada pelo gráfico 10 a seguir, vemos os metais e seus diferentes potenciais catódicos e anódicos.

Gráfico 10- Série Galvânica



Fonte: IBP (2021)

Figura 8- Corrosão Galvânica de uma União de Aço-Carbono em um Vaso de Aço



Fonte: API 571/2020

3.4.3. CORROSÃO POR FRESTA

Uma variante da corrosão por pite manifesta-se em fendas extremamente reduzidas. Esse fenômeno está intrinsecamente vinculado à disparidade de potencial eletroquímico entre uma região com uma concentração específica de íons ou oxigênio e outra com uma concentração divergente. A região com menor aeração, por exemplo, assume características anódicas, enquanto aquela mais aerada exibe comportamento catódico. Portanto, na presença de uma fenda suficientemente pequena para permitir a entrada do eletrólito, mas não a sua saída, ocorrerá a formação de uma pilha galvânica, resultando em corrosão. O mesmo fenômeno ocorre caso haja depósitos orgânicos ou inorgânicos sob a superfície metálica, criando uma disparidade de aeração entre as regiões sob o depósito (região catódica). O eletrólito pode ser representado pela umidade do ar ou por qualquer outro meio iônico no qual o metal esteja imerso (Gentil, 2003).

A corrosão por frestas (Figura 9) é caracterizada pela manifestação de uma corrosão intensa, seja generalizada ou por meio de pites, em aberturas formadas por diferentes condições, tais como:

- Fatores geométricos, como soldas, juntas, orifícios ou cabeças de fixadores;
- O contato entre metal e metal ou metal e substâncias não metálicas (como madeira, borracha, plástico);

- A presença de depósitos, como areia, produtos de corrosão permeáveis, incrustações marinhas e outros sólidos (corrosão sob depósitos);
- A ocorrência de trincas ou outros defeitos metalúrgicos (Pelliccione et al., 2012).

Figura 9- Corrosão Filiforme Sobre Alumínio



Fonte: Proquimia (2019)

Esse tipo de processo corrosivo se desenvolve na configuração de filamentos finos, embora não profundos, que se estendem em diversas direções sem se interligarem. Este fenômeno é comumente observado em superfícies metálicas protegidas por filmes poliméricos, tintas ou metais, resultando no desprendimento do revestimento (Salcedo, 2009).

O aço-carbono é o material mais propenso e amplamente utilizado em situações onde esse fenômeno se manifesta em refinarias. Aços de baixa liga e aços inoxidáveis também são vulneráveis a esse processo. A extensão da suscetibilidade está condicionada à composição química da liga e à agressividade do meio. Aços de alta liga, incluindo os aços inoxidáveis ferríticos com alto teor de cromo, aços superinoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis superdúplex e ligas Ni-Cr-Mo, assim como o titânio e suas ligas, demonstram uma resistência notável conforme avaliado em testes realizados em células de corrosão destinados a aplicações em refinarias (Ferreira, 2018).

Resumidamente, a corrosão por frestas ocorre em aberturas suficientemente grandes para permitir o acesso do meio corrosivo, mas pequenas o bastante para impedir o transporte de matéria entre o anodo e o catodo, criando assim uma célula oclusa. As frestas típicas possuem dimensões na ordem de 0,02mm a 0,1mm. Esse fenômeno afeta diversos metais, sendo os ativos passivos mais suscetíveis (IBP, 2021).

A célula de concentração de corrosão ocorre em ambientes aquosos, envolvendo uma célula oclusa cercada por um meio ligeiramente distinto. A diferença na concentração de oxigênio entre a célula oclusa e sua vizinhança propicia a formação de uma área anódica, onde a corrosão é acelerada. Esta célula pode surgir mesmo na ausência de ar ou oxigênio, como em camadas de depósito sob torres e vasos (Popoole et al, 2013).

A corrosão alveolar em aços inoxidáveis da série 300, relacionada à concentração de cloretos, pH e temperatura, está ligada à formação de pites por cloretos nesses materiais. A presença da célula de aeração diferencial, formada entre o interior do alvéolo e o ambiente externo, contribui para a aceleração da corrosão. A resistência à corrosão alveolar por cloretos desses aços está associada à presença de Cr, Mo e outros elementos na liga (IBP, 2021).

A célula de concentração da corrosão acelera a corrosão em ambientes aquosos potencialmente corrosivos, aumentando sua velocidade. O par galvânico também acelera a corrosão do material mais anódico em ambientes corrosivos. A taxa de corrosão sob depósitos ou em alvéolos é significativamente superior àquela que ocorre em ambientes não confinados. A corrosão em pontos de apoio de tubulações é acelerada pela diferença de oxigênio entre a região externa e interna no solo. A presença de um ambiente não corrosivo ao redor da célula oclusa impede a corrosão sob depósitos (Gentil, 2003).

Em uma refinaria, todas as tubulações de serviços públicos e os equipamentos de processo são passíveis de serem avaliados quanto à suscetibilidade à corrosão em testes realizados em células de corrosão, tanto em suas superfícies externas quanto internas. A presença de qualquer tipo de depósito, como lama, carepa ou sais, nos tubos ou equipamentos representa um local propenso para a manifestação de corrosão sob depósitos (Efird, 1993).

Componentes internos de equipamentos, tais como bandejas de torres, placas defletoras de trocadores de calor, flanges, juntas de vedação e elementos de vedação em válvulas e instrumentos, fixados por rebites, são áreas preferenciais onde a corrosão alveolar pode se desenvolver. Como é comum em casos de corrosão em refinarias, a célula de concentração da corrosão geralmente resulta em uma superfície corroída, frequentemente contendo pites. A corrosão alveolar em aços inoxidáveis austeníticos devido à presença de cloretos é caracterizada por um acúmulo de pites agudos, estreitos e profundos (IBP, 2021).

3.4.4. CORROSÃO POR EROSÃO

A erosão é definida como o desgaste mecânico de materiais resultante do impacto de partículas em movimento, podendo ocorrer internamente no material em alta velocidade. Este fenômeno é predominantemente observado em indústrias de petróleo e gás, onde a produção de areia junto com os fluidos pode acarretar diversos problemas no sistema (Parsi et al., 2014).

O processo de corrosão-erosão representa um agravamento do processo de corrosão devido ao impacto de partículas em um fluido contra uma superfície sólida, podendo envolver partículas sólidas em líquido ou gotas de líquido em gás. Assim, a corrosão-erosão resulta da interação combinada entre a erosão mecânica e a corrosão, sendo provocada pelo fluxo de fluido contendo partículas sobre a superfície (Efird et al., 1993).

Para antecipar os efeitos da corrosão-erosão em superfícies metálicas, é crucial considerar as características das partículas sólidas, do material que está em contato com o fluido e do meio circundante, sendo essas últimas diretamente vinculadas à taxa de corrosão, incluindo composição, velocidade do fluxo, pH e temperatura (Yang e Cheng, 2012).

Na maioria dos casos, a corrosão está intrinsecamente ligada ao processo erosivo, sendo raro considerar a erosão como um fenômeno isolado. O papel da corrosão é fundamental nesse mecanismo de deterioração. Em ligas com menor dureza, como as de cobre ou alumínio, o dano mecânico é mais pronunciado, resultando em um desgaste mais severo, especialmente em altas velocidades. Mesmo em ligas de alta dureza, o processo erosivo pode ser significativo. A corrosividade do ambiente pode comprometer a estabilidade do filme protetor na superfície metálica, expondo o material a danos mais intensos por erosão. Fatores como temperatura e pH podem aumentar a corrosividade do ambiente (IBP, 2021).

A morfologia do processo erosão/corrosão é caracterizada por perdas de espessura localizadas em forma de pites, ranhuras ou furos, geralmente seguindo um padrão direcional (Figura 10). Esse mecanismo de dano pode ocorrer em um intervalo de tempo relativamente curto. Sistemas diversos, como tubulações, válvulas, bombas, agitadores, vasos de pressão, trocadores de calor, turbinas e compressores, assim como curvas, cotovelos, "T"s, redutores, feixes de trocadores de calor, orifícios de medidores, pás de turbinas e bocais, estão sujeitos a esse tipo de deterioração. Melhorias no projeto, como alterações na forma, geometria e seleção de materiais, representam medidas preventivas eficazes, como aumentar o diâmetro da tubulação para reduzir a velocidade, empregar curvaturas mais suaves e aumentar a espessura da parede (IBP, 2021).

Figura 10- Corrosão-erosão de um Flange em Aço 11/4 em uma Linha da Unidade de Craqueamento Catalítico Fluido



Fonte: API 571/2020

3.4.5. CORROSÃO POR FADIGA

A modalidade de trincamento é aquela em que as fissuras se desenvolvem devido aos efeitos conjuntos de carga cíclica e corrosão. O trincamento, frequentemente, tem seu início em áreas de concentração de tensões, como pites na superfície, podendo originar-se em vários pontos. Todos os materiais e ligas metálicas são suscetíveis a essa forma de degradação, sendo que tensões cíclicas e aumento de tensão são fatores determinantes. O trincamento tende a ocorrer mais frequentemente em ambientes que propiciam a formação de pites ou corrosão localizada sob tensões cíclicas, resultantes de tensões térmicas, vibrações ou expansão diferencial. Diferentemente do mecanismo de fadiga pura, não há um limiar de carga para fadiga na fadiga assistida por corrosão. A corrosão induz a falhas em tensões e número de ciclos inferiores aos limites normais dos materiais na ausência de corrosão, e é comum a propagação de trincas paralelas. Os pontos iniciais das trincas incluem concentradores de tensão como pites, descontinuidades superficiais, mudanças de seção ou soldas de filete (IBP, 2021).

A fratura resultante da fadiga é frágil (Figura 11), e as trincas são frequentemente transgranulares, assemelhando-se às trincas de corrosão sob tensão, porém não ramificadas. Geralmente, isso resulta na propagação de várias trincas paralelas. A presença de trincamento

por corrosão-fadiga é identificada pela mínima deformação plástica, a menos que ocorra deformação plástica significativa durante a fratura final, geralmente associada a sobrecarga (IBP, 2021).

Figura 11 - Falha por Corrosão-fadiga em Tubo de Alta Temperatura e Pressão



Fonte: API 571/2011

3.5. TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS DA MANUTENÇÃO

Desde o momento em que se constatou a suscetibilidade a falhas dos dispositivos construídos pelo homem, tornou-se imperativo desenvolver métodos que viabilizassem uma avaliação proativa dos problemas. Nesse contexto, foram exploradas diversas metodologias de END. Na atualidade, essas abordagens figuram como uma das principais ferramentas de gestão da integridade de materiais e produtos. As técnicas de END fundamentam-se em uma diversidade de princípios físicos. Algumas incluem abordagens acústicas (como o ultrassom *Phased Array*), eletromagnéticas (como correntes parasitas) magnéticas (mediante o uso de partículas magnéticas), mecânicas (por meio da análise de vibrações), radiográficas (utilizando raios -X e raios gama), térmicos (através da termografia), e até os mesmos métodos de inspeção visual. Apesar da diversidade de técnicas disponíveis, ocasionalmente, a aplicação de apenas

uma delas é suficiente para obter a informação desejada. Essas técnicas de END são extremamente utilizadas no âmbito da indústria petroquímica (Camerini, 2012).

As ferramentas de diagnóstico desempenham um papel crucial na implementação prática da manutenção preditiva, fornecendo meios eficazes para coletar, analisar e interpretar dados operacionais. Várias ferramentas têm sido desenvolvidas e aprimoradas para atender às demandas específicas de diferentes setores industriais. (Coester, 2001).

3.5.1. METODOLOGIAS PREDITIVAS

3.5.1.1. ENSAIO VISUAL

O procedimento inicial em END frequentemente envolve a aplicação do método de Inspeção Visual, associado, em muitas situações, a outras técnicas. Essa abordagem oferece um meio eficaz para detecção e análise de diversas discontinuidades superficiais, tais como corrosão, contaminação, qualidade do acabamento e trincas superficiais, proporcionando dados quantitativos e qualitativos de maneira mais acessível comparativamente a outros métodos de END. Alguns desses testes fundamentam-se nas leis da ótica geométrica, enquanto outros exploram as propriedades ondulatórias da luz. A aplicação dessa técnica é abrangente, abarcando desde a inspeção de superfícies expostas e acessíveis em materiais opacos e equipamentos parcial ou totalmente montados até a avaliação do interior de objetos transparentes ou translúcidos, como líquidos e gases (Sampaio, 2009).

A inspeção visual é uma presença constante em processos industriais, caracterizando-se por sua simplicidade e baixo custo operacional. Apesar dessas características, a técnica requer habilidade e precisa seguir procedimentos básicos de forma precisa (Sampaio, 2009).

Ampla em sua aplicação para avaliação da condição e qualidade de soldas ou componentes, a inspeção visual destaca-se por sua execução fácil, custo acessível e a não necessidade de equipamentos especializados (Moreira, 2014).

Considerado um método primário em programas de controle de qualidade, o seu êxito está atrelado às condições de acesso ao local, ao ambiente (iluminação) e, crucialmente, à capacidade e experiência do inspetor responsável. Portanto, é imperativo que o inspetor, ao conduzir tal inspeção, possua um treinamento apropriado, compreendendo claramente as exigências da peça analisada. A principal ferramenta utilizada nesse ensaio são os olhos, podendo ser auxiliados por lupas, microscópios, projetores óticos, gabaritos e comparadores

(Figura 12). Além disso, destaca-se como vantagem a simplicidade de operação e o baixo custo operacional. Em tempos mais recentes, têm-se incorporado recursos adicionais para facilitar a inspeção visual remota, como a utilização de drones (SGS, 2018).

Figura 12- Principais Ferramentas Utilizadas na Inspeção Visual



Fonte: Ruchert (2012)

3.5.1.2. LÍQUIDO PENETRANTE

O END por líquido penetrante é fundamentado na introdução de líquidos em trincas e rachaduras superficiais de peças, aproveitando-se do fenômeno da capilaridade, cuja observação a olho nu é desafiadora (Garcia et al., 2017). Esse método explora a habilidade de líquidos, com coloração vermelha ou fluorescente, de penetrar em pequenas aberturas (Andreucci, 2018).

Segundo a NBR 15691, os ensaios não destrutivos por líquido penetrante são aplicáveis ao longo do processo de fabricação, inspeção final e manutenção, inclusive durante o uso. Esses procedimentos são adequados para identificar descontinuidades, como falta de fusão, corrosão, trincas, dobras, gotas frias e porosidade, que estejam abertas ou conectadas à superfície do material ou componente em análise (ABNT, 2009).

O método de ensaio por LP implica a aplicação de um líquido com características especiais (molhantes) na superfície da peça, que deve estar devidamente higienizada e seca. Esse líquido, ao longo do tempo, penetra nas descontinuidades presentes na peça. Em seguida, remove-se o excesso de líquido para aplicar um produto denominado revelador, que absorverá

o líquido retido nas discontinuidades. A imagem da discontinuidade fica delineada na superfície, sendo avaliada conforme a norma aplicada na fabricação da peça ou material (Mix, 2005; Andreucci, 2013).

Procedimentos para a condução do ensaio de líquido penetrante:

Exame Preliminar da Superfície: Nesta etapa, realiza-se a análise inicial da superfície a ser inspecionada, sendo crucial que os defeitos estejam acessíveis na superfície para garantir a eficácia do método.

Higienização da Superfície (Figura 13): A superfície designada para inspeção é submetida a uma limpeza meticulosa, utilizando-se geralmente um solvente adequado para remover quaisquer impurezas.

Figura 13- Limpeza da Peça



Fonte: Kras (2018)

Aplicação do Agente Penetrante (Figura 14): Consiste na aplicação de um líquido penetrante, comumente colorido em vermelho ou fluorescente, para assegurar a cobertura abrangente da área de interesse.

Figura 14- Aplicação de Líquido Penetrante



Fonte: Inpesolda (2020)

Remoção do Excedente do Penetrante (Figura 15): Após o período de penetração, o excesso de líquido deve ser cuidadosamente eliminado da superfície.

Figura 15- Remoção do Excesso de Líquido



Fonte: Andreucci (2013)

Emprego do Revelador (Figura 16): Esta fase envolve a aplicação uniforme de um material revelador sobre a superfície, muitas vezes tingido em rosa.

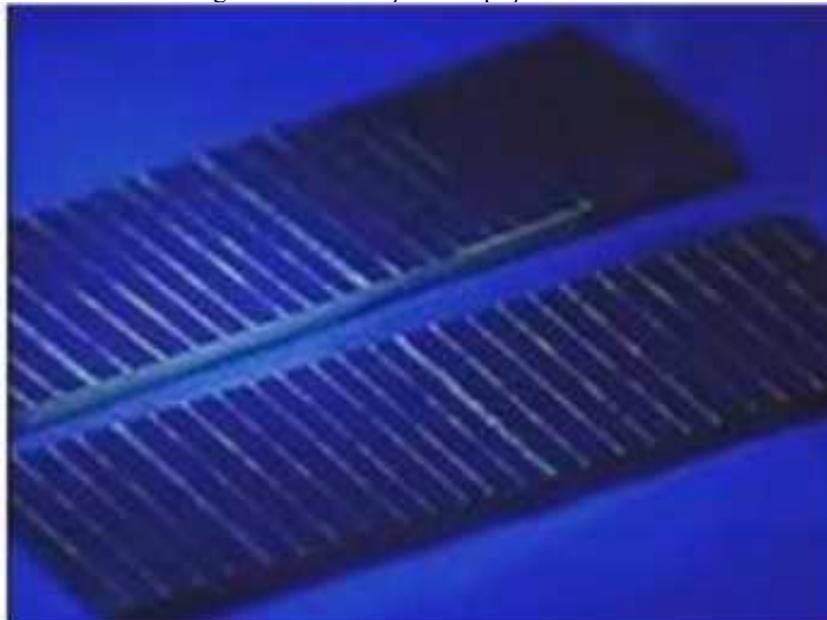
Figura 16- Aplicação do Revelador



Fonte: Andreucci (2013)

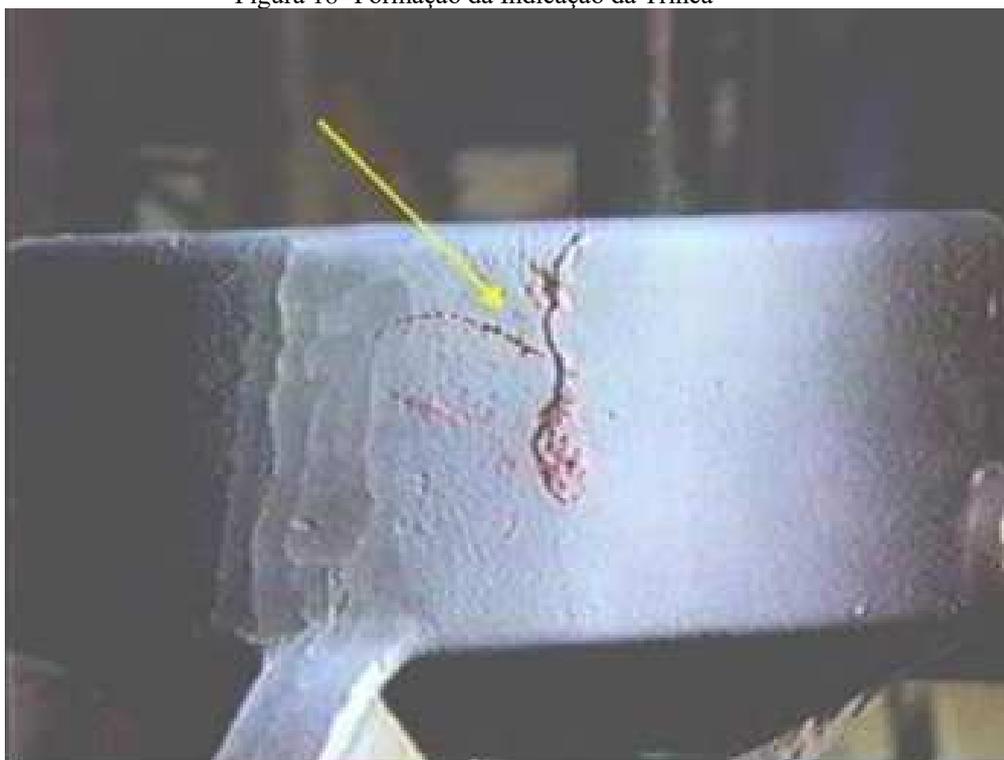
Apreciação ou Avaliação das Indicações Geradas (Figura 17 e 18): A avaliação é conduzida sob condições ótimas de iluminação, podendo ser realizada tanto com luz natural (branca) quanto com luz ultravioleta ("luz negra") (Pereira, 2013).

Figura 17 - Avaliação e Inspeção



Fonte: Andreucci (2013)

Figura 18- Formação da Indicação da Trinca



Fonte: Andreucci (2013)

O ensaio por líquido penetrante destaca-se por sua capacidade de inspecionar peças de variados tamanhos e geometrias (Figura 19), incluindo áreas pequenas e isoladas em superfícies. Além disso, é eficiente na detecção de descontinuidades de dimensões reduzidas. Sua sensibilidade para identificar imperfeições superficiais, aliada à sua praticidade e à dispensa de equipamentos complexos, o tornam uma escolha econômica. As instalações podem ser adaptadas conforme as características das peças, permitindo a automação do processo. Sua aplicação é versátil, abrangendo desde a fase de fabricação até inspeções de manutenção, visando identificar descontinuidades emergentes durante o serviço (Andreucci, 2013).

Algumas limitações da técnica, tais como a incompatibilidade com superfícies porosas ou absorventes, o que pode resultar na retenção parcial do penetrante excedente, prejudicando a interpretação dos resultados. Além disso, a realização adequada das técnicas convencionais está condicionada a uma faixa específica de temperaturas, geralmente entre 10 °C e 52 °C. Certos produtos utilizados podem conter enxofre ou compostos halógenos, e a técnica não é capaz de proporcionar informações sobre a profundidade das descontinuidades identificadas (Andreucci, 2013).

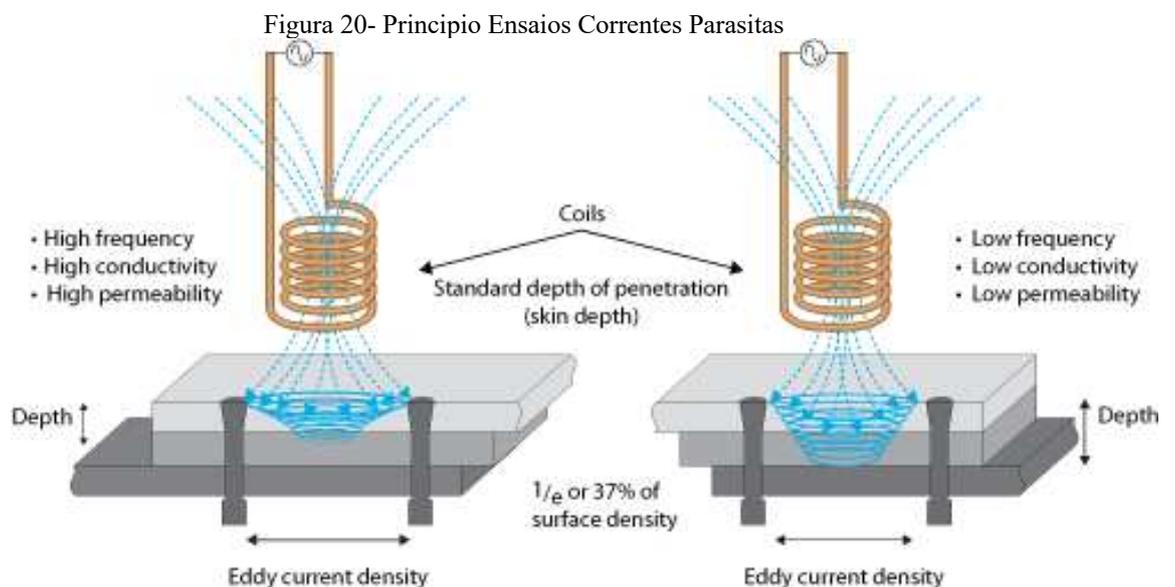
Figura 19– Ensaio de LP em Tubulação Flangeada



Fonte: Inpesolda (2020)

3.5.1.3. INSPEÇÃO POR CORRENTES PARASITAS

Correntes parasitas referem-se a correntes elétricas geradas em um condutor elétrico devido à interação com um campo magnético alternado. Essas correntes circulares manifestam-se perpendicularmente à direção do campo magnético aplicado (Figura 20). Diversos fatores, como a condutividade elétrica, permeabilidade magnética, geometria e homogeneidade do material em análise, influenciam as correntes induzidas (Khan et al., 2008)



Fonte: Evident (2021)

Cada bobina é identificada pelo parâmetro de impedância, que descreve a relação entre a tensão e a corrente. A inspeção mediante correntes parasitas tem como base a Lei da Indução Magnética de *Faraday*. Conforme essa lei, uma alteração na densidade do fluxo magnético ao longo do tempo ocasiona a indução de corrente em um condutor elétrico, como mostra a equação:

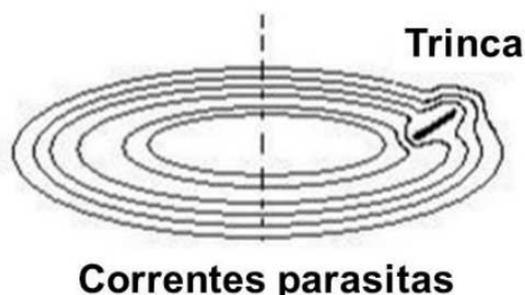
$$\varepsilon = - \frac{d\phi B}{\Delta t} \quad (\text{equação 1})$$

Quando uma bobina de impedância é alimentada alternadamente e se aproxima de um material condutor não magnético, um campo magnético primário penetra o material, gerando correntes parasitas contínuas e circulares. As correntes induzidas resultantes provocam a formação de um campo magnético secundário que age em oposição ao campo primário, levando ao seu enfraquecimento. A parte imaginária da impedância reduz proporcionalmente ao aumento da intensidade das correntes parasitas geradas no material sob avaliação (Placko e Dufour, 1993).

As correntes parasitas também contribuem para o aumento da capacidade de dissipação de energia, ocasionando modificações na parte real da impedância da bobina. Através do monitoramento do sinal de tensão elétrica e corrente, é possível estabelecer correlações entre os valores de impedância medidos e informações específicas do material testado, como condutividade e composição química (Garcia-Martin, Gomez-Gil e Vazquez-Sanchez, 2011).

Trincas e discontinuidades, ao serem percorridas pelo sensor, causam distorções no fluxo das correntes parasitas na peça (Figura 21), resultando em uma nova alteração na impedância observada. Desse modo, ao monitorar ao longo do tempo a impedância do sensor, é factível detectar e dimensionar diversos tipos de defeitos em regiões superficiais e subsuperficiais.

Figura 21 - Perturbação do Fluxo de Correntes Parasitas Provocado pela Presença de uma Trinca



3.5.1.3.1. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Cada material apresenta uma resistência específica ao fluxo de corrente, caracterizada pela condutividade elétrica, σ , ou seu inverso, $1/\sigma$, que representa a resistividade. A condutividade do material influencia diretamente o fluxo das correntes parasitas geradas: quanto maior a condutividade, maior o fluxo dessas correntes na superfície. Materiais com alta condutividade elétrica, como cobre e alumínio, geram correntes parasitas intensas na superfície de teste. Esse efeito oferece a vantagem de produzir uma variação de sinal mais significativa em presença de trincas, enquanto a diferença de fase entre as linhas da trinca e do *Lift-off* é maior para esses materiais. Entretanto, materiais altamente condutores apresentam profundidades de penetração padrão menores para uma frequência fixa em comparação com materiais de baixa condutividade. Fatores como temperatura, composição química, tensões residuais e tratamentos térmicos influenciam a condutividade elétrica e podem ser mensurados pelo método de correntes parasitas (Hansen, 2004).

3.5.1.3.2. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

A permeabilidade magnética refere-se à facilidade com que um material pode ser magnetizado. Em metais não magnéticos, como cobre, alumínio e aço inoxidável austenítico, a permeabilidade magnética é a mesma que a do ar, ou seja, sua permeabilidade relativa é 1. Para metais ferrosos, a permeabilidade relativa pode atingir algumas centenas, influenciando significativamente a resposta das correntes parasitas. A alta permeabilidade magnética reduz a profundidade de penetração padrão, tornando necessária a utilização de frequências de inspeção mais baixas. Além disso, a permeabilidade pode variar consideravelmente em determinadas regiões do metal analisado devido a tensões localizadas, segregações, tratamentos térmicos, entre outros. Em alguns casos, a magnetização do material até a saturação é realizada para tornar constante a permeabilidade em todo o material e eliminar o efeito das variações (Hansen, 2004).

De acordo com a Figura 22 a seguir, podemos ver o equipamento completo de correntes parasitas, com a sonda, o mostrador, o operador e o material a ser inspecionado (Qualidade Online, 2022)

Figura 22– Mostrador Correntes Parasitas



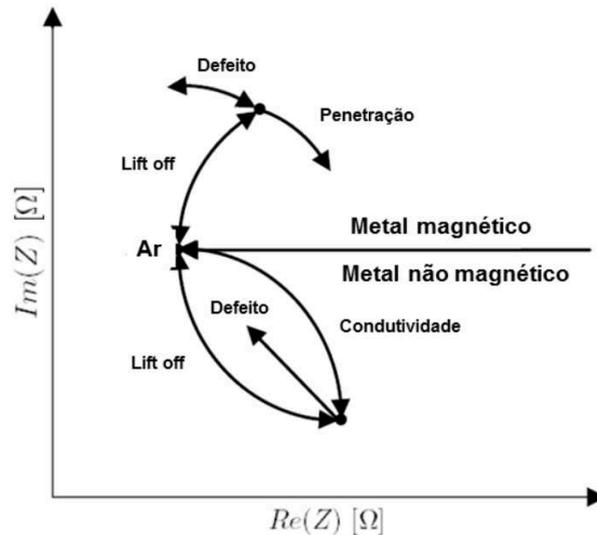
Fonte: Qualidade Online (2022)

3.5.1.3.3. *LIFT-OFF*

Ao aproximar uma bobina superficial energizada alternadamente de um condutor, a impedância da bobina apresenta um determinado valor quando mantida no ar. Conforme a bobina se aproxima do condutor, a impedância inicial é alterada devido à interação do fluxo magnético gerado com o material teste. O campo magnético mais intenso próximo à bobina resulta em uma mudança contínua na impedância até que a bobina esteja diretamente sobre o condutor. Uma vez posicionada sobre o condutor, pequenas variações na proximidade entre a bobina e o condutor alteram a impedância. O efeito do "*Lift-off*" é tão evidente que pequenas variações na aproximação podem mascarar muitas indicações (Hellier, 2001).

Trincas e descontinuidades no material teste modificam as correntes parasitas e, conseqüentemente, a medição da impedância da bobina de leitura. O plano de impedância (Gráfico 11) facilita a interpretação dos resultados de inspeção e o efeito de diferentes fontes de perturbação. Ao se aproximar de materiais ferromagnéticos, o comportamento é diferente. Ao contrário dos materiais não ferromagnéticos, há um aumento na componente imaginária da impedância devido a um efeito de concentração de campo magnético. A componente real, causada pela resistividade do material, aumenta da mesma forma que nos materiais não ferromagnéticos (Rosado, 2009).

Gráfico 11- Plano de Impedância Mostrando Indicações Observadas em Materiais Magnéticos e Não Magnéticos

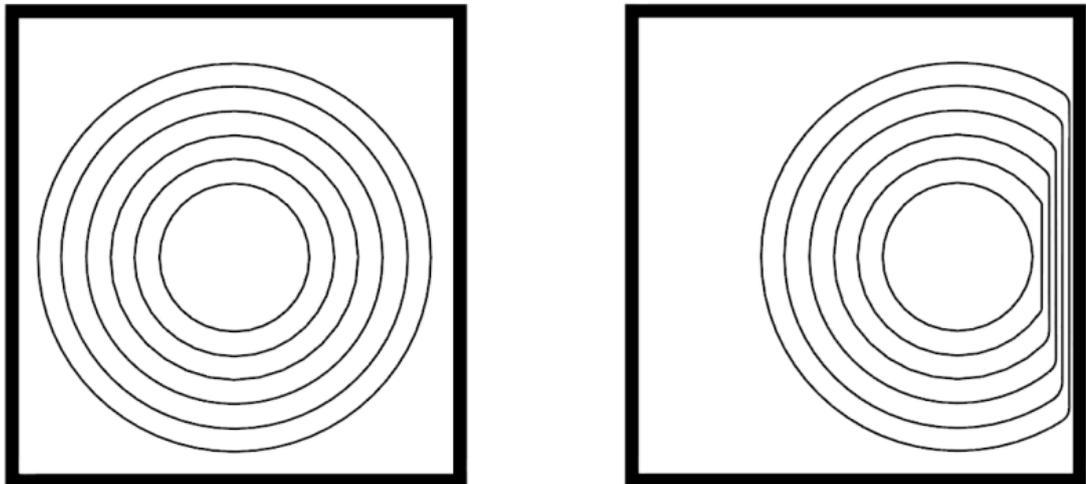


Fonte: Rosado, 2009

3.5.1.3.4. EDGE-EFFECT

Quando a bobina teste se aproxima de uma borda ou da parte final de um elemento em inspeção, as correntes parasitas começam a se distorcer, resultando em uma falsa indicação conhecida como "*Edge-Effect*" ou efeito de borda (Figura 23). Para o circuito de leitura, a borda atua como um buraco ou uma trinca grande. Essa resposta pode mascarar outras variáveis que possam estar presentes, limitando a aplicação do método nessas regiões. O uso de bobinas e, conseqüentemente, de campos magnéticos menores permite a inspeção de regiões mais próximas das bordas sem o "*Edge-Effect*" (Shull, 2002).

Figura 23- Linhas de Fluxo das Correntes Parasitas em um Condutor Representando o Efeito de Borda



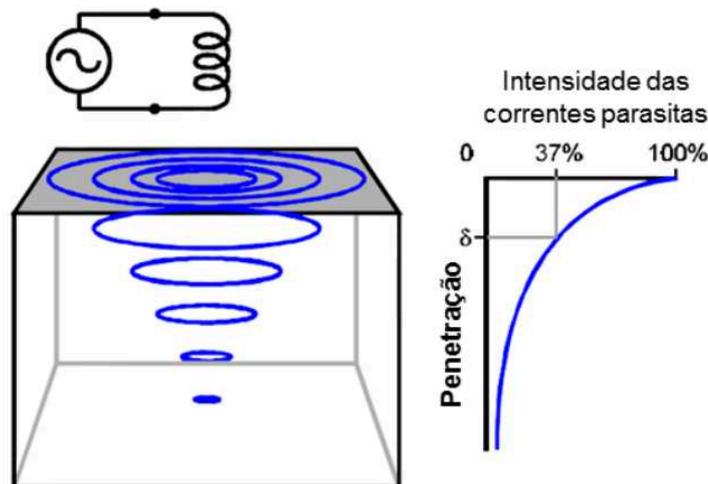
Fonte: Hellier (2001)

3.5.1.3.5. FREQUENCIA E PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

A análise da frequência nas correntes parasitas é um parâmetro crucial na detecção de falhas. À medida que a frequência é ampliada, a sensibilidade a trincas superficiais é aprimorada, possibilitando a identificação de discontinuidades substancialmente menores. Por outro lado, ao reduzir a frequência, a capacidade de penetração das correntes parasitas no material aumenta, permitindo a detecção de defeitos subsuperficiais. A determinação da frequência adequada para uma penetração eficiente em um material específico pode ser realizada por meio de equações ou de diagramas que representam a profundidade padrão de penetração em relação à frequência para diversos materiais (Garcia-Martin, Gomez-Gil e Vazquez-Sanchez, 2011).

A densidade da corrente parasita não permanece constante ao longo da profundidade do material. Ela é mais intensa na superfície e decresce exponencialmente com a profundidade, fenômeno conhecido como "efeito de pele". A equação que descreve a profundidade padrão de penetração (Figura 24) é empregada para elucidar a capacidade de penetração no teste por correntes parasitas, a qual diminui com o aumento da frequência, condutividade ou permeabilidade. Em materiais espessos e homogêneos, a profundidade padrão de penetração é aquela em que a densidade da corrente parasita alcança 37% do valor na superfície do material. Frequências elevadas são adotadas para detecção de defeitos superficiais em materiais ou para mensurar a espessura de chapas finas. Em contrapartida, frequências mais reduzidas são empregadas para identificar defeitos subsuperficiais em materiais altamente condutores, magnéticos ou espessos (Evident, 2021).

Figura 24- Intensidade das Correntes Parasitas em Função da Profundidade de Penetração no Material



Fonte: Hansen (2004)

3.5.1.3.6. APLICAÇÕES

A diversidade de aplicações desenvolvidas para o método de correntes parasitas se deve à sua apurada sensibilidade diante dos seguintes fatores:

- Variações na condutividade
- Inspeção minuciosa de descontinuidades
- Espessura de componentes
- Espessuras de camadas depositadas sobre o material base
- Distância entre o sensor e a peça (alteração no *Lift-off*)
- Variações na permeabilidade

A notável versatilidade desse método resultou em uma ampla gama de aplicações, destacando-se, especialmente, na inspeção de tubulações e componentes da indústria química e petroquímica (Hellier, 2001).

3.5.1.3.7. VANTAGENS E LIMITAÇÕES

A vantagem preponderante desse método é a sua sensibilidade a diversas variáveis, abrangendo condutividade, espessura do material, dimensões de defeitos superficiais e subsuperficiais, camadas de revestimento ou cladeamento no metal base, distância entre a bobina e a peça (*Lift-off*) e variações na permeabilidade. Contudo, essa vantagem também pode ser encarada como a principal limitação, uma vez que a resposta dessas variáveis é somada vetorialmente, e a bobina leitora detecta simultaneamente mais de uma variável, tornando complexa a interpretação isolada de cada fator. Uma análise precisa das variáveis (Tabela 3) individualmente exige conhecimento avançado e treinamento por parte do usuário da técnica (Hellier, 2001).

Tabela 3- Resumo Principais Vantagens e Desvantagens das Correntes Parasitas

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção rápida e segura. • Não necessita necessariamente contato entre o sensor e a peça • Sensível a uma variedade de parâmetros relativos a condutividade, permeabilidade magnética, e geometria (ex. trincas, espessura, revestimentos, dureza e proximidade) • Opera numa faixa larga de temperatura. • Sensores e equipamentos leves, pequenos e portáteis. • Permite utilização de tecnologias "arrays". 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspecciona apenas materiais condutores elétricos • Detecta apenas defeitos superficiais e subsuperficiais, em regiões próximas à superfície, principalmente se tratando de materiais com elevada permeabilidade magnética. • Sensibilidade a mais de uma variável ao mesmo tempo. • Uso de padrões de calibração é necessário na maioria dos casos. • Sensível a variações de lift off e efeito de borda.

Fonte: Hellier (2001); Shull (2002); Hansen (2004)

3.5.1.4. ULTRASSOM

A finalidade primordial do exame por ultrassom consiste na identificação de descontinuidades internas em diversos tipos de materiais, incluindo ferrosos, não ferrosos, metálicos e não metálicos. Esse objetivo é alcançado mediante a introdução de um feixe sônico com características adequadas à estrutura do material em análise. Quando esse feixe é direcionado de maneira propícia em relação à descontinuidade (interface), ele se manifesta na tela do equipamento como um pico ou eco (Santin, 2003).

No decorrer do processo de produção, diversas descontinuidades são geradas, decorrentes, por exemplo, de porosidade, escória, inclusões, dobras de laminação e micro trincas em materiais laminados. Assim sendo, o ensaio por ultrassom, à semelhança de outros métodos não destrutivos, objetiva garantir a qualidade e reduzir a incerteza associada à utilização de materiais em contextos industriais (Santin, 2003). Recentemente, o emprego difundido do ensaio de ultrassom tem abrangido diversos tipos de materiais na indústria, incluindo, por exemplo, aço e alumínio.

Uma descontinuidade também pode ser designada como indicação, representando uma interrupção na estrutura do material, ou seja, uma ausência de homogeneidade em suas características metalúrgicas, não sendo, necessariamente, classificada como um defeito. Por sua vez, um defeito se refere a uma falha ou conjunto de imperfeições que torna o material, ou parte dele, incapaz de atender aos requisitos mínimos de aceitação de sua norma de fabricação, resultando, assim, em sua rejeição (Trombini, 2015).

De maneira adicional, cabe ressaltar que este método não destrutivo apresenta a capacidade de identificar algumas irregularidades superficiais. A efetiva execução desse procedimento demanda a presença de operadores devidamente capacitados e qualificados, bem como a estrita observância de normas técnicas, manuais, procedimentos, e a utilização de dispositivos, transdutores, acoplantes, blocos de calibração e referência (Santin, 2003).

O ultrassom, caracterizado como uma onda mecânica com frequências (F) superiores ao alcance da audição humana, ultrapassando os 20 kHz (David e Cheeke, 2002), é comumente gerado por transdutores, que convertem pulsos elétricos em vibrações mecânicas ultrassônicas, viabilizando sua propagação em um meio específico (Schmerr e Lester, 2016).

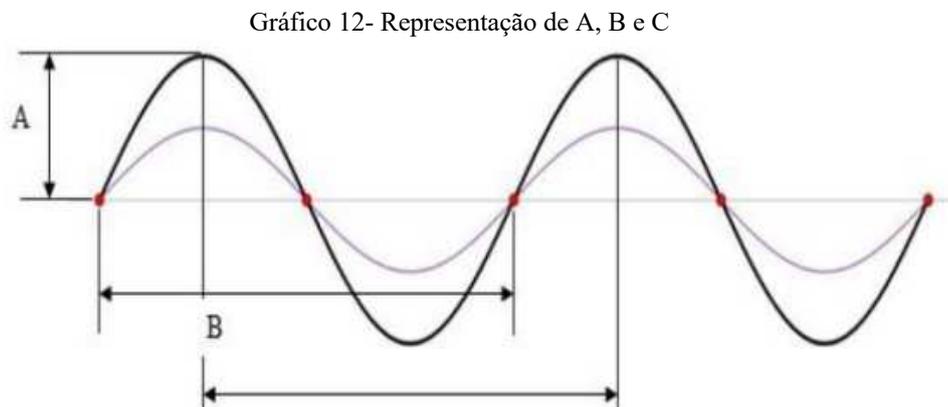
Dentro do escopo da terminologia do ultrassom, conforme Gráfico 12:

Comprimento de onda (λ): Representa a distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos, dependente da frequência e da velocidade (Leite, 1966).

Período (T): Corresponde ao menor intervalo de tempo de repetição do fenômeno periódico, sendo também o tempo necessário para que uma onda completa percorra a distância entre duas cristas (ou vales) consecutivas (Leite, 1966).

Frequência (F): É a contagem de períodos por segundo, medida em Hertz (Hz), e sua magnitude depende exclusivamente do período (T). Quanto maior a frequência (F), mais significativo é o número de oscilações (ciclos) por segundo, resultando em uma menor distância entre cristas, vales, ou zonas de compressão e diluição. Importante ressaltar que a frequência permanece fixa no transdutor utilizado neste método de ensaio, adquirido especificamente para operar em uma frequência determinada (Leite, 1966).

Amplitude (A): Refere-se à elongação máxima, ou seja, ao ponto de máximo no eixo "Y" (Leite, 1966).



Fonte: Halliday et. al (2012)

A - Amplitude: é a altura da crista da onda, medida a partir da superfície.

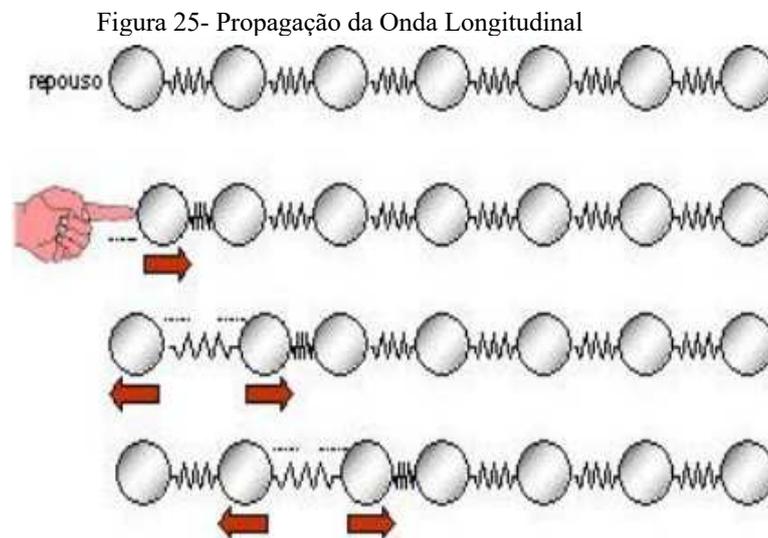
B - Ciclo: movimento completo da onda, partindo de sua posição original e voltando.

C - Comprimento de onda: é a distância de uma crista à outra.

Frequência: é o número de ciclos pela unidade de tempo e é dada em Hertz [Hz]

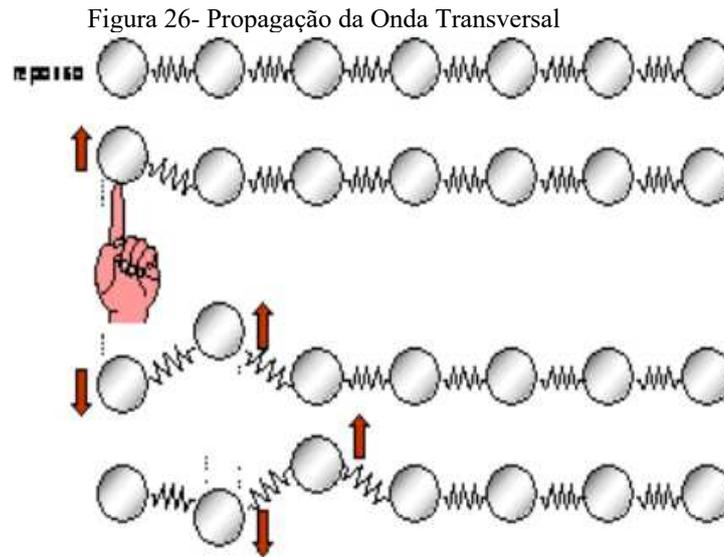
Dentre os tipos de ondas ultrassônicas, destacam-se:

Ondas longitudinais ou ondas de compressão (Figura 25): Ocorre quando as partículas do meio vibram na mesma direção de propagação da onda, sendo sua propagação viável em sólidos, líquidos e gases. Além disso, é considerada a onda de maior velocidade (Andreucci, 2018).



Fonte: Andreucci (2018)

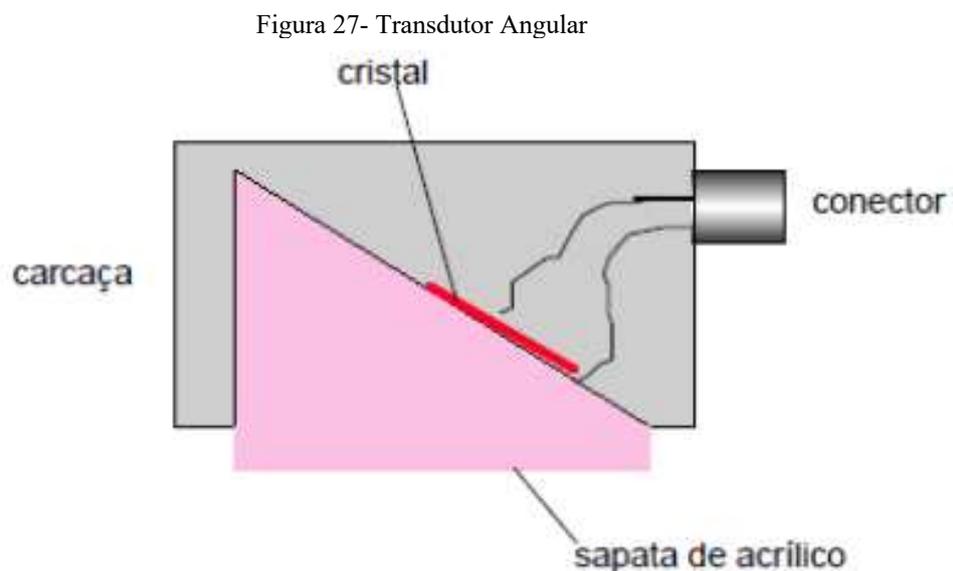
Ondas transversais ou ondas de corte ou cisalhamento (Figura 26): Evidencia-se pela vibração perpendicular à direção de propagação, não se propagando em líquidos e gases devido à ausência de ligações mecânicas nesses meios. Sua velocidade de propagação, aproximadamente metade da onda longitudinal, a torna ideal para ensaios com transdutores angulares (Andreucci, 2018).



Fonte: Andreucci (2018)

3.5.1.4.1. TRANSDUTORES

Os transdutores desempenham um papel crucial na emissão das ondas ultrassônicas, incorporando um cristal piezelétrico que vibra quando estimulado por pulsos elétricos. Os cabos coaxiais transportam os pulsos elétricos para os transdutores, sendo estes considerados itens de consumo, sujeitos a desgaste se não manuseados com o devido cuidado. No ultrassom *Phased Array*, é usual o transdutor angular (Andreucci, 2018).



Fonte: Andreucci (2018)

O acoplante, substância líquida ou pastosa, desempenha o papel de facilitar a transmissão das ondas ultrassônicas do transdutor para a peça em ensaio, evitando a presença de ar entre os meios. A escolha do acoplante é orientada pelas condições superficiais da peça e pelo tipo de material a ser inspecionado (Olympus, 2007).

Em superfícies bem acabadas, uma camada de óleo fino é suficiente, enquanto superfícies rugosas podem demandar um acoplante mais viscoso, como gel, graxa, vaselina líquida ou em pasta, ou uma combinação destes. A compatibilidade entre o acoplante e o material a ser ensaiado deve ser verificada (Santin, 2003).

3.5.1.4.2. ULTRASSOM *PHASED ARRAY*

A abordagem não destrutiva do ultrassom *Phased Array* emprega princípios análogos aos do ultrassom convencional, possibilitando a detecção de descontinuidades internas em diversos materiais como substituto às técnicas manuais e radiográficas. Destaca-se por registrar de maneira abrangente a área sob inspeção. Originada no domínio médico, a tecnologia *Phased Array* foi adotada na esfera industrial na década de 1980, concomitantemente ao avanço na produção de materiais piezo-compósitos, possibilitando a confecção de transdutores *Phased Array* com geometrias complexas (Olympus, 2010). As características distintivas da inspeção por ultrassom *Phased Array* atendem diretamente a diversas exigências de inspeção (Martin, 2012).

1. Eficiência: A varredura eletrônica no ultrassom *Phased Array* viabiliza uma velocidade de inspeção significativamente superior à abordagem mecanizada e, notavelmente, à abordagem manual;

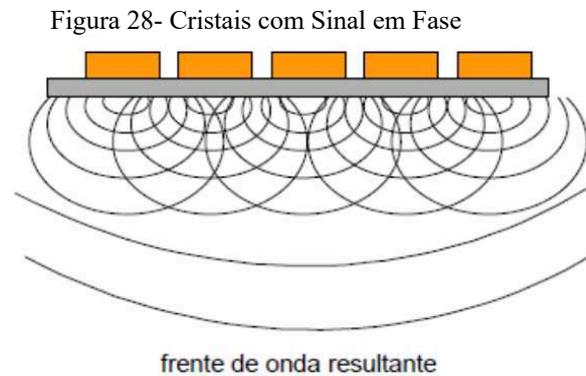
2. Versatilidade: Um único cabeçote *Phased Array* pode ser empregado em uma extensa gama de aplicações, ao contrário dos cabeçotes ultrassônicos convencionais;

3. Ajustes Eletrônicos: Calibrações são executadas por meio do carregamento simples de um arquivo, permitindo a variação de parâmetros por meio de diferentes configurações;

4. Cabeçotes Compactos: Em cenários de acesso restrito, um pequeno cabeçote *Phased Array* pode suprir a funcionalidade de vários cabeçotes convencionais.

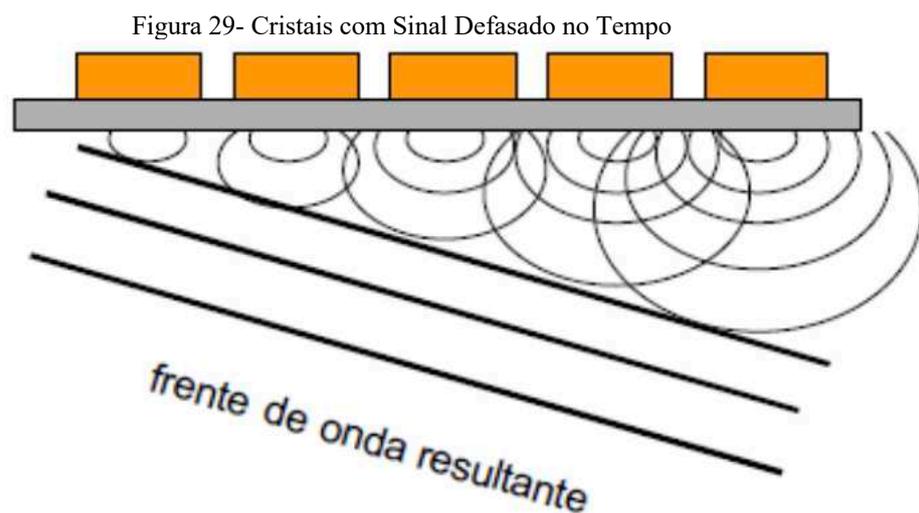
Os transdutores *Phased Array* consistem em múltiplos cristais (de 10 a 256 elementos), cada um conectado a circuitos independentes com a capacidade de controlar o tempo de excitação de forma autônoma entre os cristais. Isso resulta na adaptação do comportamento do feixe sônico emitido pelo conjunto de cristais ou pelo transdutor (Martin, 2012). Na Figura 28, visualiza-se o conjunto de cristais operando em fase, onde o dispositivo de ultrassom realiza a

excitação simultânea de todos os cristais, gerando uma onda perpendicular ao plano da superfície (Andreucci, 2018).



Fonte: Andreucci (2018)

Já na Figura 29, o aparelho de ultrassom executa a excitação dos cristais de forma defasada, isto é, o tempo em que cada cristal é excitado é retardado no tempo, e o resultado é uma frente de onda angular à superfície (Andreucci, 2018).



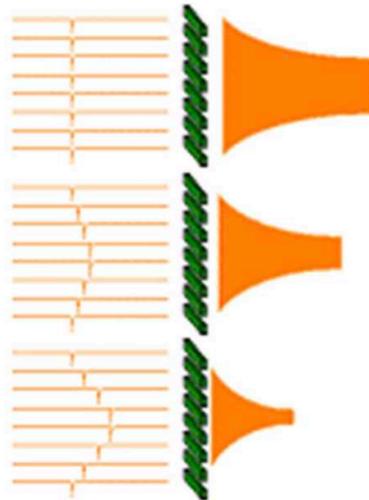
Fonte: Andreucci (2018)

3.5.1.4.3. FOCALIZAÇÃO ELETRÔNICA

A focalização eletrônica (Figura 30), é baseada no emprego de retardos eletrônicos aplicados durante a emissão e a recepção ao longo de cada canal do cabeçote. Esses retardos têm efeito similar a lentes de focalização acústica do feixe, permitindo também a focalização em diferentes profundidades.

A focalização eletrônica permite o uso de apenas um cabeçote (*Phased Array*) ao invés da necessidade de vários cabeçotes convencionais (um único elemento) com diferentes distâncias focais. Essa aplicação é comum na inspeção de chapas grossas, geralmente maiores de 25 mm de espessura (Martin, 2012).

Figura 30- Esquema de Focalização Eletrônica



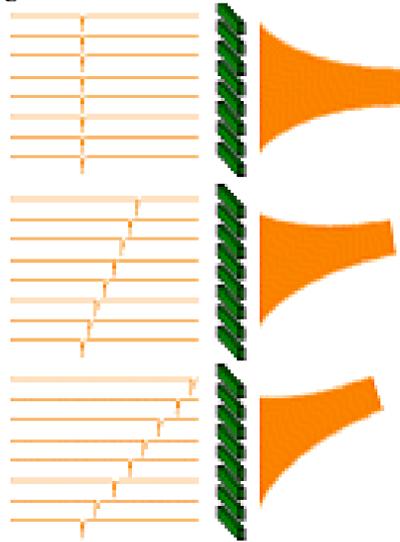
Fonte: Ginzel (2009)

3.5.1.4.4. DEFLEXÃO ELETRÔNICA

A deflexão eletrônica é ilustrada na Figura 31. Emprega as leis de retardo para obter a focalização eletrônica. Nesse caso, as leis são calculadas para obter feixe emitido com um ângulo de incidência que pode ser modificado simplesmente alterando-se a lei de retardo (todos os retardos aplicados a cada um dos canais concernentes) (Ginzel, 2008).

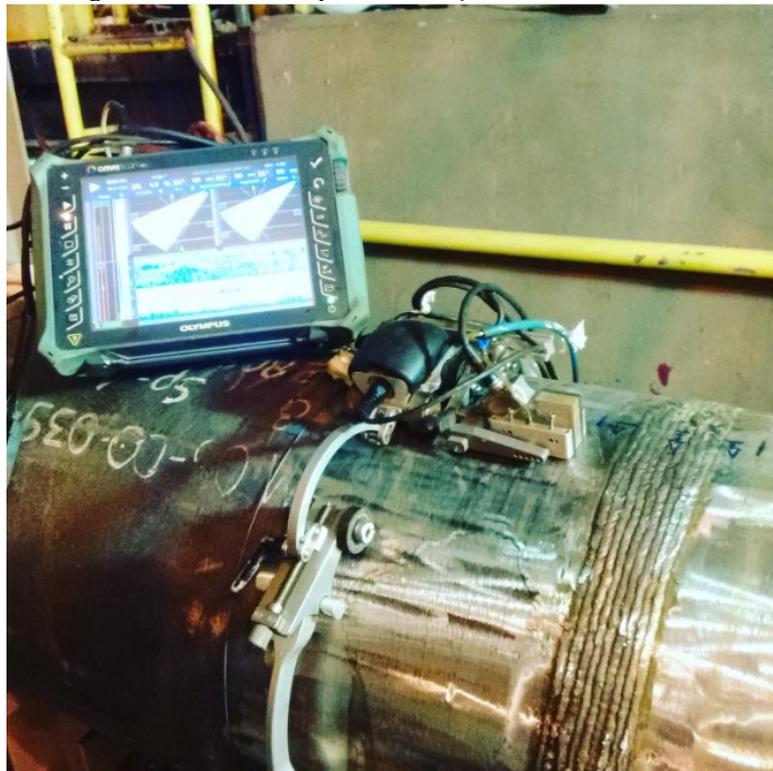
A deflexão pode ser conseguida em alguns casos sem a necessidade do uso de uma cunha permitindo a inspeção de regiões restritas (geometria complexa) de peças (Ginzel, 2009).

Figura 31- Deflexão Eletrônica



Fonte: Ginzel (2009)

A técnica de inspeção com matriz de transdutores *Phased Array* (Figura 32) tem a capacidade de alterar as características acústicas normais do feixe ultrassônico produzido, podendo não só modificar o ângulo de refração do feixe como controlar a profundidade do ponto focal (Ginzel, 2008).

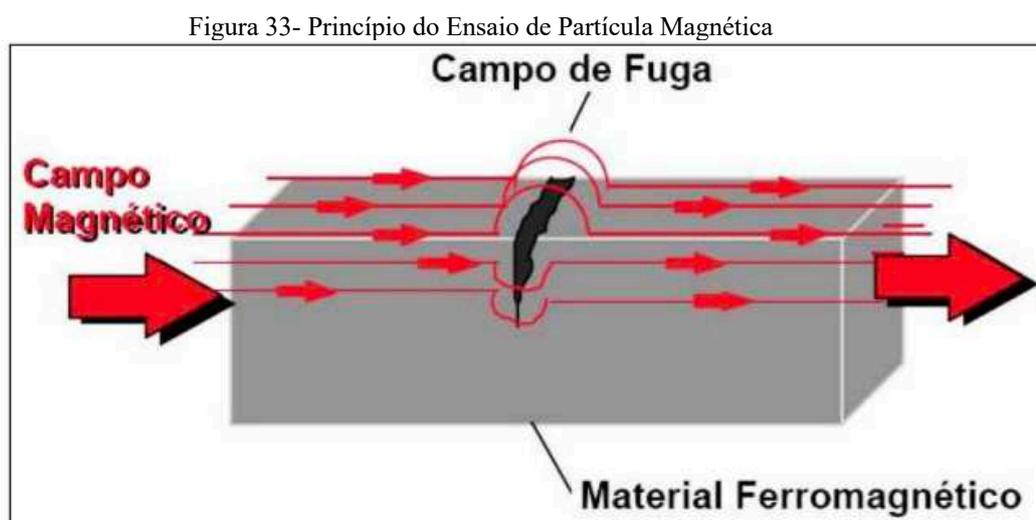
Figura 32- *Phased Array* em Tubulação de Processo

Fonte: Utmaax (2023)

3.5.1.5. PARTICULAS MAGNÉTICAS

O método de inspeção por partículas magnéticas é uma técnica não destrutiva empregada na avaliação de materiais ferromagnéticos, visando detecção e localização de discontinuidades. Esta técnica possui ampla aceitação, principalmente devido à sua operacionalidade simplificada. A execução desse ensaio implica submeter a peça, ou uma região específica dela, a um campo magnético. Caso existam discontinuidades, ocorrerá a criação de campos de fuga ou dispersão, resultantes da falta de continuidade nas propriedades magnéticas da peça (Oliveira, 2014).

O princípio fundamental desse ensaio fundamenta-se na magnetização do material ou peça em teste, gerando um campo magnético uniforme que estabelece linhas de fluxo magnético. Essas linhas sofrem distorções ao encontrar discontinuidades, geralmente em uma direção transversal à orientação do campo magnético, como representado na Figura 33.



Fonte: Santos (2008)

A utilização das partículas magnéticas proporciona ao ensaio uma sensibilidade significativa, aliada à economia e praticidade. Estas partículas são aglomeradas nos campos de dispersão, decorrentes da atração gerada pelos polos magnéticos. Para a detecção adequada de discontinuidades, tanto em termos de formato quanto de dimensão, os campos de fuga devem possuir resistência suficiente para induzir uma considerável concentração dessas partículas (Oliveira, 2014).

Amplamente empregado no setor metal-mecânico, englobando caldeirarias, tubulações, indústria naval, ferroviária, automotiva, de máquinas, equipamentos agrícolas, estruturas, entre

outros, esse ensaio estabelece um ângulo mínimo de 30° entre o campo magnético formado e a descontinuidade. A máxima sensibilidade é alcançada quando o campo magnético é perpendicular à orientação da imperfeição. Portanto, para a detecção, as descontinuidades devem estar posicionadas entre 30° e 90° em relação ao campo magnético, geralmente aplicado em duas direções perpendiculares (Santos, 2008).

No que se refere aos métodos de magnetização, uma peça metálica pode ser magnetizada por diferentes abordagens, como campos longitudinais, circulares ou multidirecionais, sendo a escolha orientada pela geometria e dimensões da amostra (Oliveira, 2014).

Outro aspecto relevante é a ausência de um tamanho mínimo para a descontinuidade, possibilitando que, para materiais ferromagnéticos, o ensaio por partículas magnéticas seja mais eficaz do que os métodos superficiais tradicionais, inclusive superando o ensaio por líquidos penetrantes (Moreira, 2014).

Segundo Santos (2008), as principais vantagens da inspeção por partículas magnéticas compreendem:

- Capacidade de detectar descontinuidades superficiais e subsuperficiais;
- Execução relativamente simples e rápida;
- Preparação das peças para o ensaio de forma simples, sem a necessidade de as descontinuidades estarem obrigatoriamente abertas à superfície, ao contrário do ensaio com líquidos penetrantes;
- Tamanho e forma da peça inspecionada têm pouca ou nenhuma influência nos resultados.

No entanto, como observado por Moreira (2014), algumas limitações incluem:

- Aplicabilidade restrita aos materiais ferromagnéticos, como aços estruturais ao carbono, de baixa e média liga, ferros fundidos, ligas à base de cobalto e aços inoxidáveis ferríticos;
- Influência significativa da forma e orientação das descontinuidades em relação ao campo magnético nos resultados do ensaio, muitas vezes exigindo a realização de múltiplos ensaios na mesma peça;
- Necessidade ocasional de desmagnetização da peça após a inspeção;
- Uso geralmente de correntes elétricas elevadas, podendo resultar em aquecimento indesejado das partes examinadas.

3.5.1.6. PIGS

Um dos desafios significativos confrontados ao transportar óleo é a acumulação de ceras ao longo da superfície interna do sistema de condução, dependendo da magnitude, podendo resultar em obstrução completa no movimento do fluido (Dementino, 2018).

Uma das maneiras de abordar a questão é empregar o uso de *PIGs*. Esses instrumentos percorrem a tubulação, devido às discrepâncias de pressão, efetuando a remoção das impurezas nas superfícies internas do sistema. Existem diversas categorias de *PIGs*, embora essencialmente se dividam em modalidades de higienização e instrumentação. Por meio de sua aplicação, é possível estender a durabilidade do sistema de tubulação, sem a necessidade de interrupção total na produção (Curvelo, 2016).

Os *PIGs* podem ser classificados em duas categorias: "*Utility PIGs*" ou *PIGs* de limpeza (Figura 34) e "*In line inspection tools*" ou "*Smart PIGs*" (*PIGs* instrumentado). Os "*Utility PIGs*" realizam função de limpeza, separação de produtos, remoção de água e desamassamento dos dutos (Diaz, 2008). Quando utilizados para remoção de detritos acumulados (p.ex. parafina) na parte inferior do duto permitem restaurar a seção reta original da tubulação. A Figura a seguir apresenta três tipos de *PIGs* de limpeza disponíveis no mercado.

Figura 34- Tipos de *PIGs* de Limpeza



Fonte: Souza (2005)

Os *PIGs* de limpeza têm a única finalidade de eliminar resíduos, como a parafina, que se acumulam naturalmente durante o transporte de petróleo. Em contrapartida, os *PIGs* instrumentados estão equipados com uma variedade de sensores destinados a avaliar a integridade do sistema e fornecer informações precisas para auxiliar em potenciais reparos na tubulação. Os *PIGs* são dispositivos empregados, principalmente, no transporte de petróleo para

garantir a desobstrução da tubulação através da remoção da sujeira que adere à parede interna do duto. Outra aplicação dos *PIGs* ocorre na inspeção da integridade da parede interna dos dutos (Curvelo, 2016).

A principal benefício ao utilizar esses dispositivos é a capacidade de identificar falhas e limpar a tubulação sem precisar retirar a própria tubulação, evitando assim a interrupção da produção e resultando em custos operacionais mais baixos. No entanto, quando o *PIG* é empregado em tubulações de dimensões consideráveis e/ou longas distâncias, geralmente resulta em um aumento nos custos operacionais (Cordell e Vanzart, 2003).

Para a movimentação dentro dos dutos, primeiro, o *PIG* é inserido em uma estação de lançamento acima do solo (*PIG Launcher*)(Figura 35) com um diâmetro interno superior ao da tubulação. Ele é deslocado pelo próprio fluido presente na linha de produção até alcançar a estação receptora (*PIG Receiver*). Os lançadores, bem como os receptores são desenvolvidos para atender aos requisitos específicos dos dutos, seguindo normas de projetos, implementadas pela *ASME* ou *API*, de projetos mecânicos aplicáveis (Viana, 2016).

Figura 35- *PIG Launcher*



Fonte: Batvaz (2019)

Normalmente, os *PIGs* voltados para higienização não apresentam sistemas de coleta de dados. Existem diversas categorias de *PIGs* de limpeza que são escolhidos com base em uma análise conduzida por especialistas, considerando informações sobre o tipo de substância

transportada, as dimensões do duto e a eventual rigidez do material incrustado. Alguns de seus benefícios podem ser citados, como:

Melhora na eficiência do fluxo do fluido transportado devido a parede interna está limpa;

Reduz a contaminação do produto transportado;

Reduz o dano abrasivo a equipamentos em tubulações, tais como válvulas e instrumentos;

Facilita a secagem das tubulações. (Viana, 2016)

3.5.1.6.1. *PIGs* INSTRUMENTADOS OU INTELIGENTES

Os *PIGs* instrumentados, também conhecidos como *smart PIGs* ou *intelligent PIGs* (Figura 36), diferentemente dos *PIGs* de limpeza são instrumentos que, além de avaliarem a integridade interna do sistema de tubulação, registram dados com o propósito de oferecer informações sobre as condições da linha, incluindo sua extensão e a localização de eventuais defeitos. Conforme relatado por Sarti, Araújo e Pinto (2011), as informações normalmente examinadas por esses *PIGs* referem-se à geometria do sistema de tubulação. No entanto, a diversidade de dados fornecidos é significativa, incluindo, entre outros:

Curvatura da tubulação;

Perfil da tubulação;

Temperatura e pressão;

Perda de metal perda e detecção de corrosão;

Inspeção fotográfica;

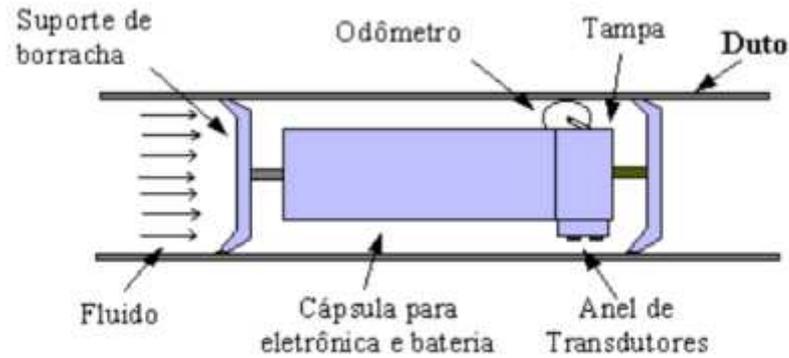
Detecção de trincas;

Mensuração da deposição de resíduos;

Detecção de vazamentos;

Amostragem do produto;

Mapeamento

Figura 36- Exemplo de *PIG* Instrumentado Inserido no Duto

Fonte: Mazzini (2009)

Para efetuar a análise em busca de imperfeições no interior do duto, os *PIGs* instrumentados necessitam carregar em suas cápsulas sensores capazes de identificar a falha ou interrupção desejada. Tais dispositivos conseguem identificar e mensurar as dimensões de defeitos menores, além de fornecer informações sobre a localização correspondente (Mazzini, 2009).

Existem dois tipos de *PIGs* instrumentados: o *PIG* geométrico (Figura 37) e o *PIG* de corrosão (Figura 38). O primeiro é uma ferramenta equipada com sensores múltiplos que pode identificar e mensurar ovalizações, reduções de diâmetro e curvaturas. Esses dispositivos são projetados para operar em tubulações com diâmetros variando de 3” a 42” . Enquanto isso, o segundo é uma ferramenta instrumentada de alta resolução, com uma significativa capacidade de registro de dados, capaz de localizar, quantificar e distinguir perdas de espessura (interna e externa) na parede do duto, utilizando a técnica de *MFL* ou vazamento de campo magnético. Esses dispositivos são projetados para operar em dutos com diâmetros variando de 6” a 2” (Pipeway, 2012).

Figura 37- *PIG* Geométrico

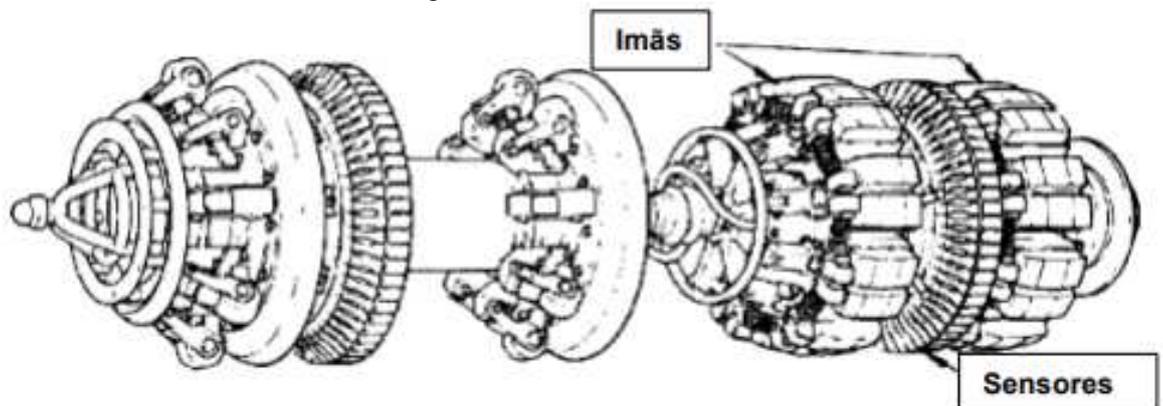
Fonte: Curvelo (2016)

Figura 38- *PIG* de Corrosão 16"

Fonte: Curvelo (2016)

3.5.1.6.2. *PIG* MAGNÉTICO DE CORROSÃO

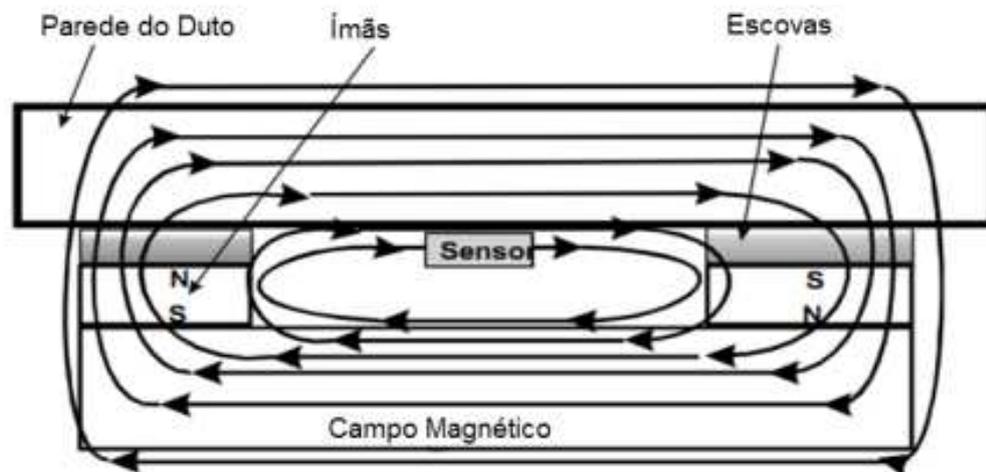
Os *PIG* de inspeção de corrosão utilizam a tecnologia *MFL* (Figura 39) que se constitui em um sistema formado por ímãs na configuração do *PIG*, no qual é introduzido um amplo fluxo magnético uniforme na superfície da tubulação. A partir desse ponto, toda vez que ocorrer uma interrupção desse fluxo, presume-se que, naquele ponto específico, houve deterioração do material metálico, embora não seja viável afirmar se ocorreu interna ou externamente. Para essa finalidade, são empregados sensores discriminadores do tipo *Hall* (Curvelo, 2016).

Figura 39- *PIG MFL*

Fonte: Tiratsoo (1992)

A metodologia *MFL* envolve a implementação de um campo magnético (Figura 40), sendo transversal ou longitudinal, na superfície do tubo até atingir sua saturação magnética. Conforme a ferramenta se move, isso é realizado por meio do sistema de magnetização do *PIG* (ímãs) (Araújo, 2012). A Figura que segue, ilustra um caso em que um tubo íntegro é atravessado por um campo magnético uniforme, com linhas paralelas à superfície do mencionado tubo.

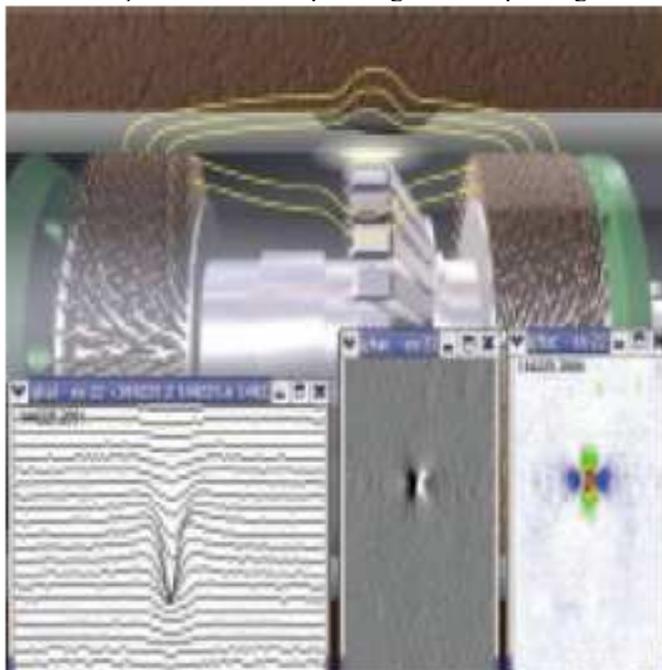
Figura 40- Campo Magnético Uniforme pela Parede do Duto



Fonte: Araújo (2012)

Conforme destacado por Araújo (2012), quando há irregularidades, ocorre uma dispersão do campo magnético, a qual é captada pelos sensores e registrada pelo sistema de coleta de dados. Dessa forma, a detecção de uma anomalia (Figura 41) só acontece na presença de uma dispersão no campo magnético. Ilustra-se uma irregularidade no tubo, resultando em uma alteração no campo magnético, evidenciada pelo desvio ou dispersão das linhas (que não permanecem mais paralelas ao tubo) e registrada pelo sistema de dados.

Figura 41- Detecção de Anomalia pela Fuga de Campo Magnético



Fonte: Araújo (2012)

3.5.1.7. TESTES HIDROSTÁTICOS

O TH tem como propósito a verificação da presença de vazamentos ou rupturas em equipamentos industriais, a exemplo de tanques, tubulações ou outros dispositivos na esfera *Onshore* (Filho, 2004).

Este procedimento é executado com os equipamentos fora de operação, sendo pressurizados com água (ensaio hidrostático), ar comprimido (ensaio pneumático) ou outro fluido disponível, a pressões que ultrapassam as operacionais ou de projeto, frequentemente atingindo 1,5 vezes a PMTA. Assim, busca-se simular condições operacionais mais rigorosas do que as normalmente encontradas, assegurando que, em circunstâncias usuais (com pressões mais baixas), não ocorram falhas (Huppel, 2009).

O exame hidrostático é categorizado como um método não destrutivo, como requerido pelas diretrizes da *ASME*, e sua execução é necessária em intervalos regulares ou sempre que um equipamento é fabricado, passa por reparos ou é submetido a transporte (Huppel, 2009).

A imposição da pressurização é conduzida por meio de dispositivos de bombeamento de pressão elevada. Esse procedimento, de natureza cíclica, é minuciosamente documentado para garantir a confiabilidade integral dos resultados obtidos. A pressão aplicada em qualquer ponto do trecho submetido ao teste é mantida em níveis iguais ou superiores à "pressão mínima de

teste" e, simultaneamente, é estritamente regulada para não ultrapassar a "pressão máxima de teste," uma variável predefinida durante a fase de planejamento (Andrade, 2004).

Segundo definição da NBR 12712, Teste Hidrostático define-se como um método que atesta a robustez mecânica de um tubo ou sistema de tubulação, verificando se estão em consonância com as especificações técnicas ou as condições operacionais estipuladas.

As seções não subterrâneas da tubulação e seus acessórios são devidamente identificadas para alertar sobre a presença de elevada pressão. A conduta contendo o fluido de ensaio (água) permanece sob pressão por um mínimo de 24 horas, com a pressão mantida entre 40% e 60% da pressão de teste, visando a estabilização do sistema. Após esse período, a pressão é gradualmente elevada até atingir 100% da pressão de teste especificada, permanecendo nesse patamar por 1 hora. Posteriormente, o sistema é despressurizado até alcançar 50% da pressão de teste determinada. A partir desse ponto, a pressurização é novamente aplicada, atingindo 70% da pressão de teste determinada. A pressurização é incrementada em etapas constantes, com intervalos mínimos de 3 minutos entre elas, até alcançar 100% da pressão especificada, mantendo-se nesse nível por no mínimo 3 horas (Andrade, 2004).

Para a obtenção da aprovação no teste hidrostático, é admissível uma variação máxima de 0,5% da pressão de teste especificada ao longo de um período de 24 horas.

Simultaneamente, outra consideração de grande importância diz respeito à eventualidade da pressão interna do sistema exceder o limite máximo preestabelecido para o teste. Nessa situação, torna-se imperativo realizar uma diminuição da pressão interna, visando preservar a integridade física do sistema (Andrade, 2004).

O teste engloba tanto dutos novos, como dutos já empregados nas linhas de distribuição, e apresenta inúmeros fatores positivos de obtenção de resultados. No caso de tubulações virgens, com o referido teste, obtém-se dados relevantes de sua integridade estrutural, bem como classe de resistência mecânica, alívio de tensões oriundas da montagem, além de remoção e imobilização de defeitos. Nos dutos existentes verifica-se a integridade estrutural e resistência mecânica para a PMOA, podendo requalificar a tubulação em questão para novas condições operacionais superiores aquelas anteriormente qualificadas. Recomenda-se essa avaliação para dutos que tenham permanecido por mais de 5 anos desativados ou fora de operação, e que não possua um critério adequado de hibernação (Dias, 2011).

No planejamento do duto, é necessário levar em conta a escolha das espessuras das paredes, considerando a viabilidade de conduzir testes hidrostáticos em segmentos extensos, mesmo em áreas com terreno acidentado. É fundamental manter uma atenção constante aos aspectos econômicos e de segurança.

Segundo a norma ABNT 15280-1 verifica-se requisito de teste hidrostático em oleodutos com os dados da Tabela 4 abaixo.

Tabela 4- TH em Oleodutos

Categoria do fluido	Ensaio hidrostático				PMOA o menor valor entre:
	Ensaio de resistência		Ensaio de estanqueidade		
	Min. Nota 2	Máx.	Min. Nota 2	Máx.	
I	1,25 x PMO	A pressão que produzir uma tensão circunferencial equivalente a 100 % do "SMYS" no ponto mais baixo do trecho de ensaio (Nota 1)	1,1 x PMO	A pressão que produzir uma tensão circunferencial equivalente a 90 % do "SMYS" no ponto mais baixo do trecho de ensaio	Pressão mínima atingida no ensaio de resistência mecânica dividida por 1,25 e Pressão de projeto
II	1,5 x PMO	A pressão que produzir uma tensão circunferencial equivalente a 100 % do "SMYS" no ponto mais baixo do trecho de ensaio (Nota 1)	1,1 x PMO	A pressão que produzir uma tensão circunferencial equivalente a 90 % do "SMYS" no ponto mais baixo do trecho de ensaio	Pressão mínima atingida no ensaio de resistência mecânica dividida por 1,5 e Pressão de projeto

Fonte: ABNT 15280-1

Segundo a ASME B16.5 as pressões máximas admissíveis, em bar, seguem a Tabela 5 abaixo:

Tabela 5- Pressões Máximas Admissíveis

Classe Temp. (°C)	150	300	600	900
-30 a 40	19,6	50,8	101,7	152,5
80	18,3	47,6	95,2	142,8
120	16,9	45,9	91,9	137,8

Fonte: ASME B16.5

NOTA 1 Para temperaturas superiores a 40 °C, as pressões máximas admissíveis não encontradas na tabela podem ser obtidas por interpolação linear.

NOTA 2 A Tabela considera flanges em aço carbono. Para flanges de outros materiais ou outras classes de pressão, consultar o ASME B 16.5.

NOTA 3 A faixa padronizada pelo ASME B 16.5 para DN é ½ pol a 24 pol, exceto o DN 22 pol.

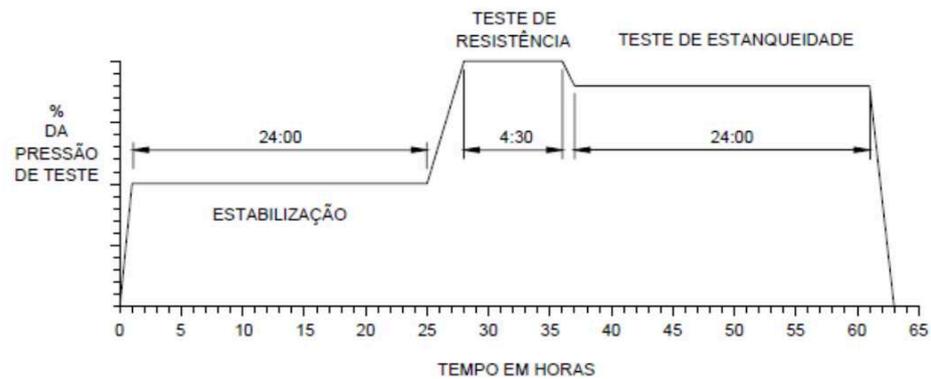
Requisitos de teste para tubulações de aço que terminam na tensão circunferencial (Tabela 6) para operar com tensões circulares de 30% ou mais do limite de escoamento mínimo especificado do tubo

Tabela 6- Requisitos de teste para tubulações de aço que terminam na tensão circunferencial para operar com tensões circulares de 30% ou mais do limite de escoamento mínimo especificado do tubo

1 Location Class	2 Maximum Design Factor, F	3 Permissible Test Medium	4 Pressure Test Prescribed		6 Maximum Allowable Operating Pressure, the Lesser of
			Minimum	Maximum	
1 Division 1	0.8	Water	$1.25 \times MOP$	None	$TP \div 1.25$ or DP
1 Division 2	0.72	Water	$1.25 \times MOP$	None	$TP \div 1.25$ or DP
	0.72	Air or Gas [Note (1)]	$1.25 \times MOP$	$1.25 \times DP$	$TP \div 1.25$ or DP
2	0.6	Water	$1.25 \times MOP$	None	$TP \div 1.25$ or DP
	0.6	Air [Note (1)]	$1.25 \times MOP$	$1.25 \times DP$	$TP \div 1.25$ or DP
3 [Note (2)]	0.5	Water [Note (3)]	$1.50 \times MOP$	None	$TP \div 1.5$ or DP
4	0.4	Water [Note (3)]	$1.50 \times MOP$	None	$TP \div 1.5$ or DP

Fonte: ASME B31.8-2010

Gráfico 13- Gráfico de Pressurização (Pressão X Tempo)



Fonte: Dias (2011)

Na eventualidade de a pressão manter-se estabilizada, registrar uma leve variação dentro do limite de 0,5% da PTH (Gráfico 13) durante o período designado para o TH, este é considerado como APROVADO.

Resumidamente, o teste hidrostático desempenha diversas funções essenciais, tais como assegurar a integridade do duto, eliminar pequenos defeitos que poderiam passar despercebidos durante a pressão operacional, gerando danos severos (Figura 42), criar uma margem de segurança, reduzir a probabilidade de crescimento de trincas durante a operação, aliviar as tensões residuais resultantes da fabricação e montagem, identificar vazamentos por meio da

utilização de odorizantes e corantes na água, empregar softwares de monitoramento de vazamentos e incluir manômetros (Dias, 2011).

Figura 42- Vista do Tubo que Rompeu (Linha de LCO 12")



Fonte: Dias (2011)

3.5.1.8. TERMOGRAFIA

A termografia é especificamente descrita como a técnica de sensoriamento remoto que viabiliza a medição de temperatura e a obtenção de imagens térmicas de um componente, ou estrutura, por meio de coleta de radiação infravermelha. Por meio dessa tecnologia, é factível identificar em estágios iniciais os processos de falha ocorridos de anomalias térmicas em um componente específico, prevenindo a ocorrência de incidentes no funcionamento dos equipamentos. Além disso, é possível classificar e quantificar tais anomalias. (Soares e Miyamoto, 2018).

A termografia é um método pelo qual o usuário pode discernir irregularidades ao observar o padrão de radiação emitido pelo material sob investigação. As câmeras termográficas não realizam medições diretas de temperatura. Ao invés disso, efetuam a mensuração da radiação, que é subsequentemente convertida em valores de temperatura (Abdel-Qader et. al, 2007).

A imagem térmica é obtida por meio de uma técnica que converte um padrão de radiação, invisível ao olho humano, em uma representação visual. Para realizar esse processo, utiliza-se um termógrafo, que transforma a energia irradiada por objetos em um sinal de vídeo eletrônico e, por fim, em uma imagem visível (Chaudhuri et. al, 2005).

A inspeção termográfica representa uma ferramenta crucial na manutenção preditiva para identificar problemas térmicos em componentes constituídos de diversos materiais. Trata-se de uma técnica não invasiva, segura e economicamente viável. Nesse sentido, diversas investigações foram conduzidas, corroborando a confiabilidade da termografia e suas diversas aplicações (Huda e Taib, 2013).

Uma eventual falha em um sistema de tubulações pode levar a desdobramentos de natureza catastrófica. Conforme exposto por Senouci et.. al (2012), dada a significativa movimentação financeira diária, na ordem de milhões de dólares, envolvendo óleos e gasodutos, torna-se imperioso empreender estudos sobre a prevenção de falhas por meio da aplicação de modelos termográficos. Essa abordagem visa provar suporte aos responsáveis pela tomada de decisões, capacitando-os a antecipar e prevenir falhas em tais sistemas.

Conforme a Lei *Kirchhoff*, há uma igualdade entre a habilidade de um objeto em assimilar a energia recebida e sua aptidão para refleti-la. O termo usado para descrever esta última é "emissividade", e sua definição é a seguinte:

“[...] a emissividade corresponde à relação entre a energia emitida, em um comprimento de onda específico, por um objeto qualquer e um corpo negro na mesma temperatura [...]” (Senouci et.. al, 2012).

Sob essa definição, a emissividade sempre assume valores de 0 a 1, numericamente equivalentes à fração da radiação absorvida pelo objeto. Essa é uma característica que está principalmente vinculada à composição química e à textura do material, podendo variar de acordo com a temperatura e o comprimento de onda (Senouci et.. al, 2012)

A integração da termografia com outras técnicas de manutenção preditiva, como análise de vibração e monitoramento em tempo real, proporciona uma abordagem mais holística na gestão de ativos. A combinação dessas técnicas oferece uma visão mais completa e confiável do estado operacional dos equipamentos, contribuindo para a eficácia global do programa de manutenção preditiva (Boesch, 2011).

A termografia também é eficaz na identificação de falhas intermitentes, que podem ser desafiadoras de diagnosticar por métodos tradicionais. Variações térmicas sutis que ocorrem apenas sob certas condições operacionais podem ser capturadas pelas câmeras termográficas,

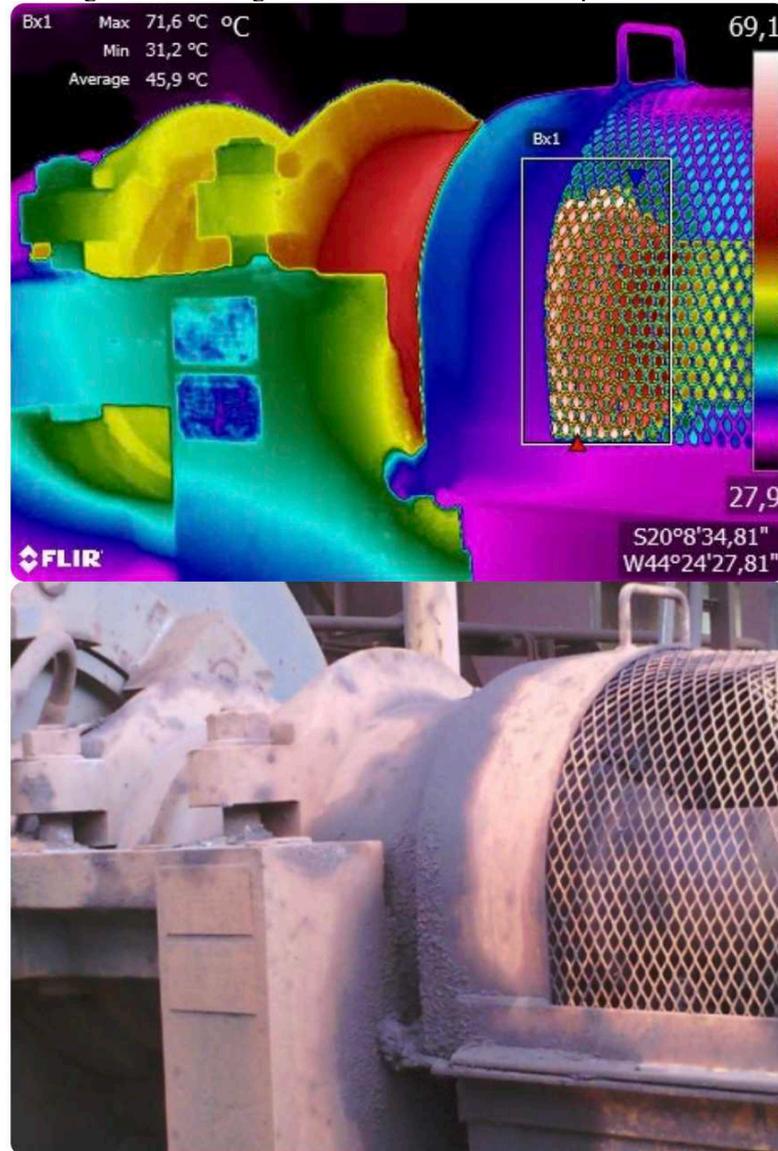
permitindo uma análise abrangente e detalhada do comportamento térmico ao longo do tempo (Boesch, 2011).

Na prática, câmeras termográficas capturam imagens em tempo real, convertendo a radiação térmica em uma representação visual conhecida como imagem termográfica. Essas imagens fornecem uma visão abrangente da distribuição de temperatura em equipamentos e estruturas, permitindo a identificação de pontos quentes ou frios anômalos que podem indicar condições operacionais adversas (Boyes, 2018).

A termografia é aplicada em ambientes mecânicos para detectar desgaste em rolamentos, mau alinhamento em máquinas rotativas e outras condições que possam gerar calor excessivo. Em sistemas de refrigeração, por exemplo, a termografia pode indicar bloqueios ou vazamentos, facilitando a manutenção preventiva. A interpretação das imagens termográficas exige conhecimento técnico para distinguir entre variações normais e anormais de temperatura. A análise espectral das imagens pode revelar padrões térmicos específicos associados a diferentes tipos de falhas ou anomalias, proporcionando informações mais detalhadas sobre o estado operacional dos equipamentos (Cholette, 2013).

A termografia pode identificar variações de temperatura ao longo da superfície de um oleoduto. Se houver um vazamento, o líquido liberado pode alterar a temperatura da área circundante, tornando possível a detecção precoce de vazamentos, ocasionados causados por fricção, que podem levar a falhas no sistema. Pontos quentes em válvulas, conexões, mancais (Figura 43) e outros componentes do oleoduto, podem indicar problemas como desgaste, falhas de isolamento ou problemas estruturais (Boyes, 2018).

Figura 43- Termograma em Mancal de uma Máquina de Fluxo



Fonte: JC Soluções (2019)

3.5.2. MANUTENÇÃO CORRETIVA

A manutenção corretiva desempenha um papel fundamental na garantia da segurança e confiabilidade das linhas de distribuição de dutos petrolíferos e gás natural em usinas de refino. Essa modalidade de manutenção tem como principal objetivo corrigir falhas e defeitos que possam comprometer o funcionamento adequado dos dutos, evitando acidentes, vazamentos e interrupções no fornecimento de energia. Através da manutenção corretiva, é possível identificar e solucionar problemas emergenciais, minimizando os riscos associados à operação dessas estruturas (Piccoli, 2018).

Dentre os principais tipos de falhas que podem ocorrer nas linhas de distribuição e que necessitam de manutenção corretiva, destacam-se os vazamentos, a corrosão e as obstruções. Os vazamentos representam uma ameaça significativa à segurança, pois podem resultar em incêndios ou explosões. A corrosão, por sua vez, compromete a integridade dos dutos ao longo do tempo, podendo levar ao rompimento das tubulações. Já as obstruções podem causar restrições no fluxo do petróleo ou gás natural, reduzindo a eficiência do sistema (Piccoli, 2018).

Para realizar a manutenção corretiva das linhas de distribuição, são utilizadas diversas técnicas e métodos. As inspeções visuais são fundamentais para identificar visualmente possíveis falhas nos dutos, como trincas ou deformações. Além disso, os testes não destrutivos permitem avaliar a integridade estrutural dos dutos sem danificá-los. Em casos de emergência, são realizados reparos emergenciais para solucionar problemas imediatos. Quando necessário, componentes danificados são substituídos, garantindo o funcionamento adequado do sistema (Piccoli, 2018).

O planejamento adequado da manutenção corretiva é essencial para otimizar os recursos disponíveis e minimizar o tempo de parada das linhas de distribuição. Nesse sentido, é importante definir prioridades com base na criticidade das falhas identificadas e alocar os recursos necessários para a realização dos reparos. Além disso, é fundamental estimar o tempo necessário para a execução das atividades, visando reduzir ao máximo os impactos na produção (Piccoli, 2018).

Um sistema eficiente de monitoramento contínuo das linhas de distribuição é indispensável para identificar rapidamente possíveis falhas e acionar a manutenção corretiva antes que ocorram problemas mais graves. Através do monitoramento constante, é possível detectar variações nos parâmetros operacionais dos dutos, como pressão e temperatura, indicando a necessidade de intervenção. Dessa forma, é possível evitar acidentes e minimizar os custos associados à manutenção corretiva (Junior, 2020).

A execução da manutenção corretiva em linhas de distribuição apresenta diversos desafios. O acesso difícil aos locais onde estão instalados os dutos pode dificultar o trabalho dos técnicos responsáveis pela manutenção. Além disso, as condições adversas do ambiente, como temperaturas extremas e presença de produtos químicos corrosivos, exigem cuidados especiais por parte dos profissionais envolvidos nas atividades de reparo (Balthazar, 2016).

A documentação adequada dos procedimentos realizados durante a manutenção corretiva é de extrema importância para garantir a rastreabilidade das intervenções realizadas.

Registros detalhados das atividades executadas, materiais utilizados e resultados obtidos permitem uma análise posterior dos trabalhos realizados, auxiliando na identificação de possíveis melhorias e no planejamento de futuras manutenções. Além disso, essa documentação é fundamental para atender às exigências regulatórias e normativas do setor (Piccoli, 2018).

Em caso de falha em equipamentos críticos, onde seja necessário intervenção de substituição de periféricos as linhas, mais comuns se destacam, bombas, compressores ou turbinas, itens suscetíveis a falhas súbitas, sem manejo correto de manutenção de prevenção. Trocadores de calor danificados devido a vazamentos ou corrosão, são expressivos. Nas linhas de distribuição, vazamentos não recuperáveis por processos de solda, sofrem substituição das seções danificadas, bem como falhas em sistemas de segurança, como válvulas de alívio de pressão (Piccoli, 2018).

4. DISCUSSÃO

A implementação da manutenção preditiva, embora promissora em seus benefícios, enfrenta alguns desafios significativos que podem impactar sua eficácia e adoção generalizada. Um dos principais desafios é a complexidade associada à integração de tecnologias de monitoramento em tempo real e análise de dados em sistemas existentes. Muitas indústrias possuem uma variedade de equipamentos de diferentes idades, fabricantes e tecnologias, o que pode dificultar a padronização e a implementação uniforme de soluções de manutenção preditiva (Boesch, 2011).

A falta de profissionais capacitados para interpretar e utilizar as informações geradas pelos sistemas de manutenção preditiva é outro desafio importante. A análise de dados requer habilidades específicas, tanto em termos de compreensão técnica dos equipamentos quanto na interpretação de dados complexos. A capacitação adequada dos profissionais de manutenção e engenheiros é essencial para extrair todo o potencial da manutenção preditiva (Affonso, 2006).

Outro desafio é a resistência à mudança dentro das organizações. A adoção da manutenção preditiva muitas vezes requer uma mudança cultural significativa, especialmente em ambientes onde as práticas de manutenção reativas são tradicionalmente predominantes. Convencer as equipes a abandonar abordagens convencionais em favor de uma abordagem mais proativa pode ser um processo desafiador que exige liderança eficaz e comunicação clara (Bosa, 2009).

A implementação bem-sucedida da manutenção preditiva enfrenta desafios relacionados à integração tecnológica, capacitação de pessoal, segurança de dados, resistência à mudança e seleção de tecnologias apropriadas. Superar esses desafios requer uma abordagem estratégica, investimentos cuidadosos e um compromisso organizacional para aproveitar plenamente os benefícios da manutenção preditiva em ambientes industriais (Clark e Pradhan, 1995).

A variação nas condições operacionais e ambientais também apresenta um desafio adicional. Ambientes industriais muitas vezes enfrentam condições extremas, como altas temperaturas, umidade, poeira e vibrações intensas. Essas condições adversas podem afetar a precisão e a confiabilidade dos sensores e equipamentos de monitoramento, exigindo soluções robustas e adaptáveis para garantir a eficácia da manutenção preditiva. Essa implementação da manutenção preditiva exige uma abordagem estratégica para a seleção de equipamentos críticos a serem monitorados. Identificar os pontos-chave onde a manutenção preditiva pode ter o maior impacto requer uma análise detalhada dos processos operacionais, riscos associados e impacto financeiro das potenciais falhas (Bosa, 2009).

Por fim, a gestão eficaz da transição de um modelo de manutenção reativa para a manutenção preditiva requer uma estratégia clara de implementação. Isso envolve o desenvolvimento de um plano de transição, a comunicação eficaz com a equipe, a definição de indicadores de desempenho e a avaliação constante dos resultados alcançados (Boyes, 2018).

Apesar dos benefícios substanciais da manutenção preditiva, a superação desses desafios requer uma abordagem holística que combine tecnologia, treinamento de pessoal, investimentos estratégicos e uma mudança cultural dentro das organizações industriais. A implementação bem-sucedida não é apenas uma questão técnica, mas também envolve a gestão inteligente de recursos e a adaptação a um novo paradigma de manutenção proativa (Cholette, 2013).

Outro aspecto dos investimentos iniciais envolve a definição de *KPIs* e a implementação de sistemas de monitoramento para avaliar a eficácia do programa de manutenção preditiva ao longo do tempo (Bosa, 2009). A análise contínua dos resultados é crucial para ajustar estratégias, identificar áreas de melhoria e otimizar a alocação de recursos.

A manutenção preditiva também demanda investimentos contínuos em atualizações tecnológicas (Bousdekis, 2018). À medida que a tecnologia avança, é essencial manter os sistemas e equipamentos atualizados para garantir a aderência aos padrões mais recentes e aproveitar as inovações que possam aprimorar a eficácia da manutenção preditiva.

Além disso, os investimentos iniciais devem levar em consideração a natureza dinâmica das operações industriais (Boyes, 2018). A expansão de instalações, a introdução de novos equipamentos ou mudanças nas condições operacionais podem exigir ajustes e expansões nos sistemas de manutenção preditiva, adicionando um componente adaptativo aos investimentos.

A avaliação dos custos de oportunidade também é crucial (Ceitec, 2018). Ao adotar a manutenção preditiva, a empresa pode evitar custos associados à manutenção corretiva e aumentar a disponibilidade operacional dos equipamentos. Considerar esses benefícios ao calcular os investimentos iniciais oferece uma perspectiva mais abrangente sobre o retorno sobre o investimento ao longo do tempo.

Os programas de treinamento devem abranger tanto os aspectos teóricos quanto práticos da manutenção preditiva (Cholette, 2013). Isso inclui uma compreensão aprofundada dos princípios físicos subjacentes às técnicas preditivas, como análise de vibração, termografia e monitoramento em tempo real. Os profissionais precisam desenvolver habilidades práticas na instalação, calibração e operação dos dispositivos de monitoramento, bem como na interpretação de resultados.

A capacitação não deve se limitar apenas aos profissionais diretamente envolvidos na operação dos sistemas preditivos (Coester, 2001). A colaboração entre equipes multidisciplinares, incluindo engenheiros de manutenção, operadores de equipamentos e equipes de gerenciamento, é essencial para uma implementação eficaz. Portanto, o treinamento deve abordar a necessidade de comunicação eficiente e colaboração entre diferentes setores da organização.

Além dos aspectos técnicos, o treinamento de pessoal na manutenção preditiva também deve abordar as habilidades analíticas e a capacidade de tomar decisões informadas com base nos dados obtidos (Diniz, 2013). Isso inclui o desenvolvimento de uma compreensão profunda das implicações práticas dos resultados da análise preditiva, a identificação de tendências e a aplicação de estratégias corretivas quando necessário.

A colaboração interdisciplinar é outra ênfase importante no treinamento (Djurdjanovic, 2003). A manutenção preditiva muitas vezes requer a colaboração de diferentes equipes, incluindo engenharia, operações e manutenção. Os profissionais precisam aprender a compartilhar informações, coordenar esforços e comunicar efetivamente para garantir uma implementação eficaz do programa de manutenção preditiva.

A compreensão dos princípios de confiabilidade e segurança é essencial no treinamento de pessoal (Chen, Chua e Lim, 2022). Isso inclui a identificação de riscos potenciais associados às práticas de manutenção preditiva, a implementação de medidas de segurança adequadas e a promoção de uma cultura de segurança em toda a organização.

Além dos aspectos técnicos e operacionais, o treinamento deve abordar as implicações financeiras da manutenção preditiva (Chillarege e Bowen, 1989). Os profissionais precisam entender como avaliar o retorno sobre o investimento, calcular custos de falhas e justificar os gastos com base nos benefícios obtidos. Isso é crucial para o alinhamento da estratégia de manutenção preditiva com os objetivos financeiros e estratégicos da organização.

5. CONCLUSÃO

A implementação bem-sucedida da manutenção preditiva em linhas de distribuição de dutos petrolíferos e gás natural em usinas de refino representa não apenas uma evolução tecnológica, mas também uma transformação cultural e operacional para as organizações. Ao longo deste trabalho, exploramos diversos aspectos relacionados a essa estratégia inovadora de gestão de ativos na perspectiva da engenharia mecânica.

Iniciamos abordando a necessidade premente de manutenção como um elemento central para garantir a segurança, confiabilidade e eficiência operacional em ambientes industriais complexos. Destacamos os desafios inerentes à gestão de ativos em usinas de refino, onde a integridade dos dutos petrolíferos e de gás natural desempenha um papel crítico na prevenção de falhas catastróficas.

Exploramos a diferença fundamental entre manutenção preditiva e corretiva, destacando a importância de antecipar problemas e adotar uma abordagem proativa. Definimos os objetivos distintos de cada abordagem e discutimos como a combinação estratégica dessas práticas pode otimizar a gestão de ativos em usinas de refino.

Aprofundamos nosso entendimento sobre a termografia, análises de pressão, de interação com o campo magnético e outras técnicas específicas, destacando suas vantagens e desvantagens. Ao abordar os desafios na implementação da manutenção preditiva, reconhecemos as barreiras tecnológicas, a resistência cultural, a segurança de dados e a necessidade de investimentos substanciais como fatores críticos a serem superados.

Discutimos os investimentos iniciais como um compromisso estratégico para otimizar a eficiência operacional a longo prazo. Esses investimentos incluem aquisição de tecnologia, treinamento de pessoal e adaptação de infraestrutura, destacando a importância de uma análise cuidadosa dos custos e benefícios a longo prazo.

Por fim, abordamos detalhadamente o treinamento de pessoal como um pilar fundamental para o sucesso da manutenção preditiva. Esse aspecto envolve não apenas a capacitação técnica, mas também o desenvolvimento de habilidades analíticas, colaboração interdisciplinar, compreensão de princípios de segurança e adaptação contínua às mudanças na indústria.

Em conclusão, a manutenção preditiva emerge como uma abordagem transformadora na gestão de ativos em usinas de refino. Sua implementação eficaz não apenas fortalece a segurança e confiabilidade das operações, mas também posiciona as organizações para enfrentar os desafios dinâmicos da indústria de petróleo e gás. A busca pela excelência na

manutenção preditiva não é apenas uma evolução técnica, mas uma jornada contínua de aprendizado, inovação e adaptação para garantir a sustentabilidade e eficiência a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-QADER I., YOHALI S., ABUDAYYEH O., AND YEHIA S. **Segmentation of thermal images for non-destructive evaluation of bridge decks**, *NDT E International*, 41, 395–405. 2007.
- AFFONSO, L. O. A. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. 2. ed. [S.l.]: QUALITYMARK, 2006.
- AHUJA I.P.S; KHAMBA J.S. **Total Productive Maintenance: literature review and directions**. *International Journal of Quality & Reliability Management* Vol. 25 No. 7, 2008 pag. 709-756. Emerald Group Publishing Limited.
- AL-MOUBARAKI, AISHA H; OBOT, IME BASSEY. **Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook**. *Journal of Saudi Chemical Society*, v.25, p. 2-24, 2021.
- ALMEIDA, M. T. **Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade**. 2000.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **B 31.4 – Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and order liquids**, 2002.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **B 31.8 – Gas Transmission and Distribution Piping Systems**, 2003.
- ANDRADE, R. P. **Delineamento de metodologias de gestão ambiental para execução de teste hidrostático em dutos de gás natural**. Santa Maria, 2004.
- ANDREUCCI, R. A. **Aplicação industrial: ensaio por ultrassom**. São Paulo: ABENDI, jun. 2018. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostila_us_2018.pdf> Acesso em: 11 jan. 2023.
- ANDREUCCI, R. **Líquidos Penetrantes**. Abendi, 2013.
- ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Rio de Janeiro: ANP, 2013.
- ANP. Agência Nacional de Petróleo. **Exploração de petróleo e gás**. 2015.
- API. **API 571 – CORROSION AND MATERIALS**. 2020.
- ASKARI, M. et al.; **Film former corrosion inhibitors for oil and gas pipelines: a technical review**. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 58, p. 92-114, 2018.
- ASME B16.5. **Wrought Copper and Copper Alloy Braze-Joint Pressure Fittings**. Outubro, 2001.
- ASME **B31.3 – Power Piping**, 1995 Edition;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15691: Ensaio não destrutivo – Líquido penetrante – Prática padronizada**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BALDIN, A; FURLANETTO, L; ROVERSI, A; TURCO, F. **Manual de mantenimiento de instalaciones industriales**. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.

BALTHAZAR, M.A.P. **Cuidados com a saúde dos soldadores nos estaleiros brasileiros – uma revisão integrativa**. Niterói, 2016.

BANCO MUNDIAL. **Relatório sobre o desenvolvimento mundial**. 2000.

BATVAZ, Y. **What are PIG's, PIG Launchers, and PIG Receivers and Why Are They Important?** Setembro, 2019.

BICALHO, Ronaldo. **Projeto PIB: perspectiva de investimento em energia**. Rio de Janeiro, IE-UFRJ/UNICAMP, 2009.

BÖESCH, K. **Detecção de falhas por fusão de sensores em atuadores elétricos. Correlação entre sinais de torque e vibração**. Dissertação (Trabalho de diplomação) — Departamento de Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BOSA, J. L. **Sistema Embarcado para a Manutenção Inteligente de Atuadores Elétricos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Informática, Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, 2009.

BOUSDEKIS, A. et al. **Enabling condition-based maintenance decisions with proactive event-driven computing**. Computers in Industry, v. 100, p. 173 – 183, 2018.

BOYES, H. et al. **The industrial internet of things (iiot): An analysis framework**. Computers in Industry, v. 101, p. 1 – 12, 2018.

BP (British Petroleum). **BP Statistical Review of World Energy**. 2015. Disponível em: <<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>>. Acesso em: 17 Mar. 2023.

BRANCO FILHO, Gil. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2008.

BRASILMINING. **Processo de Corrosão faz com que 30% da produção mundial de ferro e aço seja desperdiçada**. Setembro, 2020.

BRAZ, André Luiz. **Operação de tramo de controle**, 2009.

BRUSCHI, R.; et al.; **Pipe technology and installation equipment for frontier deep water projects**. Ocean Engineering. Vol. 108, p. 369-392. 2015.

CAMERINI, Cesar Giron. **Desenvolvimento de sondas de correntes parasitas para detecção e quantificação de fase sigma em aço inoxidável duplex**. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CAMPOS, Vicente Falconi. **TQC: Controle da qualidade total: no estilo japonês**. Rio de Janeiro: Bloch, 1992.

CANELAS, André Luís de Souza. **Evolução da importância econômica da indústria de petróleo e gás natural no Brasil: contribuição a variáveis macroeconômicas**. Rio de Janeiro, 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Estratégico) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

CARDOSO, L. C. **Petróleo do Poço ao Posto**. 2005.

CARTER, JONATHAN; DAWSON, PETER; NIXON, ROBERT. **Explosion at the Conoco Humber Refinery – 16th april 2001**. In: Symposium Series, 151, 2006, Great Britain. Anais... Great Britain: Institution of Chemical Engineers, 2006.

CAVALCANTE, C.A. **Evento e análise organizacional: contribuição de um estudo sobre as atividades de manutenção**. Tese de doutorado. Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

CEITEC. **Centro de Excelência em Tecnologia Eletrônica Avançada**. 2018. Disponível em: <<http://www.ceitec-sa.com>>. Acesso em: 09 de outubro de 2023.

CHAOUADI, R.; FABRY, A. **On the utilization of the instrumented Charpy impact test for characterizing the flow and fracture behavior of reactor pressure vessels steels**. From Charpy to present impact testing, ESIS 30, Oxford: Springer Science, 2002.

CHAUDHURI P., SANTRA P., YOELE S., PRAKASH A., REDDY D.C., LACHHVANI L.T., GOVINDARAJAN J AND SAXENA Y.C.. **Non-destructive evaluation of brazed joints between cooling tube and heat sink by IR thermography and its verification using FE analysis**, NDT E International, 39, 88–95.2005.

CHEN, H.; CHUA, P. S.; LIM, G. **Adaptive wavelet transform for vibration signal modelling and application in fault diagnosis of water hydraulic motor**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 20, n. 8, p. 2022–2045, 2022.

CHILLAREGE, R.; BOWEN, N. S. **Understanding large system failures-a fault injection experiment**. In: [1989] The Nineteenth International Symposium on Fault-Tolerant Computing. Digest of Papers. [S.l.: s.n.], 1989. p. 356–363.

CHOLETTE, M. E. et al. **Condition Monitoring and Operational Decision Making in Semiconductor Manufacturing**. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, v. 26, n. 4, p. 454–464, Nov 2013.

CLARK, J. A.; PRADHAN, D. K. **Fault Injection: A Method for Validating Computer-System Dependability**. IEEE Computer, v. 28, n. 6, p. 47–56, 1995.

COELHO, José Mauro Ferreira. **Modelagem para auxílio à seleção de alternativas de valorização de excedentes de petróleo no Brasil**. Rio de Janeiro, 2015. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

COESTER AUTOMAÇÃO. **Coester Automação, Manual Atuador - Linha CSR CSR 12-CSR 25 - CSR 50 Integral**. [S.l.], 2001.

CORDELL, J., & Vanzart, H. (2003). **The Pipeline PIGging**. Handbook (3ª ed.). Houston: Clarion Technical Publishers And Scientific Surveys Ltd.

CORDER, A. **Maintenance management techniques**. London: Mc Graw-Hill, 1976.

Curvelo, E. V. (Abril de 2016). **ESTUDO PARA PROJETO DE MÓDULO DISCRIMINADOR DE UM PIG**.

DAVID, J.; CHEEKE, N. **Fundamentals and applications of ultrasonic waves**. 2nd ed. USA: CRC Press, 2002.

DE ARAÚJO, Anne Aguiar (2012), **Gerenciamento de Falhas por Corrosão em Dutos**, Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, RJ.

DEMETINO, G. G. (2018). **Novo aparato para produção de deposição de parafina em dutos de petróleo para testes de PIG**. Tese (Doutorado), Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica e Instituto de Matemática e Estatística, Salvador.

DIAS, R. **Teste Hidrostático**. Rio de Janeiro, 2011.

DIAZ, John F. A. (2008), **Estudo e Projeto Conceitual de um Robô para Inspeção de Linhas de Serviço**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

DINIZ, P. S. R. **Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation**. 4. ed. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2013.

DJURDJANOVIC, D.; LEE, J.; NI, J. **Watchdog agent - an infotonics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction**. *Advanced Engineering Informatics*, v. 17, n. 3-4, p. 109–125, 2003.

EFIRD, K. D. et al.; **Correlation of Steel Corrosion in Pipe Flow with Jet Impingement and Rotating Cylinder Tests**, *Corrosion*, v. 19, n. 12, pp. 992-1003, 1993.

EVIDENT. Tutorial sobre correntes parasitas multielementos. 2021. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/eca-tutorial/what-is-eca/depth/>>. Acesso em: 12 outubro de 2023.

FABRO, Elton. **Modelo para planejamento de manutenção baseado em indicadores de criticidade de processo**. Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

FERREIRA, F. G.; **Classificação de petróleo**. Tese (doutorado) - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM. **Termografia**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/43383156/Apostila-Termografia>>. Acesso em: set. 2023.

GARCIA-MARTIN, J.; GOMEZ-GIL, J.; VAZQUEZ-SANCHEZ, E. **Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing**. *Sensors*, v. 11, n. 3, p. 2525-2565, Mar 2011.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GENTIL, V.; **Corrosão**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003.

GENTIL, VICENTE; CARVALHO, LADIMIR JOSÉ DE. **CORROSÃO**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GINZEL, E. A. **NDT adapts to Phased Array: price reductions and user-friendly options have allowed not to warm up to advanced ultrasonic testing technology, including phased-array and time of flight diffraction**. *Quality Magazine*, Waterloo, Ontario, Canada, v. 48, n. 2. feb. 2009.

GINZEL, E. A.; JOHNSON, D. **Phased-array resolution assessment techniques**. *Materials Research Institute, NDT.net - The e-Journal of Nondestructive Testing*. Waterloo, Ontario, Canada. 2008. Disponível em: <<https://www.ndt.net/article/v13n07/ginzel.pdf>> Acesso em: 24 jul. 2023.

GROYSMAN, A. **Corrosion problems and solutions in oil, gas, refining and petrochemical industry**. *Koroze a ochrana materialu*, v. 61, n. 3, p. 100, 2017.

HALLIDAY D., RESNICK R., WALTER J., **Fundamentos da Física**, 9º edição, 2012.

HANSEN, J. **The eddy current inspection method – Part 1**. History and electrical theory. *Insight*, v. 46, n. 5, p. 279-281, May 2004.

HEIZER, Jay; RENDER, Barry. **Operations Management**. 9th Ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2008.

HELLIER C., **Handbook of Nondestructive evaluation**, cap. 2, p.2.1-2.18, cap 7, p. 7.1-7.115, 2001.

HUDA A.S.N. AND TAIB S.. **Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment**, *Applied Thermal Engineering*, 61, 220–227.2013.

IBP. **ENERGY OUTLOOK**. 2023. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>>. Acesso em: outubro 2023.

IEA - (International Energy Agency). **World Energy Outlook**. 2012. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2012/presentationtopress.pdf>>. Acesso em: 3 Mar. 2023.

INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS. **Caso 066: Explosão em Refinaria da ConocoPhillips** (2001).

INSPESOLDA. **Informações sobre ensaio de líquido penetrante**. Junho, 2020.

Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. **Inspeção de mecanismos de danos**. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás; organizado e revisado por Ricardo de Oliveira Carneval. – Rio de Janeiro: IBP, 2021.

IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change). **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan. 2016.

IPEA (Instituto De Pesquisa Econômica Aplicada). **Perspectivas de Desenvolvimento do Setor Petróleo e Gás no Brasil**. Comunicados do Ipea, n.55, IPEA, 2010.

JC SOLUÇÕES PREDITIVAS. **Termografia Mecânica – Complemento de técnicas preditivas**. Janeiro, 2019.

JUNIOR, C.S. **A importância da manutenção preditiva**. Londrina, 2020.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio de Aquino. **Manutenção: função estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio de Aquino. **Manutenção: Função Estratégica**. 3 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio de Aquino. **Manutenção: Função Estratégica**. 4 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.

KHAN, S. H. et al. **Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction**. Computational Materials Science, v. 43, n. 4, p. 623-628, Oct 2008.

KRAS. **Ensaio por Líquido Penetrante**. 2018.

LEDET, W. **The ABC's of failure: getting the noise out of your system**. 2008.

LEITE, P. G. **Curso de ensaio não destrutivos**. 8. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais (ABM), 1966.

LÓPEZ, D. A. et al.; **The influence of microstructure and chemical composition of carbon and low alloy steels in CO2 corrosion**. A state-of-the-art appraisal. Material and Design. Vol. 24, p. 561-575. 2003.

MARMELO, Sandro Miguel Pereira. **O mercado petrolífero mundial: a necessidade de um multilateralismo de gestão energética.** Coimbra, 2009. Dissertação (Mestrado em Relações Internacionais: Estudos de Economia Política Internacional) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2009.

MARTIN, C. C. **Ultrassom.** São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção – ABENDI, 2012.

MAZZINI, Carlos E. (2009), **Comparação de Métodos de Inspeção de Integridade de Dutos: Método PIG e CIS/DCVG**, Projeto de graduação, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

MENDES, André Pompeo do Amaral; TEIXEIRA, Cassio Adriano Nunes. **Petróleo e gás.** In: Perspectivas do investimento 2015-2018 e panoramas setoriais. APE/DEPEQ (Ed.). Rio de Janeiro: BNDES, 2014.

MIRSHAWKA, Victor; OLMEDO, Napoleão Lupes. **Manutenção combate aos custos da não-eficácia – a vez do Brasil.** São Paulo: Makron Books: McGraw-Hill, 1993.

MIX, P. E. **Introduction to Nondestructive Testing: a training guide.** 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

MORAES, Paulo Henrique de Almeida. **Manutenção produtiva total: estudo de caso em uma empresa automobilística.** Taubaté, 2004. Dissertação (Mestrado em Gestão e Desenvolvimento Regional) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2004.

MOREIRA, Gedson. **Análise da prestação de serviços de caldeiraria nas paradas programadas de manutenção de plantas industriais da refinaria Landulpho Alves – RLAM.** Salvador, 2008. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

MOREIRA, H. A; 2014. **Avaliação do desempenho de técnicas não destrutivas: um estudo de caso na inspeção de componentes para molas pneumáticas.** Trabalho de Conclusão de Curso, UFC, Fortaleza, CE, Brasil.

MULLER HUPPES, Ricardo. **Análise de falha em um vaso de pressão.** Porto Alegre, 2009. Monografia (Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Disponível em: . Acesso em: 5 jul. 2023.

NELLIGAN, T.; CALDERWOOD, C. O. - **Equipamentos de correntes de Foucault.** 2013.

NORMA BRASILEIRA. ABNT NBR 15280-1. **Dutos terrestres parte 1: Projeto.** Setembro, 2009.

NUNES, L.P.; LOBO, A.C.O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1990.

OAKLAND, John. **Gerenciamento da Qualidade Total (TQM).** São Paulo: Nobel, 1994.

OHARA, Amanda Paiva. **Possíveis destinos para o excedente de petróleo brasileiro: um estudo sobre o mercado chinês**. Rio de Janeiro, 2014. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

OLIVEIRA, M. J.; 2014. **Indicação de descontinuidades em materiais metálicos e compósitos: uma comparação entre métodos não destrutivos**. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, Sidney Teylor. **Ferramentas para o aprimoramento da qualidade**. São Paulo: Pioneira, 1995.

OLYMPUS NDT. **Advances in phased array ultrasonic technology applications**. Waltham, Massachusetts – USA, 2007. Disponível em: <https://www.ndt.net/news/2007/20070401olympusndt1.htm>. Acesso em: 7 out. 2023.

OLYMPUS NDT. **Phased array basic theory for industrial applications**. Waltham, Massachusetts – USA, 2010. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/patesting/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

OSSAI, C. I. et al.; **Pipeline failures in corrosive environments: a conceptual analysis of trends and effects**. Engineering Failure Analysis. Vol. 56, p. 36-58. 2015.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. **A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial**. Revista Gestão Industrial. Vol.4, n.2, 2008.

PARSI, M. et al.; **A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications**, Journal of Natural gas Science and Engineering, v.21, p.850-873, 2014.

PASA, Giovana Savitri. RODRIGUES, Rafael Garcia. **Sistemática de planejamento e programação da manutenção na indústria petroquímica**. Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 29. Salvador, 2009.

PELLICCIONE, A. S. et al.; **Análises de falhas em equipamentos de processo: mecanismos de danos e casos práticos**, 1 ed., Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda, 2012.

PEREIRA FILHO, Jorge dos Santos. **ANÁLISE DE EFEITOS DE TESTE HIDROSTÁTICO EM VASO DE PRESSÃO**. 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Cap. 1. Disponível em: . Acesso em: 18 Jun. 2023.

PEREIRA, J. A. V.; 2013. **Estudo e Aplicação de Ensaio Não Destrutivos**, Dissertação de mestrado, FEUP, Porto, Portugal.

PETROBRAS. N-1673. **Critérios de cálculo mecânico de tubulação**. Outubro, 2006.

PETROBRAS. N-464 – **Construção, Montagem e Condicionamento de Dutos Terrestres**, 2008.

PETROBRAS. **Petróleo Brasileiro S.A.** 2023. Disponível em: <<https://petrobras.com.br>>. Acesso em: 09 de outubro de 2023.

PICCOLI, Leonardo Bisch. **Desenvolvimento de um Sistema em Chip de processamento online para Manutenção inteligente.** Porto Alegre, 2018.

PIPEWAY (2012), ‘**Site PipeWay**’, <http://www.pipeway.com.br>. Acesso em: 03 jul. 2023.

PLACKO, D.; DUFOR, I. **A Focused-Field Eddy-Current Sensor for Nondestructive Testing.** Ieee Transactions on Magnetics, v. 29, n. 6, p. 3192-3194, Nov 1993.

POPOOLE, L. T. et al.; **Problemas de corrosão durante a produção de óleo e gás e sua mitigação.** International Journal of Industrial Chemistry, v. 4, n. 1, pág. 1-15, 2013.

PROQUIMIA. **Corrosão Filiforme, da origem à prevenção.** SC, 2019.

QUALIDADE ONLINE. **O ensaio de correntes parasitas pulsadas em componentes metálicos ferromagnéticos.** Julho, 2022.

QUEIROZ, Laura Michelle Dos Anjos. **Planejamento e controle da manutenção aplicados ao processo de manufatura no ramo alimentício.** Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 35. Fortaleza, 2015.

ROSADO, L. F. S. G. **Non-Destructive Testing Based on Eddy Currents.** 2009. (Master’s Degree). Electronics Engineering, Universidade Técnica de Lisboa.

RUCHERT, Cassius O. F. T. **Principais Ensaio Não Destrutivos.** Lorena, 2012.

SALCEDO, T. **Análise do Sensor de um PIG Instrumentado do tipo palito.** Rio de Janeiro, 2019.

SAMPAIO, M. V; 2009. **Aplicação da inspeção não intrusiva em equipamentos do sistema de dessulfurização de gás natural da plataforma de pampo.** Dissertação de mestrado, UFRS, Porto Alegre, RS, Brasil.

SANTIN, J. L. **Ultrassom: técnica e aplicação.** 2. ed. Curitiba: Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003.

SANTOS, M., **Apostila de Partículas Magnéticas,** Petrobras, Curso de Formação de Engenheiros de Equipamentos Inspeção, 2008.

SANTOS, Patrícia Carneiro. **Recentes impactos da indústria petroquímica sobre o parque de refino.** Rio de Janeiro, 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SARTI, C., Araújo, R., & Pinto, S. (2011). **PIG - Tecnologia para tubulações.** Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO, Rio de Janeiro.

SCHMERR, L. W. **Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation.** 2nd ed. Springer, 2016.

SENOUCI A., ELABBASY M., ELWAKIL E., ABDRABOU B. AND ZAYED T. **A model for predicting failure of oil pipelines**, Structure and Infrastructure Engineering, 10, 375-387. 2012.

SGS. **Ensaio não destrutivo o que é preciso saber? Uma discussão inicial sobre os ensaios não destrutíveis e suas aplicações diretas**. Abril, 2018.

SHULL, P. J. **Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications**. New York, 2002.

SILVA, Dayse Camila Saraiva; LUCENA, André Duarte; MEDEIROS, Leydja Dayane Dantas; COSTA, Daiane de Oliveira; ANDRADE, Jackson Toscano Dantas. **Estudo de indicadores chave de desempenho em manutenção e construção de um dashboard em uma indústria do ramo petrolífero**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 35., 2015, Fortaleza. Anais Eletrônicos... Fortaleza: ABEPRO, 2015.

SIMEI, Luís Carlos. **A Definição da Manutenção. A Gestão da manutenção**. 2012. Disponível em: <<http://manutenabilidade.blogspot.com.br/2012/09/a-definicao-da-manutencao.html>>. Acesso em: 10 de Mar. 2023.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2002.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2008.

SOARES, R.M.S., SILVA, A.L.O., SOUZA, M.C.M.F., MIYAMOTO, H.K., FORTES, M.Z., FERREIRA, V.H. **Termografia Aplicada na Manutenção Preditiva de Retificadores de Proteção Catódica – Estudo de Caso**. São Paulo, 2018.

SOUZA, Fábio Januario. **Melhoria do Pilar "Manutenção Planejada" da TPM através da utilização do RCM para nortear as Estratégias de Manutenção**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

SOUZA, Fernanda Rocha. **Impacto do preço do petróleo na política energética mundial**. Rio de Janeiro, 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Souza, R. d. (2005). **Avaliação de Modelos para a Remoção de Depósitos de Parafina em Dutos Utilizando PIGs**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro.

SOUZA, Ricardo Dias de. **Projeto Mecânico de Dutos Dimensionamento Hidráulico**, 2016.

Sweldens, W. **Factoring wavelet transforms into lifting steps**. Maio, 1998.

TELLES, Pedro Carlos Silva. **Tubulações Industriais**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. , 2001.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciencia, 2004.

TIRATSOO, J. (1992). **PIPELINE PIGGING TECHNOLOGY** (2nd Edition ed.). (T.J.N.H, Ed.) Originally published by Gulf Publishing Company.

TROMBINI, Mauricio. **Avaliação da técnica de ultrassom phased array para a otimização do controle de qualidade em aços laminados e forjados**. Campinas, 2015.

UTMAAX. **Phased Array em tubulação de processo**. 2023.

VENDRAME, Mário Antônio. **Gerenciamento de paradas programadas de plantas industriais**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 2005.

VIANA, C. (2016). **PASSAGEM DE PIG - OPERAÇÃO CRÍTICA**: Conceitos, Operações e Recomendações.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM: planejamento e controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Quality, 2002.

XENOS, H.G. **Gerenciando a manutenção produtiva**. Belo Horizonte: EDG, 1998.

YAMAGUCHI, C. T. **TPM - Manutenção Produtiva Total**. Instituto de Consultoria e Aperfeiçoamento Profissional. São João Del Rei. 2005.

YANG, Y., CHENG, Y.F., **Parametric effects on the erosion corrosion rate and mechanism of carbon steel pipes in oil sands slurry**, *Wear*, v.276-277, pp.141-148, 2012.