Revista Técnica da Universidade Petrobras

Desenvolvimento e homologação de ferramentas de limpeza e inspeção interna para o sistema integrado de escoamento de gás do pré-sal da bacia de Santos

Development and testing of cleaning and in line inspection tools for the integrated gas flow system of the pre-salt in the Santos basin

Ranieri Ambrosio Merini
Petrobras, Rio de Janeiro-Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: ramerini@petrobras.com.br

Luciano Baptista
ROSEN, Rio de Janeiro-Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: lbaptista@rosen-group.com

Gustavo Carvalheira Mazzei
Petrobras, Rio de Janeiro-Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: gustavo.mazzei@petrobras.com.br

Edgard Suzano da Silva
Petrobras, Santos-São Paulo, Brasil.
E-mail: edgardsuzano@petrobras.com.br

Marcos Quintino Santos de Oliveira
Petrobras, Santos-São Paulo, Brasil.
E-mail: marcosquintino@petrobras.com.br

Wagner Pereira Mendes de Castro
Petrobras, Santos-São Paulo, Brasil.
E-mail: wagnercastro@petrobras.com.br

Palavras-chave:
Gasoduto.
PIG.
Inspeção.
Limpeza.
Multidiâmetro.

Keywords:
Pipeline.
PIG.
Inspection.
Cleaning.
Multidiameter.

Recebido:
13 de novembro de 2024
Aceito para publicação:
22 de novembro de 2024
Publicado:
23 de dezembro de 2024
https://doi.org/10.70369/cnh7fh25l

RESUMO

A inspeção interna dos gasodutos Rota 1, 2 e 3 é considerada um marco tecnológico para exploração em águas ultraprofundas. O desafio do desenvolvimento dos PIGs de limpeza e inspeção abrangia dutos com grande variação de diâmetro entre 18 e 24 polegadas, longas distâncias percorridas de até 450 quilômetros, altas pressões operacionais de até 250 kgf/cm², lâmina d'água de até 2400 metros e passagem por equipamentos com geometrias complexas. O risco desta operação, em relação à possibilidade de aprisionamento dos PIGs, foi considerado alto. Para redução deste risco foi prevista uma fase de homologação das ferramentas, após minuciosa verificação da documentação dos componentes do sistema submarino, foram definidos os testes mínimos necessários para aferir performance operacional das ferramentas nos cenários de exposição a altas pressões, deslocamento em baixas vazões, detecção de anomalias em altas velocidades de deslocamento e durabilidade/desgaste em longas distâncias. Finalizando a etapa de homologação, foram realizados testes em escala real em circuito contendo 51 componentes que representavam as geometrias restritivas do sistema submarino. Outra medida adotada foi o uso de transmissores de isótopo radioativo, aumentando a autonomia em caso de necessidade de localização do PIG. Até o presente momento, 03 de 04 gasodutos já foram inspecionados com essas ferramentas.

ABSTRACT

The internal inspection of the Rota 1, 2, and 3 gas pipelines is considered a technological milestone for deepwater exploration. The challenge of developing cleaning and inspection PIGs involved pipelines with a large variation in diameter, ranging from 18 to 24 inches, long distances of up to 450 kilometers, high operating pressures of up to 250 kgf/cm², water depths of up to 2400 meters, and passage through equipment with complex geometries. The risk of this operation, in terms of the possibility of PIGs getting stuck, was considered medium/high. To reduce this risk, a phase of tool homologation was planned. After a thorough verification of the documentation of the subsea system components, the minimum tests necessary to assess the operational performance of the tools in scenarios of high pressure exposure, displacement at low flow rates, detection of anomalies at high speeds, and durability/wear over long distances were defined. At the end of the homologation phase, full-scale tests were carried out in a circuit containing 51 components that represented the restrictive geometries of the subsea system. Another measure taken was the use of radioactive isotope transmitters, increasing the autonomy in case the PIG needed to be located. So far, 03 out of 04 pipelines have been inspected with these tools.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de escoamento de gás do pré-sal é composto por 03 grandes rotas de dutos submarinos, denominadas rota 1, rota 2 e rota 3.

A rota 1 está em operação desde 2011, sua extensão é de 284 quilômetros e tem capacidade para escoar 10 milhões de metros cúbicos de gás por dia da região do pré-sal da bacia de Santos até a plataforma de Mexilhão (PMXL-1). A rota 2 está em operação desde 2016, sua extensão é de 445 quilômetros e tem capacidade para escoar 20 milhões de metros cúbicos de gás por dia da região do pré-sal da bacia de Santos até a unidade de tratamento de gás de Cabiúnas. A rota 3 está em operação parcial desde 2022 e sua extensão total será de 372 quilômetros. Foi construída para transportar o gás do pré-sal da bacia de Santos até o polo de tratamento de gás de Itaboraí e terá capacidade para escoar até 18 milhões de metros cúbicos de gás por dia. A instalação do trecho marítimo foi finalizada em 2022, atualmente, o gás escoado pela rota 3 é direcionado à rota 2. Com a integração da rota 3 ao polo de Itaboraí, a malha de gasodutos terá aproximadamente 1100 km e a capacidade total de escoamento será de cerca de 48 milhões de metros cúbicos de gás por dia, o que representará 37% da capacidade de processamento de gás natural do Brasil.

Para garantir a disponibilidade operacional das rotas é necessário um plano de gestão da integridade robusto, sendo que as principais ferramentas são o monitoramento e a prevenção da degradação associados à corrosão interna. E dentre as técnicas mais utilizadas, destacam-se os planos de limpeza e inspeção interna com o uso de ferramentas denominadas “PIG” de limpeza e “PIG” de inspeção instrumentada.

Desde a concepção do projeto, a Petrobras buscou junto ao mercado uma solução ao desafio proposto: limpar e inspecionar dutos com variação de diâmetro entre 18 e 24 polegadas, por longas distâncias percorridas de até 450 quilômetros, com pressões operacionais de até 250 kgf/cm², em lâmina d’água de até 2400 metros, passando por equipamentos com geometrias complexas e tendo que realizar a aquisição de dados em trechos sujeitos à altas velocidades.

2. OBJETIVO

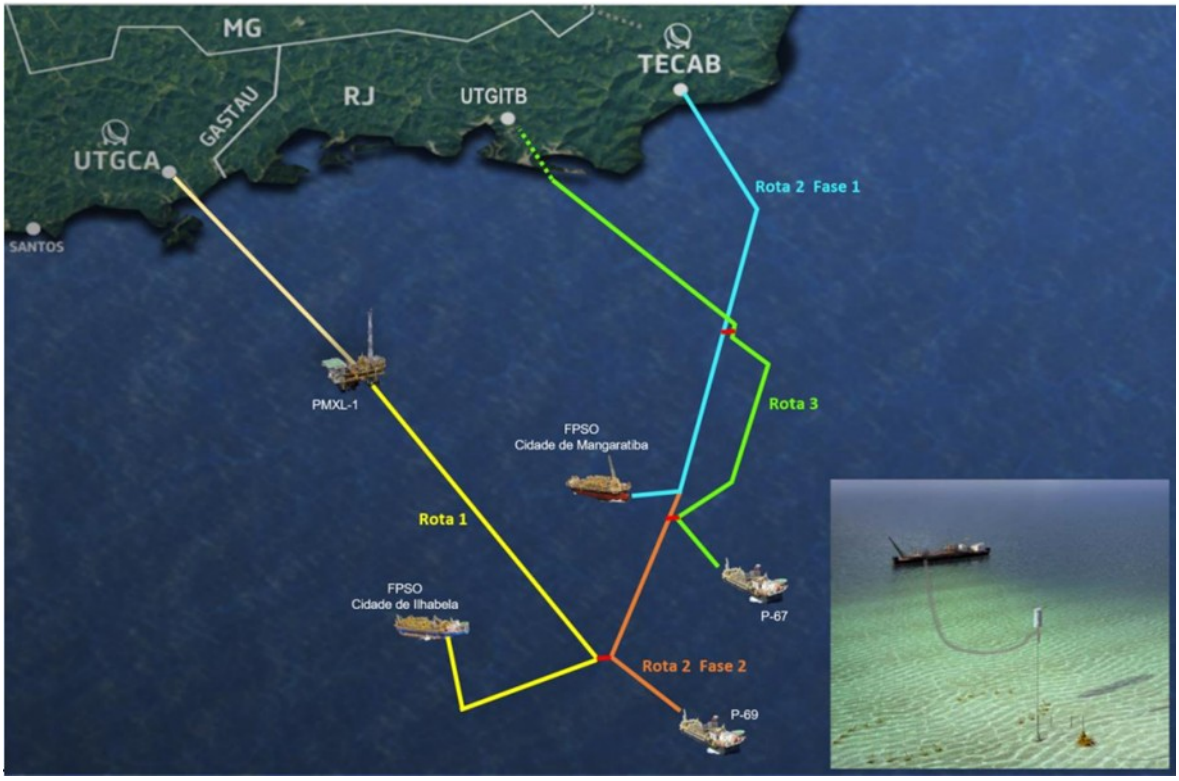
Apresentar a análise de pigabilidade do duto durante a fase de projeto e a avaliação da capacidade do mercado fornecedor de prestação de serviço, que levou à necessidade de uma etapa de desenvolvimento e homologação das ferramentas de limpeza e inspeção. Serão abordados os resultados das campanhas de limpeza e inspeção, as lições aprendidas e desafios futuros.

3. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E ANÁLISE DE PIGABILIDADE DOS DUTOS

No sistema integrado de escoamento todas as rotas são interligadas, cada rota funciona como um tronco principal contendo derivações para conexão da exportação de gás, atualmente, há um total de 18 unidades de produção de petróleo interligadas. O projeto definiu quatro unidades responsáveis pelo lançamento de PIG, que são conectadas às rotas por meio de um riser híbrido autossustentável (RHAS), vide Figura 1.

A adoção de premissas de projeto que viabilizem a inspeção interna com PIG instrumentado torna mais robusto o programa de gerenciamento da integridade ao longo da vida útil, aumentando a disponibilidade e a confiabilidade do ativo, garantindo a segurança das pessoas e do meio ambiente, além de cumprir as normas técnicas, legais e regulatórias.

Figura 1. Ilustração das rotas de escoamento e conexão das unidades lançadoras de PIG



Fonte: PETROBRAS.

As boas práticas à época do projeto citavam que os dutos submarinos deveriam ser preferencialmente monodiâmetros. O projeto sinalizava a necessidade de aumento do diâmetro interno ao longo do percurso, para prover capacidade de escoamento. Conforme observado na Tabela 1, o mercado fornecedor sinalizava a possibilidade de oferecer uma solução para a variação de diâmetro interno, além disso, a Petrobras já contemplava estudos de pesquisa e desenvolvimento neste âmbito.

Tabela 1 – Capacitação tecnológica do mercado para gasodutos multidiâmetros

Diâmetro Nominal (in)	Variação de diâmetro interno (%)
14 – 20	43
16 – 26	63
17 – 22	29
18 – 22	22
20 – 26	30

Fonte: PETROBRAS.

Sendo assim, as características construtivas das rotas de escoamento foram definidas conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Características construtivas das rotas de escoamento de gás[1]

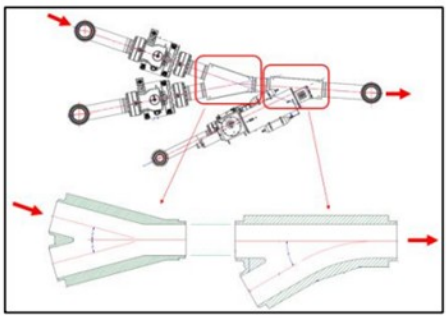
Característica	Extensão (km)	Diâmetro Nominal (in)	Variação do diâmetro interno (%)
Rota 1	284	16 x 18	15
Rota 2 Fase 1	392	16 x 20 x 24	40
Rota 2 Fase 2	445	16 x 18 x 20 x 24	48
Rota 3	324	16 x 20 x 24	44

Fonte: PETROBRAS.

[1]O diâmetro nominal de 16" é referente ao diâmetro interno do duto flexível que interliga cada FPSO ao respectivo riser híbrido autossustentável.

Apesar desse alinhamento à capacitação do mercado fornecedor, esse sinalizou que havia complexidade na operação de passagem de PIG devido às condições operacionais. Após análises, foram identificados pontos importantes a tratar. O principal deles foi com relação à velocidade máxima durante a passagem do PIG de inspeção. A velocidade de 6.5 m/s, inicialmente definida, visava à execução da inspeção sem perdas consideráveis, tanto na entrega de gás quanto na produção de óleo, porém, foi necessária uma redução para 4.5 m/s, devido à restrição na capacidade de aquisição de dados. Além da velocidade, dificuldade adicional foi identificada nos equipamentos submarinos. Entre as geometrias sinalizadas como restritivas, destacam-se as derivações do tipo Y simétricas e Y assimétricas. Em alguns equipamentos, encontrávamos a combinação dessas geometrias, conforme observado na Figura 2.

Figura 2. Equipamento submarino contendo derivações do tipo Y, simétricas e assimétricas



Fonte: PETROBRAS.

4. HOMOLOGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DOS PIG'S DE LIMPEZA E INSPEÇÃO

O desenvolvimento das ferramentas iniciou com a definição dos mapas geométricos, que subsidiaram a seleção dos protótipos. A etapa seguinte compreendeu a definição de quais testes de performance seriam aplicáveis às ferramentas de limpeza e inspeção. A etapa final consistia em executar os testes de performance e em escala real para homologação dos resultados.

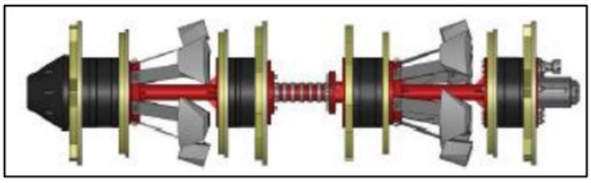
4.1. Mapas geométricos

Nesta etapa foi realizada uma verificação dimensional de cada componente ao longo do trajeto: lançadores e recebedores de PIG, tubulações de superfície, dutos e equipamentos submarinos. Com isso foram gerados os mapas geométricos de cada rota, contendo a indicação das geometrias a serem validadas em teste, tais como: diâmetros internos mínimos e máximos, transição entre diâmetros, raios de curvatura, derivações, internos e geometria dos equipamentos, conexões entre os dutos e os equipamentos e a combinação entre todos eles.

4.2. Protótipos de PIG de limpeza

Na sequência, com base nos mapas geométricos e na expertise da ROSEN, foi projetado o protótipo de PIG de limpeza da rota 1, conforme ilustrado na Figura 3.

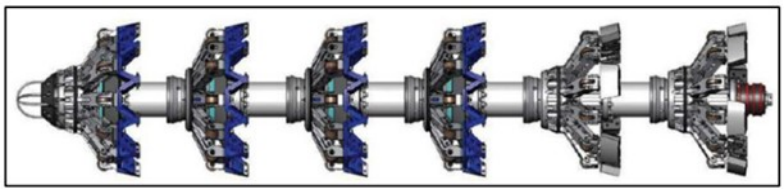
Figura 3. Protótipo do PIG de limpeza da rota 1



Fonte: ROSEN.

Para a limpeza dos gasodutos das Rotas 2 e 3 que apresentam uma variação de diâmetro interno maior foi projetado outro protótipo, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4. Protótipo do PIG de limpeza das rotas 2 e 3

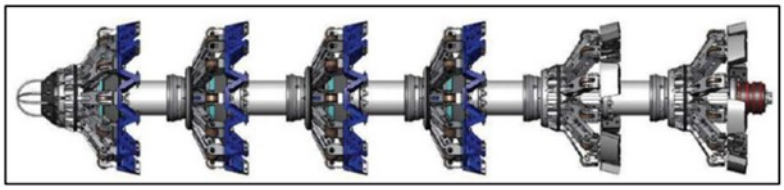


Fonte: ROSEN.

4.3. Protótipo de PIG de inspeção

As características construtivas e operacionais, especialmente a variação de diâmetro e a alta espessura de parede, impossibilitaram a utilização de técnicas difundidas na indústria, como o MFL. Para o primeiro ciclo de inspeções foi adotada tecnologia IEC (Internal Eddy Current), solução adequada à detecção de corrosão interna em estágio inicial. Com capacidade de dimensionamento de perda de espessura interna de até 10mm, independentemente da espessura da parede, permitiria a combinação de todos os módulos de inspeção - inercial, geométrico e de perda de massa - num único PIG reduzindo a quantidade de corridas em cada rota, mostrando-se mais segura e efetiva. Sendo assim, para a inspeção das rotas 1, 2 e 3, foi projetado o protótipo conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5. Protótipo do PIG de inspeção das rotas 1, 2 e 3



Fonte: ROSEN.

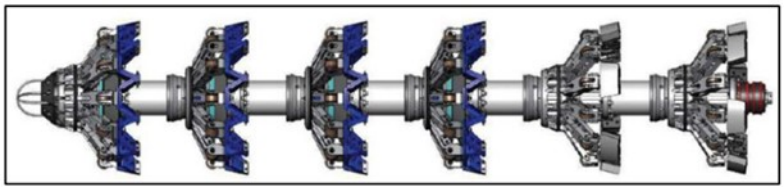
4.4. Sistema de localização

O planejamento e a execução de uma intervenção submarina para resgate de PIG aprisionado em lâmina d'água de 2400 metros adiciona dificuldade e eleva o tempo da recuperação. É necessário garantir a localização exata do PIG, tanto após aprisionamento quanto na pré-intervenção. Transmissores eletromagnéticos, usualmente utilizados na atividade, têm autonomia baixa, portanto, optou-se pelo uso de transmissores radioativos de baixa intensidade, cuja autonomia pode perdurar de meses a anos.

4.5. Circuito de teste em escala real

O projeto do circuito de testes determinaria quais componentes apontados pelos 4 mapas geométricos deveriam estar presentes para aferir a passagem em escala real, tanto dos PIG's de limpeza quanto do PIG de inspeção. Sendo assim, foi projetado e construído um circuito de teste em escala real com 150 metros, contendo 51 componentes, conforme a Figura 6.

Figura 6. Circuito de teste em escala real



Fonte: PETROBRAS; ROSEN.

4.6. Testes de performance

A definição de quais testes de performance seriam aplicados aos PIG's de limpeza e de inspeção estavam correlacionadas com os principais desafios já apresentados. Sendo assim, os seguintes testes foram definidos, cada qual com seu objetivo específico:

a) Teste de pressão: aplicável à eletrônica, o objetivo é confirmar que a eletrônica pode suportar a máxima pressão especificada e continuar operacional;
b) Teste de fluxo: aplicável aos módulos tracionadores, utilizados tanto no PIG de limpeza quanto no de inspeção, o objetivo é avaliar o diferencial de pressão fornecido pelo módulo tracionador que está diretamente correlacionado com a capacidade de deslocamento do PIG;
c) Teste de puxada: aplicável ao módulo de aquisição de dados, o objetivo é confirmar a precisão de detecção e dimensionamento de anomalias nas velocidades especificadas;
d) Teste de circulação em escala real: aplicável tanto aos PIG's de limpeza quanto aos de inspeção, o objetivo é confirmar a passagem dos PIG's por meio das geometrias mais restritivas encontradas ao longo dos dutos, avaliando diferencial de pressão, desgaste e avarias;
e) Teste final de montagem: aplicável à eletrônica e à mecânica dos sensores, o objetivo é confirmar a funcionalidade dos sensores, odômetros e aquisição de dados após finalizada a montagem.

5. RESULTADOS

5.1. Testes de performance

Dentro os testes de performance, o interesse principal residia no resultado do teste de puxada e do teste de circulação em escala real.

O teste de puxada avaliou o posicionamento e a distribuição física dos sensores para que os parâmetros de probabilidade de detecção e precisão de dimensionamento atingissem os valores de referência da API 1163, para cada diâmetro interno especificado e com cobertura total da área interna dos dutos ao longo da rota. A Tabela 3 apresenta o resultado dos testes, e o valor de referência da API 1163 entre parênteses, demonstrando os ótimos resultados obtidos.

O teste de escala real avaliou a passagem dos PIGs de limpeza e de inspeção por meio das geometrias restritivas, observando o comportamento na vazão mínima e máxima operacional, a variação de pressão mínima necessária para superar as geometrias e a ocorrência de danos às ferramentas. Também avaliou as condições operacionais de lançamento e recebimento dos PIGs, bem como a facilidade das operações de inserção e remoção. Um gráfico de vazões e pressões ao longo do circuito

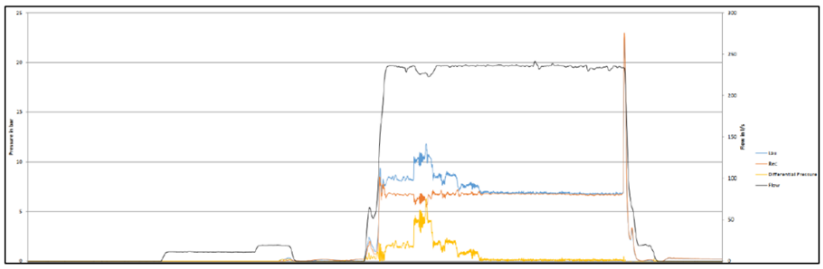
era gerado para cada teste, conforme Figura 7, ao fim da bateria de testes esses dados eram analisados, quando necessário eram realizadas modificações no projeto (vedações, materiais, construção, entre outras) e novos testes realizados, até que os parâmetros de vazão mínima e máxima operacional e a variação de pressão mínima necessária para superar as geometrias fosse atingida, e da não ocorrência de danos às ferramentas.

Tabela 3 – Resultados do teste de puxada

Parâmetro avaliado	Anomalias geométricas	Anomalias de perda de massa
Probabilidade de detecção	100% (95%)	
Precisão de dimensionamento	100% (80%)	100% (80%)[1] 94% (80%)[2]

Fonte: PETROBRAS, ROSEN.
Nota 1: largura e comprimento. Nota 2: profundidade

Figura 7. Parâmetros analisados no teste de escala real



Fonte: PETROBRAS; ROSEN.

5.2. Campanhas de limpeza e de inspeção

Analisando o histórico de operação, o controle dos parâmetros de exportação de gás - umidade, CO2 e H2S - e o monitoramento da corrosão interna, foram planejadas 2 corridas de limpeza e 1 corrida de inspeção em cada gasoduto. A seguir serão detalhadas as campanhas.

Além disso, para definir o sucesso da inspeção, a qualidade dos dados adquiridos pelo PIG instrumentado é verificada conforme POF100, guia de recomendações do *Pipeline Operator Forum*, devendo atender aos seguintes requisitos:

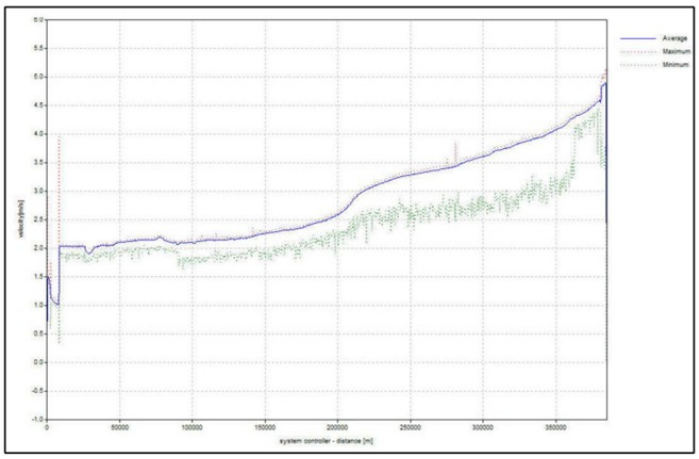
a) Perda acumulada de dados de todos os sensores primários simultaneamente menor ou igual a 0,5% do comprimento do duto;
b) Perda acumulada de dados de sensores primários individuais menor ou igual a 3% da área da superfície do duto; e
c) Perda acumulada de dados de sensores primários adjacentes, cobrindo mais de 25 mm de circunferência, menor ou igual a 10% do comprimento do duto.

5.2.1. Rota 2 fase 1

Ocorreu em julho de 2021, foram realizadas 2 corridas de limpeza e 1 corrida de inspeção. Cada PIG levou em média 42 horas para percorrer os 392 km. O controle da velocidade do escoamento é afetado tanto por variáveis físicas – composição, pressão e temperatura – quanto pelo balanço de massa do sistema – disponibilidade de exportação x disponibilidade de processamento.

A inspeção foi finalizada com sucesso e a aquisição de dados atingiu os parâmetros mínimos aceitáveis para prosseguir com a análise de integridade do duto. A velocidade no trecho final se aproximou do limite admissível – conforme Figura 8 – sinalizando que nas próximas campanhas deveríamos verificar com rigor este controle, para não comprometer o resultado.

Figura 8. Velocidade de deslocamento do PIG na inspeção da rota 2



Fonte: PETROBRAS; ROSEN.

5.2.2. Rota 1

Ocorreu entre dezembro de 2020 e abril de 2023, foram realizadas 7 corridas de limpeza e 1 corrida de inspeção. A campanha estendeu-se em decorrência da condição de limpeza do gasoduto e do estado de integridade dos PIGs, que levaram de 47 a 63 horas para percorrer os 284 km. Foi adotada uma velocidade de deslocamento em torno de 1.5 m/s, a fim de evitar desgaste excessivo do PIG de inspeção, bem como a quebra ou falha dos sensores. A inspeção foi finalizada com sucesso e a aquisição de dados atingiu os parâmetros mínimos aceitáveis para prosseguir com a análise de integridade do duto.

5.2.3. Rota 2 fase 2

Ocorreu entre setembro de 2023 e janeiro de 2024, foram realizadas 4 corridas de limpeza e 1 corrida de inspeção. Vale destacar que essa é a mais extensa rota *offshore* de escoamento de gás em operação no Brasil. Cada PIG levou de 63 a 71 horas para percorrer os 445 km. A inspeção foi finalizada com sucesso e a aquisição de dados atingiu os parâmetros mínimos aceitáveis para prosseguir com a análise de integridade do duto.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Homologação

Conforme apresentado, fica evidente a importância de uma etapa de homologação de ferramentas de limpeza e inspeção de dutos, para cenários complexos de operação e geometria. A homologação durou 12 meses, desde a concepção até a validação dos resultados.

Entre as vantagens da homologação, destacam-se a redução do risco de aprisionamento de PIG no duto, a avaliação de novas tecnologias de inspeção disponíveis, a otimização e o aumento da performance das ferramentas de limpeza e inspeção.

Todas essas vantagens tornam a operação de passagem de PIG, em dutos sujeitos à grande variação de diâmetro, longas distâncias percorridas, altas pressões operacionais, altas profundidades, equipamentos com geometrias complexas e a aquisição de dados em trechos sujeitos à altas velocidades, muito mais segura e eficaz, aumentando a probabilidade de atingir os requisitos mínimos para a coleta dos dados e reduzindo os riscos de perda associados.

6.2. Desafios futuros

Uma das principais limitações tecnológicas é a taxa de aquisição de dados que reflete na velocidade de deslocamento da ferramenta. O primeiro desafio é a busca por soluções que atendam esse requisito desafiador, por exemplo, na melhoria da tecnologia de aquisição de dados ou ainda o desenvolvimento de mecanismos de controle de velocidade dos PIG's.

A tecnologia de inspeção IEC possibilitou o desenvolvimento da solução nesta fase inicial de operação, uma vez que não é esperada corrosão acima do limite de detecção - atualmente 10 mm - porém, com o passar dos anos a probabilidade de ocorrência de alvéolos deste tipo é maior. O segundo desafio é a busca por soluções tecnológicas para a condição futura de integridade do duto, desde o mapeamento de alvéolos de corrosão interna com profundidades maiores até a necessidade de mapeamento de anomalias externas ao duto, além de mitigar a perda de produção esperada com tecnologias de inspeções tradicionais.

AGRADECIMENTOS

A toda a equipe que participou da concepção, projeto, homologação e execução das campanhas de inspeção, à Petrobras e à ROSEN, por compartilharem os dados para gerar conhecimento.

Trabalho originalmente apresentado no Congresso ROG, em 2024. Acesse aqui.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (BRASIL). **Estudo sobre o aproveitamento do gás natural do pré-sal**. Rio de Janeiro: ANP, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/livros-e-revistas/estudo-sobre-o-aproveitamento-do-gas-natural-do-pre-sal. Acesso em: 08 out. 2023.

GINTEN, M.; BROCKHAUS, S.; BOUAOUA, N; KLEIN, S.; BRUENING, F. Inline inspection of multi-diameter and high-pressure pipelines in Brazil using combined technologies: magnetic flux leakage and ultrasonic testing. *In*: RIO PIPELINE CONFERENCE AND EXPOSITION, 8., 2009, Rio de Janeiro. **Annals [...]**. Rio de Janeiro: IBP, 2009. Disponível em: https://biblioteca.ibp.org.br/scripts/bnmapi.exe?router=upload/5901 Acesso em: 08 out. 2023.

ALMEIDA, Edmar de *et al.* **Gás do pré-sal**: oportunidades, desafios e perspectivas. Trabalho apresentado no primeiro workshop do Ciclo de Debates sobre Petróleo e Economia de 2017. Rio de Janeiro: IBP, 2017. Disponível em: https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/analises/gas-do-pre-sal-oportunidades-desafios-e-perspectivas. Acesso em: 08 out. 2023.

API STANDARD 1163. **In-line Inspection Systems Qualification**. Retrieved February 1, 2024. API: Washington, DC, 2024. Disponível em: https://www.api.org/products-and-services/standards. Acesso em: 08 out. 2023.

LINDNER, H. Deepwater, high-pressure and multidiameter pipelines: a challenging in-line inspection project. *In*: REVIE, R. Winston. **Oil and Gas Pipelines.** New Jersey: Wiley, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1002/9781119019213.fmatter. Acesso em: 08 out. 2023.

LINDNER, H.; BEUKER, T.; DIEKAMP, M. In-line inspection of multi-diameter pipelines: standardized development and testing for a highly efficient tool fleet. *In*: PIPELINE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2011. **Proceedings [...]**. Disponível em: https://www.pipeline-conference.com/abstracts/line-inspection-multi-diameter-pipelines-standardized-development-and-testing-highly. Acesso em: 08 out. 2023.

PIPELINE OPERATORS FORUM. **Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines**: standard practice: POF 100. POF: [*s. l.*], 2021. Disponível em: https://pipelineoperators.org/documents. Acesso em: 08 out. 2023.