

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Pipeline Conference & Exposition 2005*, realizada no período de 17 a 19 de outubro de 2005, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Pipeline Conference & Exposition 2005*.

Resumo

O oleoduto OSPAR que une São Francisco do Sul-SC à Araucária-PR, com 30 polegadas de diâmetro e 118 km de extensão foi esvaziado em maio de 2004. Utilizou-se nitrogênio bombeado em alta vazão e um *pig* para retirar o petróleo, liberando o duto para manutenção. Restrições logísticas impediram que o esvaziamento seguisse o sentido normal do fluxo no duto, por isso, optou-se por fazer o trabalho no sentido inverso. De forma a viabilizar nossa operação, foi realizada uma manobra, que supomos inédita no Brasil, em estação intermediária de bombeamento, permitindo reduzir a pressão no destino, para mantê-la dentro dos níveis admissíveis. Apesar das dificuldades logísticas e operacionais, o serviço foi realizado com sucesso em 47 horas.

Abstract

Crude oil pipeline OSPAR that unites São Francisco do Sul-SC to Araucária-PR, with 30 inches in diameter and extension of 118 km (74 mi) was displaced in May 2004. Nitrogen at high flow rate and a pig were used to remove the crude oil, liberating the line to maintenance. Logistic restrictions prevented that the displacement followed the normal flow direction, so the option was to do the job in the reverse direction. To make viable our operation, a maneuver was performed; which we suppose was never done before in Brazil, at an intermediate pumping station, allowing a pressure reduction at the line end, maintaining it at permissible levels. Despite logistical and operational difficulties, the job was performed with success in 47 hours.

1. Introdução

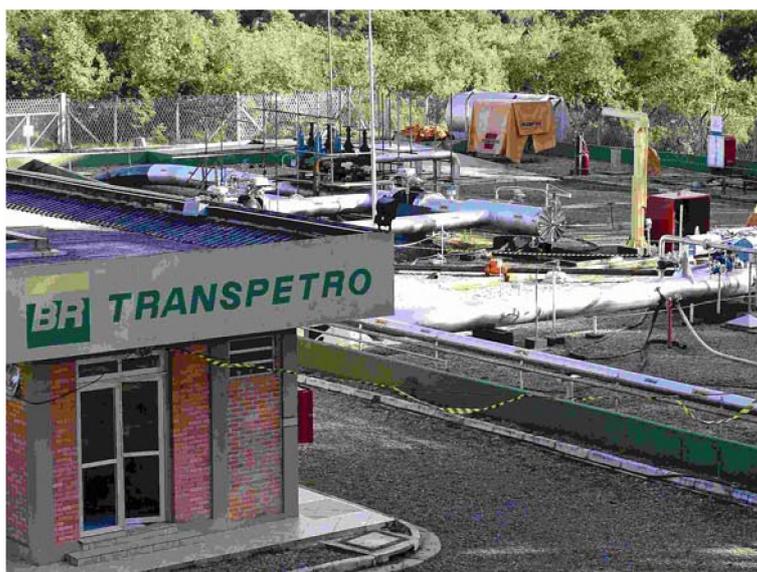
O oleoduto OSPAR transporta petróleo do Terminal Aquaviário da Transpetro em São Francisco do Sul (SFS), no Estado de Santa Catarina até a Refinaria Presidente Getúlio Vargas (Repar) da Petrobras em Araucária, no Estado do Paraná, Figura 1. Ele tem 30 polegadas de diâmetro nominal e cerca de 118 quilômetros de extensão, sendo a única fonte de abastecimento da REPAR, por isso qualquer parada para manutenção neste equipamento é crítica para a operação da refinaria, tendo seu cronograma limitado pelos estoques de petróleo e eventuais paradas da própria REPAR.

Análises da Transpetro, operadora do OSPAR, feitas com *pig* instrumentado, determinaram a necessidade de troca de 19 trechos ao longo do duto, incluindo substituição de válvulas existentes e instalação de novas válvulas. Devido ao número de pontos de reparo e ao cronograma reduzido, ela optou por realizar um esvaziamento completo da tubulação utilizando nitrogênio e *pig*.

O serviço foi realizado pela White Martins em conjunto com a própria Transpetro, tendo apresentado desafios na área de logística de nitrogênio e operação do duto.

¹ Engenheiro Químico – WHITE MARTINS GASES INDUSTRIAIS DO NORDESTE S.A.

² Engenheiro Mecânico – PETROBRAS TRANSPORTE S.A. – TRANSPETRO

Figura 1. Área de lançamento de *pig* na Repar

2. Perfil do OSPAR

Para o projeto de uma operação de deslocamento é necessário o conhecimento do perfil de elevações, Tabela 1, e, de forma auxiliar, saber a posição das válvulas de bloqueio do duto, Tabela 2.

Tabela 1. Perfil de elevações – REPAR → S. Francisco do Sul

Ponto	Distância (km)	Elevação (m)	Ponto	Distância (km)	Elevação (m)	Ponto	Distância (km)	Elevação (m)
1 (REPAR)	0,0	900	22	52,1	783	43	68,8	232
2	1,3	900	23	52,5	876	44	72,1	64
3	2,9	870	24	53,7	776	45	77,4	24
4	6,0	909	25	53,8	793	46	78,3	12
5	6,4	892	26	54,1	826	47	80,0	3
6	6,7	867	27	54,6	768	48	90,9	7
7	8,9	873	28	54,7	771	49	92,2	31
8	9,3	878	29	54,9	785	50	92,6	147
9	11,7	893	30	55,1	865	51	93,7	29
10	16,5	924	31	56,0	812	52	94,0	82
11	17,0	884	32	56,7	619	53	94,2	15
12	25,9	970	33	58,5	668	54	100,5	7
13	28,5	934	34	59,5	489	55	103,5	15
14	31,4	931	35	60,8	440	56	104,0	69
15	34,2	900	36	60,9	440	57	104,4	66
			(Itararé)					
16	37,7	908	37	61,4	385	58	104,6	10
17	39,5	920	38	62,0	336	59	110,3	3
18	46,5	830	39	62,5	387	60	113,2	-23
19	48,1	927	40	63,9	239	61 (SFS)	118,5	3
20	46,6	853	41	67,3	157			
21	50,6	883	42	67,6	139			

Tabela 2. Localização das válvulas

Válvula	REPAR > SFS (km)	Volume (m ³)
---------	------------------	--------------------------

REPAR	0	0
8	5,2	2.235
7	8,0	3.460
6	30,3	13.090
5	53,0	22.915
Itararé	60,6	26.198
4	78,1	33.758
3	90,8	39.212
2	110,4	47.694
1	113,2	48.916
SFS	118,5	51.211

3. Preparativos

3.1. Engenharia

Inicialmente estudamos a realização do deslocamento no sentido de operação do duto, isto é, de SFS para REPAR. A simulação do trabalho indicou uma necessidade de 2,2 milhões de m^3 ($21^\circ C$ e $1atm$) de nitrogênio líquido, que deveriam ser bombeados a uma vazão de $193.000m^3/h$. Estes resultados exigiam recursos técnicos não disponíveis no país, tanto em termos de equipamentos de bombeamento de nitrogênio, como na parte logística de produção e entrega deste produto em SFS, que seria o local de injeção do gás.

A opção foi pensar no deslocamento do *pig* no sentido inverso ao do fluxo normal do duto, com lançamento do mesmo na REPAR. Novos cálculos foram feitos e mostraram uma necessidade de nitrogênio compatível com os equipamentos e produtos que poderiam ser alocados em Araucária. Por outro lado, surgiu uma nova dificuldade, as pressões que se desenvolveriam em SFS seriam superiores ao máximo permitido para o oleoduto, $68kgf/cm^2G$, ver a Figura 2, que mostra um gráfico da pressão esperada em SFS em um deslocamento padrão versus a posição do *pig* no duto.

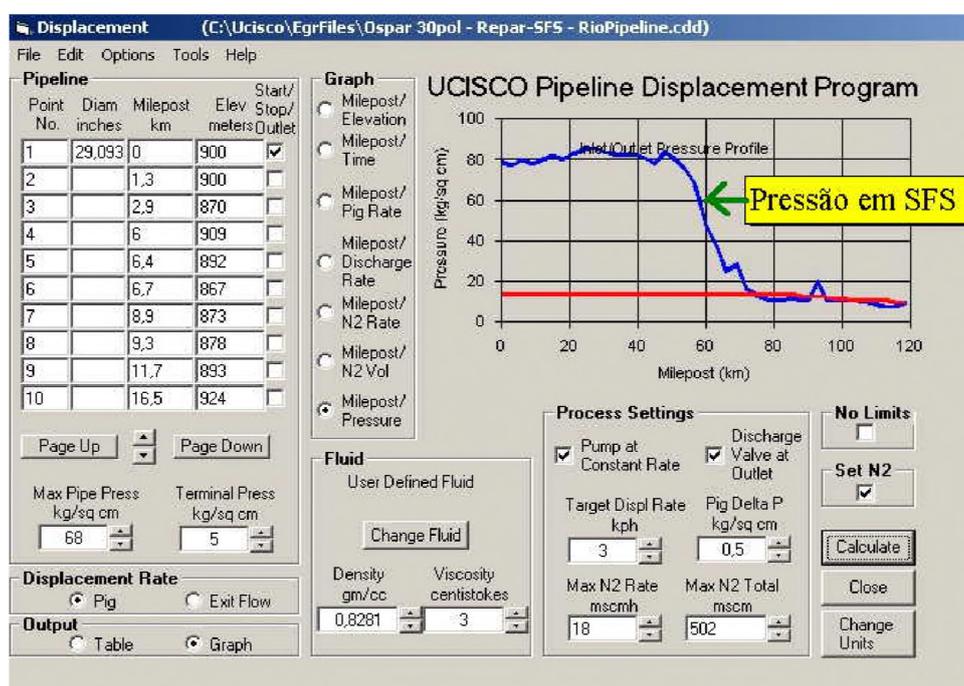


Figura 2. Tela de saída de programa de simulação de deslocamento (pressão vs. posição do *pig*)

A solução envolveu uma estação intermediária de bombeamento de petróleo existente no duto - Itararé - neste ponto está instalado *bypass* que permite direcionar o fluxo de petróleo para dentro da estação - Figura 3. Analisando no sentido REPAR - SFS, a operação consiste em realizar uma manobra de válvulas, permitindo a abertura da coluna de líquido a jusante da estação, através do bloqueio em Itararé e abertura em SFS. Em SFS foi montado um sistema de tubulações e válvulas de controle, para recebimento do petróleo e controle da pressão à montante desta, visando controlar o fechamento da coluna. Em seguida, iniciou-se a passagem de óleo pelo *bypass*, simultaneamente à retirada

do líquido em SFS, mantendo-se a “quebra” de pressão em Itararé, conseqüentemente a pressão não seria transmitida do trecho a montante de Itararé para o trecho seguinte.

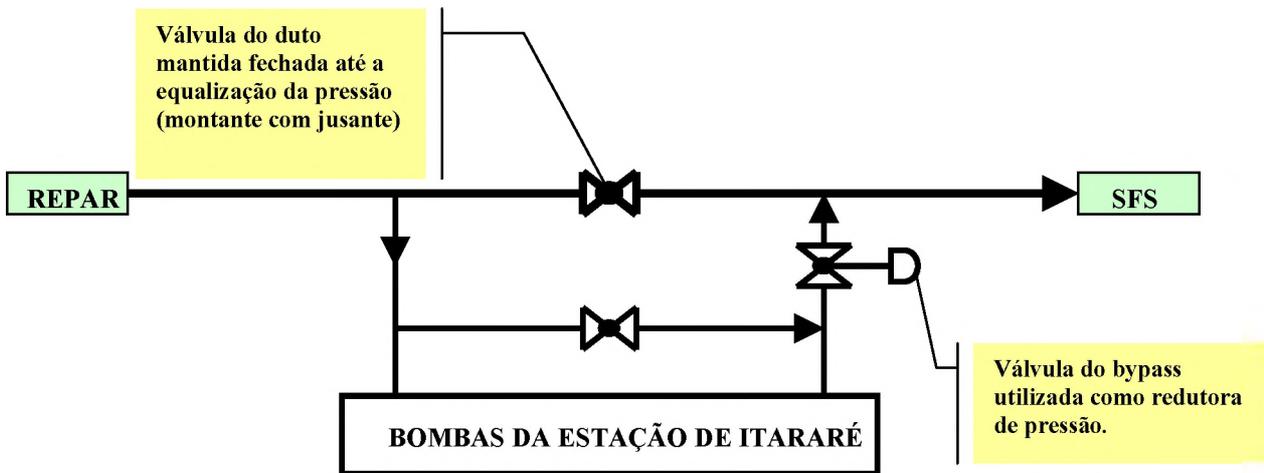


Figura 3. Bypass na estação intermediária de Itararé

Outros pontos levados em consideração foram:

- Integridade da válvula de bloqueio do oleoduto em Itararé – mantê-la totalmente fechada, não realizando manobras, para assegurar seu pleno funcionamento, quando fosse necessária sua abertura total.
- O desbloqueio da válvula principal em Itararé só poderia ser feito com as pressões à montante e à jusante da estação equalizadas, garantindo uma operação suave.
- Evitar que o pig atingisse a válvula de Itararé antes dela estar completamente aberta, o que poderia danificar o pig ou a mesma.

Para resolver estas questões decidiu-se paralisar o pig em um trecho de descida, num ponto tal que a pressão neste momento (altura de coluna mais pressão de nitrogênio) fosse inferior ao máximo admitido em SFS. Foi escolhido o km 57 como ponto de monitoramento, logo após o qual existe um trecho de descida íngreme com cota máxima de 668m, ver Figura 4. Para garantir que a pressão em SFS fosse menor que 68kgf/cm²G, calculamos a pressão com a coluna de SFS até Itararé cheia de petróleo e subtraímos este valor do máximo permitido, o resultado é a pressão máxima a montante de Itararé para garantir um bloqueio seguro.

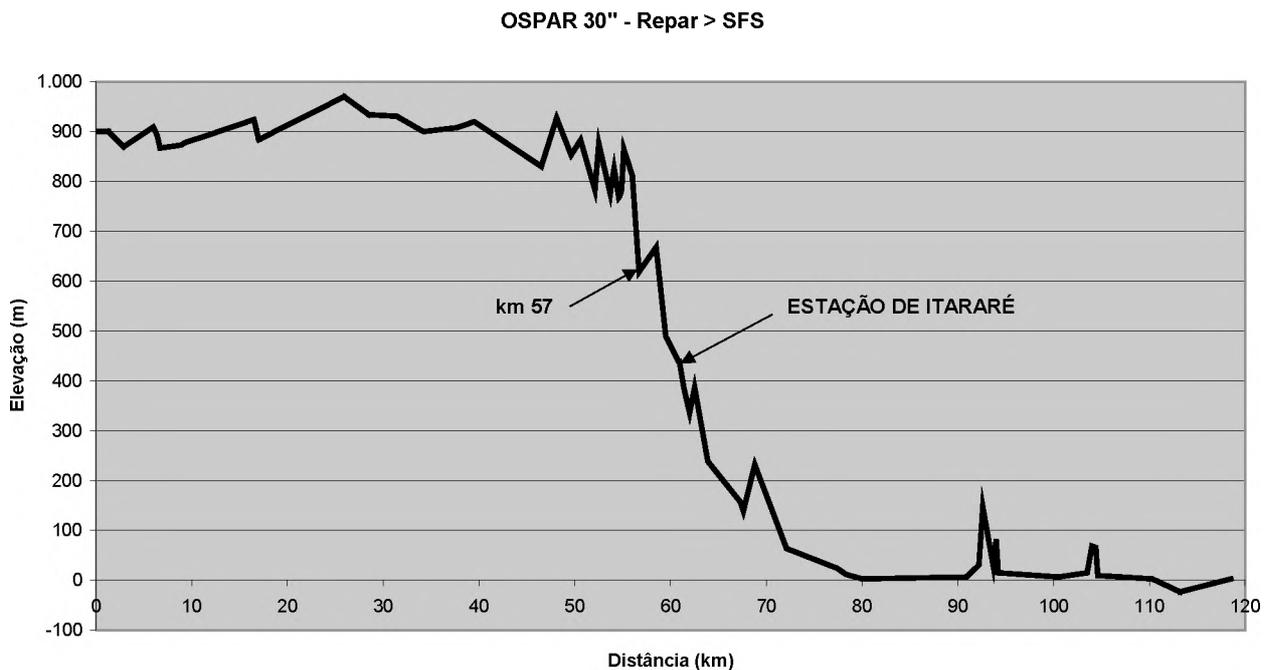


Figura 4. Perfil de elevação

O bombeamento de nitrogênio foi dividido em duas etapas: antes e depois da equalização. Para minimizar as pressões envolvidas na operação, calculamos a primeira fase de bombeio baseados na necessidade de levar o pig somente até a estação de Itararé. Isto permitiu um corte antecipado no bombeio, desta forma, quando o pig chegasse no ponto em que faríamos o bloqueio de SFS para realizar a equalização, a pressão no lado nitrogênio seria mínima.

Feita a equalização, passaríamos à segunda fase do bombeamento, retornando a injeção de nitrogênio, ainda sem a abertura de SFS, de forma a levantar a pressão até o nível de uma curva normal de bombeio, capaz de levar o pig até SFS, considerando o comprimento total do oleoduto. Atingido o nível desejado, SFS poderia ser desbloqueado e o pig movimentado novamente. Desta vez, o corte definitivo no bombeio foi determinado considerando a totalidade do duto, como dito anteriormente.

O cronograma de trabalho previa um total de 58 horas entre a partida do pig e sua chegada no destino. Incluso 1 hora para equalização e 10 horas e meia para re-pressurização após a equalização.

Os cálculos foram feitos utilizando um simulador de deslocamento de fluidos criado pela Praxair, Inc. (EUA), empresa matriz da White Martins. Este programa supõe uso de nitrogênio e pig para deslocar um líquido, considerando que o mesmo esteja com a coluna “fechada”, isto é, não haver escoamento com abertura de vácuo no topo das maiores elevações.

3.2 Logística

O fornecimento de nitrogênio líquido para operações deste tipo é um item chave, por isso devem ser considerados os seguintes fatores:

- Distância do local de bombeamento até as usinas produtoras de nitrogênio líquido – a unidade mais próxima capaz de suprir a quantidade necessária estava localizada em Joinville (SC), cerca de 180km de distância. As outras com tamanho adequado ficavam em Americana e Jacaré (SP) e Triunfo (RS).
- Quantidade e vazão dos equipamentos de bombeamento de nitrogênio.
- Quantidade e capacidade das carretas de transporte de nitrogênio líquido – estes equipamentos normalmente fazem parte de uma frota que é otimizada para entregas regulares em consumidores com consumo contínuo. Serviços de natureza eventual, como o nosso, exigem uma série de procedimentos logísticos para permitir a liberação das carretas, por exemplo: aumento de estoque nos consumidores, aumento de estoque nas usinas produtoras, mudança no mix de produção das usinas, contratação de demanda de energia elétrica, atendimento de consumidores regulares a partir de usinas mais distantes, todos eles com limites físicos que podem inviabilizar uma operação.

Para viabilizar a operação, foi necessária a montagem de estocagem temporária na REPAR, isto incluiu dois tanques criogênicos, cada um com capacidade nominal de 34.000m³, 63 toneladas peso bruto, 11m de altura e 3,1m de diâmetro, ver Figura 5. Além disso, para o período da operação, alugou-se um tanque existente em uma usina desativada em Curitiba, já destinada a sucata, o qual tinha capacidade de armazenagem superior a 500.000m³, ficando a uma distância de cerca de 20 quilômetros do local do serviço. Este tanque foi reativado, resfriado e abastecido em uma programação de transferência de nitrogênio líquido que durou os três meses anteriores ao início da operação de deslocamento do OSPAR.



Figura 5. Tanque criogênio para nitrogênio líquido

4. Operação de Deslocamento com Nitrogênio

4.1. Informações Gerais

O deslocamento do petróleo foi realizado com nitrogênio gasoso e um pig, que teve função de interface, impedindo que o gás laminasse sobre o líquido.

Foram descarregados na REPAR 689.000m³ de nitrogênio líquido, sem contabilizar outros gastos na tancagem de Curitiba – resfriamento, fugas e perdas que ocorreram nos três meses de armazenagem neste mesmo tanque.

Usamos um pig do tipo flex, com corpo monolítico em elastômero de poliuretano, com cinco discos de selagem mais um copo na parte posterior, Figura 6.

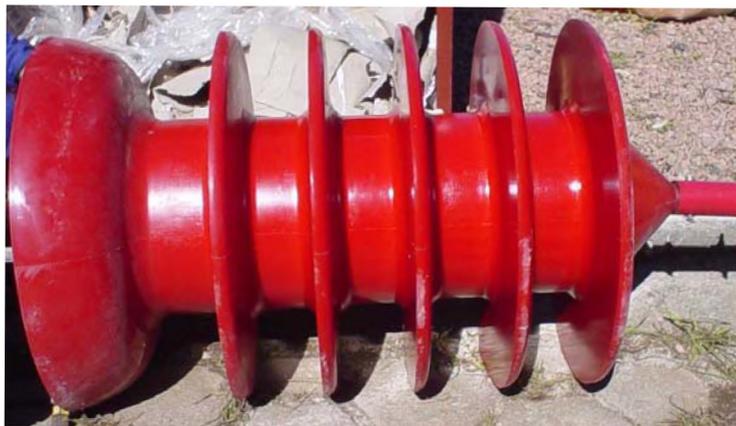


Figura 6. Pig tipo flex

O pig foi posicionado no lançador, Figura 7, o qual foi fechado em seguida, para que sua câmara fosse equalizada com o duto. Na mesma figura podemos ver o que o pig possui uma cavidade ao longo de seu eixo, que se expande na direção radial quando o nitrogênio pressiona o pig, aumentando sua capacidade de selagem, mesmo que haja desgastes do copo e discos.



Figura 7. Pig sendo posicionado na câmara de lançamento

Durante o período de bombeamento, o nitrogênio foi levado ao local da operação na forma líquida por 5 carretas criogênicas, como a da Figura 8, sua temperatura neste estado é de -196°C , na pressão atmosférica. Ao todo, foram realizadas 34 viagens de entrega do produto.



Figura 8. Carreta para transporte de nitrogênio ($24.000\text{m}^3 @ 21^{\circ}\text{C}$ e 1atm)

O nitrogênio foi bombeado e vaporizado através de 4 equipamentos móveis dotados de bombas criogênicas de deslocamento positivo, impulsionadas por motores diesel e vaporizadores de chama direta ou água aquecida em caldeira, em ambos os casos usando chama de diesel como fonte de calor, ver Tabela 3 e Figura 9.

Tabela 3. Relação de equipamentos de bombeamento e vaporização de nitrogênio

Tipo	Vazão Máxima ($\text{m}^3/\text{h} @ 21^{\circ}\text{C}$, 1atm)	Pressão Máxima ($\text{kgf}/\text{cm}^2\text{G}$)	Vaporizador de Nitrogênio	Configuração
SMB 15.000	15.000	350	Chama direta	Carreta com 5 eixos
SMB 6.000 I	6.000	350	Água aquecida em caldeira	Caminhão com 2 eixos
SMB 6.000 II	6.000	350	Água aquecida em caldeira	Carreta com 5 eixos
NPS 400	11.000	350	Chama direta	Skid sobre prancha rebaixada



Figura 9. Sistema móvel de bombeamento de nitrogênio (6.000m³/h, 350kgf/cm²G)

O monitoramento da operação teve como pontos chave a medição de pressão em diversos pontos, medição do volume recebido em SFS, e rastreamento do pig em pontos notáveis, como as válvulas de bloqueio, usando geofones eletrônicos para escutar a passagem do pig. Também foi colocado no pig um emissor de rádio frequência, para auxiliar na determinação da partida e chegada nos canhões de lançamento e recebimento respectivamente, e possível detecção da posição do mesmo em caso de parada não esperada ao longo do duto. Todos estes meios tem erros e possibilidades de falso positivo associados, assim interpretação dos dados deve ser feita em conjunto e por pessoal experiente.

4.2. Cronologia de Eventos

Segue a Tabela 4 com detalhamento dos eventos. Nossas estimativas de posição e velocidade do pig foram feitas com base no volume de petróleo recebido em SFS, isto gera uma possibilidade razoável de imprecisões, já que existia um escoamento proposital do duto em Itararé, e podem ter havido outras situações de escoamento. A posição corrigida leva em conta um escoamento 920m³ de petróleo antes do início da passagem do pig. Quando possível, determinamos a posição pela passagem do pig nas válvulas de bloqueio, detectada por geofone.

Tabela 4. Detalhamento de eventos

Duração (h)	Posição Corrigida REPAR > SFS (km)	Vel. Média do Pig no Intervalo (km/h)	Pressão REPAR (kgf/cm ² G)	Pressão Montante Itararé (kgf/cm ² G)	Pressão Jusante Itararé (kgf/cm ² G)	Pressão SFS (kgf/cm ² G)	Observações
0,00	0,0	na	3,0	33,0	nd	nd	Pig na REPAR Início do bombeio de N ₂
1,50	4,7	3,14	9,0	35,8	0,0	29,0	Pig na válvula de bloqueio 8 (VB-8)
1,75	5,5	3,24	9,3	37,1	0,3	28,6	
2,75	9,0	3,50	9,0	37,2	0,0	22,4	VB-7 (2,50h)
3,75	12,1	3,10	9,0	41,8	0,0	24,2	
4,75	16,5	4,38	8,0	38,0	0,0	23,2	
5,75	21,1	4,55	7,1	41,7	0,0	23,8	
6,75	25,6	4,57	6,7	42,8	0,0	21,6	
7,75	29,5	3,89	6,7	41,9	0,0	28,3	
8,75	33,5	3,94	7,0	42,9	0,0	29,5	
9,75	37,4	3,91	7,2	42,3	0,0	29,5	
10,75	41,5	4,14	7,4	40,5	0,0	29,2	
11,75	45,0	3,47	8,0	18,4	0,0	26,0	
12,75	45,9	0,96	8,4	40,6	0,0	27,4	
13,75	45,9	0,00	9,0	34,0	0,6	35,2	
14,75	46,6	0,65	9,7	45,0	0,3	34,2	
15,75	48,3	1,70	10,0	42,2	7,2	36,5	
16,75	52,1	3,84	9,9	38,1	5,1	34,7	VB-5 (16,92h) Parada no bombeio de N ₂ (17,00h)

17,75	55,9	3,80	9,3	32,8	2,4	32,4	Pig no km 57 (18,08h)
18,75	58,2	2,27	8,9	19,1	18,7	54,7	Bloqueado SFS (18,25h)
19,75	58,2	0,00	8,9	na	na	54,7	Válvula principal de Itararé toda aberta (18,85h)
20,45	60,1	2,73	8,9	na	na	44,0	Início do bombeio de N ₂ (19,42h)
20,75	60,3	0,78	9,0	na	na	41,6	Aberto SFS para movimentar o pig até jusante de Itararé, visando diminuição de pressão em ponto defeituoso
21,25	60,3	0,00	9,2	na	na	nd	Pig passando por Itararé
21,75	60,3	0,00	9,5	na	na	41,8	Bloqueado SFS
22,75	60,3	0,00	10,2	na	na	42,2	
23,75	60,3	0,00	10,8	na	na	42,7	
24,75	60,3	0,00	11,3	na	na	43,1	
25,75	60,3	0,00	11,9	na	na	43,4	
26,75	60,3	0,00	12,4	na	na	43,5	
27,75	60,3	0,00	12,8	na	na	43,5	Aberto SFS
28,25	61,0	1,35	13,0	na	na	39,0	
28,75	62,4	2,72	13,0	na	na	34,9	
29,75	65,2	2,83	12,8	na	na	23,6	
30,75	67,9	2,66	12,7	na	na	26,9	
31,75	70,7	2,79	12,6	na	na	19,4	
32,75	73,6	2,99	12,5	na	na	16,1	
33,75	74,9	1,28	12,7	na	na	14,6	
34,75	78,0	3,09	12,9	na	na	14,0	
35,33	78,2	0,26	12,5	na	na	12,7	VB-4
35,75	78,9	1,71	12,8	na	na	12,9	
36,75	82,5	3,62	12,5	na	na	8,5	
37,75	86,9	4,37	12,3	na	na	8,7	
38,75	90,4	3,49	12,0	na	na	11,5	VB-3
39,75	93,5	3,12	12,0	na	na	13,4	
40,75	96,3	2,83	11,8	na	na	11,7	
41,75	99,2	2,86	11,8	na	na	nd	Parada final no bombeio de N ₂
42,75	102,8	3,68	11,6	na	na	10,1	
43,75	107,2	4,41	11,0	na	na	9,6	
44,75	111,0	3,75	10,6	na	na	9,6	
45,50	113,7	3,62	10,3	na	na	9,7	VB-2
45,75	114,7	3,79	10,2	na	na	9,8	
46,05	115,9	4,02	10,1	na	na	10,0	
46,77	117,9	2,89	9,9	na	na	nd	VB-1
46,95	118,4	2,70	9,8	na	na	nd	Pig em SFS

4.3. Deslocamento do Pig da REPAR até Itararé

Os equipamentos de bombeio e carretas de transporte de nitrogênio líquido foram posicionados na REPAR, Figura 10, o lançamento do pig transcorreu normalmente, e em uma hora e meia já tínhamos um regime estável de pressão e velocidade do pig.



Figura 10. Equipamentos de bombeio e carretas de nitrogênio na REPAR

Com cerca de treze horas de operação, houve uma redução na velocidade do pig, e possível parada no km 46,5. Isso esteve associado a uma velocidade elevada do pig em período anterior, que manteve a pressão em níveis mais baixos que o desejado. A parada ou redução na velocidade, permitiu que a pressão no lado nitrogênio subisse, com isso, o pig voltou a se deslocar de forma normal.

A posição do pig foi confirmada pela sua passagem pela válvula de bloqueio 5 (VB-5), a análise posição versus pressão neste momento, mostrou que já havia nitrogênio suficiente na linha para levar o pig até Itararé, então o bombeio do gás foi paralisado. O pig seguiu seu deslocamento, levando a pressão de nitrogênio a cair naturalmente.

4.4. Equalização em Itararé

O pig foi detectado no km 57, passou a elevação de 668m e com a pressão à montante de Itararé abaixo de 33,6kgf/cm²G, garantindo que a pressão no destino não passaria de 68kgf/cm²G, foi bloqueado o duto em SFS para iniciar a equalização.

As pressões à montante e à jusante de Itararé se igualaram, como pode ser visto na Figura 11, onde as linhas representando estas pressões se juntam, então a válvula de bloqueio na estação pode ser totalmente aberta. A partir daí foi reiniciado o bombeio de nitrogênio para elevar a pressão até uma nova curva de trabalho, adequada a levar o pig a SFS.

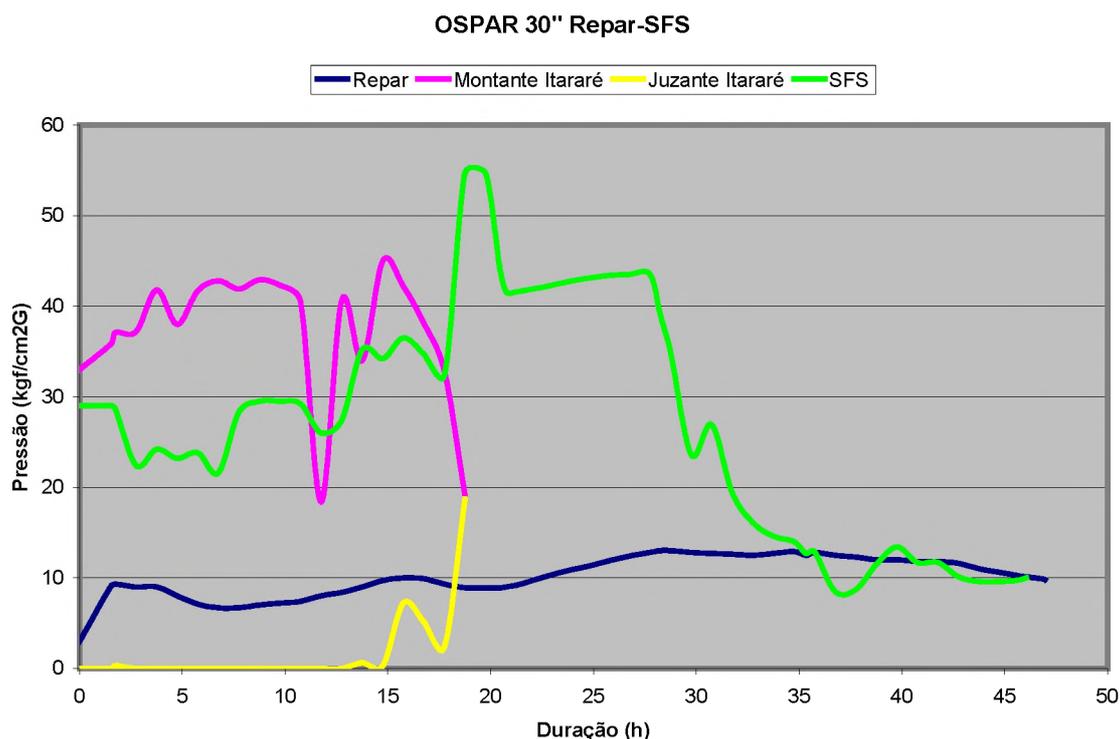


Figura 11. Pressão em diversos pontos do oleoduto ao longo do tempo

Durante o levantamento de pressão, foi feita uma reavaliação de um dos pontos que seriam reparados a jusante de Itararé, recomendando que a pressão fosse reduzida naquela seção, por isso a válvula em SFS foi aberta para deslocar o pig até uma cota mais baixa, aliviando a coluna naquela seção. O pig passou por Itararé, então, novamente, foi bloqueado SFS, para continuar o levantamento de pressão.

4.5. Deslocamento do Pig de Itararé até SFS

O reinício do deslocamento do pig, pela abertura de SFS, foi feito quando a pressão no lado nitrogênio atingiu o nível de 12,8kgf/cm²G.

Na passagem do pig pela VB-4, aparentemente houve uma redução da sua velocidade, mas uma análise mais apurada indicou que o deslocamento permaneceu normal. Naquele ponto a determinação da posição do pig foi feita pela sua detecção com geofone na própria válvula de bloqueio, mas as leituras anteriores e posteriores foram baseadas no volume de petróleo recebido em SFS. Acreditamos que essa discrepância mascarou os valores.

Quando a junção dos dados de posição e a pressão na REPAR indicaram que já havia gás suficiente para deslocar todo o produto até SFS, o bombeio de nitrogênio foi cortado definitivamente, estimava-se que o pig estava no km 99.

O pig chegou a seu destino após 47 horas, na Figura 12 podemos visualizar toda a movimentação.

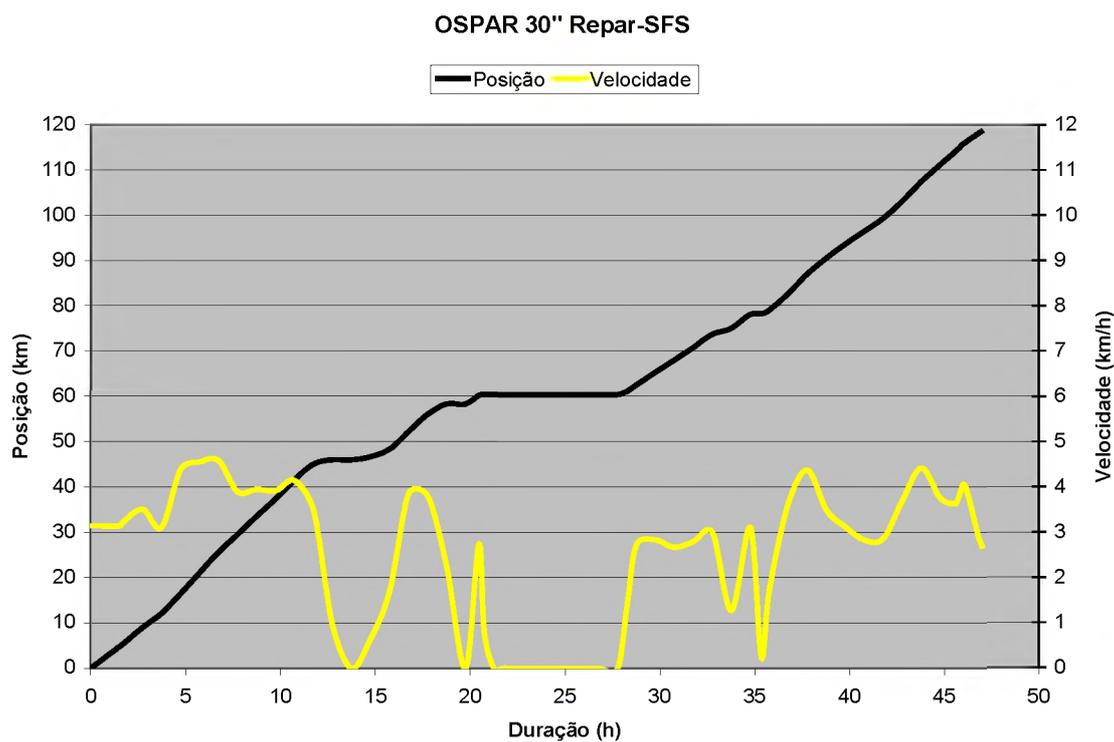


Figura 112. Posição e velocidade do pig durante a corrida

5. Conclusões

A operação ocorreu dentro do cronograma previsto, fator essencial para os trabalhos de manutenção que estavam sendo realizados no oleoduto. Houve uma redução de 9 horas em relação à estimativa inicial.

O pig trafegou, na maior parte do trajeto, dentro da faixa de velocidades recomendadas para as suas características construtivas, 2 a 5 km/h, o que proporciona uma melhor remoção do petróleo. As exceções ocorreram em torno do km 46 e na parada programada para equalização.

Na parte de segurança operacional, a pressão em SFS não ultrapassou o valor máximo permitido.

Por todos estes fatores, consideramos a operação bem sucedida.