

Franklin Wander Nascimento Santos

**Redução das Interfaces Geradas em
Polidutos – Estudo de Caso ORSUB**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Nélio Domingues Pizzolato
Co-orientador: Prof. Luís Fernando Gonçalves Pires

Rio de Janeiro
Abril de 2013



Franklin Wander Nascimento Santos

**Redução das Interfaces Geradas em Polidutos
– Estudo de Caso ORSUB**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada..

Prof. Nélio Domingues Pizzolato

Orientador e Presidente
Departamento de Engenharia Industrial - PUC–Rio

Prof. Luís Fernando Gonçalves Pires

Co-orientador
Centro Tecnológico do Exército

Prof. Armando Celestino Gonçalves Neto

UFRJ

Prof. Marcelo Maciel Monteiro

Petróleo Brasileiro – Rio de Janeiro – Matriz

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de abril de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Franklin Wander Nascimento Santos

Graduou-se em Bacharel em Química na Universidade de Brasília em 2002. Cursou MBA em Planejamento e Gestão Ambiental na Universidade Cândido Mendes, Rio de Janeiro. Atualmente trabalha na área de Logística do Abastecimento da PETROBRAS S.A.

Ficha catalográfica

Santos, Franklin Wander Nascimento

Redução das interfaces geradas em polidutos: estudo de caso ORSUB / Franklin Wander Nascimento Santos ; orientador: Nélio Domingues Pizzolato, co-orientador: Luís Fernando Gonçalves Pires. – 2013.
121 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2013.
Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Transporte de derivados. 3. Duto. 4. Interface. 5. Sistema de tratamento de interface. 6. Simulação. I. Pizzolato, Nélio Domingues. II. Pires, Luís Fernando Gonçalves. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Aos meus Pais, Domingas e Lourenço,
aos meus Irmãos, Wanya e Matheus,
e a minha querida esposa Bruna.

Agradecimentos

À Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais, pelo carinho e por terem sido o contínuo apoio em todos estes anos, ensinando-me, principalmente, a importância da construção de meus próprios valores. A vocês a minha eterna gratidão. Aos meus irmãos, Wanya e Matheus, que confiaram em meu trabalho.

À minha querida esposa Bruna, pelo companheirismo, pelo carinho e compreensão durante a fase de elaboração deste trabalho.

À PETROBRAS, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus orientadores Professor Nélio Domingues Pizzolato e Professor Luís Fernando Gonçalves Pires a consideração de terem aceito a orientação da minha dissertação, pela confiança em mim depositada e pelo estímulo na realização deste trabalho.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

Aos colegas da TRANSPETRO pelo apoio e colaboração na informações.

Aos meus colegas do mestrado, pelos momentos divididos juntos.

Ao corpo docente da PUC, aos técnicos administrativos do Departamento de Engenharia Industrial e da Coordenação Central de Extensão da PUC, pelo auxílio durante todo o curso.

Ao gerente de Avaliação Operacional/Planejamento de Logística, João Fernando Campos, pela sua constante preocupação com o andamento do trabalho, além dos seus valiosos conselheiros e críticas pertinentes.

Resumo

Santos, Franklin Wander Nascimento; Pizzolato, Nélio Domingues. **Redução das Interfaces Geradas em Polidutos**: estudo de caso ORSUB. Rio de Janeiro, 2013. 120p. Dissertação de Mestrado (Opção profissional) - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O transporte de petróleo e de seus derivados através do modal dutoviário é bastante comum na indústria petrolífera. O Oleoduto do Recôncavo-Sul da Bahia (ORSUB) é um poliduto que transporta diesel, gasolina e GLP do Terminal de Madre de Deus até os terminais de Jequié e Itabuna. Esses produtos são inseridos no poliduto em forma de bateladas sequenciais, o que gera as interfaces entre os produtos. Essas interfaces são segregadas e armazenadas em tanques exclusivos. A Agência Nacional de Petróleo ao longo do tempo vem restringindo cada vez mais as especificações dos produtos derivados do petróleo comercializados no país. Com isto, há a tendência natural do aumento das interfaces entre os produtos movimentados no poliduto, para a garantia de que estes atendam a legislação vigente. Estudos demonstram que os custos provenientes da geração de interfaces são altos e constituem um item importante na composição dos custos variáveis do modal dutoviário. Deste modo, reduzir o tamanho destas interfaces deve sempre ser um dos objetivos que o operador logístico responsável pela movimentação no duto deve buscar. Nesta pesquisa foram estudadas as interfaces geradas entre a gasolina e o GLP no ORSUB. Foi utilizado o software ConBate para a estimativa do tamanho da interface e o simulador de processos Petrox, para estimar a qualidade da interface. Com estas duas ferramentas desenvolvidas pelo Centro de Pesquisa da Petrobras (Cenpes) foram comparadas os tamanhos das interfaces geradas nas operações reais, com os tamanhos das interfaces ideais.

Palavras-chave

Transporte de derivados; Duto; Interface; Sistema de tratamento de interface; Simulação.

Abstract

Santos, Franklin Wander Nascimento; Pizzolato, Nélio Domingues (Advisor). **Transmix Reduction in Pipelines – ORSUB Case Study**. Rio de Janeiro, 2013. 120p. MSc. Dissertation (Professional option) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The transportation of oil and its derivatives through modal pipeline is quite common in the oil industry. The pipeline Recôncavo-Sul Bahia (ORSUB) is an oil pipeline that transports gas oil, gasoline and LPG from Terminal Madre de Deus to the terminals Jequié and Itabuna. These products are inserted into the oil pipeline in the form of batches, which generates the interfaces (transmix) between products. These transmix are segregated and stored in dedicated tanks. Over time, The National Petroleum Agency (ANP) is increasingly restricting the specifications of petroleum products sold in the country. With this, there is the natural tendency of increased interfaces between the products moved in pipeline, to ensure that they meet current legislation. Studies show that the costs arising from the generation of interfaces are high and constitute an important item in the cost composition variables modal pipeline. Thus, reducing the size of these interfaces should always be a goal that the logistics operator responsible for moving the product should look. In this research we studied the interfaces generated between gasoline and LPG in ORSUB. *ConBate* software was used to estimate the size of the interface and process simulator *Petrox* to estimate the quality of transmix. With these two tools sizes of the interfaces generated in actual operations and the sizes of the interfaces ideal were compared.

Keywords

Pipeline; Transmix; Oil Pipeline; Transmix Treatment System; Transport fuels; Simulation.

Sumário

1. Introdução	15
1.2. Objetivo	17
1.3. Estrutura da Dissertação	17
2. Oleodutos	19
2.1. Modal Dutoviário	19
2.2. Histórico	20
2.3. Poldutos & Interfaces	25
2.3.1. Fatores que influenciam a geração de interface.....	28
2.3.1.1. Diferença de densidade.....	28
2.3.1.2. Velocidade.....	29
2.3.1.3. Viscosidade	29
2.3.1.4. Continuidade (desligamento e falhas) operacional.....	29
2.3.1.5. Passagem através das instalações	29
3. Oleoduto Recôncavo Sul da Bahia ORSUB	31
3.1. Cadeia de Suprimento do ORSUB	31
3.2. Localização Geográfica	31
3.3. Instalações e Operação do ORSUB	35
3.4. Descrições dos Terminais	37
3.4.1. Terminal Terrestre de Jequié TT Jequié.....	37
3.4.2. Terminal Terrestre de Itabuna TT Itabuna.....	39
3.5. Centro Nacional de Controle Operacional (CNCO)	40
3.6. Sistema de Tratamento de Interface GLP/Gasolina	40
3.7. Características das operações atuais	45
3.7.1. Volumes movimentados de janeiro a setembro de 2011	45

3.7.2. Aspectos físicos das instalações e impactos operacionais	45
4. Modelo de Previsão de Geração de Interface	47
4.1. Revisão bibliográfica	47
4.2. Comparação entre as ferramentas disponíveis para o cálculo do tamanho da interface.....	64
5. Previsão da Qualidade da Interface Gerada	68
6. Cálculos e Simulações	83
6.1. Determinando a equação dos volumes de GLP e gasolina da interface.....	83
6.2. Simulações em operações no ORSUB.....	87
6.2.1. Operação 1 Recebimento da Batelada Gasolina/GLP no Terminal de Jequié.....	88
6.2.2. Operação 2 – Recebimento da Batelada Gasolina/GLP no Terminal de Jequié.....	96
6.2.3. Operação 3 – Recebimento da batelada Gasolina/GLP/Gasolina em Itabuna	102
6.2.4. Operação 4 Simulação considerando o cenário mais crítico.....	111
7. Custos Operacionais e Logísticos	113
8. Conclusões.....	116
9. Referências Bibliográficas.....	118

Lista de Figuras

Figura 1 – Visão esquemática do ORSUB	16
Figura 2 – Transporte Dutoviário	19
Figura 3 – Aqueduto dos Pegões, em Portugal.....	21
Figura 4 – Panorama do Aqueduto da Carioca	22
Figura 5 – Comparação da infraestrutura dutoviária do Brasil com a de outros países ILOS.....	24
Figura 6 – Representação esquemática de uma transferência em batelada de dois produtos em um poliduto, sem a presença de um separador físico.....	26
Figura 7 – Interfaces geradas num poliduto	27
Figura 8 – Sequência das bateladas no ORSUB	31
Figura 9 – Distribuição geográfica do ORSUB	32
Figura 10 – Gráfico do volume movimentado em metros cúbicos no ORSUB.....	34
Figura 11 – Logística de distribuição no ORSUB	35
Figura 12 – Vista aérea do TT Jequié	38
Figura 13 – Vista aérea do TT Itabuna.....	39
Figura 14 – Esquema do sistema de tratamento de interface	41
Figura 15 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds.....	50
Figura 16 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds.....	51
Figura 17 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds.....	51
Figura 18 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds.....	52
Figura 19 – Porcentagem do volume total do duto pela função do	

Número de Reynolds.....	52
Figura 20 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds.....	53
Figura 21 – Comportamento das concentrações em relação ao efeito difusivo	54
Figura 22 – Mudanças no volume da mistura em função da velocidade do fluxo para cada valor de concentração permitido	57
Figura 23 – Volume da mistura em função do número de Reynolds para (a) 100 km e (b) 800 km com CAB=CBA=1%	58
Figura 24 – Volume de interface estimado e medido versus a concentração admissível a $x=135,9$ km	60
Figura 25 – Volume de interface estimado e medido versus a concentração admissível a $x=199,9$ km	60
Figura 26 – Tela inicial do software ConBate	62
Figura 27 – Máscara de dados do cálculo do volume de interface.....	65
Figura 28 – Simulação no ConBate para o trecho Temadre-Itabuna	66
- Simulação no ConBate para o trecho Temadre-Jequié	66
Figura 30 – Comparação da composição do GLP média experimental x média histórica	71
Figura 31 – Dispersão dos valores das densidades do GLP no ORSUB	72
Figura 32 – Curvas de destilação das gasolinas	73
Figura 33 – Especificação dos componentes do GLP	74
Figura 34 – Dados da curva de destilação da gasolina leve	74
Figura 35 – Módulo "misturador" no Petrox.....	75
Figura 36 – Fluxograma das simulações das correntes	76
Figura 37 – Curva de destilação ASTM D86 da corrente S09.....	77
Figura 38 – Pressão de vapor x intemperismo nas correntes de saída (interface) do Petrox	78
Figura 39 – Delta viscosidade x delta densidade nas correntes de entrada do Petrox.....	79
Figura 40 – Pressão de vapor da mistura interface x gasolina e a linha de corte em 62,0 Kpa	80
Figura 41 – Intemperismo da mistura interface x GLP e a linha de corte da especificação (2,2 C).....	82

Figura 42 – Curva de densidade da interface.....	84
Figura 43 – Composição das densidades	85
Figura 44 – Perfil da curva de densidade da batelada gasolina/GLP na operação 1	89
Figura 45 – Região da interface da operação 1	89
Figura 46 – Curva de destilação da gasolina no Petrox	92
Figura 47 – Composição do GLP alimentada no Petrox	92
Figura 48 – Esquema de Simulação no Petrox	93
Figura 49 – Perfil da curva de densidade da operação 2	97
Figura 50 – Perfil da interface na operação 2.....	97
Figura 51 – Curva de destilação da gasolina alimentada no Petrox.....	100
Figura 52 – Composição do GLP alimentada no Petrox	100
Figura 53 – Perfil da curva de densidade da operação 3.....	103
Figura 54 – Cortes de interface entre a gasolina (1) e o GLP	104
Figura 55 – Cortes na interface GLP/gasolina (2)	108

Lista de tabelas

Tabela 1 – Municípios cruzados pelo ORSUB 10	32
Tabela 2 – Municípios cruzados pelo ORSUB 8" (Jequié)	33
Tabela 3 – Municípios cruzados pelo ORSUB 8"(Itabuna).....	33
Tabela 4 – Histórico do volume movimentado no ORSUB em m3	34
Tabela 5 – Diâmetro, espessura e material do ORSUB	35
Tabela 6 – Dados de vazão no TEMADRE	35
Tabela 7 – Dados de vazão em Ipiaú.....	36
Tabela 8 – Propriedades dos produtos transportados via duto	36
Tabela 9 – Movimentação prevista para as bases de distribuição do ORSUB.....	43
Tabela 10 – Resultados das simulações realizadas no projeto do ORSUB.....	44
Tabela 11 – Dados das características dos produtos na simulação.....	64
Tabela 12 – Comparação dos métodos	67
Tabela 13 – Composição dos GLPs.....	72
Tabela 14 – Curva de destilação das gasolinas	73
Tabela 15 – Vazão molares e as características físico-químicas das correntes de saída.....	76
Tabela 16 – Características da mistura interface x gasolina em diferentes concentrações	80
Tabela 17 – Características da mistura interface x GLP em diferentes concentrações	81
Tabela 18 – Composição do GLP na operação 1.....	88
Tabela 19 – Perfil de destilação da gasolina na operação 1	88
Tabela 20 – Volume da Batelada (m3).....	88
Tabela 21 – Estimativa da porcentagem de GLP nos diversos pontos da interface.....	90
Tabela 22 – Resultados do Petrox e do ConBate	94

Tabela 23 – Resultados do Petrox e do ConBate	95
Tabela 24 – Estimativa do volume de interface gerado pelo ConBate	95
Tabela 25 – Composição do GLP na operação 2.....	96
Tabela 26 – Perfil da gasolina na operação 2	96
Tabela 27 – Volume da batelada da operação 2.....	96
Tabela 28 – Estimativa da porcentagem de GLP nos diversos pontos da região de interface.....	98
Tabela 29 – Resultados do Petrox e ConBate	100
Tabela 30 – Resultados do Petrox e do ConBate	101
Tabela 31 – Estimativa do volume de interface gerado pelo ConBate ...	102
Tabela 32 – Composição do GLP da operação 3.....	102
Tabela 33 – Perfil das curvas de destilação das gasolina (1) e (2)	103
Tabela 34 – Volume das bateladas de GLP e das gasolinas na operação 3	103
Tabela 35 – Estimativa do percentual de GLP nos diversos pontos da interface.....	104
Tabela 36 – Resultados do Petrox e do ConBate	106
Tabela 37 – Resultados do Petrox e do ConBate	107
Tabela 38 – Estimativa do volume de interface gerado pelo ConBate ...	107
Tabela 39 – Estimativa das porcentagens de GLP nos diversos pontos da interface.....	108
Tabela 40 – Resultados do Petrox e do ConBate	110
Tabela 41 – Resultados do Petrox e do ConBate	110
Tabela 42 – Estimativa do volume de interface gerado pelo ConBate ...	111
Tabela 43 – Resultados dos Custos Variáveis no Poliduto OSBRA.....	114
Tabela 44 – Resultados nos Custos Variáveis no Poliduto Hipotético ...	115

1 Introdução

O modal dutoviário consiste no sistema de transporte de produtos através de dutos. Historicamente, esse modal foi utilizado para o abastecimento de água para cidades, seja através de aquedutos abertos ou em tubulações. Como modalidade típica de transporte de outros produtos, ganhou importância quando da exploração comercial do petróleo e da distribuição de seus derivados líquidos e gasosos, em especial nos Estados Unidos. Nas últimas décadas, ganhou o reforço de seu emprego no transporte de granéis sólidos, como o minério de ferro e o carvão mineral em mistura com a água, de modo a formar uma pasta fluida, nos chamados minerodutos e carbodutos.

No Brasil, no final da década de 80, foi projetado um sistema de transporte, estocagem e distribuição de combustíveis derivados do petróleo, iniciando no Terminal de Madre de Deus (TEMADRE), na Bahia, e indo em direção ao sul do estado, e terminando nos pólos de Jequié e Itabuna. Este sistema foi denominado oleoduto Recôncavo Sul da Bahia – ORSUB.

O ORSUB é composto por um poliduto (duto que opera com mais de um produto) com duas seções, com um tamanho total de aproximadamente 389 km, e terminais de armazenamento de derivados combustíveis, estações de bombeamento e bases de distribuição (Figura 1).

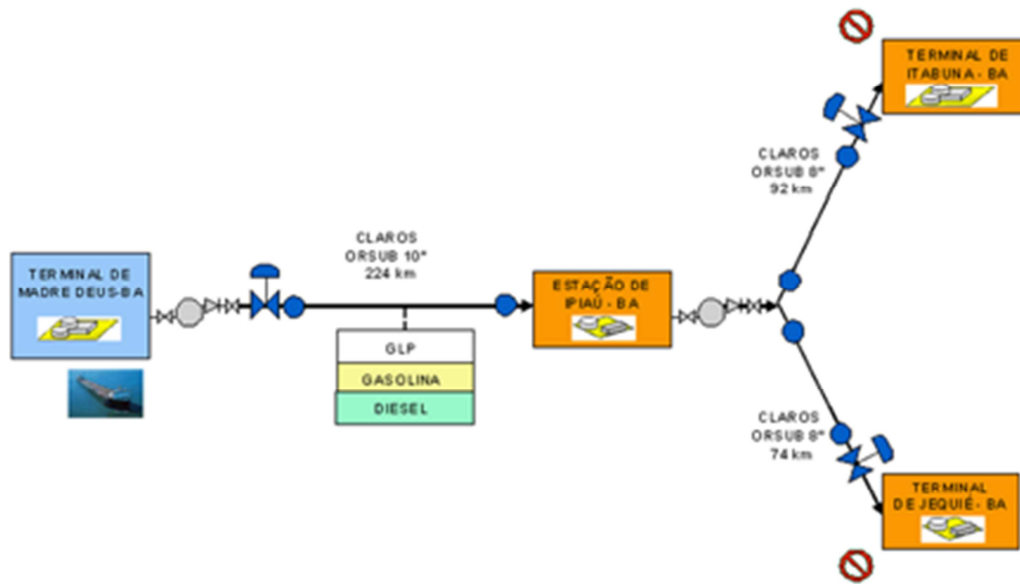


Figura 1 – Visão esquemática do ORSUB
Fonte: Transpetro (2002)

O projeto do poliduto englobava o transporte de 3 combustíveis: gasolina, óleo diesel e gás liquefeito de petróleo (GLP). A movimentação dos produtos no ORSUB é feita em bateladas sequenciais. E, entre cada batelada, se formam misturas intermediárias entre os produtos movimentados, chamadas de interface.

O tratamento formal de interfaces de bombeio é um dos fatores que envolve o gerenciamento das operações de um poliduto, além de outros fatores, como a disponibilidade de produtos, restrições de armazenamento, sequenciamento de eventos, possibilidade de reversão do sentido de bombeio do duto, além de uma variedade de restrições operacionais.

No bombeio entre a gasolina e o diesel é colocado um selo de Querosene de Aviação (QAV), onde 30% é incorporado ao diesel e 70% é incorporado a gasolina, não comprometendo a qualidade de ambos os produtos. Assim, não é produzida uma interface para segregação e posterior tratamento.

As interfaces geradas pelo escoamento de Gasolina e GLP pelo poliduto, ao chegar às bases de Jequié e Itabuna, passam por um vaso de separação (com serpentina de aquecimento e sistema de compressão de vapores) visando à maior recuperação possível de cada um dos produtos e geração mínima de remanescente final de interface, que ainda pode ser incorporada, em parte, ao pool de Gasolina, desde que esta apresente uma pressão de vapor *in natura* que permita tal operação.

A partir de 2001, através de suas resoluções e portarias, a Agência Nacional do petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) modificou parâmetros de qualidade de alguns combustíveis. Entre estas alterações houve a elevação do ponto de fulgor do óleo diesel, em 2001 através da portaria nº 310, e em 2004, a inclusão do resíduo de evaporação do GLP a ser comercializado no país (resolução nº 18). Esta última alteração impactou diretamente o procedimento de tratamento de interface.

Em 2009, através de um Grupo de Trabalho interno da Petrobras, foi apresentada uma proposta de restrição dos limites da pressão de vapor da gasolina e da densidade do GLP produzidos pela RLAM (Refinaria Landulpho Alves), destinados ao bombeio via ORSUB, visando equacionar a incorporação dos volumes de remanescente final de interface gerado durante as operações.

No entanto, o cumprimento de tais limites se mostrou inviável, devido às limitações que provocariam na produção da RLAM e outras de natureza operacional, óbices cuja remoção afetaria fortemente a rentabilidade da Refinaria, além de demandar obras para remover gargalos operacionais.

1.2 Objetivo

O objetivo desta dissertação de mestrado é apresentar uma solução técnica e operacional que permita reduzir o volume de interface gerado entre os produtos movimentados no ORSUB. O presente estudo focará a interface gerada apenas entre o GLP e a Gasolina.

1.3 Estrutura da Dissertação

No capítulo 2, descrevem-se o modal dutoviário, o seu breve histórico, a concepção dos dutos que movimentam mais de um produto, chamados de polidutos, e o modelo teórico para a estimativa dos volumes de interface gerados em polidutos.

No capítulo 3, descreve-se o projeto e as instalações que compõem o ORSUB, desde o início do projeto e construção, e como era realizada a operação deste sistema até 2001, quando a ANP modificou as características dos derivados

de petróleo comercializados no Brasil. Também são descritas as alterações que foram introduzidas visando minimizar as dificuldades criadas pelas mudanças na legislação.

No capítulo 4, descreve-se um modelo teórico de previsão da quantidade da interface na movimentação de GLP e da gasolina através do poliduto.

No capítulo 5, descreve-se um modelo teórico de previsão da qualidade da mistura gerada a partir da qualidade do GLP e da gasolina.

No capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos nos modelos teóricos (de mistura e de geração de interface), e comparados com os resultados e as observações em campo.

No capítulo 7, são discutidos os impactos/custos logísticos decorrentes de uma sistemática ineficiente para reduzir e tratar as interfaces geradas entre as movimentações dos produtos.

No capítulo 8, são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para futuros trabalhos.

2 Oleodutos

2.1 Modal Dutoviário

O modal de transporte por dutos (dutoviário) de um país é uma infraestrutura estratégica por garantir a movimentação de grandes volumes de petróleo e derivados, produtos essenciais para a economia do país. Para determinados volumes e distâncias, o transporte de produtos combustíveis por dutos, quando comparado com outros modais de transporte, geralmente se apresenta como alternativa econômica mais vantajosa, confiável e segura (Freire, 2009).

A Figura 2 apresenta a seção de um sistema de transporte dutoviário.



Figura 2 – Transporte Dutoviário
Fonte: www.logisticaaplicada.wordpress.com (2011).

O transporte modal dutoviário apresenta grandes vantagens com relação aos outros modais de transporte:

1. Alta confiabilidade: por se tratar de uma operação contínua, que não é afetada por condições adversas do tempo; elevado grau de automação.
2. Alta economia: em geral é mais econômico que outros modais, como o transporte ferroviário ou o rodoviário.
3. Baixo consumo de energia: em comparação ao modal ferroviário e rodoviário, considerando a energia consumida para transportar a mesma carga pela mesma distância;
4. Baixo impacto ambiental: por ficarem enterrados não trazem os inconvenientes dos modais ferroviário e rodoviário, como ocupação das vias de transporte, poluição do ar, ruído, e acidentes. Entretanto, têm-se o impacto no desmatamento da faixa e na fase de montagem do duto.

2.2 Histórico

A necessidade de suprimento contínuo de água para beber nas pequenas comunidades, levou ao desenvolvimento dos aquedutos. Há séculos atrás os dutos transportavam água para as aldeias e habitações. Os primeiros assentamentos foram ao longo dos rios, lagos e poços naturais, já que a proximidade com as fontes de água foi primordial para o estabelecimento das primeiras cidades. Entretanto, o aumento da população realocou estes assentamentos para maiores distâncias dos recursos hídricos. Concomitantemente, houve a crescente necessidade humana por quantidades cada vez maiores de água. Assim, tornaram-se necessárias construções que transportassem água a assentamentos mais distantes, os grandes aquedutos (Mohitpour, 2005).

Na antiguidade, quase todas as civilizações construíram aquedutos, como por exemplo a China, a Assíria, a Fenícia, a Grécia e Roma. E foi com a civilização romana que os aquedutos tiveram um desenvolvimento extraordinário.

A cidade de Roma, no século I era abastecida por onze aquedutos, o maior deles com 90 km de extensão.

Na Figura 3 é apresentado o Aqueduto dos Pegões, em Portugal. Este aqueduto foi construído em 1614, com a finalidade de abastecer de água o Convento de Cristo em Tomar, e tem cerca 6 km de extensão.



Figura 3 – Aqueduto dos Pegões, em Portugal
Fonte: <http://pt.wikipedia.org> (2012).

No Brasil tem-se o conhecido aqueduto da Carioca (Figura 4) popularmente conhecido como os Arcos da Lapa, na região da Lapa, no centro da cidade do Rio de Janeiro. Inaugurado em 1750, captava água no Alto de Santa Tereza e a transportava até aos pés do Convento de Santo Antônio, em um chafariz de mármore, através de 16 bicas de bronze. Mais tarde essa água foi estendida, através da Rua do Cano (atual Rua Sete de Setembro), até ao Lago do Paço (atual Praça 15 de Novembro), aonde os navios vinham abastecer-se. Na segunda metade do século XIX, durante o Império e, posteriormente, diante do advento da República, novas alternativas para o abastecimento de água aos moradores da cidade do Rio de Janeiro foram sendo utilizadas. O aqueduto, a partir de 1896, passou a ser utilizado como viaduto para os novos bondes de ferro da Companhia de Carris Urbanos, principal meio de acesso do centro aos altos do bairro de Santa Teresa, até os dias de hoje (Aqueduto dos Pegões, 2012).

A estrutura, em pedra argamassada, apresentava originalmente 270 metros de comprimento por 17,6 metros de altura. Em estilo românico, caiada, possui 42 arcos duplos e óculos na parte superior. Em sua construção foi empregada a mão de obra de escravos indígenas e africanos.



Figura 4 – Panorama do Aqueduto da Carioca
Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Aqueduto_da_Carioca (2013).

Os primeiros dutos, propriamente ditos, foram construídos em madeira. Com a evolução da tecnologia, as tubulações de aço rapidamente substituíram as primeiras tubulações de madeira, já que estes eram pontos críticos de potenciais vazamentos dos produtos transportados (Freire, 2009).

No dia 27 de agosto de 1859, o americano “coronel” Edwin Drake, constrói a primeira torre de petróleo na Pensilvânia. O óleo foi produzido quando o poço atingiu 23 metros de profundidade (Yergin, 2010). Refinarias foram construídas para refinar os óleos produzidos nos campos de perfuração. As refinarias de petróleo se localizam próximo aos grandes centros industriais ou às grandes cidades, que são os maiores consumidores de derivados de petróleo, com o objetivo de reduzir os gastos com o transporte, tendo em vista que transportar petróleo é menos custoso que transportar seus derivados. Assim, mover o óleo do campo para as refinarias se configurou como sendo um dos problemas mais urgentes.

Barcos de todos os tipos e tamanhos também foram utilizados neste serviço. Entretanto, esse tipo de transporte se mostrou muito caro e perigoso na época, já que muitos barcos foram destruídos e muito óleo foi perdido (University of Texas, 1984).

As ferrovias foram a segunda solução para o problema de movimentação do óleo do campo para a refinaria. Nesta época do *boom* do óleo, as ferrovias ficavam a mais de 30 km dos principais campos produtores. Assim, as primeiras

descobertas de petróleo eram transportadas para as estações ferroviárias em barris de whisky, agora convertidos em barris de petróleo, que por sua vez seriam transportados em carroças movidas por cavalos. Daí vem o uso de Barril como unidade de medida de petróleo líquido, equivalente a 159 litros. Entretanto, novamente o alto custo do transporte do óleo, aliado ao congestionamento das linhas ferroviárias e à falta de segurança, foi um desafio que estimulou o desenvolvimento de um meio de transporte mais econômico e seguro. Os dutos foram a resposta (University of Texas, 1984).

Assim, em 1879, foi construído um duto com 175 km de comprimento e de 6 polegadas de diâmetro, através das montanhas Allegheny até Williansport, Pensilvânia. Deste ponto em diante, o óleo seguia por caminhões-tanque para Nova York e outras refinarias na costa do atlântico. Este projeto de oleoduto serviu para comprovar em definitivo a viabilidade do transporte de produtos combustíveis, de forma contínua, por meio de dutos e através de grandes distâncias (Freire, 2009).

No início do século XX, a construção de oleodutos começou a se expandir (Kennedy, 1983). Nessa época, o Azerbaijão era responsável por mais da metade da produção mundial de petróleo. Ali foi construído o maior oleoduto do mundo à época – com 8 polegadas de diâmetro, 885 km de comprimento e 16 estações de bombeamento –, para transportar de Baku até o Mar Negro; de lá o combustível seguia por navios para o resto do mundo.

Ao longo de todo o século XX, o segmento de dutos nos Estados Unidos cresceu exponencialmente, chegando a atingir, no ano de 2007, aproximadamente 800.000 km de dutos, dos quais 300.000 km de oleodutos, 500.000 km de gasodutos de transporte de gás natural.

Semelhante expansão verificou-se no restante do mundo, em todos os países com certo nível de desenvolvimento. Em 2007, a Rússia despontava com cerca de 250.000 km de dutos, dos quais 170.000 km de gasodutos; o Canadá, com 100.000 km; a China, com 50.000 km; a Alemanha e a Austrália, com 32.000 km cada; o Reino Unido, com 30.000 km; a França com 23.000 km; e a Itália, com 20.000 km (Freire, 2009).

No Brasil, apesar das dimensões continentais, a rede de dutos é pequena em relação a norte-americana (Figura). Isto se deve a contribuições de alguns fatores: a concentração histórica da população brasileira ao longo da costa, e,

consequentemente, a instalação de refinarias e terminais junto a estes centros; o uso de modais de transportes como a cabotagem; o fato das reservas de petróleo estarem localizadas junto aos principais centros consumidores; a definição estratégica governamental de investimentos em hidroelétricas para a geração de energia elétrica em detrimento ao gás natural como matriz energética.

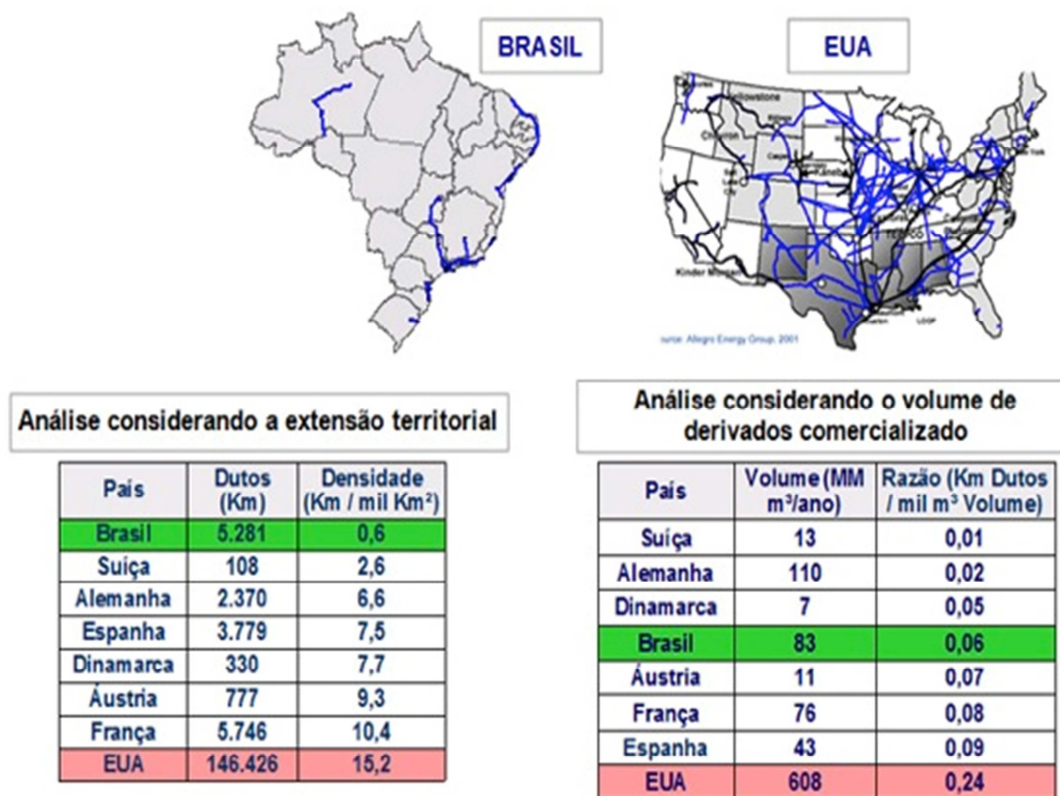


Figura 5 – Comparação da infraestrutura dutoviária do Brasil com a de outros países ILOS

Fonte: FIGUEIREDO (2006)

Em 2008, o Brasil possuía cerca de 8.000 km de oleodutos e 8.000 km de gasodutos. Em 2010, a malha dutoviária brasileira chegou a 22.000 km (MONTENEGRO, 2012). Ultimamente, com: o desenvolvimento do centro-oeste brasileiro; a maior participação do gás natural na matriz energética nacional; a exploração das novas reservas de petróleo e gás; e o aumento da produção de biocombustíveis em regiões distantes dos mercados consumidores, serão necessários novos dutos.

2.3 Polidutos & Interfaces

Como forma de otimizar os altos investimentos necessários para a construção de dutos, surge a alternativa da multiutilização de um mesmo duto.

O transporte de líquido em forma de lotes (bateladas) permite que múltiplos produtos possam ser enviados pelo mesmo duto. Para se gerenciar a qualidade de cada produto transferido em sequência, são dimensionados os volumes das diversas porções, também chamadas de bateladas. Esse movimento sequencial de líquidos em bateladas é comumente utilizado por refinarias e terminais para transportar uma grande quantidade de produtos através de um único duto, também chamado nestes casos de poliduto (Mohitpour, 2005).

A batelada de produtos refinados foi realizada pela primeira vez em 1901, em um duto na Pensilvânia. Mas a construção de polidutos não começou, efetivamente, até 1930. O crescimento dos grandes centros populacionais no centro-oeste americano tinha criado novas áreas de venda de produtos refinados. Por causa da Depressão de 1929, os comerciantes de petróleo estabelecidos estavam acirradamente lutando por esta fatia do mercado. A concorrência exigiu que um método menos dispendioso de transporte devesse ser empregado da refinaria para o mercado. Os dutos destinados ao transporte de vários tipos de produtos refinados foram a resposta. Como resultado, 3.000 km de polidutos foram colocados em operação durante 1930-31 (University of Texas, 1984).

Este tipo de operação de transferência de lotes pode ser realizado na prática de duas maneiras diferentes. A primeira é a utilização de separadores físicos, denominados pigs, de modo a impedir o processo de mistura e contaminação na interface do produto subsequente. Neste tipo de operação, separadores físicos devem ser devidamente alinhados e conectados a cada estação de bombeamento, o que exige mão de obra especializada e tempo para executar essas tarefas. Em particular, a operação com pigs em polidutos, onde existem numerosas estações intermediárias de bombeio, pode se torna tecnicamente inviável.

Na segunda maneira é sem o uso de separadores físicos, o que induz a formação de uma zona de mistura na região entre os dois produtos, ou seja, na região do contato físico entre duas bateladas de produtos diferentes existe uma área de contaminação. Nessa zona, o “produto” é frequentemente conhecido como

interface. Hoje em dia, a segunda opção é a mais utilizada no transporte dutoviário de produtos derivados da indústria do petróleo. (Oliveira, 2010)

A Figura representa a transferência num poliduto de dois produtos em batelada, sem a presença de um separador físico. Notar que no destino, além da presença dos dois produtos iniciais, há a formação de uma mistura dos dois produtos (interface).

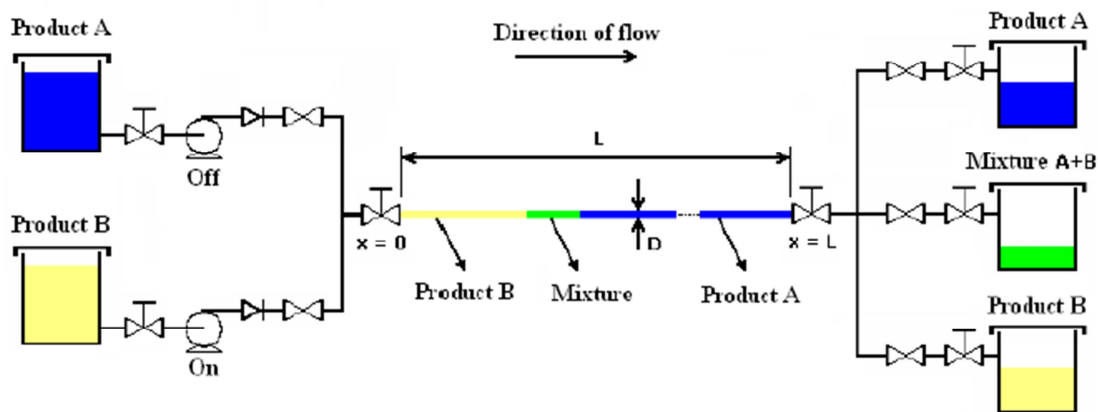


Figura 6 – Representação esquemática de uma transferência em batelada de dois produtos em um poliduto, sem a presença de um separador físico
Fonte: Oliveira, 2010.

Como mostrado na Figura 6, o produto A está sendo bombeado, quando em certo momento, o produto B é inserido no duto. A partir deste momento, o produto B começa a empurrar o produto A através do poliduto, iniciando a formação de uma zona de mistura na área de contato entre os dois produtos. Esta zona de mistura é denominada interface.

A formação de interface nas transferências em lotes implica num custo adicional de tratamento, ou na venda desta interface como um produto de menor valor de mercado ou mesmo reprocessamento em uma refinaria. Neste caso, além do custo do reprocessamento em si, há que se considerar o custo do transporte até a refinaria e outros custos decorrentes desta logística reversa. Do ponto de vista operacional, a formação de interface é um fator importante a ser considerado no planejamento de transferências de produtos por dutos.

Assim, em polidutos deve-se planejar a sequência dos vários produtos, de modo que as consequências da inevitável contaminação sejam reduzidas tanto

quanto possível, e que este produto “intermediário” possa ser utilizado diretamente em um dos dois produtos ou mesmo dividido entre os dois. Geralmente, o produto menos nobre ou mais flexível (menos rigoroso em relação à especificação de qualidade) recebe esta interface. Entretanto, em alguns casos, a interface não pode ser incorporada a nenhum dos dois produtos, por apresentar características incompatíveis com os mesmos (Vicent-Genod, 1984).

A Figura mostra um exemplo de sequência de bateladas em um poliduto, e a formação de interface entre os produtos. A batelada gasolina/GLP produz uma interface que necessita ser separada e tratada. Já na batelada entre a gasolina e a gasolina Premium, a mistura formada na zona de contato vai ser incorporada na gasolina comum, já que esta interface poderá tirar de especificação a gasolina Premium. Neste caso o custo equivale à perda no volume que seria vendido como gasolina Premium, e agora será comercializada apenas como gasolina.

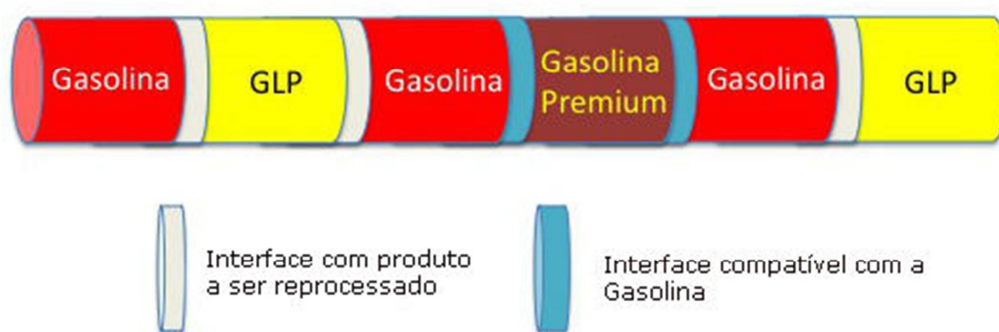


Figura 7 – Interfaces geradas num poliduto
Fonte: O Autor (2013).

O tratamento formal de interfaces de bombeio é um dos fatores que envolvem o gerenciamento das operações de um poliduto, além de outros fatores como: a disponibilidade de produtos, restrições de armazenamento, sequenciamento de eventos, vazão do duto, possibilidade de reversão do sentido de bombeio do duto, além de uma variedade de restrições operacionais.

2.3.1 **Fatores que influenciam a geração de interface**

A interface aqui descrita nada mais é que a zona de mistura de dois produtos consecutivos em um poliduto. Mistura é a reunião de duas ou mais substâncias sem que haja reação química entre elas, e mantendo cada qual as suas propriedades.

A formação dos produtos na zona de mistura em transferências contínuas (isto é, as transferências em que o bombeio não é interrompido) é predominantemente governada pelo fenômeno da dispersão de massa. Este fenômeno resulta da combinação do processo de difusão radial, com a existência de um perfil de velocidade não uniforme da mistura em um desenvolvimento laminar ou em fluxo turbulento (Fowler & Brown, 1943).

Quando um sistema de dois ou mais componentes no qual as concentrações variam de ponto a ponto, há uma tendência natural de a massa ser transferida, minimizando as diferenças de concentração entre os componentes deste sistema. O transporte de um constituinte de uma região de alta concentração para aquela de menor concentração é chamado de transferência de massa.

A transferência de massa em sentido lato poderá ser entendida como o movimento espacial da matéria. Essa transferência pode ocorrer pelo mecanismo da difusão molecular ou da convecção. Podem-se elencar os cinco principais fatores que podem contribuir para a geração de interface no transporte de produtos através de polidutos.

2.3.1.1 **Diferença de densidade**

Uma diferença nas densidades de dois líquidos em contato um com o outro gera uma diferença de forças de inércia, o que tende a aumentar o volume de interface.

2.3.1.2 Velocidade

Obviamente, sob condições de fluxo laminar, em que a distribuição de velocidade através do oleoduto não é uniforme, o arrasto de contaminação é muito grande, uma vez que a diferença entre as velocidades de fluxo próximo às paredes do duto e do centro potencializa efeitos de difusão. No entanto, logo que o fluxo turbulento é totalmente atingido, o efeito da velocidade se torna pequena.

2.3.1.3 Viscosidade

A diferença de viscosidade entre os produtos pode interferir diretamente no volume de interface gerada no poliduto. Produtos muito viscosos tendem a se movimentar a velocidades menores que os produtos com viscosidade baixa, podendo assim aumentar a área de sobreposição de um produto em relação ao outro.

2.3.1.4 Continuidade (desligamento e falhas) operacional

A experiência mostra que a quantidade de contaminante aumenta invariavelmente como resultado de paradas de bombeamento ou de taxas irregulares de bombeio. Esse efeito é incrementado quanto mais alto forem as diferenças entre as densidades dos produtos consecutivos. Tais paradas ou irregularidades geram o efeito de difusão, quer por inércias diferentes durante a súbita mudança nas condições de fluxo ou por difusão da gravidade, o que ocorre quando o fluxo é parado numa encosta com o produto mais leve atrás do mais pesado.

2.3.1.5 Passagem através das instalações

Passagem através dos equipamentos das estações de bombeio, muitas vezes pode aumentar o volume da interface. Isto é devido à passagem através de

aparelho, no qual a superfície de contato aumenta muito, ou também em espaços mortos que não podem ser sistematicamente limpos.

3 Oleoduto Recôncavo Sul da Bahia ORSUB

3.1 Cadeia de Suprimento do ORSUB

O Oleoduto Recôncavo Sul da Bahia (ORSUB) foi projetado para movimentar derivados de petróleo (Diesel, Gasolina e GLP) para o sul da Bahia, a partir de Madre de Deus. Este poliduto interliga o Terminal de Madre de Deus (TEMADRE) aos terminais terrestres de Jequié e Itabuna.

O ORSUB é composto por um poliduto e terminais de armazenamento de derivados combustíveis, estações de bombeamento e bases de distribuição.

O poliduto trabalha em bateladas, transportando sempre os produtos na sequência descrito na Figura 8:



Figura 8 – Sequência das bateladas no ORSUB
Fonte: O Autor (2013).

3.2 Localização Geográfica

O ORSUB é constituído por um poliduto de 389 quilômetros de extensão total e conta com duas seções, conforme apresentado na Figura 9. A primeira seção se inicia no TEMADRE e vai até a estação de bombeamento de Ipiaú-BA. Esta seção tem 222,65 quilômetros de extensão e 10 polegadas de diâmetro, sendo que os primeiros 23,93 quilômetros de extensão estão submersos (trecho Mirim/Cairú). A segunda seção se inicia nesta estação de Ipiaú, onde o poliduto se bifurca em dois ramais, ambos com 8 polegadas de diâmetro. O primeiro ramal

vai em direção ao terminal de Itabuna-BA, com 92,9 quilômetros de extensão, com 3.200 m³ de volume e o segundo em direção ao terminal de Jequié-BA, com aproximadamente 73,03 quilômetro de extensão e 2.554 m³ de volume.



Figura 9 – Distribuição geográfica do ORSUB
Fonte: Transpetro (2010).

Os municípios cruzados pelo ORSUB até a estação de Ipiá podem ser observados nas Tabela 1.

Tabela 1 – Municípios cruzados pelo ORSUB 10

Trecho	Início (Km)	Término (Km)	Municípios
1	0,00	23,93	Madre de Deus
2	23,93	48,03	Salinas das Margaridas, Maragojipe, Jaguaripe e Nazaré
3	48,03	62,02	Nazaré, Muniz Ferreira
4	62,02	77,67	Muniz Ferreira, Aratuípe
5	77,67	91,37	Muniz Ferreri, Laje
6	91,37	108,12	Laje, Valença
7	108,12	141,27	Valença, Teolândia
8	141,27	156,91	Teolândia, Wenceslau Guimarães
9	156,91	159,40	Wenceslau Guimarães
10	159,40	173,25	Wenceslau Guimarães, Gandu
11	173,25	179,59	Nova Ibiá
12	179,59	197,07	Nova Ibiá, Ibirataia
13	197,07	222,65	Ibirataia, Ipiá

Fonte: Transpetro (2010).

Os municípios cruzados pelo ORSUB a partir da estação de Ipiá até o terminal de Jequié podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Municípios cruzados pelo ORSUB 8" (Jequié)

Trecho	Início (Km)	Término	Municípios
14	0,00	18,57	Ipiaú, Aiquara
15	18,57	35,16	Aiquara, Itaji
16	35,16	38,05	Itaji, Jequié
17	38,05	55,26	Jequié
18	55,26	73,03	Jequié

Fonte: Transpetro (2010).

Os municípios cruzados pelo ORSUB a partir da estação de Ipiaú até o terminal de Itabuna podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Municípios cruzados pelo ORSUB 8"(Itabuna)

Trecho	Início (Km)	Término	Municípios
19,20	0,00	14,43	Ipiaú, Gongogi
21	14,43	15,37	Barra da Rocha
22	15,37	44,76	Itapitanga
23	44,76	73,52	Coaraci
24	73,52	73,83	Itajuípe
25	73,83	92,76	Itabuna

Fonte: Transpetro (2010).

Os produtos são bombeados sequencialmente no TEMADRE , percorrem o poliduto e chegam aos terminais aonde são feitas as retiradas. Por trabalhar com o poliduto sempre cheio, quando um produto é bombeado na origem um ou mais produtos são retirados nos terminais. Cada terminal possui tanques pré-definidos para cada produto.

Após completar o recebimento o tanque fica parado para que o produto tenha a sua qualidade comprovada em testes e ensaios laboratoriais. Durante este período de certificação o tanque fica indisponível para retirada ou adição de mais produto. Após a certificação, o tanque está liberado para atender a demanda do mercado local. Os volumes entregues diariamente variam conforme a sazonalidade do mês e do dia na semana. Para entregar seus produtos aos clientes, os terminais utilizam o modal rodoviário.

A Tabela 4 e a Figura 10 apresentam os volumes movimentados de óleo diesel, gasolina e GLP nas bases de Jequié e Itabuna entre os anos de 2004 e 2011.

Tabela 4 – Histórico do volume movimentado no ORSUB em m3

TT JEQUIÉ	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Diesel	547.305	535.947	537.895	581.659	566.310	554.560	523.556	461.995
Gasolina	101.837	104.222	119.828	131.762	130.056	122.288	136.641	153.366
GLP	116.218	124.473	139.228	135.651	144.662	157.531	118.411	145.970
Mov. JEQUIÉ	765.360	764.642	796.951	849.072	841.028	834.379	778.608	761.331

TT ITABUNA	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Diesel	241.406	220.627	199.629	217.472	257.553	268.304	373.487	465.050
Gasolina	86.822	82.648	88.960	88.346	107.802	114.050	151.003	211.132
GLP	61.977	60.476	21.556	33.039	33.708	53.535	91.674	69.305
Mov. ITABUNA	390.205	363.751	310.145	338.857	399.063	435.889	616.164	745.487

Mov. JEQ/ITAB	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
	1.155.565	1.128.393	1.107.096	1.187.929	1.240.091	1.270.268	1.394.772	1.506.818

Fonte: Transpetro, 2011.

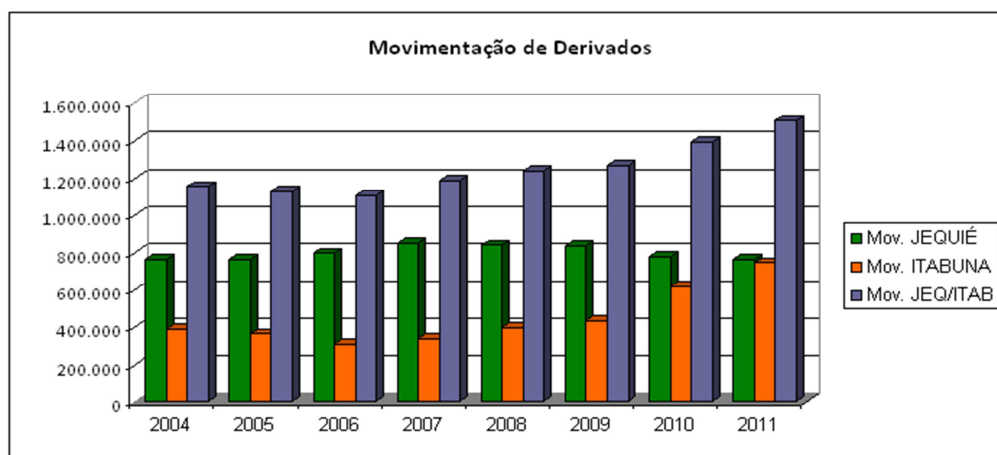


Figura 10 – Gráfico do volume movimentado em metros cúbicos no ORSUB

Fonte: Transpetro, 2011.

A Figura 11 mostra a logística de distribuição dos derivados através do ORSUB e de suas bases de distribuição.

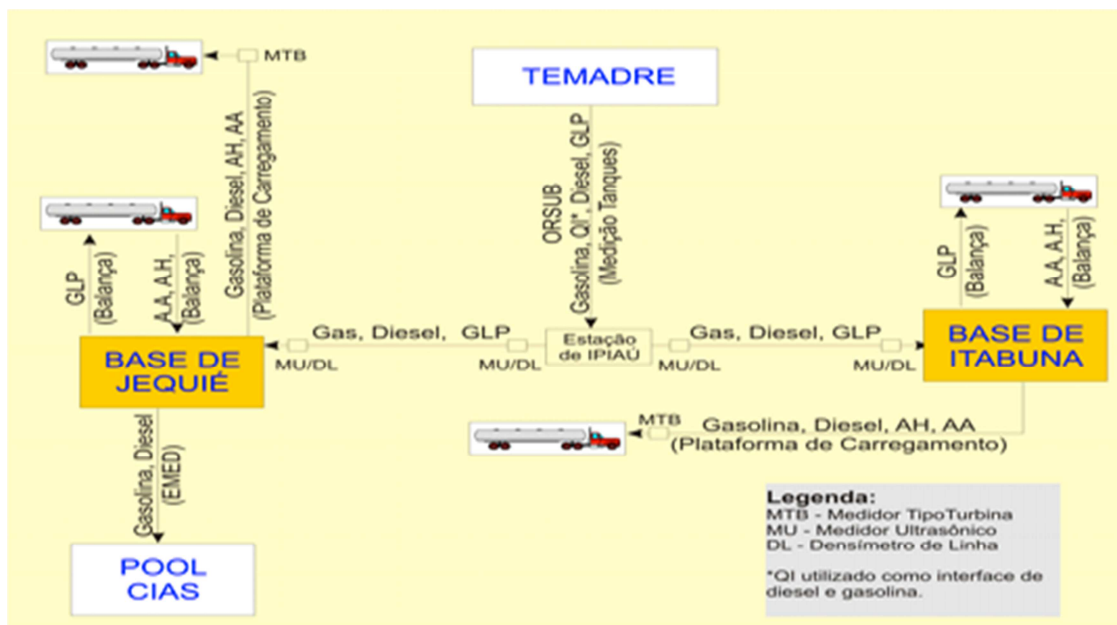


Figura 11 – Logística de distribuição no ORSUB
 Fonte: Transpetro, 2011.

3.3 Instalações e Operação do ORSUB

A Tabela 5 apresenta o diâmetro, espessura e material do oleoduto. O trecho submerso na Baía de Todos os Santos possui 0,438” de espessura e também em algumas passagens por córregos, rios e rodovias.

Tabela 5 – Diâmetro, espessura e material do ORSUB

Trecho	Comprimento (km)	Diâmetro (pol)	Espessura (pol) (1)	Material
TEMADRE – IPIAÚ	0 – 222,65	10”	0,438” – 0,203”	API 5L X 65
IPIAÚ – ITABUNA	0 (2) – 92,9	8”	0,188”	API 5L X 65
IPIAÚ – JEQUIÉ	0 (2) – 73,1	8”	0,188”	API 5L X 65

(1) A espessura do duto informada na tabela é a predominante no trecho. Outras espessuras podem ser encontradas, em menores comprimentos (2) Foi considerado como ponto zero, o trecho a partir da Estação de Ipiaú.
 Fonte: Transpetro (2010).

A Tabela 6 indica as características da vazão nominal das bombas no Terminal de Madre de Deus.

Tabela 6 – Dados de vazão no TEMADRE

DADOS	Auxiliares (série)	Auxiliares (paralelo)		Principais (série)
	B-0305 A/B	B-0231 A	B-0231 B	B-0230 A/B/C/D/E
Fabricante	Worthington	Ingerson Dresser Pumps	KSB Bombas Hidráulicas	Weir Pumps

DADOS	Auxiliares (série)	Auxiliares (paralelo)		Principais (série)
	B-0305 A/B	B-0231 A	B-0231 B	B-0230 A/B/C/D/E
Tipo	Centrífuga	Centrífuga	Centrífuga	Centrífuga
Modelo	4HN – 112	6HN - 134	RPH 150 630 A	GSB com 2 estágios
Vazão Nominal (m ³ /h)	180	305 / 385	385	305

Fonte: Transpetro (2010).

O Terminal Madre de Deus envia GLP e derivados para os terminais de Itabuna e Jequié através de 9 (nove) bombas: as bombas auxiliares B-0305 A/B de GLP, instaladas em série; as bombas auxiliares B-0231 A/B de gasolina e diesel, instaladas em paralelo, 5 bombas principais B-0230 A/B/C/D/E instaladas em série.

A Estação de Ipiaú integra o bombeio de GLP, diesel e gasolina para o Terminal de Itabuna e o Terminal de Jequié, e não realiza tancagem e fluxo reverso. O parque de bombas possui duas bombas B-5401 A/B instaladas em série.

A Tabela 7 mostra a vazão das bombas principais na estação de bombeamento em Ipiaú.

Tabela 7 – Dados de vazão em Ipiaú

DADOS	Principais
	B-5401 A/B
Fabricante	Weir Pumps
Tipo	Centrífuga
Modelo	GSB com 2 estágios
Vazão Nominal (m ³ /h)	305

Fonte: Transpetro (2010).

Na Tabela 8 estão apresentadas as propriedades típicas dos produtos movimentados.

Tabela 8 – Propriedades dos produtos transportados via duto

Produto	Pressão de Vapor (kgf/cm ² .abs.)	Faixa de Densidade (g/cm ³)	Faixa de Viscosidade (Cst)
Diesel	0,08	0,82 – 0,88	1,6 – 6,0
Gasolina	0,8	0,73 – 0,77	0,90 – 0,74
GLP	15	0,5 – 0,6	0,20 – 0,30

Fonte: Transpetro (2010).

A qualidade do produto deve ser conhecida antes e durante o recebimento para possibilitar análise comparativa entre resultados dos ensaios obtidos na origem e no destino. Sendo detectada alguma não-conformidade no produto no terminal receptor, deve ser realizada uma análise crítica do processo.

Os ensaios realizados para os produtos recebidos podem ser observados a seguir:

- Diesel – Aspecto, cor ASTM, densidade, destilação ASTM, BSW, viscosidade cinemática, água por Karl Fischer, turbidez, ponto de fulgor, enxofre;
- Gasolina – Aspecto, cor visual, densidade, destilação ASTM, teor de etanol, teor de benzeno, ponto de fulgor, água por Karl Fischer;
- GLP – Densidade, intemperismo, resíduo e teste de mancha.

A rastreabilidade das amostras é garantida através do registro do número de identificação das amostras e dos certificados de análises nos sistemas internos da Transpetro e Petrobras.

3.4 **Descrições dos Terminais**

3.4.1 **Terminal Terrestre de Jequié TT Jequié**

O Terminal Terrestre de Jequié, localizado no município de Jequié no Estado da Bahia opera recebendo gasolina, diesel e GLP do poliduto, recebe álcoois e biodiesel via rodoviário, carrega caminhões tanques por uma plataforma de carregamento operada pela BR Distribuidora e transfere derivados, via duto, para as Bases de carregamento rodoviário: uma do pool operado pela companhia distribuidora de combustíveis Raízen e a outra pela companhia distribuidora PetroSerra. Os dutos que operam as transferências pertencem às Companhias também proprietárias das Bases.

O armazenamento de produtos na base de Jequié é composto por 2 (dois)

parques de armazenamento distintos, sendo um destinado ao armazenamento de derivados e álcool e outro para o armazenamento de GLP. Na Figura é apresentado o terminal terrestre de Jequié com os seus dois parques de armazenamento.



Figura 12 – Vista aérea do TT Jequié
Fonte: Transpetro, 2011.

O parque de tanques de derivados e álcool é constituído por 6 (seis) tanques, sendo 2 (dois) destinados para o armazenamento do diesel, e um tanque para o armazenamento de cada um dos demais produtos (gasolina, álcool hidratado, álcool anidro), além do tanque para interfaces de derivados e álcool.

Os tanques de diesel e gasolina são do tipo teto flutuante e neles estão instalados misturadores mecânicos, com a finalidade de homogeneizar as interfaces de produtos, provenientes do oleoduto ou do tanque de interface, que serão diluídas nestes tanques.

O parque de armazenamento de GLP é constituído de 2 (duas) esferas, sendo uma de 3.200 m³ e a outra de 1.600 m³ de capacidade nominal cada uma. A entrada do produto é pelo topo das esferas.

3.4.2 Terminal Terrestre de Itabuna TT Itabuna

O Terminal Terrestre de Itabuna, localizado no município de Itabuna no Estado da Bahia, opera recebendo gasolina, diesel e GLP do poliduto, recebe álcoois e biodiesel via rodoviário e carrega caminhões tanques por uma plataforma de carregamento operada pela BR Distribuidora.

O armazenamento de produtos na base de Itabuna é composto por 2 (dois) parques de armazenamento distintos, sendo um destinado ao armazenamento de derivados e álcool e outro para o armazenamento de GLP. Na Figura 13 é apresentado os parques de armazenagem do terminal terrestre de Itabuna.



Figura 13 – Vista aérea do TT Itabuna
Fonte: Transpetro, 2011.

O parque de tanques de derivados e álcool é constituído por 7 (sete) tanques, sendo 2 (dois) destinados para o armazenamento do diesel, e um tanque para o armazenamento de cada um dos demais produtos (gasolina, álcool hidratado, álcool anidro e diesel marítimo), além do tanque para interfaces de derivados e álcool.

Os tanques de diesel e gasolina, similarmente ao que ocorre no terminal de Jequié, são do tipo teto flutuante e estão instalados misturadores mecânicos, com a finalidade de homogeneizar as interfaces de produtos, provenientes do oleoduto ou do tanque de interface, que serão diluídas nestes tanques.

O parque de armazenamento de GLP é constituído de 2 (duas) esferas, de 3.200 m³ de capacidade nominal cada uma. A entrada do produto é pelo topo das esferas.

3.5

Centro Nacional de Controle Operacional (CNCO)

O modelo de controle operacional dos dutos e polidutos adotados pela Transpetro é o modelo centralizado. Assim, foi criado o Centro Nacional de Controle Operacional (CNCO) do sistema dutoviário da Transpetro.

O Centro Nacional de Controle Operacional (CNCO), localizado na sede da Transpetro no Rio de Janeiro, acompanha a evolução das variáveis do processo durante as etapas de repouso, regime transitório e regime permanente do ORSUB 10”, verificando a consistência dos dados, gráficos e das tendências. O CNCO acompanha e analisa os alarmes do sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition - Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados), tais como bombas ligadas ou desligadas, abertura de válvulas de segurança, chaves de pressão, chaves de temperatura.

Os alinhamentos para transferência de produtos provenientes do Terminal de Madre de Deus são realizados remotamente pelo CNCO da Sede da Transpetro e a operação somente é iniciada após solicitar o pronto para operar do Controle Local do Terminal Madre de Deus. Os alinhamentos para transferência através da estação intermediária de Ipiaú são realizados remotamente pelo CNCO, bem como os alinhamentos para recebimento de produtos nos Terminais de Itabuna e Jequié.

3.6

Sistema de Tratamento de Interface GLP/Gasolina

No bombeio entre a gasolina e o diesel é colocado um selo de querosene de aviação (Qav), onde 30% é incorporado ao diesel e 70% é incorporado a gasolina, não comprometendo a qualidade de ambos os produtos. Assim, não é produzida uma interface para segregação e posterior tratamento.

Já como dito anteriormente, no bombeio de GLP e Gasolina é necessário um sistema de tratamento para absorver e tratar a interface gerada entre estes dois

produtos. As bateladas de GLP são escoadas no poliduto entre as bateladas de gasolina. As interfaces do GLP com a gasolina formadas no escoamento pelo oleoduto são recebidas no vaso de interface (V-5101 – Jequié / V-5201 - Itabuna), e, para cada batelada de GLP, são recebidas 2 (duas) interfaces no vaso, com composição de cerca de 50% em volume de cada produto.

O tratamento da interface GLP/Gasolina consiste, basicamente, na separação dos leves da interface em um processo simples de separação, em um estágio onde a interface armazenada no vaso é despressurizada e os gases originados dessa despressurização são succionados do vaso por um compressor e injetados nas esferas de armazenamento (Figura 14).

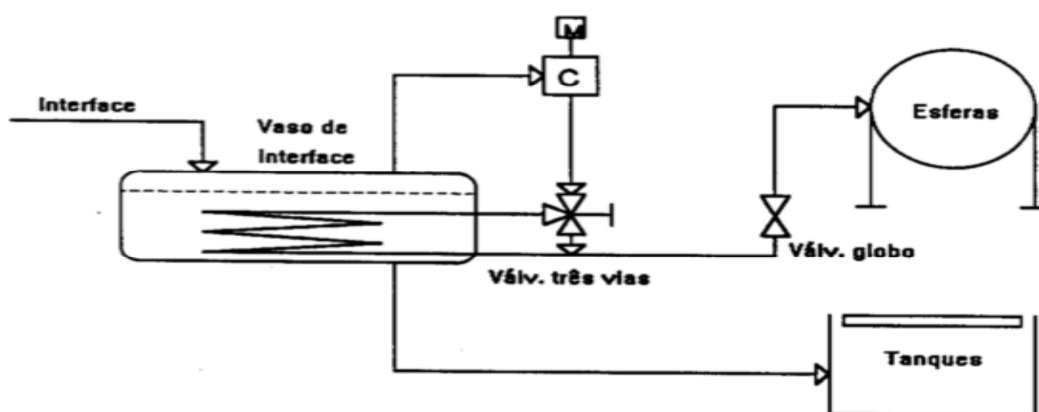


Figura 14 – Esquema do sistema de tratamento de interface
Fonte: Petrobras, 1993.

O sistema existente nos dois terminais é constituído de um vaso de *flash*, um compressor e um trocador de calor utilizado para aquecer o líquido sendo evaporado no interior do vaso com os vapores comprimidos (portanto quentes) que são aspirados no topo do vaso pelo compressor. O sistema opera em bateladas, ou seja, as interfaces (misturas formadas entre as bateladas de GLP e gasolina deslocados no duto) da frente e da cauda da batelada de GLP são recebidas no vaso.

O compressor fica operando até que a pressão no vaso atinja 0,2 kgf/cm².man e a temperatura 38°C. O líquido remanescente é misturado à gasolina em um tanque em proporção que garanta que a pressão de vapor não ultrapasse o normativo. O sistema foi projetado de forma a tratar 2 (duas) interfaces de 52m³ cada em aproximadamente 48 horas.

O vaso de interface possui, no seu interior, uma serpentina para aquecimento do produto e um demister (conjunto de telas) para evitar o arraste de líquido para a sucção dos compressores. Na parte inferior do vaso está instalada uma tomada para amostragem do produto do interior do vaso.

Estão instalados dois compressores (C-5101 A/B – Jequié / C-5101 A/B - Itabuna), sendo um reserva, do tipo alternativo de 2 (dois) estágios, acionados por motor elétrico com variador de velocidade (conversor de frequência).

A gasolina separada da interface GLP/Gasolina será transferida para o tanque do produto, através da pressurização controlada do vaso de interface, com vapor de GLP do topo das esferas. O alinhamento dos tanques é efetuado através de um manifold de descarga de transferência interna.

A transferência do GLP também é efetuada pressurizando o vaso de interface utilizando um dos compressores. Para a saída de GLP do vaso de interface é utilizada a linha específica onde está instalada a válvula de bloqueio manual, do tipo esfera, e o alinhamento das esferas é efetuado através do manifold de entrada de produto das esferas.

No processo de descompressão do vaso ocorre abaixamento de temperatura, que será controlada em um valor mínimo de 5°C, evitando o uso de material especial para o sistema e a colocação de proteção contra o frio. O aquecimento será feito com o gás quente da descarga dos compressores.

Os compressores succionarão o gás do vaso e o enviarão para as esferas, até que a pressão do vaso atinja a pressão atmosférica; o líquido remanescente no vaso será incorporado ao inventário da gasolina.

No projeto de dimensionamento dos vasos de interface, foram utilizadas as seguintes premissas:

- Produto: Foram analisadas interfaces compostas por uma mistura de propano comercial utópico (gás mais leve) com gasolina, butano comercial utópico com gasolina e GLP típico com gasolina, todos na proporção de 1 para 1.
- Processo: Foram feitas simulações com temperaturas ambientes de 10°C (média das mínimas) e 39°C (média das máximas). O tempo adotado de separação foi de aproximadamente 48 horas. A pressão inicial de separação foi a pressão do ponto de bolha das misturas a 10°C e 39°C. A temperatura mínima admissível foi de 5°C

para se evitar a necessidade de colocação de proteção contra o frio e a utilização de materiais especiais. A temperatura final do gás na saída da serpentina foi fixada em 20°C.

- Destino dos produtos: O inventário mínimo de GLP para a diluição do gás que é separado da interface foi estimado em 2.160 m³ (metade do volume útil de GLP da base). Para a diluição do líquido separado da interface foi analisado o caso de um inventário mínimo de 1.500 m³ de gasolina (metade do volume útil de gasolina da base).

O relatório RL-4100.51-6000-940-PET-101 (Petrobras, 1993), que reúne informações sobre os critérios adotados para o dimensionamento do sistema de separação de interface, apresenta os dados da Tabela 9:

Tabela 9 – Movimentação prevista para as bases de distribuição do ORSUB

Produto	Demanda Fase 1 (m ³ /dia)	Demanda Fase 2 (m ³ /dia)
GLP	350	655
Gasolina	161	301
Diesel	951	1778
Álcool Anidro	40	75
Álcool Hidratado	168	314

Fonte: Petrobras, 1993

Cabe destacar que os volumes previstos em projeto para a Fase 2 dependem da implantação de estações intermediárias de bombeio, o que ainda não ocorreu.

Essa projeção considerou um crescimento de mercado menor que o verificado na região suprida pelo ORSUB, além de não levar em conta os aspectos de qualidade que foram incorporados aos produtos após a implantação do empreendimento, assim como alternativas para suprimento de etanol, biodiesel e dos produtos com baixo teor de enxofre.

No que tange à transferência de GLP, os critérios para dimensionamento consideraram uma interface com gasolina de 93m³, a qual o vaso teria a capacidade de armazenar e tratar em um período de 48 horas.

Atualmente, o ORSUB trabalha com interface com volume entre 20 e 30m³, premido pelas seguintes condições: a) sistema com rotatividade maior do que a

prevista; b) gasolina com a pressão de vapor (PVR) mais alta do que a prevista; c) limitações no vaso tratador, que não permitem trabalhar com a capacidade máxima projetada; margem de segurança definida pelo CNCO de 60 m³ no vaso tratador, espaço que não pode ser ocupado na rotina de tratamento de interface.

Na fase de dimensionamento de projeto do ORSUB, foram feitas simulações com variadas composições de mistura propano, butano e GLP com gasolina. Os resultados podem ser vistos na Tabela 10. O objetivo destas simulações foi verificar como se comportava a PVR com as diferentes misturas. Para esta simulação foi utilizada a gasolina típica da REPAR, com PVR de 41,8 kPa, selecionada aleatoriamente.

Tabela 10 – Resultados das simulações realizadas no projeto do ORSUB

Caso	Temp. amb. (°C)	Pressão desc. kgf/cm ² abs (kPa abs)	Tempo (h)	PVR (kPa)	Intemp. (°C)
propano+ gasolina REPAR	10	15,0333 * (1474,26)	44,5	44	não calculada
propano+ gasolina REPAR	39	14,3236 (1404,67)	39,1	44	não calculada
butano.+ gasolina REPAR	10	1,8732 (183,70)	4,7	47,4	não calculada
butano.+ gasolina REPAR	39	4,4909 (440,41)	21	33,3	não calculada
GLP típ.+gasolina REPAR	10	14,0333 * (1376,20)	36,7	45,7	1,55
GLP típ.+gasolina REPAR	39	11,1109 (1089,61)	31,2	45,4	não calculada

Fonte:Petrobras, 1993

É importante ressaltar mais uma vez, que após a implantação do ORSUB houve alterações nas especificações dos combustíveis, entre as quais duas trouxeram impactos para a operação do Poliduto: a) a elevação do ponto de fulgor do óleo diesel, em 2001 (Portaria ANP n° 310), e b) a inclusão do resíduo de evaporação do GLP na relação dos itens de qualidade a serem respeitados para venda deste combustível, em 2004 (Resolução ANP n° 18). Esta última alteração impactou diretamente o procedimento de tratamento de interface (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS, 2001, 2009).

3.7 **Características das operações atuais**

3.7.1 **Volumes movimentados de janeiro a setembro de 2011**

Os volumes previstos em projeto para a Fase 1 foram 350 m³ de GLP, 161 m³ de gasolina, 951 m³ de diesel, totalizando 1.462 m³. Cabe destacar que os volumes previstos em projeto para a Fase 2 dependem da implantação de estações intermediárias de bombeio, o que ainda não ocorreu.

De janeiro a setembro de 2011 o ORSUB movimentou uma média diária de 571m³ de GLP, 963 m³ de gasolina e 2.539 m³ de Diesel, totalizando 4.073 m³. Esse desempenho supera os volumes previstos em 63%, 498%, 167% e 179%, respectivamente.

É relevante considerar que o recebimento de etanol e biodiesel é feito por modal rodoviário, operações que não foram previstas no planejamento do poliduto.

3.7.2 **Aspectos físicos das instalações e impactos operacionais**

O aspecto físico das instalações causa impactos no aspecto operacional, conforme destacado a seguir:

- ✓ A válvula globo, dispositivo mecânico para regulação de vazão em tubulações, utilizada para elevar a pressão de descarga e aumentar a eficiência do sistema de tratamento inexistente no terminal de Itabuna, acarretando perda de precisão no sistema de recirculação e elevação da temperatura;
- ✓ Não existe sistema de circulação interna no vaso tratador, situação que provoca dificuldades para elevar a temperatura do mesmo;
- ✓ Utiliza-se o gás aquecido na saída do compressor para alimentar a serpentina, condição que provoca morosidade e não permite o sistema de tratamento de interface atingir a temperatura de projeto;

- ✓ É necessário repressurizar o vaso utilizando a pressão de vapor das esferas, para a degradação da gasolina residual, operação que pode ocasionar mudanças das propriedades da mesma;
- ✓ Ausência de uma bomba para execução da transferência do líquido remanescente no final do tratamento para a tancagem de gasolina, situação que exige a pressurização do vaso tratador com vapor de GLP do topo de esfera;
- ✓ Ausência de fonte de vapor para assegurar eficácia ao sistema de tratamento de interfaces, o que faz o processo depender do calor gerado pelo compressor que aspira os vapores do topo do vaso, operação que demanda cerca de 8 horas para atingir a temperatura de 38°C.

4

Modelo de Previsão de Geração de Interface

4.1

Revisão bibliográfica

A transferência de lotes de produtos na ausência de separadores físicos tem suas peculiaridades associadas, já que deve se notar que esta operação envolve o deslocamento de uma grande variedade de produtos ao longo de distâncias que podem atingir centenas de quilômetros. Assim, a existência de mais de uma interface ao longo da linha, a injeção e retirada de produtos em estações intermediárias de bombeamento, diâmetros diferentes e diferentes dimensões topográficas, bem como a ocorrência de desligamentos e paradas acidentais das operações de bombeamento, a velocidade e a viscosidade dos fluidos movimentados são fatores-chave que podem afetar significativamente o volume de mistura, como já mencionados no capítulo 2. Assim, a extensão da contaminação depende das condições de funcionamento do oleoduto e dos produtos a serem transportados, e é de grande significado econômico, pois qualquer erro na estimativa pode levar a um lote inteiro / tanque de produto a ficar fora da especificação desejada.

A primeira investigação publicada da contaminação em polidutos foi reportada por Schoder (1911), que estudou a mistura entre dois petróleos diferentes, e entre eles, continha uma solução de corante e água que fluía sucessivamente através de uma linha de 6 polegadas. Schoder concluiu de suas limitadas experiências que o volume da porção contaminada parecia ser uma percentagem constante do volume total do tubo.

A construção de um poliduto pela Phillips Petroleum Company em 1931 (Phillips Museum, 2012) resultou em vários artigos discutindo este poliduto. Com a previsão baseada em experiências, em uma linha de 3 polegadas de 24 milhas, a quantidade de mistura esperada seria de algumas centenas de barris em uma linha de 8 polegadas de cerca de 700 quilômetros.

Kashcheev (1933) apresentou dados sobre a mistura de gasolina e querosene bombeada através de uma linha de duto que se estende a partir de Baku para Batum. Kashcheev apresentou duas conclusões: em primeiro lugar, que a quantidade da porção contaminada não aumenta proporcionalmente ao comprimento do duto e em segundo lugar, que quanto maior diâmetro e mais lento o fluxo, maior a quantidade obtida de material contaminado.

Contrariamente à percepção, o volume de contaminação (no caso de diâmetro constante, medido pelo comprimento do trecho contaminado) não aumenta linearmente com o comprimento do tubo. A presença de uma interface entre os dois produtos puros age como um amortecedor e reduz a taxa de dispersão em comprimentos mais longos (Fowler & Brown, 1943). Considere um exemplo de dois produtos A e B sendo bombeados sequencialmente através de um tubo. Forma-se uma interface entre os dois produtos, logo que o segundo produto (B) entra na linha. Inicialmente, a interface cresce a uma taxa constante, enquanto os dois produtos puros estão em contato direto um com o outro. No entanto, uma vez que a interface cresce a uma extensão considerável, os produtos puros já não estão em contato entre si, mas estão em contato com uma interface constituída por uma mistura de A e B, resultando, assim, numa redução da taxa de crescimento da contaminação.

A formação dos produtos na zona de mistura em transferências contínuas, como já dito anteriormente, é predominantemente governada pelo fenômeno da dispersão de massa. Este fenômeno resulta da combinação do processo de difusão radial, com a existência de um perfil de velocidade não uniforme da mistura em um desenvolvimento laminar ou em fluxo turbulento (Levenspiel, 1958).

O número de Reynolds (Re) é um número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície. A significância fundamental do número de Reynolds é que o mesmo permite avaliar o tipo do escoamento (a estabilidade do fluxo), indicando se o fluxo é laminar ou turbulento. Tipicamente, por valores experimentais, costuma-se caracterizar um fluido com escoamento laminar num duto com $Re < 2100$ e escoamento turbulento com $Re > 4000$ (Janna, 1993).

O fluxo laminar em um duto é caracterizado por uma curva de distribuição de velocidade parabólica e a direção de movimento em qualquer ponto no tubo é sempre paralela ao eixo do tubo. Se dois fluidos adjacentes estão fluindo um atrás

do outro através de um duto sob fluxo viscoso ideal, isto é, considera-se desprezível a fricção interna entre as distintas partes do fluido, a interface permanecerá distinta, isto é, os fluídos não se misturam, proporcionando assim, um insignificante efeito de difusão.

É interessante verificar que, no caso de fluxo em regime laminar, a quantidade teórica de contaminação é proporcional ao comprimento do tubo e é independente do número de Reynolds (Fowler & Brown, 1943).

Num fluxo turbulento a velocidade de qualquer partícula é caótico. Assim, as zonas de interfaces entre dois fluidos bombeados em sucessão no fluxo turbulento são imediatamente destruídas. Se dois fluidos movem-se sucessivamente através de duto, uma mistura dos dois fluidos, é encontrada e esta separa os fluidos puros.

A mistura do fluido B puro com uma quantidade de uma mistura de A e B, resultará em menos contaminação do fluido B do que se tivesse sido misturado com a mesma quantidade de fluido puro A. Portanto, a presença de mistura entre os dois fluidos serve como um tampão, e diminui a quantidade de porção contaminada movimentada pelo duto. Seguindo este raciocínio, o aumento da turbulência diminui a porção contaminada. O efeito quantitativo de turbulência na porção contaminada é provavelmente para Número de Reynolds baixos. (Fowler e Brown, 1943).

Segundo Levenspiel (1958), a zona de contaminação está relacionada com um número de dispersão e as dimensões do tubo. O número de dispersão, por sua vez é obtido a partir de uma correlação com os números de Reynolds.

Ainda segundo Fowler & Brown (1943), em um fluxo laminar a porção contaminada é independente do número de Reynolds. O volume da contaminação como fração do volume do duto pode ser dado por:

$$\text{Porção contaminada} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{(x_2)}} - \frac{1}{\sqrt{(x_1)}} \right] \quad (1)$$

onde, x_1 e x_2 , são as composições instantâneas dos fluidos A e B. A composição instantânea, x , é o volume instantâneo de um fluido A dividido pelo volume

instantâneo total do fluido. Ainda segundo Fowler & Brown (1943), em um fluxo turbulento, a porção contaminada pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\log_{10}(\text{volume interface}) = \log_{10}(\text{volume do duto}) - 0,4 \log_{10}\left(\frac{L}{D}\right) + c \quad (2)$$

Onde c é uma função do número de Reynolds e da faixa de composição instantânea que define a porção contaminada. L e D são respectivamente, o comprimento e o diâmetro do duto.

As porções contaminadas para as várias faixas de composição são representados em função do número de Reynolds para cada duto em particular nas Figuras 15-20 (Fowler & Brown, 1943). Na região turbulenta estas curvas são paralelas e indicam claramente que um aumento no número de Reynolds provoca uma diminuição na porção contaminada.

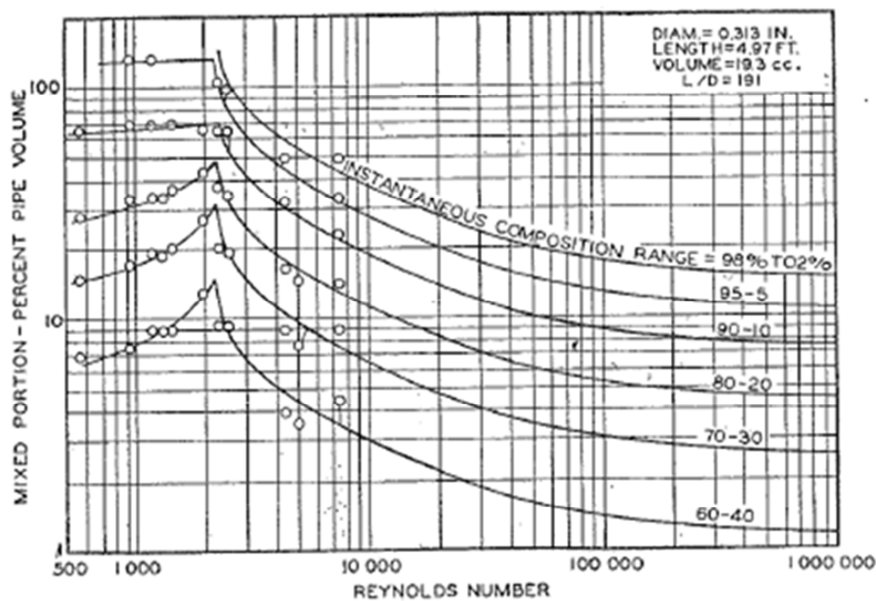


Figura 15 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds
Fonte: Fowler & Brown, (1943)

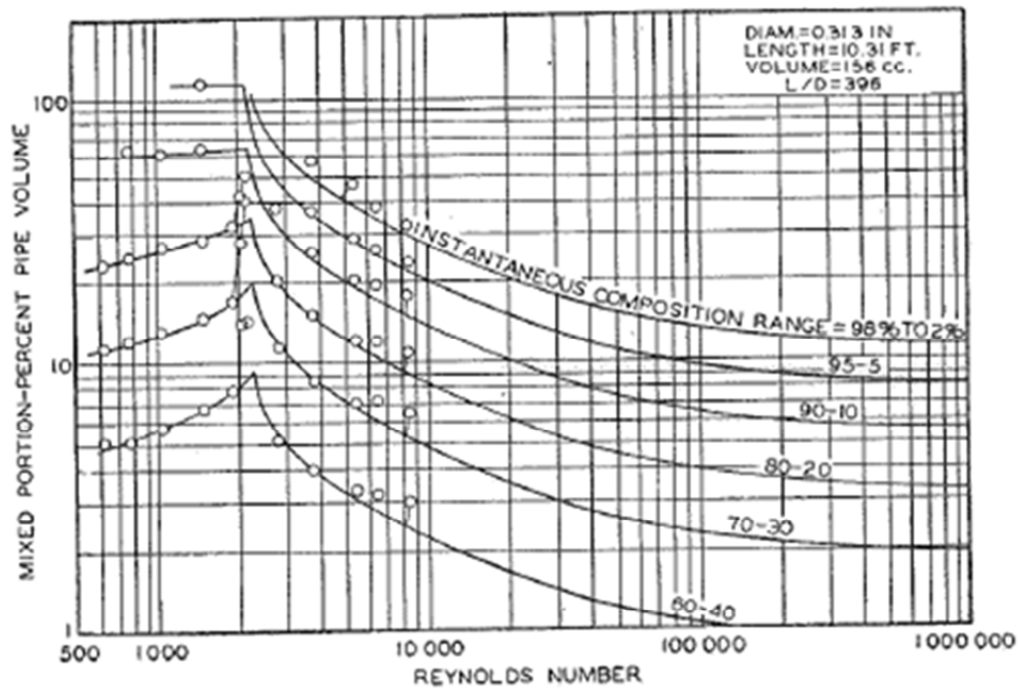


Figura 16 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds
Fonte: Fowler & Brown, (1943)

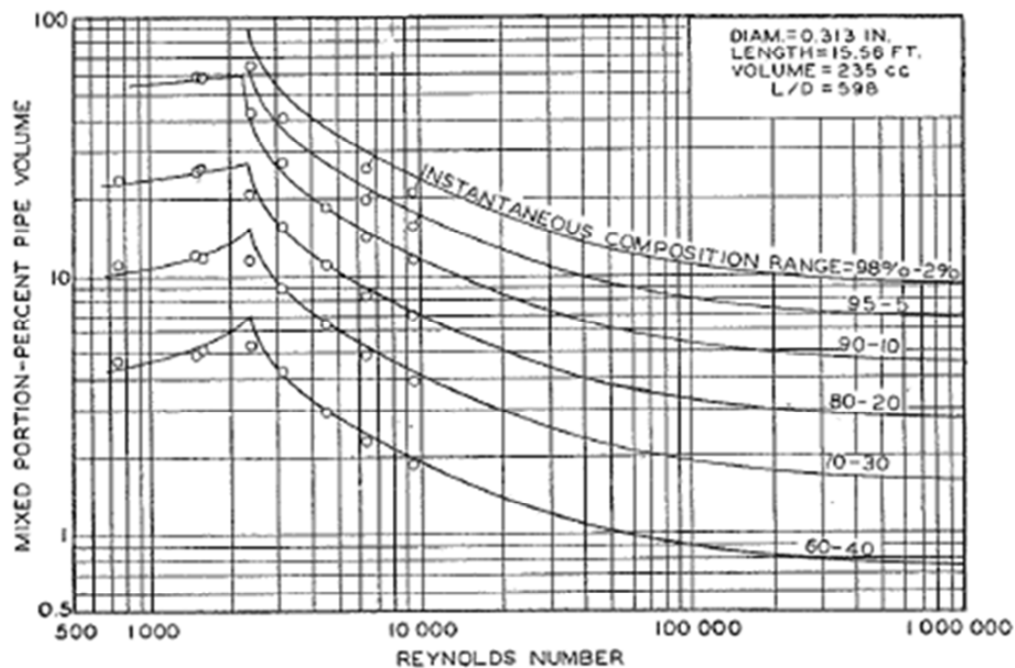


Figura 17 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds
Fonte: Fowler & Brown, (1943)

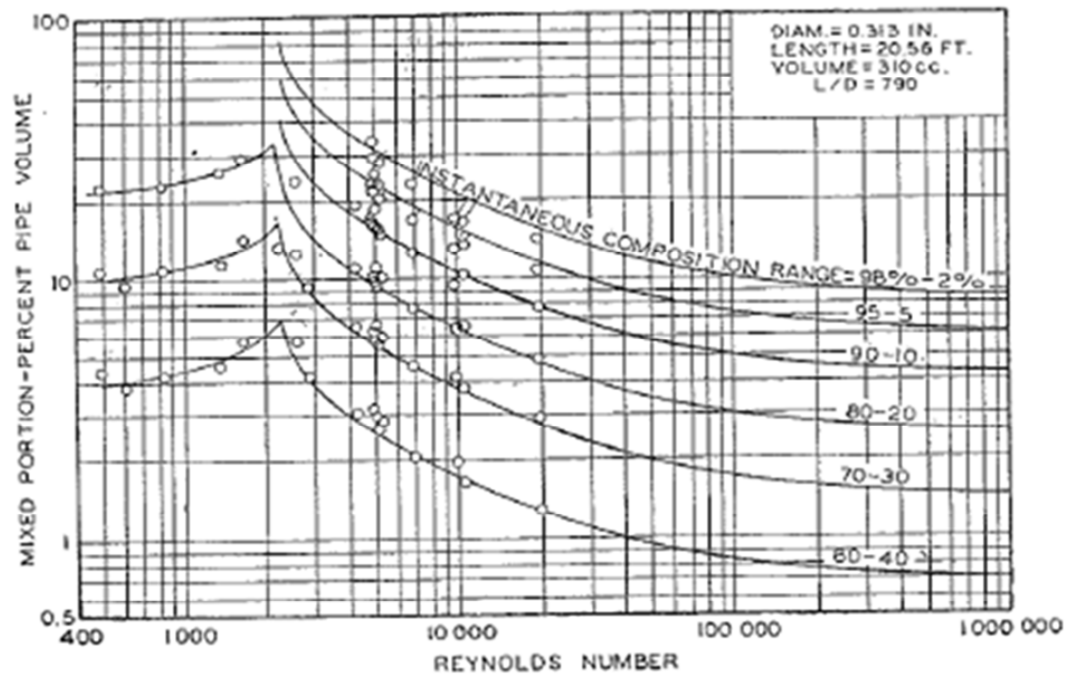


Figura 18 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds
 Fonte: Fowler & Brown, (1943)

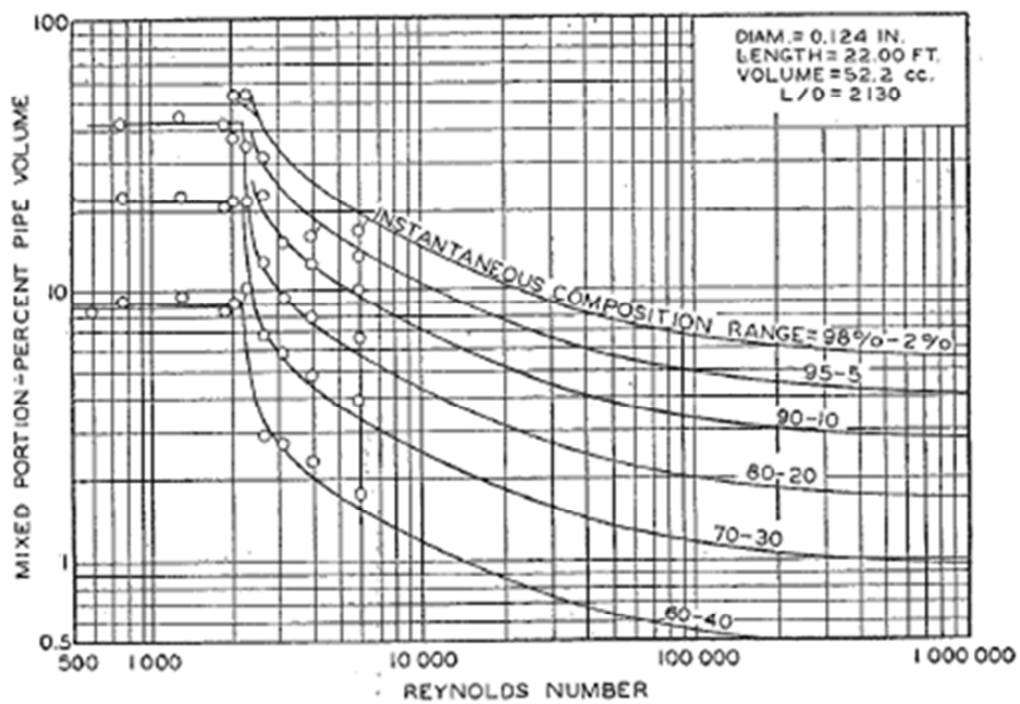


Figura 19 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds
 Fonte: Fowler & Brown, (1943)

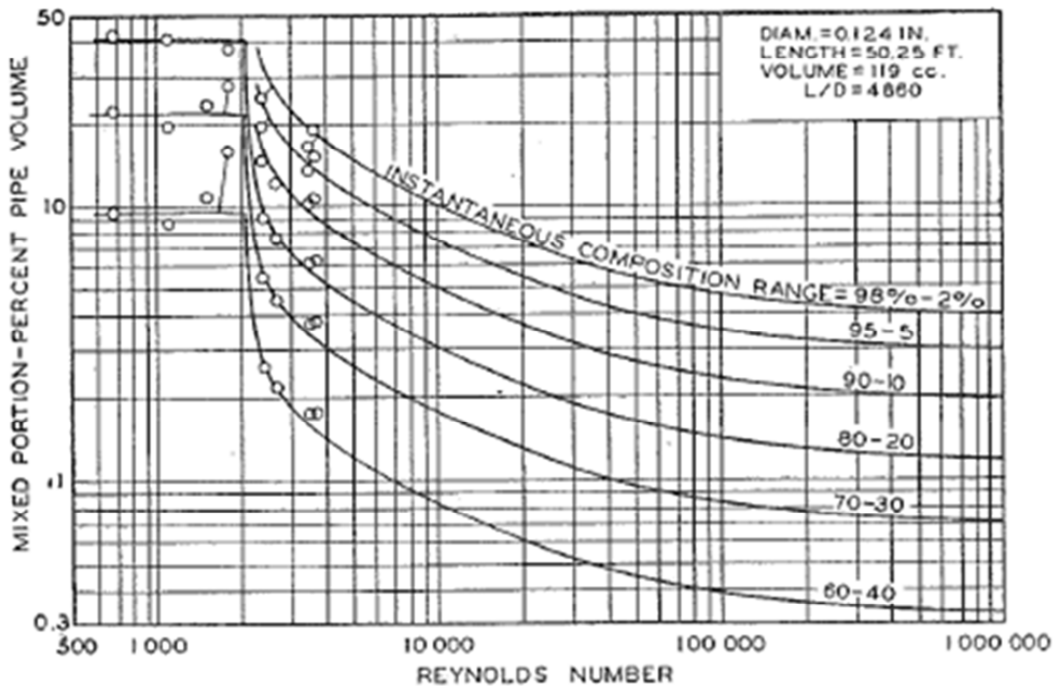


Figura 20 – Porcentagem do volume total do duto pela função do Número de Reynolds
 Fonte: Fowler & Brown, (1943)

Fowler & Brown (1943) concluiu que qualquer aumento na turbulência do fluxo tende a decrescer a porção contaminada. Isto é, maior número de Reynolds, menor o volume de interface. Este trabalho publicado por Fowler foi delimitado pelo uso de dois fluidos de viscosidades cinemáticas muito próximas.

A Figura 21 apresenta o comportamento das concentrações de dois produtos numa mistura em um poliduto. O exemplo dado é a representação de um GLP empurrando uma gasolina através do duto. Observa-se que, no início, a concentração de gasolina é igual a 100 e de GLP igual a zero. Com o passar do tempo a concentração de gasolina na mistura vai decrescendo, enquanto a de GLP vai aumentando, até o momento em que só existe a concentração de GLP, isto é, a concentração de gasolina neste ponto é zero. Assim, as concentrações dos produtos na interface gerada vão variando conforme o andamento do bombeio das bateladas envolvidas.

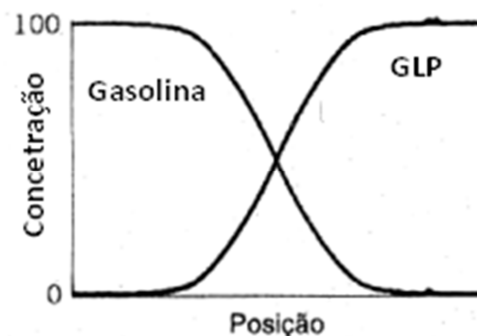


Figura 21 – Comportamento das concentrações em relação ao efeito difusivo
 Fonte: O Autor (2013).

Segundo Oliveira (2010), o volume de mistura (V_m) é calculado multiplicando o comprimento da mistura pela área da seção transversal do duto, como na equação (3):

$$V_m = L_n \cdot A \quad (3)$$

Assumindo que níveis de pureza do produto A na mistura (C_{AB}) e do produto B na mistura (C_{BA}) são iguais, ($C_{AB} = C_{BA} = C$), então o comprimento da mistura L_n pode ser calculada e expressada pela solução da equação de Fick.

A difusão molecular é tipicamente descrita matematicamente usando-se as leis de Fick. Esta difusão é o processo pelo qual os íons ou moléculas são transportados em função de um gradiente de concentração até que se torne inexistente.

Considerando um fluido com dois componentes A e B. Se a mistura entre eles for uniforme, isto é, se as proporções de A e B, em cada ponto do recipiente que os contém forem iguais, nada significativo irá ocorrer, a menos que se tenha diferenças nas temperaturas, nas pressões, etc. Assim, a situação de interesse é aquela na qual a proporção dos componentes é variável com a posição e/ou com o tempo.

Identifica-se as propriedades relativas dos dois componentes através da concentração de massa, ρ_A , definida como a massa do componente A por unidade de volume da mistura. Do mesmo modo existe para ρ_B . A massa específica da mistura é definida por:

$$\rho = \rho_A + \rho_B \quad (4)$$

Em caso de movimentações moleculares usa-se, comumente, uma concentração molar C_A , definida pelo número de moles da substância A presentes na unidade de volume da mistura (Kgmol/cm^3).

A concentração de massa, ρ_A (kg/m^3), e a molar C_A se relacionam através da massa molecular, M_A (kg/kgmol)

$$\rho_A = M_A C_A \quad \rho_B = M_B C_B \quad (5)$$

Assim,

$$\rho = M_A C_A + M_B C_B \quad (6)$$

O desbalanço nas concentrações dos componentes A e B irá propiciar o transporte de massa, ou difusão, pois se trata de misturas. Diversos autores (Levenspiel, 1958) concluíram que a mistura longitudinal de fluidos pode ser caracterizada por um modelo de difusão governado pela lei de Fick da difusão (Eq. 7), na qual o coeficiente de dispersão é considerado constante no espaço e no tempo.

$$\frac{dC}{dt} = K \frac{d^2C}{dx^2} \quad (7)$$

Onde

C é a concentração como função do tempo e do espaço;

t é o tempo;

x é a coordenada axial; e

K é o coeficiente de dispersão.

Considerando o escoamento em dutos circulares, essa Lei pode ser aplicada considerando uma mistura homogênea. Além disso, na inexistência de efeitos de

entrada e saída de dutos, curvas, pode-se esperar uma relação direta entre a concentração e o coeficiente de dispersão adimensional dado por (Eq. 8):

$$ND = \frac{K}{vD} \quad (8)$$

Onde

v é a velocidade do escoamento; e

D é o diâmetro do duto.

Devido à complexidade de se obter essas situações na prática, o coeficiente de dispersão deve ser assumido como um valor médio e ajustado para cada duto específico.

A lei de Fick apresenta uma solução analítica considerando uma concentração nula no tempo zero, uma concentração de 50% no ponto médio da interface e uma distribuição da concentração no espaço simétrica que obedece a distribuição normal de Gauss. Na forma representada pela equação 7, a lei de Fick já considera que o coeficiente de dispersão seja constante no espaço e tempo. Dessa forma, a solução é dada por:

$$x_a = 2\sqrt{Kt}Z(C_a) \quad (9)$$

Onde

$$Z(C_a) = \text{erf}^{-1}(1 - 2C_a) \quad (10)$$

Onde, erf^{-1} é a inversa da função erro.

A eq. 10 pode ser reescrita em função da pureza fracionário p que se quer garantir para os produtos em cada extremidade da interface. Como $p+C=1$, tem-se:

$$Z(C_a) = \text{erf}^{-1}(2p - 1) \quad (11)$$

Assim, Oliveira (2010) apresentou a situação onde o fluido B que empurra o fluido A, respectivamente diesel e gasolina, cujas viscosidades cinemáticas são $\nu_B = 8,7 \text{ cSt}$ e $\nu_A = 0,9 \text{ cSt}$. Foi assumido que o diâmetro do duto é $0,58 \text{ m}$ e a viscosidade da mistura (ν) é constante e igual a $3,45 \text{ cSt}$, assumindo $C_A = C_B = 0,5$.

Os resultados estão representados na Figura , para concentrações iguais a 1, 5 e 10%, para velocidades média de 3,00; 2,00; 1,00; 0,10 e 0,01 m / s, e comprimentos de tubulação de 100 km, 200, 400 e 800.

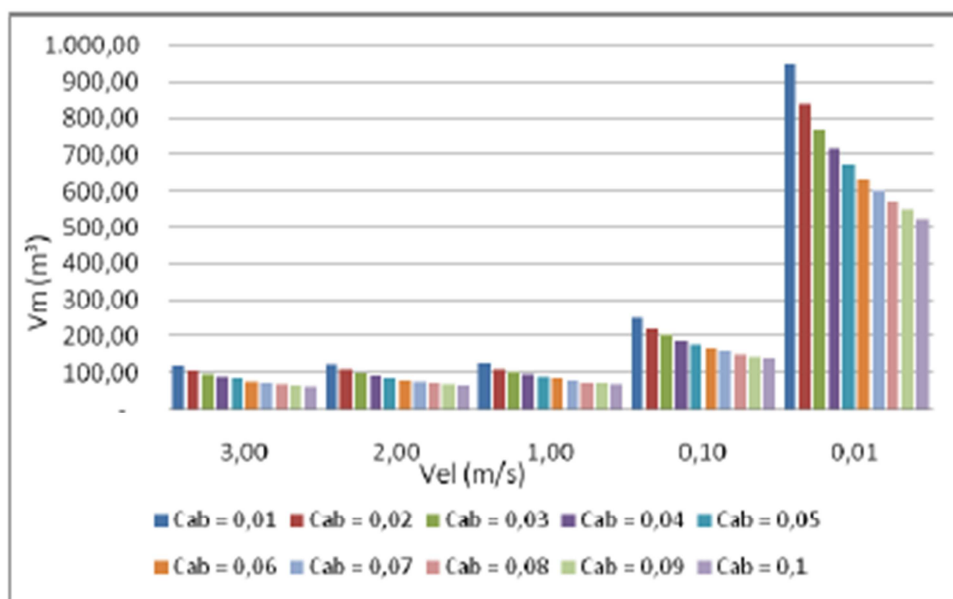


Figura 22 – Mudanças no volume da mistura em função da velocidade do fluxo para cada valor de concentração permitido
Fonte: Oliveira (2010)

Observando a figura acima, pode-se ver que o volume de mistura muda em função da velocidade de fluxo para cada valor de concentração admissível variando entre 1 e 10%. Os gráficos apresentados na Figura 23 ilustram o volume de mistura calculado como uma função do Número de Reynolds após a mistura percorrer 100km e 800km do oleoduto.

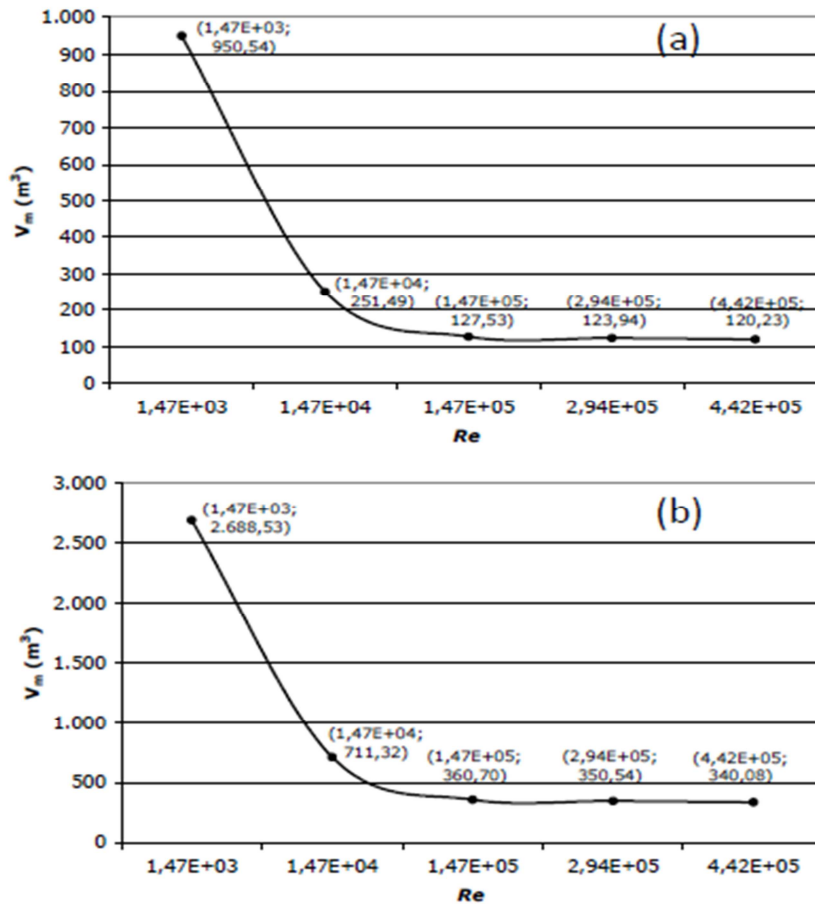


Figura 23 – Volume da mistura em função do número de Reynolds para (a) 100 km e (b) 800 km com $CAB=CBA=1\%$
 Fonte: Oliveira (2010)

Os gráficos para 200km e 400km têm o mesmo perfil da curva dos anteriores.

Com base nos resultados apresentados, Oliveira afirma que o volume da mistura aumenta com a diminuição da concentração admissível. Independentemente da concentração admissível, quanto maior a velocidade de transferência, maior o número de Reynolds e, portanto, o menor volume da mistura. Esta última afirmação normalmente surpreende aqueles que erroneamente associam diretamente à turbulência, o fenômeno de mistura.

Ainda segundo Oliveira (ano), há semelhanças no perfil das curvas apresentadas na figura 23, além disso, o volume de mistura aumenta na medida em que a extensão do duto aumenta, devido ao maior tempo de contato dos fluidos. Em outras palavras, independentemente da concentração admissível adotada, quanto maior for a distância, maior o volume de mistura. Rigorosamente

falando, a equação (9) mostra que o comprimento de mistura, L_m , é proporcional à raiz quadrada da distância percorrida.

Rachid (2002) propôs um modelo de estimativa do volume de interface. O modelo foi baseado numa melhor acurácia do valor de K , isto é, número de dispersão mais preciso, levando-se em conta também a sua dependência com a concentração e a variação da velocidade média. Este modelo foi comparado com dados experimentais para diferentes valores de concentrações admissíveis $C_{AB} = C_{BA} = 1, 2, \dots, 9, 10\%$. Os dados experimentais referem-se a uma transferência que envolve bateladas de gasolina e diesel, sendo a gasolina o primeiro produto a ser inserido no poliduto ($\gamma_A = 734 \text{ kgf} / \text{m}^3, \nu_A = 0,9 \text{ cSt}$) e o diesel o produto subsequente ($\gamma_B = 833 \text{ kgf} / \text{m}^3, \nu_B = 7,6 \text{ cSt}$).

A transferência foi em um oleoduto de 200 km de comprimento, tendo um diâmetro nominal de 10 polegadas. O nível de diferença topográfica entre o ponto de recebimento e a estação de bombeamento era de $\Delta z = -895 \text{ m}$.

Para melhor caracterizar o desempenho do modelo proposto, as Figura 24 e Figura mostram o volume de mistura contaminada como uma função de $C_{AB} = C_{BA} = 1, 2, \dots, 9, 10$ por cento, para sete métodos tradicionais utilizados, (Sjenitzer, Austin & Palfrey, Levenspiel; Ovádi & Torok,; Smith-Schulze, Aunicky, Netchval *et al.*, juntamente com os dados experimentais para $x = 135,9$ km e $x = 199,9$ km, respectivamente.

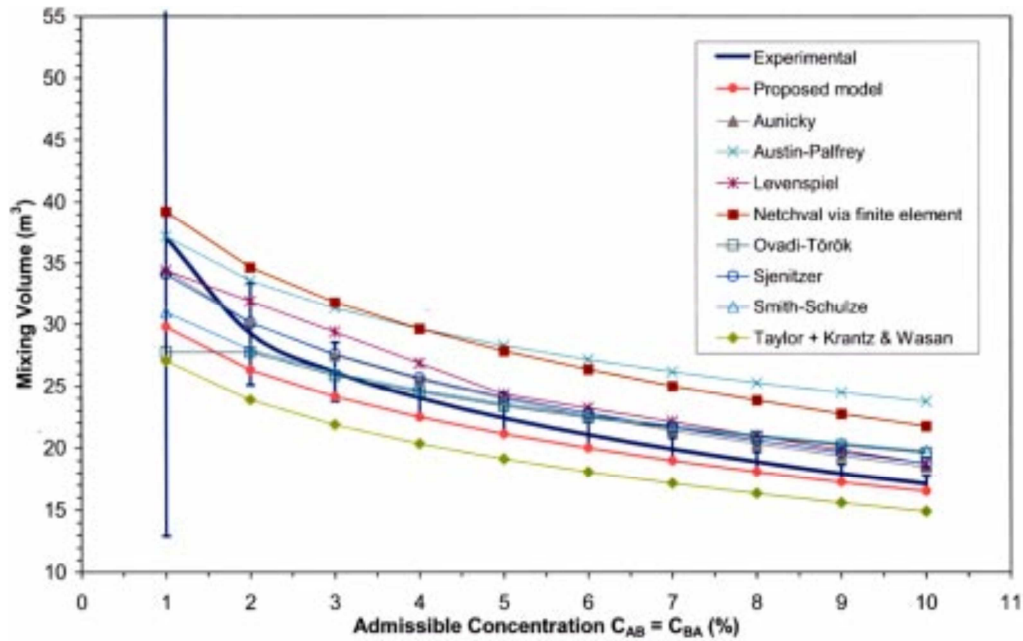


Figura 24 – Volume de interface estimado e medido versus a concentração admissível a $x=135,9$ km
 Fonte: Rachid (2012).

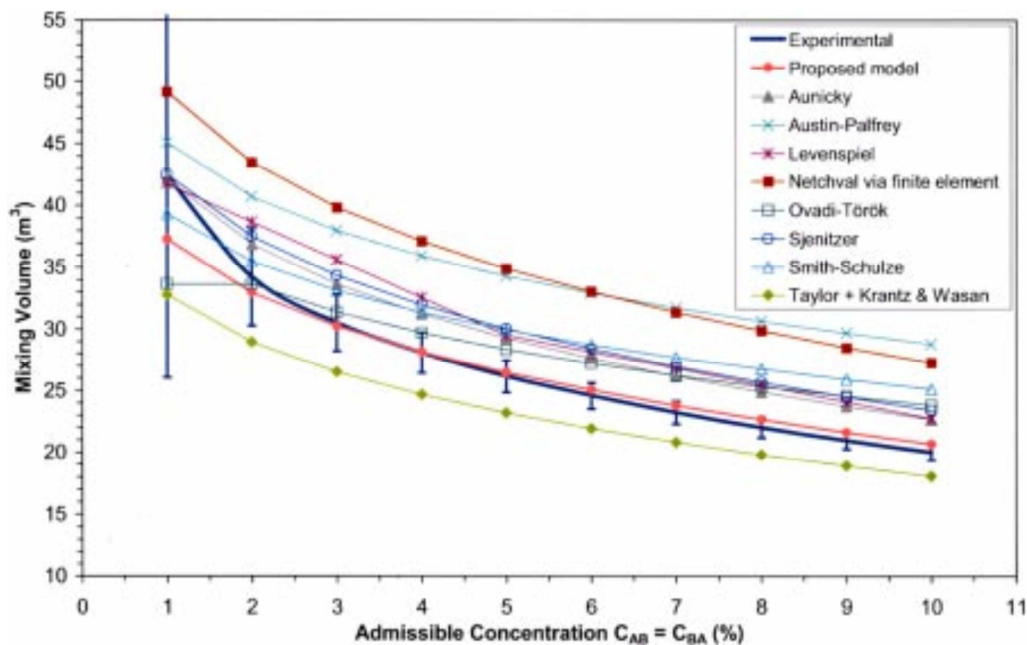


Figura 25 – Volume de interface estimado e medido versus a concentração admissível a $x=199,9$ km
 Fonte: Rachid (2012).

Como esperado e pode ser visto nas figuras acima, o volume experimental da mistura diminui à medida que a concentração admissível aumenta. Esta tendência também é observada para todos os outros sete modelos, exceto para

Ovádi & Torok (1977) , que, como dizem os autores, é válido para o $C_{AB} = C_{BA} > 2$ %. A Figura 24 revela que todos os métodos, menos Austin e Palfrey (1964), e Netchval *et al.*(1972), fazem previsões razoavelmente boas para o volume da mistura a $x=135,9$ km, quando comparados com os dados experimentais. Segundo Rachid, este mesmo tipo de comportamento é esperado quando os volumes de mistura são avaliados para $x < 135,9$ km.

A distinção entre o desempenho dos métodos torna-se evidente depois que a batelada percorre todo o poliduto. Esta afirmação é corroborada na Figura 25, onde pode ser claramente observado que o método proposto é o único que ainda apresenta a melhor correlação com os dados experimentais em toda a extensão da concentração. O modelo proposto é o único método cujas previsões se encaixam dentro das barras de incerteza para qualquer concentração admissível em ambas as posições espaciais $x=135,9$ km e $x=199,9$ km.

Rachid mostra que o sucesso do modelo proposto se baseia tanto no uso de correlações precisas para o coeficiente de dispersão (em termos dos números de Reynolds e Schmidt), quanto também na sua dependência da concentração e da variação no tempo da maior média de velocidade.

O Número de Schmidt, mencionado acima, é um número adimensional definido como a razão de difusividade de momento (viscosidade) e difusividade de massa, e é usada para caracterizar escoamentos de fluidos nos quais existem simultaneamente processos de difusão de momento e massa.

A partir do trabalho de Rachid (2002), foi desenvolvido pela UFF (Universidade Federal Fluminense), juntamente com o Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES), um software para a estimativa do volume de interface gerado numa movimentação através do modal dutoviário. Este software se chama ConBate (Contaminação de Bateladas). A Figura 26 apresenta a tela inicial do ConBate.

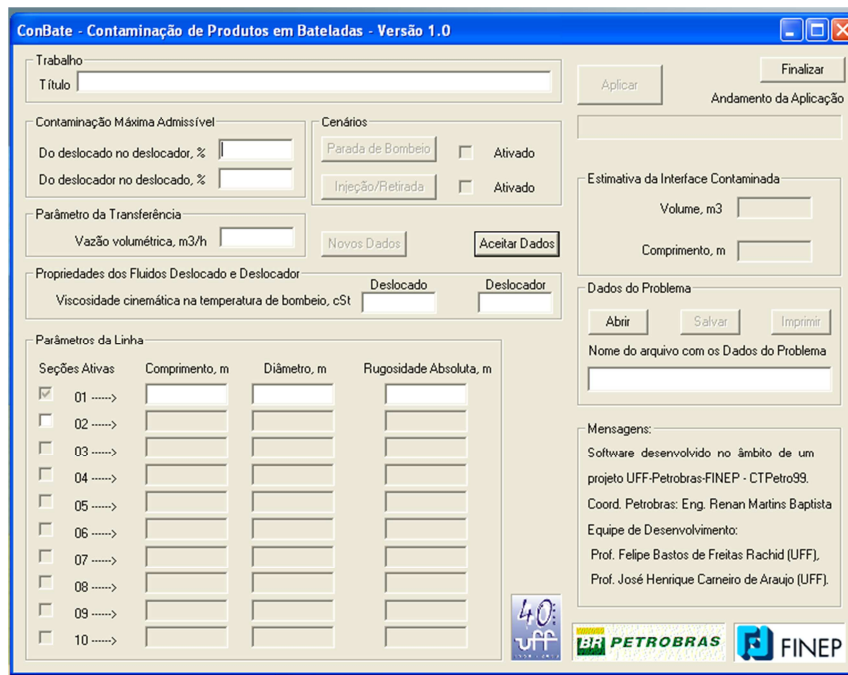


Figura 26 – Tela inicial do software ConBate
Fonte: O Autor (2013)

Lourenço (1995) faz a aplicação de dois métodos para avaliar o comprimento, e conseqüentemente, o volume das interfaces. Um deles é o método de Levenspiel (1958), que é um método difusivo, isto é, baseado nas leis que regem o fenômeno da difusão em líquidos. O outro método é o de Austin & Palfrey (1964), um método não difusivo, isto é, baseado em resultados da observação experimental.

Os dois métodos, segundo Lourenço (1995), não são válidos para o regime de escoamento laminar e consideram que as concentrações dos dois produtos ao longo do comprimento contaminado se distribuem como uma curva em “S”, simétrica, cujo diferencial obedece à curva de erro associada à curva de distribuição normal de Gauss.

Pelo método de Levenspiel (1958), a determinação do comprimento da interface é dada por:

$$L_{C_{i,f}} = \frac{4.090L}{\sqrt{Pe}} \operatorname{erf}^{-1}(2Y_{i,f} - 1) \quad (12)$$

$$L_C = \frac{L_{C_i} \pm L_{C_f}}{2} \quad (13)$$

E o volume da interface é dado por:

$$V_c = 0,00050671.d^2.L_c \quad (14)$$

onde,

L_c = comprimento, em m

V_c = volume, em m^3

L = comprimento do duto, em Km

$Y_{i,f}$ = Pureza fracionária dos componentes da mistura nos pontos de corte da interface

Pe = número de Péclet da mistura

d = diâmetro, em polegadas

erf^{-1} = função erro inversa

O número de Péclet é dado por:

$$Pe = 39370. \frac{L}{ND.d} \quad (15)$$

onde:

L = Comprimento do duto, em Km

ND = Número de Dispersão

d = Diâmetro, em polegadas

Pelo método de Austin & Palfrey (1964), a determinação do comprimento de interface é dada por:

Se $Re_{50/50} > Rec$

$$L_{C_{i,f}} = 36 \sqrt{dL} (Re_{50/50})^{-0,1} (2Y_{i,f} - 1) \quad (16)$$

Se $Re_{50/50} \leq Rec$

$$L_{C_{i,f}} = 56345 dL (Re_{50/50})^{0,9} erf^{-1}(2Y_{i,f} - 1) \quad (17)$$

$$L_c = \frac{L_{ci} + L_{cf}}{2} \quad (18)$$

E o volume da interface é dado por:

$$V_c = 0,00050671.d^2.L_c \quad (19)$$

4.2

Comparação entre as ferramentas disponíveis para o cálculo do tamanho da interface

Para definir qual a ferramenta a ser utilizada na estimativa do volume da interface gerado entre a gasolina e o GLP no poliduto ORSUB, foram utilizados os dois métodos apresentados por Lourenço e o software ConBate.

Para a utilização da formulação Lourenço, considera-se o GLP como o produto inicial, isto é, o GLP sendo empurrado pela Gasolina. Os dados necessários para a caracterização do produto estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados das características dos produtos na simulação

Interface	Produto Inicial	GLP	Densidade inicial	0,560	Densidade inicial do Corte	0,5610	Viscosidade (cSt-amb)	0,482
	Produto Final	Gasolina	Densidade final	0,740	Densidade final do corte	0,7390	Viscosidade (cSt-amb)	0,405

Fonte: O Autor (2013)

O início e o final do corte de interface foi estabelecido em função da variação de 1 dígito na terceira casa decimal. A concentração admissível considerada na simulação foi de 1%, tanto do produto deslocado no produto deslocador, quanto do produto deslocador no produto deslocado.

O duto foi dividido em três trechos, como ele realmente é, e que foi descrito no capítulo 3: O primeiro trecho entre o Terminal de Madre de Deus e a estação de Ipiaú; o segundo trecho entre Ipiaú e o terminal de Itabuna; e o terceiro trecho entre a estação de Ipiaú e o terminal de Jequié.

O primeiro trecho é comum aos dois terminais, e tem um diâmetro de 10 polegadas. O segundo e o terceiro trecho que vão para Itabuna e Jequié,

respectivamente, têm a mesma medida de diâmetro (8 polegadas). A extensão do duto no primeiro trecho é de 222,65 km, no segundo trecho a extensão é de 93 km, e por fim, a extensão do terceiro trecho, que vai de Ipiaú a Jequié, é de 73 km. A vazão do duto entre o Terminal de Madre de Deus e a estação de Ipiaú é na média de 190 m³/h. Nos dois outros trechos seguintes, a vazão média é de 180 m³/h.

A Figura 27 apresenta a máscara de dados na simulação feita com a planilha proposta por Lourenço, utilizando os dois métodos indicados por ele.

	ORIGEM DESTINO		TEMADRE ITABUNA	TEMADRE JEQUIÉ
D U T O	DIAMETRO 1 (in)		10,0	10,0
	DIAMETRO 2 (in)		8,0	8,0
	EXTENSAO 1 (Km)		222,65	222,65
	EXTENSAO 2 (Km)		93,00	73,0
	VAZAO 1 (m ³ /h)		190	190
	VAZAO 2 (m ³ /h)		190	190
	ORIGEM DESTINO		TEMADRE ITABUNA	TEMADRE JEQUIÉ
	COD. PRODUTO i		8	8
	COD. PRODUTO f		1	1
	DENSIDADE i		0,5600	0,5600
	VISC. (cSt-amb) i		0,536	0,536
	DENSIDADE f		0,7400	0,7400
	VISC. (cSt-amb) f		0,635	0,635
I N T E R F A C E	DENS. INI. CORTE		0,5610	0,5610
	DENS. FIM. CORTE		0,7390	0,7390
	COMP. MEDIDO (m)		924,1	926,3
	VOL. MEDIDO (m ³)		32,0	30,0
	COMP. CALC. Lev. (m)		1340,3	1261,8
	VOL. CALC. Lev. (m ³)		43,5	40,9
	COMP. CALC. A&P. (m)		1324,0	1246,9
	VOL. CALC. A&P. (m ³)		42,9	40,4
	DIF. COMP. / Lev. (%)		-31,1	-26,6
	DIF. COMP. / A&P. (%)		-30,2	-25,7
	DIF. VOL. / Lev. (%)		-26,4	-26,7
	DIF. VOL. / A&P. (%)		-25,5	-25,8

Figura 27 – Máscara de dados do cálculo do volume de interface
Fonte: O Autor (2013).

Na Figura 27, 8 é o código do produto inicial, que no caso é o GLP, e 1 é o código do produto final (Gasolina), ambos os códigos são utilizados na planilha de Lourenço para o cálculo das propriedades físico químicas.

A Figura 28 e a Figura 29 apresentam a simulação feita no ConBate, para a estimativa dos volumes da interfaces geradas nas movimentações entre o Temadre-Itabuna e Temadre-Jequié, respectivamente.

ConBate - Contaminação de Produtos em Bateladas - Versão 1.0

Trabalho
Título: TEMADRE-ITABUNA

Contaminação Máxima Admissível
Do deslocado no deslocador, %: 1.0
Do deslocador no deslocado, %: 1.0

Parâmetro da Transferência
Vazão volumétrica, m3/h: 190

Propriedades dos Fluidos Deslocado e Deslocador
Viscosidade cinemática na temperatura de bombeio, cSt: Deslocado: 0.482, Deslocador: 0.405

Parâmetros da Linha

Seções Ativas	Comprimento, m	Diâmetro, m	Rugosidade Absoluta, m
<input checked="" type="checkbox"/> 01	222650.0	0.2540	3.6D-5
<input checked="" type="checkbox"/> 02	93000.0	0.2032	3.6D-5
<input type="checkbox"/> 03			
<input type="checkbox"/> 04			
<input type="checkbox"/> 05			
<input type="checkbox"/> 06			
<input type="checkbox"/> 07			
<input type="checkbox"/> 08			
<input type="checkbox"/> 09			
<input type="checkbox"/> 10			

Estimativa da Interface Contaminada
Volume, m3: 32.91572
Comprimento, m: 1015.0000

Relatório
Abrir, Salvar, Imprimir

Salvar como...
Temadre-Itabuna.sai

Mensagens:
A simulação foi finalizada com SUCESSO!

Para imprimir o relatório aperte o botão Imprimir. Para salvar o relatório digite o nome do arquivo em Salvar como... e aperte o botão Salvar.

Figura 28 – Simulação no ConBate para o trecho Temadre-Itabuna
Fonte: O Autor (2013).

ConBate - Contaminação de Produtos em Bateladas - Versão 1.0

Trabalho
Título: TEMADRE-JEQUIE

Contaminação Máxima Admissível
Do deslocado no deslocador, %: 1.0
Do deslocador no deslocado, %: 1.0

Parâmetro da Transferência
Vazão volumétrica, m3/h: 190

Propriedades dos Fluidos Deslocado e Deslocador
Viscosidade cinemática na temperatura de bombeio, cSt: Deslocado: 0.482, Deslocador: 0.405

Parâmetros da Linha

Seções Ativas	Comprimento, m	Diâmetro, m	Rugosidade Absoluta, m
<input checked="" type="checkbox"/> 01	222650.0	0.2540	3.6D-5
<input checked="" type="checkbox"/> 02	73000.0	0.2032	3.6D-5
<input type="checkbox"/> 03			
<input type="checkbox"/> 04			
<input type="checkbox"/> 05			
<input type="checkbox"/> 06			
<input type="checkbox"/> 07			
<input type="checkbox"/> 08			
<input type="checkbox"/> 09			
<input type="checkbox"/> 10			

Estimativa da Interface Contaminada
Volume, m3: 32.59143
Comprimento, m: 1005.0000

Relatório
Abrir, Salvar, Imprimir

Salvar como...
ConBate_Rel_01.sai

Mensagens:
A simulação foi finalizada com SUCESSO!

Para imprimir o relatório aperte o botão Imprimir. Para salvar o relatório digite o nome do arquivo em Salvar como... e aperte o botão Salvar.

Figura 1 - Simulação no ConBate para o trecho Temadre-Jequié
Fonte: O Autor (2013).

A Tabela 12 apresenta os resultados da comparação entre os métodos de estimativas de interface e o volume real obtido através da média dos volumes dessas operações nos meses de junho e julho de 2012.

Tabela 12 – Comparação dos métodos

Trecho do ORSUB	Levenspie l (m³)	Austin & Palfrey (m³)	ConBate (m³)	Experimenta l (m³)
TEMADRE-ITABUNA	43,5	42,9	32,9	32,0
TEMADRE-JEQUIÉ	40,9	40,4	32,6	30,0

Fonte: O Autor (2013).

Conforme vemos na Tabela 12, o ConBate se mostrou mais aderente ao volume encontrado em campo, do mesmo modo que o método proposto por Rachid, no qual o ConBate é baseado, foi o mais preciso em relação aos outros, como exposto no seu trabalho visto neste capítulo. Assim, para a estimativa de volume da interface entre gasolina/GLP no ORSUB, será adotado neste trabalho, este software.

5

Previsão da Qualidade da Interface Gerada

Neste presente capítulo será abordada a questão de qual o volume de interface que pode ser adicionada ao GLP ou a gasolina, mantendo as especificações dos produtos de acordo com a regulamentação vigente.

O sistema de tratamento de interface baseia-se no equilíbrio entre uma fase líquida e uma fase vapor, seguindo as leis da termodinâmica. A primeira lei da termodinâmica é uma extensão do princípio da conservação da energia mecânica. Segundo este princípio, em um sistema isolado, a energia se conserva, seja qual for a transformação sofrida pelo sistema. Esta lei enuncia que a energia total transferida para um sistema é igual à variação da sua energia interna, estabelecendo, para um sistema fechado, que:

$$d(nU) = dQ + dW \quad (20)$$

onde $d(nU)$ é a variação total da energia interna U do sistema, n é o número de mols existente no sistema, dQ é o calor transferido ao sistema e dW é o trabalho exercido no sistema pela vizinhança.

A segunda lei da termodinâmica, num sentido amplo, envolve o fato de que processos ocorrem num dado sentido e não no oposto. Assim, podemos dizer que enquanto a primeira lei da termodinâmica estabelece a conservação de energia em qualquer transformação, a segunda lei estabelece condições para que as transformações termodinâmicas possam ocorrer (Van Wylen, 1995).

A segunda lei da termodinâmica estabelece que para um processo reversível, a variação total da entropia (S) pode ser calculada por:

$$d(nS) = \frac{dQ}{T} \quad (21)$$

onde Q é o calor transferido ao sistema pela vizinhança ou vice-versa, n é o número de mols contidos no sistema e T é a temperatura absoluta do sistema.

A energia interna de Gibbs (G) é uma grandeza que busca medir a totalidade de energia atrelada a um sistema termodinâmico disponível para execução de trabalho. Em última análise pode-se considerar que esta energia interna de Gibbs permite prever se o um processo é espontâneo (Castellan, 1983).

A energia interna de Gibbs, à temperatura e pressão constantes, é definida matematicamente por:

$$G = H - T \cdot S = U + P \cdot V - T \cdot S \quad (22)$$

Onde, H é a entalpia em joules, T é a temperatura em Kelvin, e S é a entropia em joules por Kelvin.

A entalpia (H) é uma grandeza física que mede o conteúdo de energia de cada participante de uma reação. U representa a energia interna do sistema e P e V representam a pressão e o volume do sistema respectivamente (Castellan, 1983).

A entropia (S) é uma grandeza termodinâmica que serve para medir o grau de desordem de um sistema. Quanto maior a desordem de um sistema, maior a sua entropia. As reações espontâneas seguem no sentido da diminuição da energia ou do aumento da entropia.

Assim, através de ferramentas matemáticas e com base na primeira e na segunda leis da termodinâmica e o conceito de equilíbrio termodinâmico caracterizado pelo mínimo da energia interna de Gibbs, tem-se a formulação da teoria das soluções (Castellan, 1983).

As condições próximas da idealidade em que o sistema de tratamento de interface deve trabalhar (os produtos são soluções de componentes apolares e semelhantes entre si, pressão próxima à atmosférica e temperatura em torno da ambiente) permitiriam uso de modelos bastante simples para cálculo do equilíbrio líquido-vapor.

Equações de estado foram desenvolvidas para realização de cálculos de equilíbrio de fases de misturas de hidrocarbonetos. Cita-se, por exemplo, os trabalhos de Vázquez-Román *et al.* (2001) e Hua *et al.* (1996), que utilizaram as

equações de Peng-Robinson e Soave-Redlich-Kwong na avaliação do equilíbrio de fases. Com o advento dos computadores e de sua capacidade de execução rápida de cálculos, foram desenvolvidos softwares que permitem determinar o estado de equilíbrio com enorme economia de tempo e trabalho.

O centro de pesquisas da Petrobras – CENPES desenvolveu um software que permite o cálculo de equilíbrio de fases de sistemas multicomponentes. Este software é chamado de Petrox, e será utilizado nesta dissertação para determinação dos estados de equilíbrio.

O *PETROX* é um simulador do tipo estático e sequencial-modular. A simulação estática, incluindo ou não operações de otimização, é usada em projetos de instalações de processo, e recebe este nome por reproduzir a operação em regime estacionário em contraposição à simulação dinâmica, que leva em conta as variações ao longo do tempo. O tipo sequencial-modular indica que o simulador calcula as operações unitárias como módulos isolados, ligados uns aos outros apenas por correntes de processo, e seguindo uma sequência pré-determinada (Cenpes, 2011).

O software *PETROX* tem sido utilizado com sucesso em projetos de novas unidades da Petrobras, em ampliações ou reformas de unidades existentes e em otimizações de processos. São quatro as etapas de operação do programa: Entrada de dados; Construção do problema; Execução da simulação e a Apresentação dos resultados.

Os dados dos produtos foram inseridos no Petrox de formas distintas. O GLP foi alimentado através dos dados obtidos das análises cromatográficas (ASTM D2163), onde se encontram os seus constituintes e suas concentrações médias. No caso da gasolina, os dados alimentados no Petrox foram obtidos através de suas curvas de destilação, utilizando-se o método ASTM D86.

Tanto para o GLP quanto para a gasolina, foram retiradas amostras do ORSUB para a caracterização em bancada. A partir dessas amostras, calculou-se a composição média destes produtos e os resultados foram comparados com a média histórica levantada entre o período de setembro de 2009 a junho de 2012 (Figura 30).

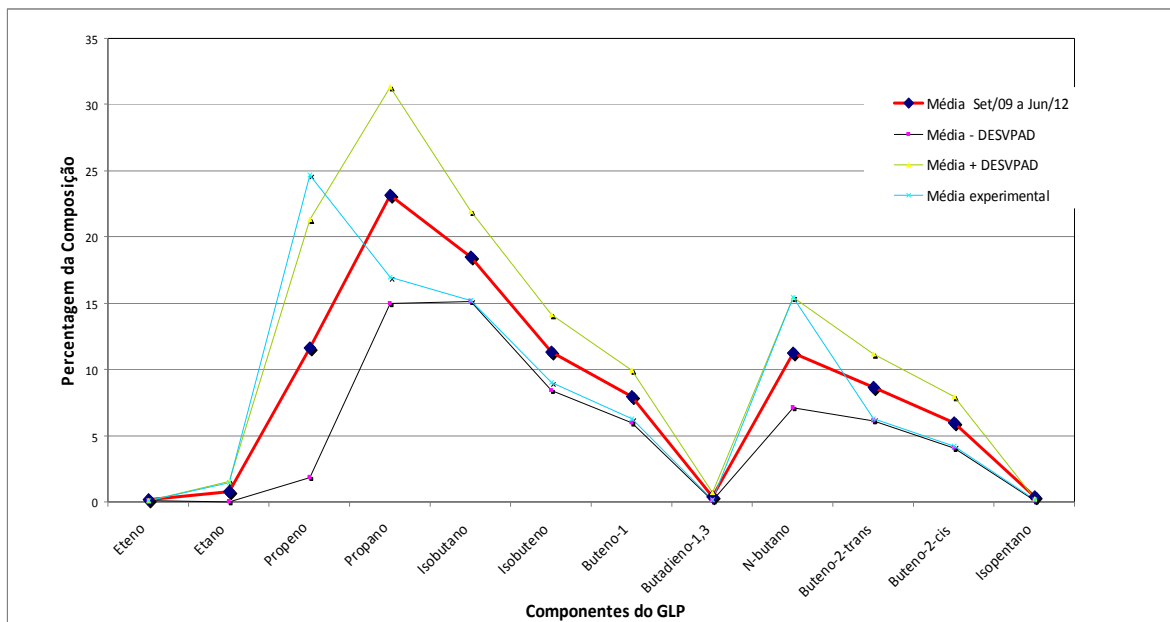


Figura 30 – Comparação da composição do GLP média experimental x média histórica
Fonte: O Autor (2013).

Como fonte de entrada no Petrox, foi utilizada a composição média histórica do GLP (curva Média Set/09 a Jun/12, da figura 35). A partir dessa média, foram estabelecidos dois outros tipos de GLP, um retratando um produto mais leve, e um segundo retratando um GLP mais pesado. Vale ressaltar que, como as curvas relativas à Média+DESVPAD e Média-DESVPAD da Figura 30 não representam cromatografias possíveis, optou-se por trabalhar diretamente com o universo das densidades históricas.

Para a determinação do GLP leve e do pesado na simulação, foi utilizada como referência a densidade média, e através do desvio-padrão foram estabelecidos o limite inferior e superior de densidade, respectivamente, como apresentado na Figura 31. Nesta figura, vemos a linha [S] que fixa o limite da média mais um desvio padrão. Da mesma forma, a linha [I] estabelece o limite da média menos um desvio padrão.

Assim, para o GLP leve foi tirado o valor médio das densidades abaixo de 547,05 kg/m³ e retirada a composição de um GLP real correspondente a esta média (539,34 kg/m³). Da mesma forma foi feito para o correspondente do GLP pesado. Foi tirada uma média das densidades acima de 568,55 kg/m³, o que resultou numa média de densidade para o GLP pesado de 573,30 kg/m³, e encontrou-se dentre do universo do levantamento histórico, um GLP com esta densidade.

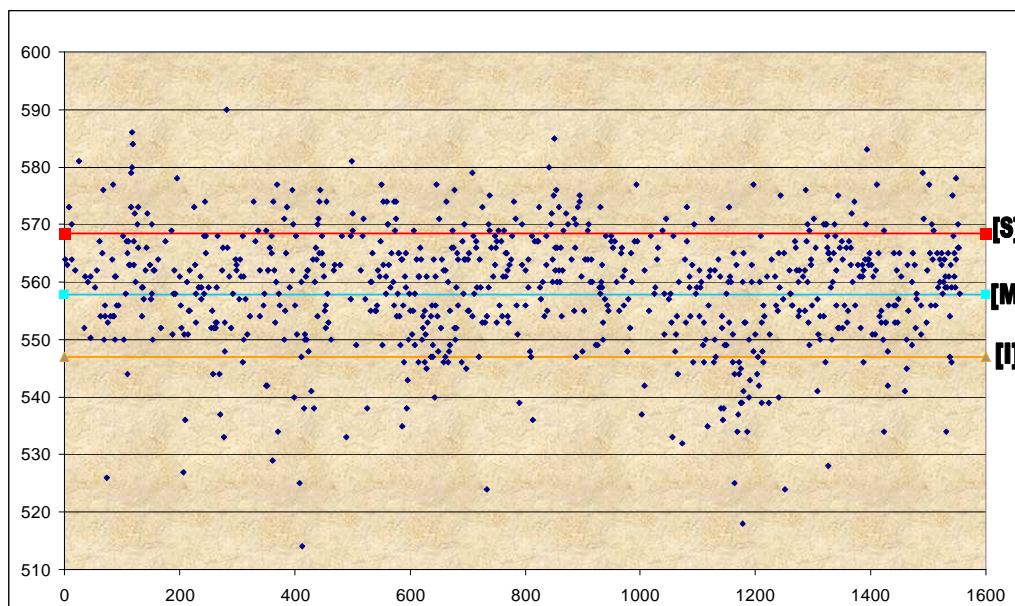


Figura 31 – Dispersão dos valores das densidades do GLP no ORSUB
Fonte: O Autor (2013).

A Tabela 13 mostra a comparação ente os resultados das composições dos GLPs utilizados neste trabalho.

Tabela 13 – Composição dos GLPs

Análise Cromatográfica do GLP - Composições Percentuais				
COMPONENTE	Média Histórica (Set/09 a Jun/12)	GLP Experimental	GLP Leve	GLP Pesado
Eteno	0,15	0,09	0,09	0,08
Etano	0,73	1,45	2,76	0,06
Propeno	11,58	24,66	6,59	2,51
Propano	23,15	16,98	42,85	14,13
Isobutano	18,51	15,23	17,49	20,53
Isobuteno	11,29	9,02	3,93	17,49
Buteno-1	7,97	6,29	2,87	12,08
Butadieno-1,3	0,38	0,17	0,14	0,23
N-butano	11,26	15,44	17,61	14,82
Buteno-2-trans	8,62	6,29	3,31	14,42
Buteno-2-cis	5,98	4,23	2,28	2,81
Isopentano	0,38	0,15	0,08	0,84

Fonte: O Autor (2013).

No caso da gasolina foi também realizado o levantamento histórico do mesmo período considerado no GLP, para a caracterização da gasolina média movimentada no poliduto. Do mesmo modo que foi feito para o GLP, também foram caracterizados mais duas gasolinas, uma mais leve e uma gasolina mais pesada. Então, para a gasolina leve teórica, subtraiu-se da gasolina média o desvio-padrão, para todos os pontos da curva de destilação que seriam

alimentados no Petrox. Para a gasolina pesada teórica foi feita a soma da gasolina média com o desvio-padrão. A Tabela 14 – Curva de destilação das gasolinas indica os pontos da destilação para as três gasolinas.

Tabela 14 – Curva de destilação das gasolinas

Percentual Volumétrico Evaporado	Gasolina Leve	Gasolina Média	Gasolina Pesada
PIE	32,8	35,0	37,2
10%	48,9	53,1	57,3
50%	88,0	93,7	99,41
90%	154,9	163,4	171,9
PFE	191,2	202,4	213,8

Fonte: O Autor (2013).

Na Figura 32 são apresentadas as curvas de destilação para as três gasolinas anteriormente descritas.

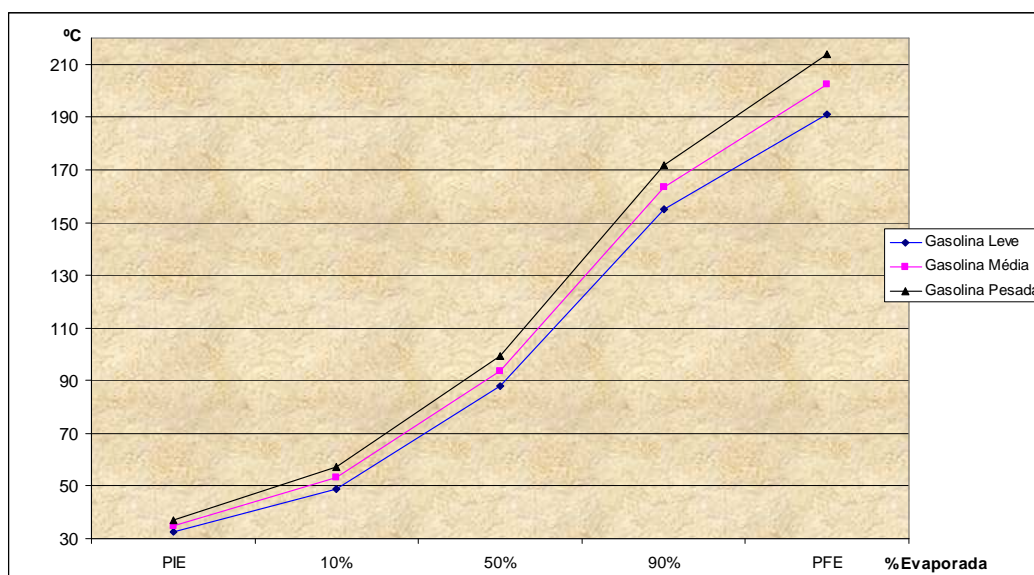


Figura 32 – Curvas de destilação das gasolinas

Fonte: O Autor (2013).

Para a simulação neste software foram então criados estes 6 produtos de entrada: GLP, GLP Leve, GLP Pesado, Gasolina, Gasolina Leve e Gasolina Pesada. Foram feitas as simulações combinando os 3 tipos de GLP com os 3 tipos de gasolina, gerando 9 cenários ou combinações.

Na Figura 33 é apresentado a tela do Petrox onde é inserida a composição do GLP que participará das simulações.

Correntes - ID: GLP

Caracterização | Especificação | Dados de viscosidade | Comentário

Tipo de Corrente: **Composição**

Unidade na tabela

Vazão

Fração

Percentagem

Unidade: V m³/h

Normalizar

Fase

Vapor Líquida Mista

Fração vaporizada: M

	Componente	%
1	eteno	0.15
2	etano	0.73
3	propano	23.15
4	propeno	11.58
5	isobutano	18.51
6	isobuteno	11.29
7	1-buteno	7.97
8	1,3-butadieno	0.38
9	n-butano	11.26
10	trans-2-buteno	8.62
11	cis-2-buteno	5.00

OK Cancel

Figura 33 – Especificação dos componentes do GLP
Fonte: O Autor (2013).

Na Figura 34 é apresentada a inserção dos valores da curva de destilação da gasolina.

Componentes

Componentes puros | Frações de Petróleo | Grupos de Cortes | **Petróleo** | Métodos de Cálculo de Petróleo | Comentário

Selecione um Petróleo já definido ou entre com um novo:

Petróleos Definidos: Gasolina Leve Apagar Petróleo

Dados

Curva de Destilação

Tipo: Curva de Destilação

Nome: Unidade de Temperatura: Celsius

Grupo: Pressão: 760 mmHg

Edição: Volumétrica Mássica

Base: Volumétrica Mássica

Tipo de Ensaio: Astm

Correção para Craqueamento

	% Vaporizada	Temperatura
1	0.000000	32.800000
2	10.000000	48.900000
3	50.000000	88.000000
4	90.000000	154.900000
5	100.000000	191.200000
6		
7		
8		
9		
10		

OK Cancelar

OK Cancel

Figura 34 – Dados da curva de destilação da gasolina leve
Fonte: O Autor (2013).

No Petrox existe uma seção chamada Conjunto Termodinâmico. Esta seção tem como objetivo definir os métodos termodinâmicos (métodos para cálculo das constantes de equilíbrio líquido-vapor, entalpia, entropia e massa específica da fase líquida e vapor) e de cálculo de propriedades de transporte (viscosidade, condutividade térmica e tensão superficial) dos componentes e correntes do

simulador. No caso deste trabalho foi utilizado o conjunto termodinâmico *default*, chamado de SET01. As equações de estado Peng-Robison são utilizadas neste conjunto termodinâmico.

Com os dados de entrada do Petrox (definição das correntes, composição dos componentes, sistema termodinâmico), seleciona-se o módulo Misturador. Este módulo tem a função de misturar duas os mais correntes de entrada. No presente trabalho a interface gerada na movimentação do ORSUB é uma mistura Gasolina/GLP.

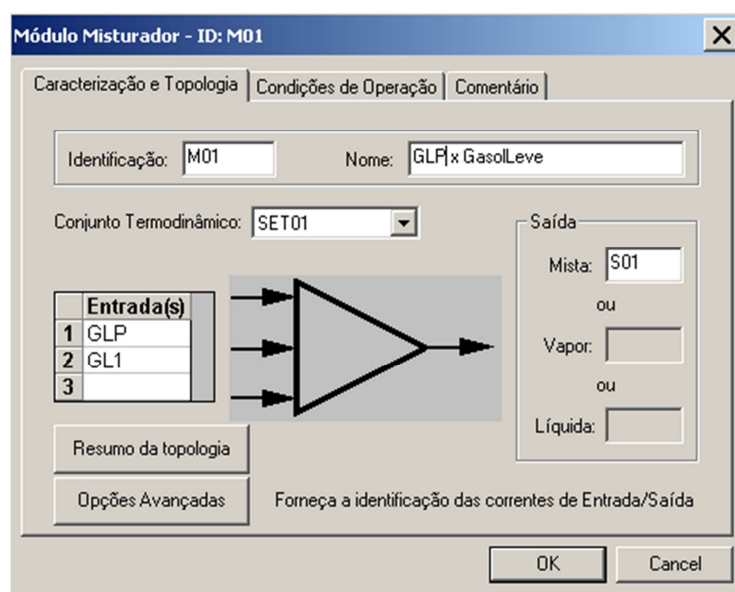


Figura 35 – Módulo "misturador" no Petrox
Fonte: O Autor (2013).

Na Figura 35 é apresentado o módulo misturador, onde se tem duas correntes de entrada, GLP e GL1 (gasolina leve), o conjunto termodinâmico SET01 e uma corrente de saída chamada "S01". A mistura foi feita na proporção 50% para cada produto.

O Petrox traz ao usuário a opção de visualização do fluxograma da simulação. Na Figura 36 tem-se o fluxograma onde aparecem as simulações realizadas neste presente trabalho.

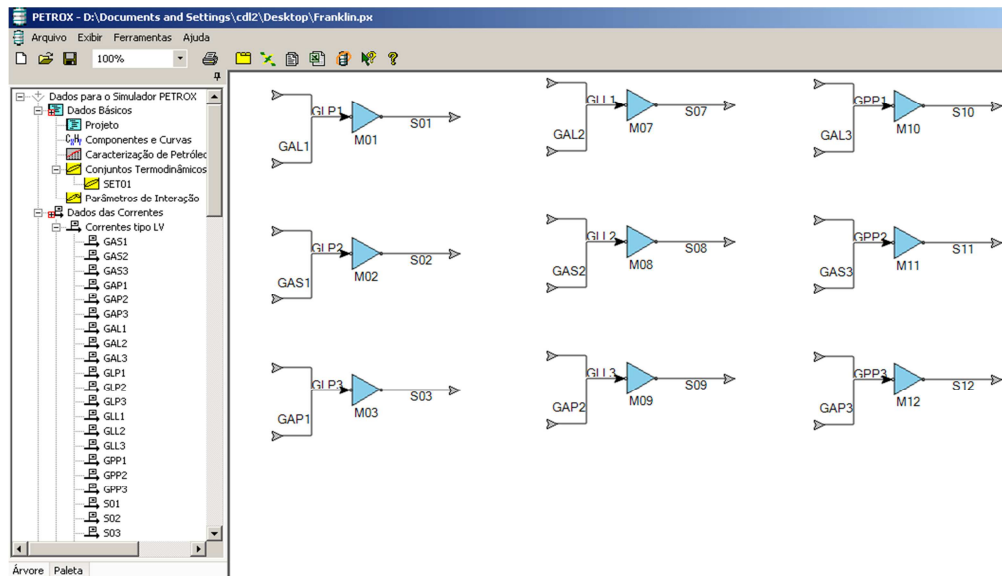


Figura 36 – Fluxograma das simulações das correntes
Fonte: O Autor (2013).

Na Tabela 15 são apresentadas as características físicas e químicas das correntes de saída da simulação.

Tabela 15 – Vazão molares e as características físico-químicas das correntes de saída

CARACT/CORRENTE	S01	S02	S03	S07	S08	S09	S10	S11	S12
FASE	LIQ SUB	LIQ SUB	LIQ SUB	LIQ SUB	LIQ SUB	LIQ SUB	LIQ SUB	LIQ SUB	LIQ SUB
1 ETENO	3,562	3,562	3,562	2,158	2,158	2,158	1,919	1,919	1,919
2 ETANO	15,116	15,116	15,116	57,722	57,722	57,722	1,255	1,255	1,255
3 PROPENO	253,248	253,248	253,248	145,561	145,561	145,561	55,441	55,441	55,441
4 PROPANO	469,174	469,174	469,174	877,113	877,113	877,113	289,232	289,232	289,232
5 ISOBUTANO	316,391	316,391	316,391	301,946	301,946	301,946	354,429	354,429	354,429
6 ISOBUTENO	213,615	213,615	213,615	75,102	75,102	75,102	334,232	334,232	334,232
7 1-BUTENO	150,212	150,212	150,212	54,632	54,632	54,632	229,951	229,951	229,951
8 1,3-BUTADIENO	7,782	7,782	7,782	2,896	2,896	2,896	4,757	4,757	4,757
9 N-BUTANO	199,840	199,840	199,840	315,664	315,664	315,664	265,652	265,652	265,652
10 TRANS-2-BUTENO	184,731	184,731	184,731	64,197	64,197	64,197	279,673	279,673	279,673
11 CIS-2-BUTENO	118,166	118,166	118,166	45,504	45,504	45,504	56,082	56,082	56,082
12 ISOPENTANO	5,812	5,812	5,812	1,236	1,236	1,236	12,975	12,975	12,975
VAZÃO TOTAL kmol/h	3.386,367	3.349,693	3.314,851	3.392,448	3.355,774	3.320,932	3.334,316	3.297,642	3.262,799
VAZÃO MÁSSICA kg/h	231.791,840	232.539,900	233.281,920	227.814,030	228.562,080	229.304,110	234.543,520	235.291,570	236.033,590
VAZÃO VOL T,P m³/h	360,722	360,720	360,716	359,395	359,390	359,382	361,667	361,666	361,663
TEM PERATURA °C	25,754	25,783	25,805	25,674	25,696	25,711	25,660	25,689	25,712
ENTALPIA Gcal/h	-3,562	-3,475	-3,394	-3,246	-3,159	-3,078	-3,644	-3,557	-3,476
EXERGIA Gcal/h	-66,573	-66,321	-66,079	-65,432	-65,179	-64,936	-66,411	-66,159	-65,918
PESO MOLECULAR	68,449	69,421	70,375	67,153	68,110	69,048	70,342	71,352	72,341
DENS. 60/60	0,649	0,651	0,654	0,638	0,641	0,643	0,657	0,659	0,661
DENS. 20/4	0,644	0,646	0,648	0,633	0,635	0,637	0,652	0,654	0,656
VISCOSIDADE cP	0,241	0,248	0,255	0,232	0,239	0,245	0,253	0,260	0,267
VISC CINEMAT. cSt	0,376	0,384	0,394	0,366	0,375	0,384	0,390	0,399	0,409
PONTO DE FULGOR (C)	-78,074	-77,856	-77,604	-81,792	-81,660	-81,564	-69,568	-69,518	-69,481
PRESSÃO DE VAPOR (Kpa)	421,840	421,579	421,773	509,395	509,877	510,813	324,348	323,254	322,622
COEF. VISC/DENS	0,560	0,564	0,568	0,524	0,529	0,533	0,582	0,586	0,590
INTEMPERISMO	159,762	169,305	178,968	160,062	169,625	179,304	159,382	168,901	178,545

Fonte: O Autor (2013).

Além das propriedades mostradas na Tabela 15, o Petrox traça a curva de destilação (ASTM D86) para cada corrente de saída. Na Figura 37 é apresentada a curva da corrente de saída S09, extraída do relatório do Petrox.

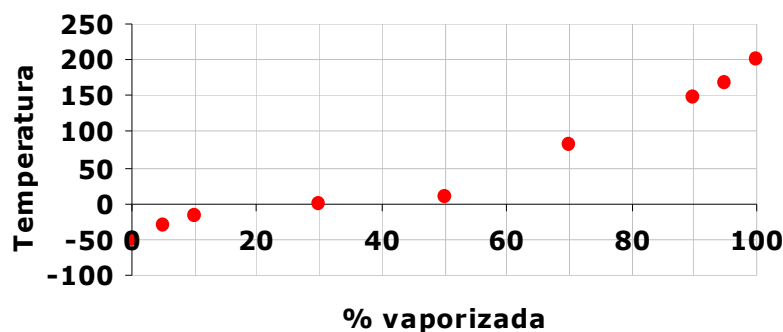


Figura 37 – Curva de destilação ASTM D86 da corrente S09
Fonte: O Autor (2013).

Com as informações obtidas pelo Petrox, foi escolhido um dos nove cenários para ser discutido mais profundamente neste trabalho. Para a escolha deste cenário, faz-se necessário estabelecer os critérios de escolha.

Primeiramente em relação á qualidade da interface, o ponto crítico são os parâmetros de qualidade que podem tirar de especificação a gasolina e o GLP. Na gasolina o item mais crítico é a Pressão de Vapor, no caso do GLP tem-se o intemperismo, que é na verdade é o ponto de ebulição de 95% do volume de gás. Esta característica limita a quantidade de pesados. Ambos os itens são especificados pela portaria ANP.

Assim, pode-se considerar que quanto maior o valor de intemperismo na interface, maior a probabilidade do GLP ficar fora de especificação neste item, no caso desse GLP absorver esta interface. Seguindo o mesmo raciocínio para a Pressão de vapor, este item deve ser o menor possível para uma melhor absorção da interface pela gasolina. Deste modo, valores altos para a Pressão de vapor comprometem a qualidade desta gasolina.

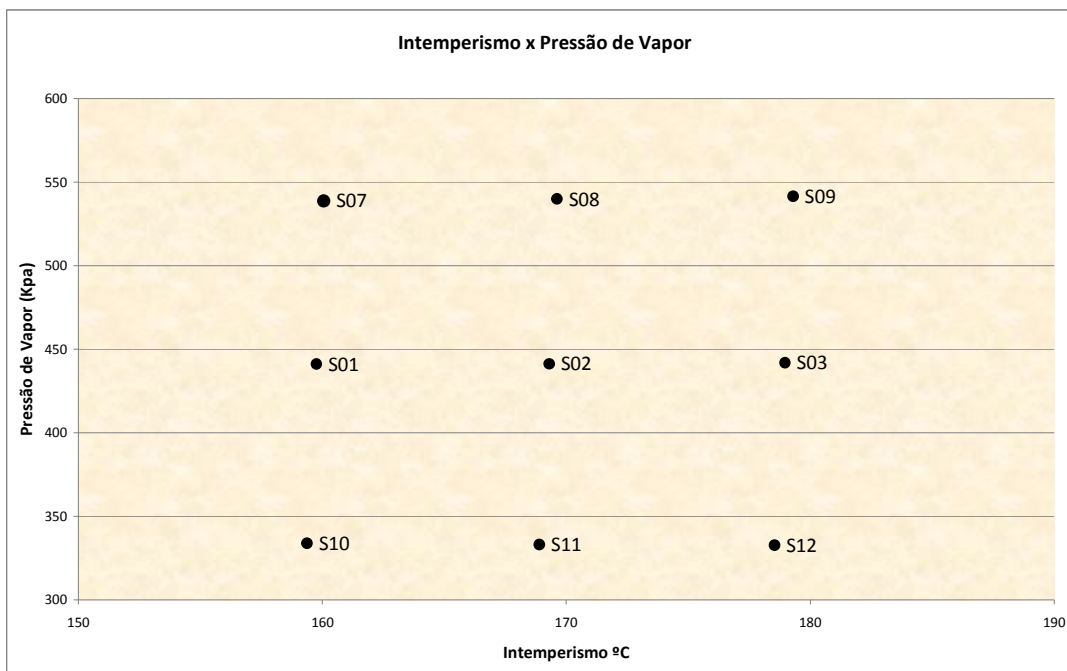


Figura 38 – Pressão de vapor x intemperismo nas correntes de saída (interface) do Petrox
 Fonte: O Autor (2013).

Na Figura 38 vê-se um gráfico relacionando os valores de intemperismo e de pressão de vapor para cada interface gerada no Petrox. Como falado anteriormente, o ponto crítico são as correntes com os maiores valores de intemperismo e de pressão de vapor. A corrente S09 apresentou os maiores valores nestas duas características, deste modo, a partir do ponto de vista da qualidade da interface, ela representa o cenário mais crítico, numa possível mistura com a gasolina e com o GLP.

Outro critério de escolha do cenário mais crítico foi a estimativa do tamanho da interface gerada no poliduto. Como visto nos capítulos anteriores, dois fatores que influem no tamanho da interface são a densidade e a viscosidade. Teoricamente, quanto maior a diferença de densidade dos produtos, maior é o volume gerado de interface. Para a viscosidade também vale o mesmo raciocínio: quanto maior a diferença das viscosidades, em tese, maior será o volume de interface.

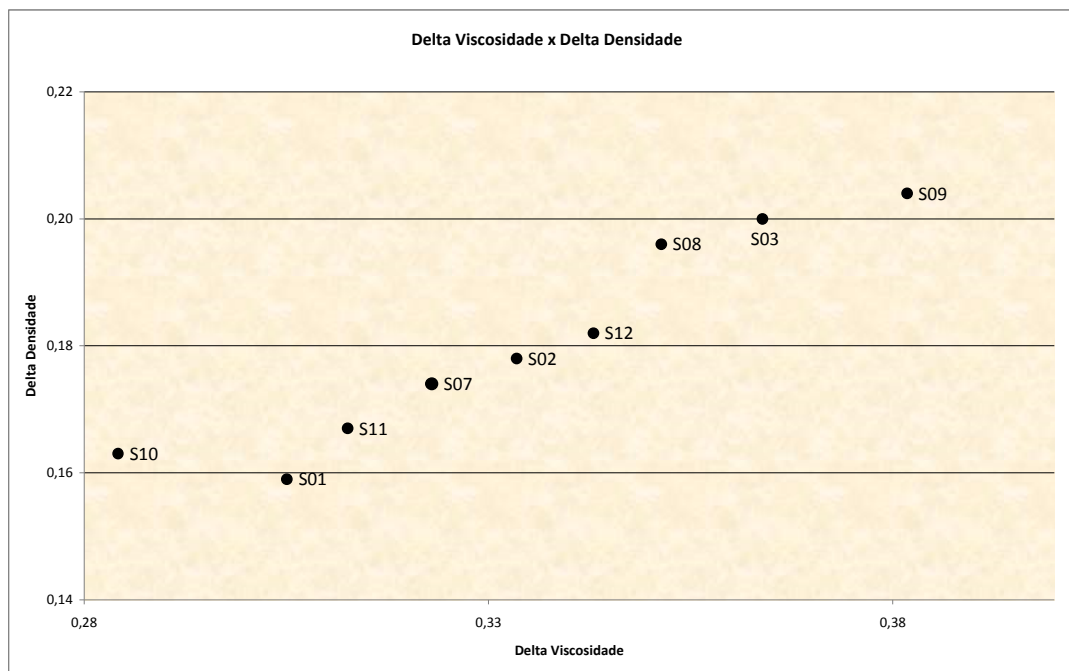


Figura 39 – Delta viscosidade x delta densidade nas correntes de entrada do Petrox
Fonte: O Autor (2013).

Conforme apresentado na Figura 39, a corrente de saída que possui as maiores diferenças de densidade e de viscosidade entre as correntes de entrada é a S09, que tem a mistura de um GLP leve com uma gasolina pesada.

Deste modo, a corrente S09 foi escolhida para representar a composição teórica crítica da interface gerada na movimentação da gasolina e do GLP no poliduto ORSUB. Assim, foram feitas as simulações com esta corrente misturando-a com a gasolina pesada e ao GLP leve, que são suas correntes de entrada, para se averiguar o comportamento da nova corrente resultante destas misturas, ou seja, busca-se assim verificar a quantidade admissível de interface (S09) no GLP sem comprometer a qualidade deste GLP, bem como verificar a quantidade admissível de interface (S09) na gasolina sem comprometer a qualidade desta gasolina.

Primeiramente, submeteu-se a gasolina pesada (GAP4 = GAP3) a várias proporções da mistura corrente de interface S091 (=S09). As proporções desta corrente na gasolina pesada foram: 1%, 2%, 5%, 10%, 25% e 50%.

Na Tabela 16 são apresentados os valores para as diversas características físico-químicas das misturas interface/gasolina pesada, para diferentes concentrações da interface nesta mistura (1%, 2%, 5%, 10% e 50%).

Tabela 16 – Características da mistura interface x gasolina em diferentes concentrações

Interface x Gasolina Pesada	1%	2%	5%	10%	25%	50%
Peso Molecular	95,804	94,656	93,50	91,139	86,165	81,493
Grau API	58,215	59,161	60,107	62,160	86,165	81,493
Vazão Molar kmol/h	1420,367	1486,983	1553,599	1720,138	2219,757	3052,454
Densidade 60/60	0,745	0,742	0,738	0,730	0,713	0,696
Densidade. 20/4	0,741	0,7374	0,733	0,725	0,708	0,69
Calor Específico kcal/kmol.°C	46,419	46,0098	45,599	44,754	42,966	41,27
Viscosidade Cinemática. cSt	0,608	0,59	0,587	0,567	0,525	0,486
Viscosidade Cinemática 20 °C cSt	0,639	0,6288	0,618	0,596	0,552	0,511
Ponto de Fulgor °C	-39,362	-43,5342	-47,705	-56,628	-68,116	-74,414
Pressão de Vapor REID Kpa	61,753	74,204	98,654	134,54	212,41	288,90
Intemperismo °C	189,684	189,5906	189,496	189,136	187,990	186,48
Coef. Viscos/Densid Leves	0,840	0,829	0,818	0,795	0,74	0,692
PIE	16,15	9,104	2,054	-12,021	-31,50	-40,449
10%	57,617	52,2808	46,944	29,383	15,126	-3,350
50%	99,221	97,848	96,475	93,527	86,059	76,814
90%	169,275	168,756	168,237	167,081	164,35	161,128
PFE	210,170	209,942	209,71	209,186	207,871	206,194

Fonte: O Autor (2013).

Como já falado anteriormente, o item crítico para a especificação da gasolina conforme a legislação legal vigente é a pressão de vapor. Como se pode observar na Figura 40, apenas para a concentração de 1% de interface na gasolina pesada o resultado foi mantido dentro da especificação da ANP.

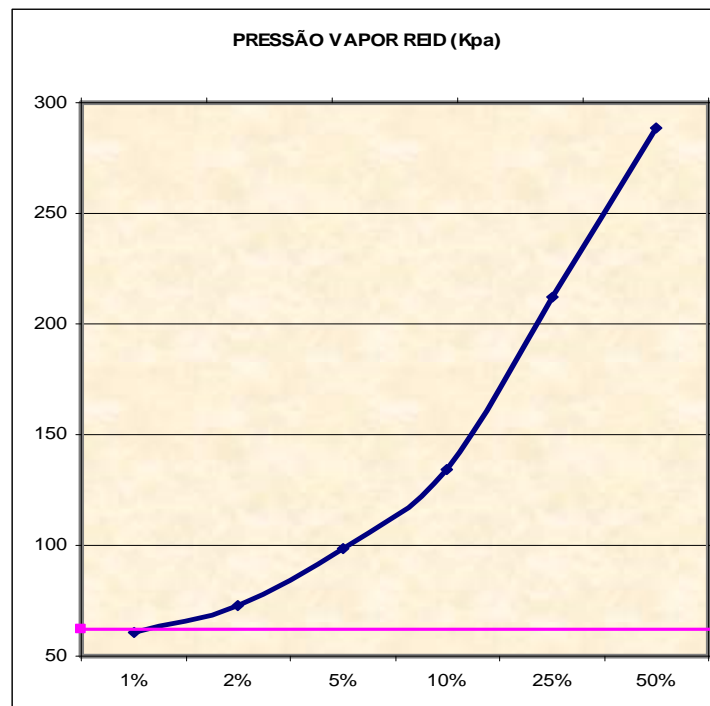


Figura 40 – Pressão de vapor da mistura interface x gasolina e a linha de corte em 62,0 Kpa

Fonte: O Autor (2013).

Para a mistura das diversas concentrações da interface com o GLP leve foram encontrados os resultados apresentados na Tabela 17:

Tabela 17 – Características da mistura interface x GLP em diferentes concentrações

Interface x GLP Leve	1%	2%	5%	10%	25%	50%
Peso Molecular	49,810	50,129	51,024	52,342	55,347	58,506
Grau API	129,389	128,447	125,862	122,218	114,559	107,355
Vazão Molar kmol/h	1.977,037	2.010,345	2.110,269	2.276,809	2.776,427	3.609,124
Densidade 60/60	0,542	0,544	0,550	0,558	0,575	0,592
Densidade. 20/4	0,536	0,538	0,544	0,552	0,569	0,587
Calor Específico kcal/kmol.°C	30,247	30,342	30,604	31,002	31,964	33,026
Viscosidade Cinemática. cSt	0,233	0,236	0,140	0,254	0,278	0,188
Viscosidade Cinemática 20 °C cSt	0,243	0,245	0,243	0,265	0,290	0,303
Ponto de Fulgor °C	-89,045	-88,948	-88,571	-87,961	-86,561	-85,361
Pressão de Vapor REID Kpa	9,843	9,771	9,572	9,282	8,637	7,973
Intemperismo °C	1,662	6,864	38,813	115,825	148,907	162,664
Coef. Viscos/Densid Leves	0,242	0,248	0,263	0,286	0,336	0,386
PIE	-64,027	-63,867	-63,249	-62,248	-59,944	-57,962
10%	-29,100	-28,949	-28,357	-27,398	-25,214	-23,400
0%	-15,529	-15,038	-13,634	-11,500	-6,322	-2,910
0%	-1,163	-0,940	-0,293	1,608	76,648	106,234
FE	15,971	59,504	80,512	91,006	144,021	165,228

Fonte: O Autor (2013).

No caso da especificação do GLP, o item crítico é o intemperismo (valor máximo segundo a legislação vigente é 2,2°C). Como apresentado na Figura 41, apenas para a concentração de 1% de interface no GLP Leve, o resultado foi mantido dentro da especificação da ANP.

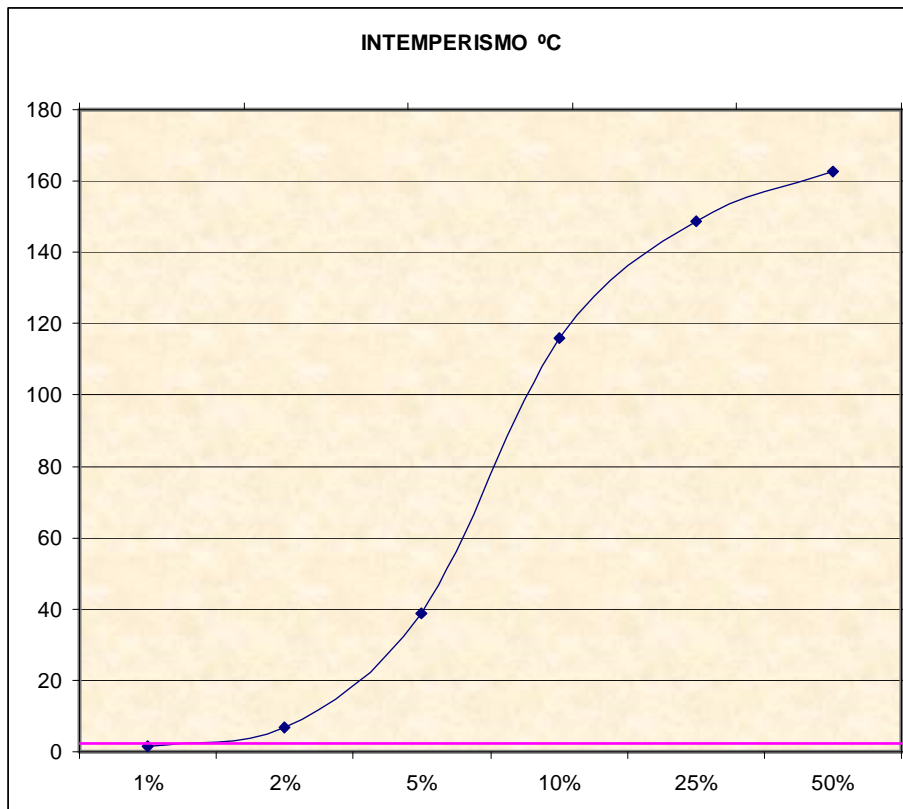


Figura 41 – Intemperismo da mistura interface x GLP e a linha de corte da especificação (2,2 C)

Fonte: O Autor (2013).

Assim, como evidenciado na simulação das misturas da interface/gasolina pesada e interface/GLP leve, a concentração admissível da interface na gasolina e no GLP é de 1%, isto considerando uma mistura de 50/50 entre os dois produtos.

6 Cálculos e Simulações

6.1 Determinando a equação dos volumes de GLP e gasolina da interface

Para o cálculo da estimativa do volume de GLP e de Gasolina foi dividido o perfil da curva de densidade em 5 regiões. Na Figura 42 é representada uma batelada em um poliduto, onde o produto mais denso, no caso a gasolina, é empurrada por um produto menos denso (GLP). O eixo x representa a posição dos produtos no poliduto.

A primeira região é chamada de gasolina, onde temos apenas a gasolina pura, isto é, sem a contaminação com o GLP. A segunda região é aqui chamada de região de corte, onde se começa uma variação na densidade da gasolina, indicando o início da mistura da gasolina com o GLP. Esta região se estende até o ponto de corte realizado pelo operador do sistema. Tanto a primeira região (gasolina) quanto a segunda região (região de corte) são encaminhadas para o parque de tancagem da gasolina.

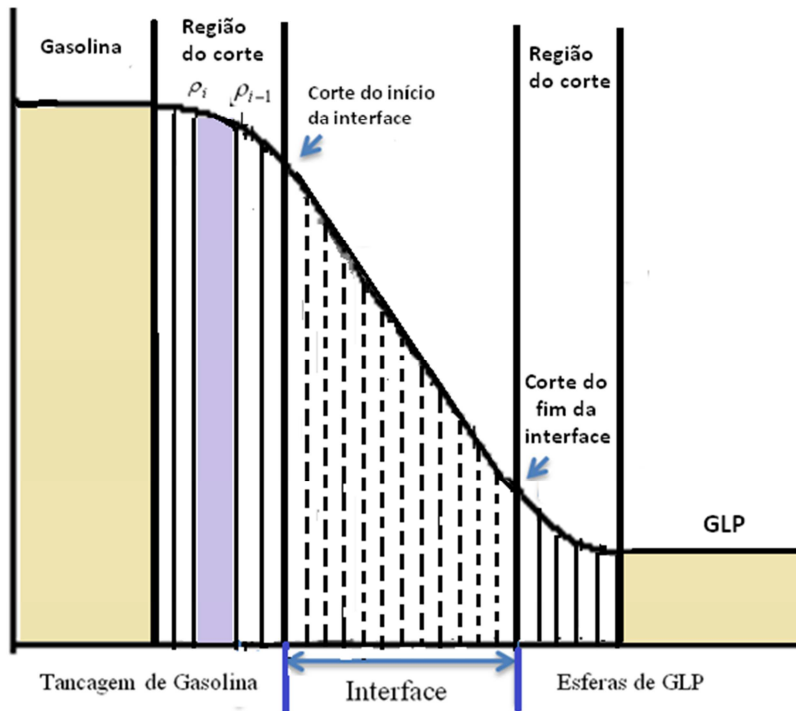


Figura 42 – Curva de densidade da interface
 Fonte: O Autor (2013).

A terceira região da curva de densidade é chamada de interface. Nesta região a porcentagem de GLP na mistura já é significativa em relação às duas regiões anteriores. A partir deste ponto o produto deixa de ser enviado para a tancagem de gasolina e é deslocado para o sistema de tratamento de interface do terminal. A quarta região, também chamada de região de corte se inicia novamente com a atuação do operador do sistema, onde a partir deste momento o produto deixa de ser enviado para o sistema de tratamento de interface, e é direcionado para as esferas de GLP. Nesta região ainda é presente a mistura gasolina/GLP. A quinta e última região representada na Figura 42, é chamada de GLP, onde a densidade é estabilizada, indicando que há somente o produto GLP a partir daquele momento.

Numa determinada faixa desta curva de densidade ao longo da interface, tem-se um volume (V_i) de produto. Este volume é a soma dos volumes de GLP (V_{GLP_i}) e de gasolina (V_{GLN_i}) neste determinado ponto.

$$V_i = V_{GLP_i} + V_{GLN_i} \quad (23)$$

O volume total de GLP até aquele ponto seria a somatória dos vários volumes de GLP na curva:

$$V_{GLP} = \sum_{I=1}^N V_{GLP_i} \quad (24)$$

Do mesmo modo, o volume total de gasolina até o determinado ponto seria a somatória dos vários volumes de gasolina na curva:

$$V_{GLN} = \sum_{I=1}^N V_{GLN_i} \quad (25)$$

Lembrando que a densidade é uma propriedade aditiva, então pode-se calcular a densidade de uma mistura de dois produtos com as densidades destes conhecidas. A densidade da mistura será uma composição das densidades que se encontram entre os dois produtos envolvidos. A Figura apresenta a densidade $\rho(\alpha, \beta)$ que é uma composição das proporções das densidades que se encontra entre a densidade da gasolina (ρ_{GLN}) e a do GLP (ρ_{GLP}).

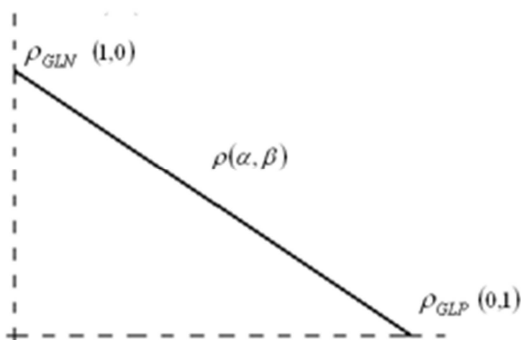


Figura 43 – Composição das densidades
Fonte: O Autor (2013).

Obtendo o percentual GLP (β)

Densidade	Percentual de GLP em β
ρ_{GLN}	0
ρ	β
ρ_{GLP}	1

$$\beta = \frac{\rho - \rho_{GLN}}{\rho_{GLP} - \rho_{GLN}} \quad (26)$$

Obtendo o percentual de Gasolina (α)

Densidade	Percentual de Gasolina em α
ρ_{GLN}	1
ρ	α
ρ_{GLP}	0

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_{GLP}}{\rho_{GLN} - \rho_{GLP}} \quad (27)$$

Considerando que num pequeno intervalo t tem-se uma linearização da curva de densidade, então a densidade ρ é dada pela média das densidades inicial e final:

$$\rho = \frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2} \quad (28)$$

Para o cálculo do volume de GLP será considerada a região de corte, onde se tem, conforme já dito anteriormente, uma mistura de gasolina/GLP logo após a região da gasolina pura.

O volume de GLP e de gasolina no determinado ponto é dado, respectivamente por:

$$V_{GLPi} = \beta \cdot V_i \quad (29)$$

$$V_{GLNi} = \alpha \cdot V_i \quad (30)$$

O volume V_i , é obtido em função da vazão em um determinado espaço de tempo:

$$V_i = Q \cdot \Delta t_i \quad (31)$$

Substituindo a equação (31) em (29), e considerando as equações (26) e (28), tem-se:

$$V_{GLP_i} = \beta \cdot Q \cdot \Delta t_i = \left(\frac{\rho_i + \rho_{i-1} - \rho_{GLN}}{2} \right) \cdot \frac{Q \cdot \Delta t_i}{\rho_{GLP} - \rho_{GLN}} \quad (32)$$

$$V_{GLP} = \frac{Q}{\rho_{GLP} - \rho_{GLN}} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_i + \rho_{i-1} - \rho_{GLN}}{2} \right) \cdot \Delta t_i \quad (33)$$

Do mesmo modo para a gasolina, substituindo a equação (31) em (30), e considerando as equações (27) e (28), tem-se:

$$V_{GLN_i} = \alpha \cdot Q \cdot \Delta t_i = \left(\frac{\rho_i + \rho_{i-1} - \rho_{GLP}}{2} \right) \cdot \frac{Q \cdot \Delta t_i}{\rho_{GLN} - \rho_{GLP}} \quad (34)$$

$$V_{GLN} = \frac{Q}{\rho_{GLN} - \rho_{GLP}} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_i + \rho_{i-1} - \rho_{GLP}}{2} \right) \cdot \Delta t_i \quad (35)$$

As equações (33) e (35) foram utilizadas para determinar o volume de GLP e de gasolina, respectivamente, na região de corte.

6.2 Simulações em operações no ORSUB

Neste trabalho foram analisadas 3 operações reais de envio de bateladas Gasolina/GLP no ORSUB. Para a diluição dos produtos foi considerada somente o volume da batelada.

6.2.1

Operação 1 Recebimento da Batelada Gasolina/GLP no Terminal de Jequié

Na Tabela 18 é apresentada a composição do GLP, e na Tabela 19 o perfil da destilação da gasolina nesta operação de envio destes produtos através do ORSUB.

Tabela 18 – Composição do GLP na operação 1

Composição do GLP	
Etano	0,04
Etano	0,20
Propeno	17,87
Propano	26,50
Isobutano	16,92
Isobuteno	11,02
Buteno-1	7,77
Butadieno-1,3	0,34
N-butano	7,93
Buteno-2-trans	6,83
Buteno-2-cis	4,53
Isopentano	0,05
Densidade (kg/m ³)	0,557

Fonte: O Autor (2013).

Tabela 19 – Perfil de destilação da gasolina na operação 1

Percentual Volumétrico Evaporado da Gasolina	
PIE	36,2
10%	52,3
50%	97,4
90%	169,3
PFE	206,0
Densidade	0,7335

Fonte: O Autor (2013).

A vazão média de bombeio durante a passagem da interface no terminal de Jequié foi de 98,5 m³/h. Na Tabela são apresentados os volumes das bateladas de gasolina e do GLP em questão.

Tabela 20 – Volume da Batelada (m³)

Volume da Batelada (m ³)	
Gasolina	2.000
GLP	1.800

Fonte: O Autor (2013).

A Figura 44 apresenta o perfil da densidade medida na entrada do terminal de Jequié durante a operação de envio de produto pelo ORSUB. Inicia-se com a densidade do primeiro produto (gasolina), vai decrescendo na região de corte, até se estabilizar na densidade do produto final (GLP).

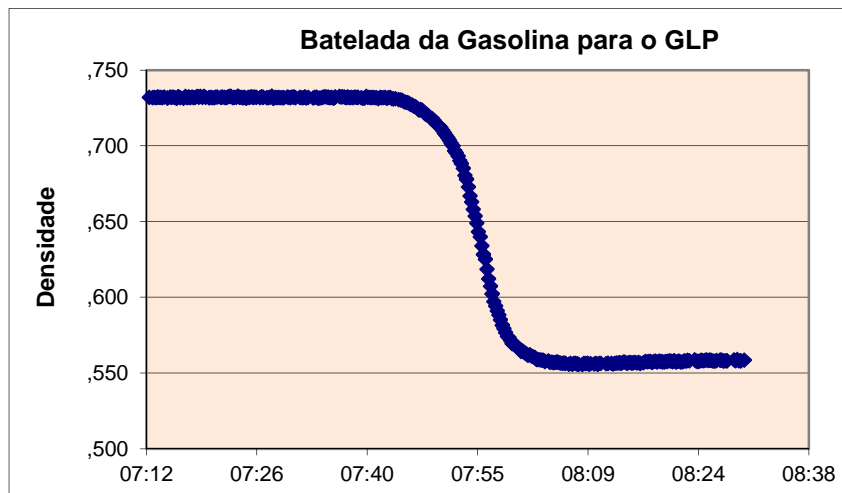


Figura 44 – Perfil da curva de densidade da batelada gasolina/GLP na operação 1
Fonte: O Autor (2013).

A Figura 45 apresenta os cortes inicial e final da interface durante o bombeio da batelada gasolina/GLP realizada durante a operação 1. Todo produto antes da primeira linha (corte) foi enviado para a armazenagem como gasolina, e todo produto após a segunda linha (segundo corte), foi enviado para as esferas de GLP.

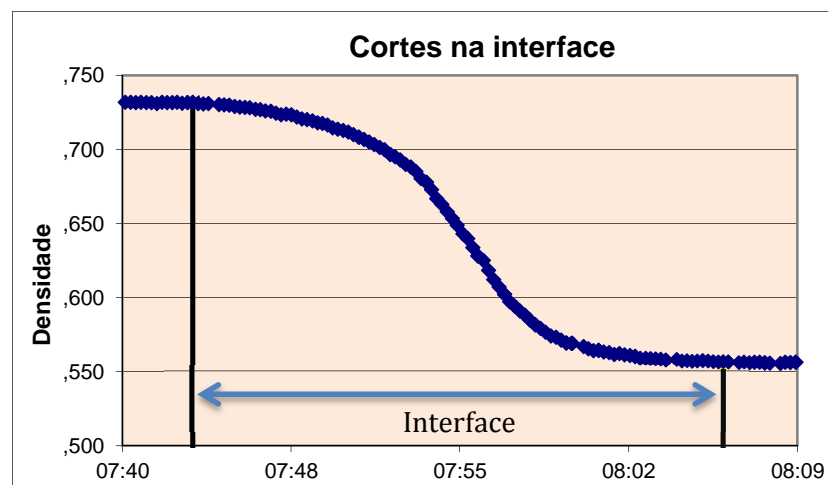


Figura 45 – Região da interface da operação 1
Fonte: O Autor (2013).

Tempo	Densidade Observada	Densidade inicial ρ_{i-1}	Densidade final ρ_i	Intervalo (s) Δt_i	Volume de GLP Acumulado	Volume de Gasolina Acumulado	Volume do intervalo Acumulado	% Volume GLP Acumulado
07:57:58	0,5883	0,5911	0,5883	13,00	5,21228	16,53216	21,74444	23,97%
07:58:11	0,5851	0,5883	0,5851	13,00	5,49663	16,59087	22,08750	24,89%
07:58:25	0,5817	0,5851	0,5817	14,00	5,80980	16,64714	22,45694	25,87%
07:58:38	0,5794	0,5817	0,5794	13,00	6,10618	16,69382	22,80000	26,78%
07:58:51	0,5768	0,5794	0,5768	13,00	6,40736	16,73570	23,14306	27,69%
07:59:05	0,5742	0,5768	0,5742	14,00	6,73718	16,77532	23,51250	28,65%
07:59:18	0,5733	0,5742	0,5733	13,00	7,04687	16,80868	23,85556	29,54%
07:59:31	0,5714	0,5733	0,5714	13,00	7,35930	16,83931	24,19861	30,41%
07:59:44	0,5695	0,5714	0,5695	13,00	7,67545	16,86622	24,54167	31,28%
07:59:57	0,5692	0,5695	0,5692	13,00	7,99375	16,89097	24,88472	32,12%
08:00:00	0,5692	0,5692	0,5692	3,00	8,06727	16,89662	24,96389	32,32%
08:00:28	0,5670	0,5692	0,5670	28,00	8,75811	16,94467	25,70278	34,07%
08:00:41	0,5656	0,5670	0,5656	13,00	9,08238	16,96346	26,04583	34,87%
08:00:54	0,5642	0,5656	0,5642	13,00	9,40939	16,97950	26,38889	35,66%
08:01:07	0,5645	0,5642	0,5645	13,00	9,73747	16,99447	26,73194	36,43%
08:01:20	0,5634	0,5645	0,5634	13,00	10,06634	17,00866	27,07500	37,18%
08:01:34	0,5629	0,5634	0,5629	14,00	10,42219	17,02226	27,44444	37,98%
08:01:47	0,5617	0,5629	0,5617	13,00	10,75429	17,03321	27,78750	38,70%
08:02:00	0,5623	0,5617	0,5623	13,00	11,08697	17,04359	28,13056	39,41%
08:02:13	0,5614	0,5623	0,5614	13,00	11,41995	17,05367	28,47361	40,11%
08:02:27	0,5609	0,5614	0,5609	14,00	11,78001	17,06304	28,84306	40,84%
08:02:40	0,5603	0,5609	0,5603	13,00	12,11544	17,07068	29,18611	41,51%
08:02:53	0,5590	0,5603	0,5590	13,00	12,45272	17,07645	29,52917	42,17%
08:03:07	0,5591	0,5590	0,5591	14,00	12,81721	17,08140	29,89861	42,87%
08:03:20	0,5587	0,5591	0,5587	13,00	13,15596	17,08571	30,24167	43,50%
08:03:33	0,5586	0,5587	0,5586	13,00	13,49520	17,08952	30,58472	44,12%
08:03:46	0,5585	0,5586	0,5585	13,00	13,83463	17,09314	30,92778	44,73%
08:03:59	0,5578	0,5585	0,5578	13,00	14,17485	17,09598	31,27083	45,33%
08:04:27	0,5581	0,5578	0,5581	28,00	14,90847	17,10125	32,00972	46,57%
08:04:40	0,5570	0,5581	0,5570	13,00	15,24986	17,10291	32,35278	47,14%
08:04:53	0,5574	0,5570	0,5574	13,00	15,59194	17,10389	32,69583	47,69%
08:05:06	0,5569	0,5574	0,5569	13,00	15,93412	17,10477	33,03889	48,23%
08:05:19	0,5571	0,5569	0,5571	13,00	16,27659	17,10536	33,38194	48,76%
08:05:33	0,5574	0,5571	0,5574	14,00	16,64487	17,10652	33,75139	49,32%
08:05:47	0,5570	0,5574	0,5570	14,00	17,01326	17,10757	34,12083	49,86%
08:06:00	0,5567	0,5570	0,5567	13,00	17,35602	17,10787	34,46389	50,36%
08:06:13	0,5565	0,5567	0,5565	13,00	17,69927	17,10767	34,80694	50,85%
08:06:26	0,5567	0,5565	0,5567	13,00	18,04253	17,10747	35,15000	51,33%

Fonte: O Autor (2013).

Como mostrado na Tabela 21, o corte inicial da interface, isto é, o momento em que o produto deixa de ir para o parque de armazenamento de gasolina e começa a ser transferido para o vaso do sistema de tratamento de interface, foi feito às 07:49:46 (destacado na tabela). Neste ponto tem-se na mistura gasolina/GLP um volume percentual de GLP igual a 3,64%.

O corte final da interface, isto é, o momento em que o produto deixa de ir para o vaso de tratamento e começa a ser transferido para as esferas de GLP, foi feito às 08:06:26 (destacado na tabela 21).

Para determinar qual o volume de GLP que a gasolina poderia absorver sem sair de sua especificação ANP, foi utilizado o software Petrox juntamente com o ConBate. A Figura 46 apresenta a curva de destilação da gasolina alimentada no PETROX, bem como a Figura 47 apresenta os componentes característicos do GLP, também alimentados no Petrox.

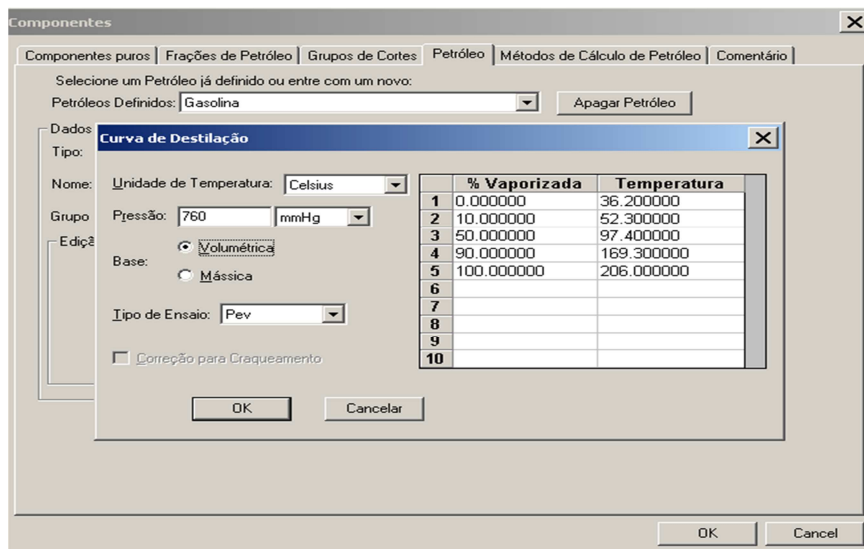


Figura 46 – Curva de destilação da gasolina no Petrox
Fonte: O Autor (2013).

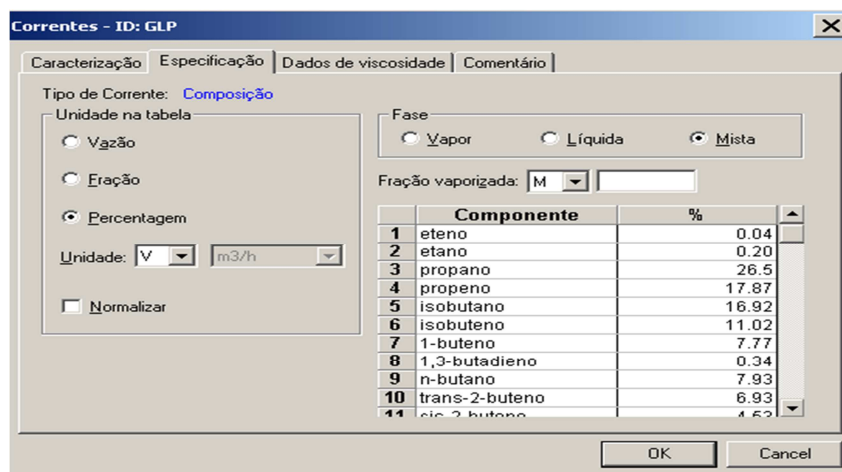


Figura 47 – Composição do GLP alimentada no Petrox
Fonte: O Autor (2013).

Nesta simulação foram utilizados os dados dos tamanhos das bateladas de gasolina e GLP envolvidos na operação de envio através do ORSUB.

Abaixo temos o diagrama da simulação (Figura 48). Para comparar as porcentagens de GLP na mistura, foram colocados divisores (DIV1 e DIV2), que são usados para decompor a quantidade da corrente de entrada em um número qualquer de correntes de saída.

Assim, a mistura das correntes GLP % e GAS% foram misturadas no MIST, resultando numa corrente de saída MIX1. Essa corrente de saída MIX1 foi misturada com a corrente GAST, que representa o volume total da batelada, no módulo misturador MIX, originando uma corrente de saída MIX2 (Figura 48).

Assim, a corrente MIX2 corresponde a mistura da gasolina da batelada com as várias porcentagens de GLP na mistura GLP/gasolina.

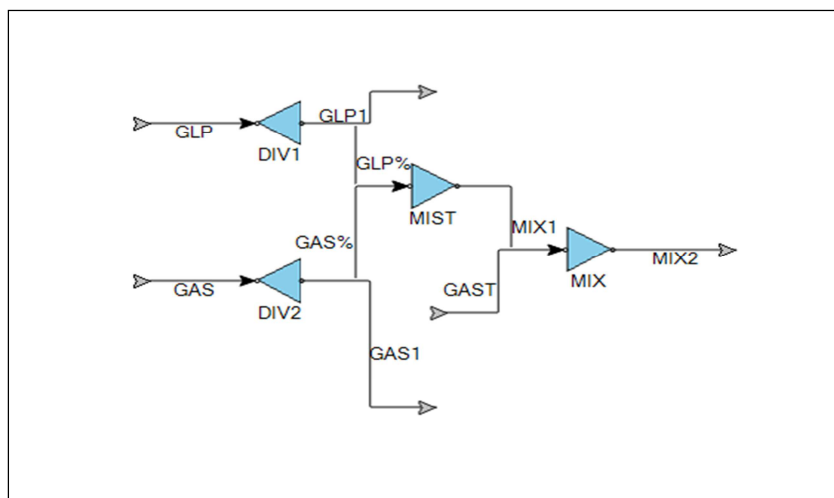


Figura 48 – Esquema de Simulação no Petrox
Fonte: O Autor (2013).

O volume do MIX1 a ser diluído na GAST é variável em função da porcentagem de GLP a ser absorvida na gasolina que será comercializada na base de distribuição. Com o auxílio do software ConBate foi encontrado o volume de MIX1 para as diversas porcentagens de GLP. O primeiro ponto simulado no ConBate é aquele onde os dois produtos estão puros, em última instância isto significa que não há presença de moléculas de GLP na gasolina que irá para a tancagem de gasolina e nem moléculas de gasolina no GLP que irá para as esferas. Considera-se então este ponto como 0 % de concentração admissível de um produto no outro.

Conforme se varia a concentração de corte da interface, varia-se o volume e a composição da mistura gasolina/GLP que permanecem com os produtos puros. Deste modo, quanto maiores forem as concentrações admissíveis de um produto no outro, menores serão os respectivos volumes de interface enviados para o sistema de tratamento. No caso limite de um corte em 50% de concentração, os volumes originais de cada produto são mantidos e nenhum volume terá que ser direcionado ao tanque de interface.

Pela metodologia aplicada neste estudo, este novo volume a ser absorvido (MIX1 que representa o volume da interface que permanece com o produto puro

em função da posição de corte) é introduzido no Petrox para avaliar se este tira ou não o produto puro da especificação vigente.

A Tabela 22 apresenta a percentagem de GLP na mistura MIX2 relacionada com o valor da pressão de vapor da gasolina, calculado pelo PETROX, juntamente com o ConBate. A especificação atual para a pressão de vapor da gasolina é de 62,0 kPa.

Tabela 22 – Resultados do Petrox e do ConBate

Composição de GLP em MIX2	0%	10%	15%	20%	25%	28%	30%	40%
Volume da interface (m ³)	61,9	44,10	42,32	39,86	38,72	35,08	33,50	31,64
Volume de gasolina/GLP absorvido pela gasolina “pura” (m ³)	0	17,80	19,58	22,04	23,18	26,82	28,40	30,26
Pressão de Vapor da Gasolina	56,4	57,72	58,83	60,17	61,38	61,84	62,35	65,03

Fonte: O Autor (2013).

Nesta operação, segundo a simulação realizada no PETROX e no ConBate, a percentagem de GLP admissível no volume da interface que permanece com o produto puro seria de 28%. Como já dito anteriormente, o corte inicial da interface se deu com a 3,64% de GLP na mistura. Isto significa que ainda existia uma considerável folga na absorção da mistura gasolina/GLP na gasolina.

Analisando agora a segunda região corte da interface, isto é, a região após a interface, onde se inicia no ponto em que o operador do ORSUB desvia o produto do sistema de tratamento de interface para as esferas de GLP. A Tabela 21 indica que às 08:06:26 (destacado na Tabela) houve o corte onde se inicia o movimento de transferência do produto para as esferas de GLP. Nesta região deve-se analisar o quanto de gasolina pode ser absorvida pelo GLP puro para que este não saia da sua especificação ANP (máximo 2,2°C).

Foi utilizada no Petrox a mesma lógica da análise anterior, entretanto, foram feitas algumas alterações. Ao invés da GAST (volume da batelada de gasolina) foi criado o GLPT (volume da batelada de GLP). Também inverteu-se as variações nas porcentagens. No caso anterior foi variado a porcentagem de GLP na mistura, aqui foi variado a porcentagem de gasolina na mistura a ser simulada com o GLPT.

Na Tabela 23 são apresentados os resultados desta simulação.

Tabela 23 – Resultados do Petrox e do ConBate

Composição de Gasolina em MIX3	0%	2%	5%	7%	8%	10%
Volume da interface (m ³)	61,9	48,29	45,21	42,07	40,24	37,62
Volume de gasolina/GLP absorvido pelo GLP "pur0" (m ³)	0	13,61	16,69	19,83	21,66	24,28
Intemperismo do GLP	-1,9	-0,8	1,1	1,9	2,4	4,0

Fonte: O Autor (2013).

Nesta operação, segundo a simulação realizada no PETROX, e no ConBate a percentagem de gasolina admissível no volume da interface que permanece no GLP seria de 7% (Tabela 23)

Deste modo, com base nas simulações feitas nas duas pontas da interface, o corte ótimo seria nos pontos onde se tem 28% de GLP na mistura gasolina/GLP absorvida pela gasolina pura, bem como no ponto onde se tem 7% de gasolina na mistura gasolina/GLP absorvido pelo GLP puro.

Com base nos cortes reais, isto é, os cortes realizados pelo operador do sistema ORSUB, e nos cortes ótimos, isto é, os cortes determinados pelo Petrox com base nas propriedades dos dois produtos, foi confeccionada a Tabela 24.

Tabela 24 – Estimativa do volume de interface gerado pelo ConBate

		Corte Real	Corte Ótimo
Concentração Admissível do GLP na gasolina	0%	3,64%	28%
Concentração Admissível da gasolina no GLP	0%	0,8%	7%
Volume de interface, m ³	61,9	30,64	15,08

Fonte: O Autor (2013).

Se a concentração admissível de um produto no outro e vice-versa fosse igual a zero, o tamanho da interface seria de 61.9 m³ (Tabela 24). Conforme também apresentado pelo ConBate, a diferença entre o corte real e o corte ótimo foi de 15,56 m³. Isto representa uma redução de 49,22% do volume da interface.

6.2.2

Operação 2 – Recebimento da Batelada Gasolina/GLP no Terminal de Jequié

Para a movimentação de derivados no ORSUB da operação 2 foi seguido os mesmos procedimentos utilizados na operação 1. O perfil do GLP e da gasolina estão apresentados nas Tabela 25 e 26, respectivamente.

Tabela 25 – Composição do GLP na operação 2

Composição do GLP	
Eteno	0,01
Etano	1,04
Propeno	0,58
Propano	25,78
Isobutano	20,22
Isobuteno	13,11
Buteno-1	8,98
Butadieno-1,3	0,70
N-butano	11,60
Buteno-2-trans	10,21
Buteno-2-cis	7,51
Isopentano	0,26
Densidade (kg/m ³)	0,563

Fonte: O Autor (2013).

Tabela 26 – Perfil da gasolina na operação 2

Percentual Volumétrico Evaporado da Gasolina	
PIE	37,2
10%	54,8
50%	98,8
90%	173,4
PFE	203,2
Densidade	0,7429

Fonte: O Autor (2013).

A vazão média de bombeio durante a passagem da região de interface no terminal de Jequié foi de 105 m³/h. Na Tabela 27 é apresentado o volume da batelada de gasolina e do GLP em questão.

Tabela 27 – Volume da batelada da operação 2

Volume da Batelada (m ³)	
Gasolina	2.300
GLP	2.000

Fonte: O Autor (2013).

A Figura 49 apresenta o perfil da curva de densidade da presente operação.

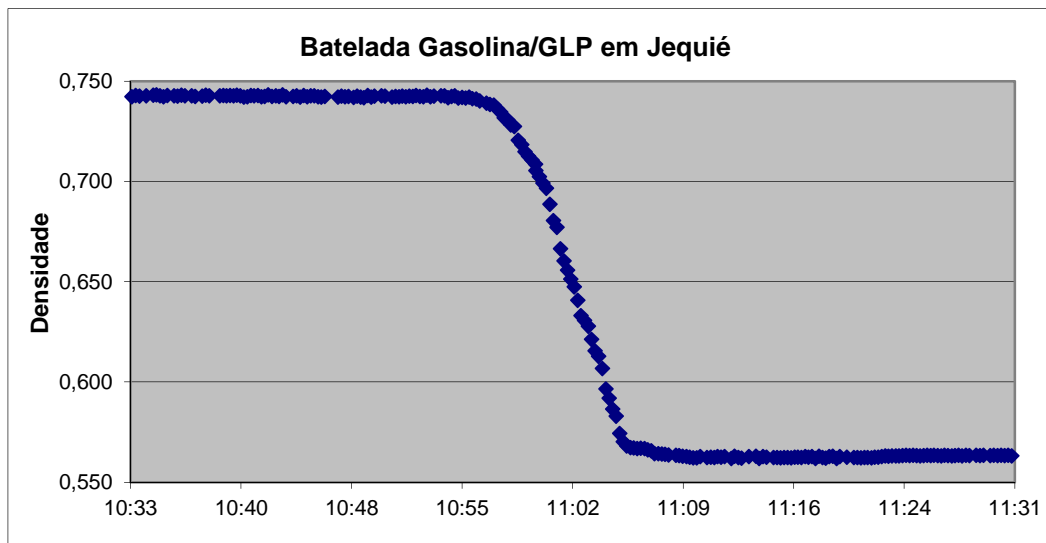


Figura 49 – Perfil da curva de densidade da operação 2
Fonte: O Autor (2013).

A Figura 50 apresenta os cortes inicial e final da interface durante o bombeio da batelada gasolina/GLP realizada durante a operação 2. Todo produto antes da primeira linha (corte) foi enviado para a armazenagem como gasolina, e todo produto após a segunda linha (segundo corte), foi enviado para as esferas de GLP.

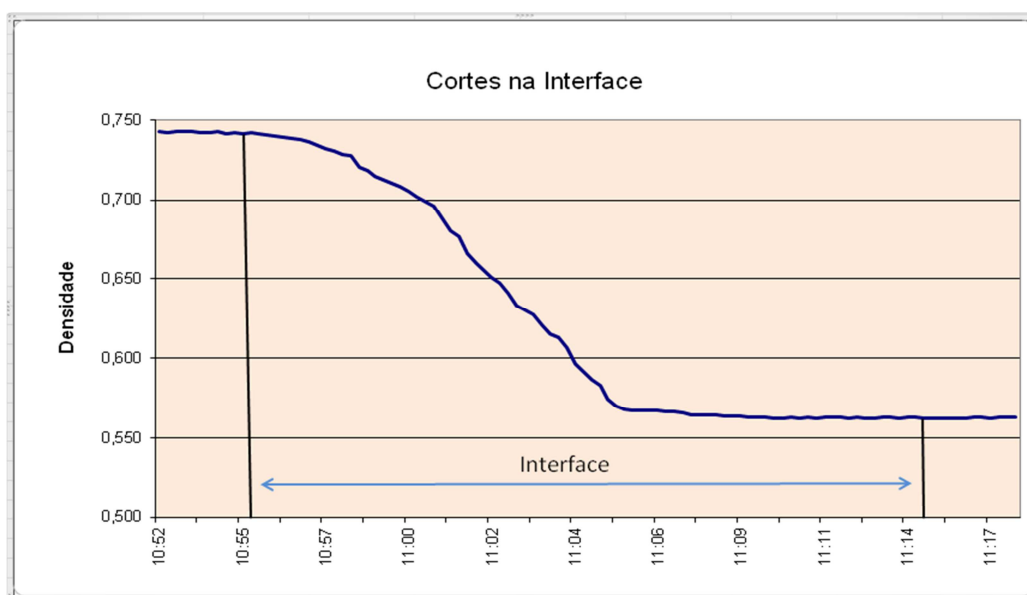


Figura 50 – Perfil da interface na operação 2
Fonte: O Autor (2013).

Ainda na Figura 50, observa-se que o corte final da interface foi bem depois do início da estabilização da densidade do GLP. Pode-se afirmar que houve perda de GLP puro para a interface.

Na Tabela 28, obtida a partir dos dados das densidades medida na chegada em Jequié na operação 2, são apresentados os valores estimados do percentual de GLP ao longo da região da interface.

Tabela 28 – Estimativa da porcentagem de GLP nos diversos pontos da região de interface

Tempo	Densidade Observada	Densidade inicial	Densidade corte	Intervalo (s)	Volume de GLP Acumulado	Volume de Gasolina Acumulado	Volume do intervalo Acumulado	% Volume de GLP Acumulado
10:52:55	0,7430							
10:53:09	0,7422	0,7428	0,7422	14	0,0006	0,3689	0,3694	0,15%
10:53:22	0,7425	0,7422	0,7425	13	0,0014	0,7111	0,7125	0,20%
10:53:50	0,7427	0,7425	0,7427	28	0,0022	1,4492	1,4514	0,15%
10:54:04	0,7426	0,7427	0,7426	14	0,0024	1,8184	1,8208	0,13%
10:54:18	0,7418	0,7426	0,7418	14	0,0037	2,1866	2,1903	0,17%
10:54:31	0,7424	0,7418	0,7424	13	0,0051	2,5282	2,5333	0,20%
10:54:44	0,7427	0,7424	0,7427	13	0,0056	2,8708	2,8764	0,19%
10:54:58	0,7416	0,7427	0,7416	14	0,0068	3,2390	3,2458	0,21%
10:55:12	0,7419	0,7416	0,7419	14	0,0090	3,6063	3,6153	0,25%
10:55:26	0,7415	0,7419	0,7415	14	0,0112	3,9735	3,9847	0,28%
10:55:40	0,7420	0,7415	0,7420	14	0,0134	4,3408	4,3542	0,31%
10:55:53	0,7413	0,7420	0,7413	13	0,0156	4,6816	4,6972	0,33%
10:56:07	0,7410	0,7413	0,7410	14	0,0190	5,0476	5,0667	0,38%
10:56:21	0,7402	0,7410	0,7402	14	0,0235	5,4126	5,4361	0,43%
10:56:48	0,7390	0,7402	0,7390	27	0,0364	6,1122	6,1486	0,59%
10:57:02	0,7383	0,7390	0,7383	14	0,0450	6,4731	6,5181	0,69%
10:57:16	0,7381	0,7383	0,7381	14	0,0544	6,8331	6,8875	0,79%
10:57:30	0,7361	0,7381	0,7361	14	0,0661	7,1909	7,2569	0,91%
10:57:43	0,7346	0,7361	0,7346	13	0,0803	7,5197	7,6000	1,06%
10:57:57	0,7317	0,7346	0,7317	14	0,1002	7,8693	7,9694	1,26%
10:58:10	0,7308	0,7317	0,7308	13	0,1222	8,1903	8,3125	1,47%
10:58:23	0,7282	0,7308	0,7282	13	0,1477	8,5079	8,6556	1,71%
10:58:37	0,7274	0,7282	0,7274	14	0,1785	8,8465	9,0250	1,98%
10:58:51	0,7204	0,7274	0,7204	14	0,2173	9,1771	9,3944	2,31%
10:59:05	0,7183	0,7204	0,7183	14	0,2656	9,4983	9,7639	2,72%
10:59:18	0,7148	0,7183	0,7148	13	0,3158	9,7911	10,1069	3,12%
10:59:31	0,7125	0,7148	0,7125	13	0,3716	10,0784	10,4500	3,56%
10:59:45	0,7106	0,7125	0,7106	14	0,4359	10,3835	10,8194	4,03%
10:59:59	0,7085	0,7106	0,7085	14	0,5044	10,6845	11,1889	4,51%
11:00:00	0,7053	0,7085	0,7053	1	0,5097	10,7056	11,2153	4,54%
11:00:14	0,7023	0,7053	0,7023	14	0,5900	10,9947	11,5847	5,09%
11:00:28	0,6991	0,7023	0,6991	14	0,6766	11,2775	11,9542	5,66%
11:00:42	0,6965	0,6991	0,6965	14	0,7692	11,5544	12,3236	6,24%
11:00:55	0,6886	0,6965	0,6886	13	0,8652	11,8015	12,6667	6,83%
11:01:09	0,6804	0,6886	0,6804	14	0,9852	12,0509	13,0361	7,56%
11:01:23	0,6770	0,6804	0,6770	14	1,1171	12,2885	13,4056	8,33%
11:01:36	0,6664	0,6770	0,6664	13	1,2529	12,4957	13,7486	9,11%
11:01:50	0,6603	0,6664	0,6603	14	1,4165	12,7016	14,1181	10,03%
11:02:04	0,6557	0,6603	0,6557	14	1,5910	12,8965	14,4875	10,98%
11:02:17	0,6513	0,6557	0,6513	13	1,7618	13,0688	14,8306	11,88%
11:02:30	0,6474	0,6513	0,6474	13	1,9404	13,2332	15,1736	12,79%
11:02:44	0,6407	0,6474	0,6407	14	2,1438	13,3993	15,5431	13,79%
11:02:57	0,6331	0,6407	0,6331	13	2,3462	13,5399	15,8861	14,77%
11:03:11	0,6306	0,6331	0,6306	14	2,5746	13,6809	16,2556	15,84%
11:03:25	0,6277	0,6306	0,6277	14	2,8085	13,8165	16,6250	16,89%
11:03:38	0,6212	0,6277	0,6212	13	3,0347	13,9333	16,9681	17,88%
11:03:52	0,6155	0,6212	0,6155	14	3,2909	14,0466	17,3375	18,98%
11:04:05	0,6128	0,6155	0,6128	13	3,5368	14,1438	17,6806	20,00%
11:04:20	0,6066	0,6128	0,6066	15	3,8303	14,2461	18,0764	21,19%
11:04:34	0,5965	0,6066	0,5965	14	4,1210	14,3248	18,4458	22,34%
11:04:47	0,5919	0,5965	0,5919	13	4,4050	14,3839	18,7889	23,44%
11:05:01	0,5864	0,5919	0,5864	14	4,7212	14,4371	19,1583	24,64%
11:05:14	0,5829	0,5864	0,5829	13	5,0235	14,4779	19,5014	25,76%
11:05:28	0,5743	0,5829	0,5743	14	5,3614	14,5094	19,8708	26,98%

Tempo	Densidade Observada	Densidade inicial	Densidade corte	Intervalo (s)	Volume de GLP Acumulado	Volume de Gasolina Acumulado	Volume do intervalo Acumulado	% Volume de GLP Acumulado
11:05:42	0,5702	0,5743	0,5702	14	5,7125	14,5278	20,2403	28,22%
11:05:56	0,5680	0,5702	0,5680	14	6,0700	14,5397	20,6097	29,45%
11:06:10	0,5673	0,5680	0,5673	14	6,4305	14,5486	20,9792	30,65%
11:06:23	0,5671	0,5673	0,5671	13	6,7662	14,5561	21,3222	31,73%
11:06:37	0,5669	0,5671	0,5669	14	7,1280	14,5636	21,6917	32,86%
11:06:51	0,5669	0,5669	0,5669	14	7,4901	14,5710	22,0611	33,95%
11:07:05	0,5668	0,5669	0,5668	14	7,8523	14,5783	22,4306	35,01%
11:07:18	0,5661	0,5668	0,5661	13	8,1893	14,5843	22,7736	35,96%
11:07:32	0,5657	0,5661	0,5657	14	8,5534	14,5897	23,1431	36,96%
11:07:45	0,5642	0,5657	0,5642	13	8,8933	14,5929	23,4861	37,87%
11:07:59	0,5643	0,5642	0,5643	14	9,2608	14,5948	23,8556	38,82%
11:08:13	0,5641	0,5643	0,5641	14	9,6284	14,5966	24,2250	39,75%
11:08:26	0,5639	0,5641	0,5639	13	9,9700	14,5981	24,5681	40,58%
11:08:40	0,5635	0,5639	0,5635	14	10,3385	14,5990	24,9375	41,46%
11:09:08	0,5634	0,5635	0,5634	28	11,0768	14,5996	25,6764	43,14%
11:09:21	0,5633	0,5634	0,5633	13	11,4197	14,5997	26,0194	43,89%
11:09:35	0,5630	0,5633	0,5630	14	11,7895	14,5994	26,3889	44,68%
11:09:49	0,5627	0,5630	0,5627	14	12,1598	14,5985	26,7583	45,44%
11:10:02	0,5625	0,5627	0,5625	13	12,5042	14,5972	27,1014	46,14%
11:10:16	0,5622	0,5625	0,5622	14	12,8756	14,5953	27,4708	46,87%
11:10:29	0,5621	0,5622	0,5621	13	13,2208	14,5931	27,8139	47,53%
11:10:43	0,5628	0,5621	0,5628	14	13,5920	14,5913	28,1833	48,23%
11:11:10	0,5623	0,5628	0,5623	27	14,3076	14,5882	28,8958	49,51%
11:11:24	0,5625	0,5623	0,5625	14	14,6789	14,5863	29,2653	50,16%
11:11:38	0,5624	0,5625	0,5624	14	15,0501	14,5846	29,6347	50,79%
11:11:51	0,5628	0,5624	0,5628	13	15,3946	14,5832	29,9778	51,35%
11:12:05	0,5625	0,5628	0,5625	14	15,7654	14,5819	30,3472	51,95%
11:12:18	0,5629	0,5625	0,5629	13	16,1096	14,5807	30,6903	52,49%
11:12:45	0,5619	0,5629	0,5619	27	16,8257	14,5771	31,4028	53,58%
11:12:57	0,5630	0,5619	0,5630	12	17,1438	14,5756	31,7194	54,05%
11:13:12	0,5624	0,5630	0,5624	15	17,5410	14,5743	32,1153	54,62%
11:13:25	0,5620	0,5624	0,5620	13	17,8861	14,5722	32,4583	55,10%
11:13:53	0,5629	0,5620	0,5629	28	18,6285	14,5687	33,1972	56,11%
11:14:21	0,5630	0,5629	0,5630	28	19,3689	14,5673	33,9361	57,07%
11:14:34	0,5618	0,5630	0,5618	13	19,7136	14,5655	34,2792	57,51%
11:14:48	0,5628	0,5618	0,5628	14	20,0852	14,5634	34,6486	57,97%
11:15:02	0,5625	0,5628	0,5625	14	20,4560	14,5620	35,0181	58,42%

Fonte: O Autor (2013).

Observa-se na Tabela 28 que o corte inicial da interface foi feito às 10:57:43 (destacado na tabela). Neste ponto tem-se na mistura gasolina/GLP um volume acumulado percentual de GLP igual a 1,06%.

O corte final da interface foi feito às 11:15:02 (destacado na Tabela). Entretanto, é mostrado na Tabela que a densidade do GLP puro foi alcançado às 11:09:35, isto significa que o corte final da interface poderia ter sido feito pelo menos 5 minutos antes.

A Figura 51 apresenta a curva de destilação da gasolina alimentada no PETROX, assim como a Figura 52 apresenta os componentes característicos do GLP, também alimentados no Petrox.

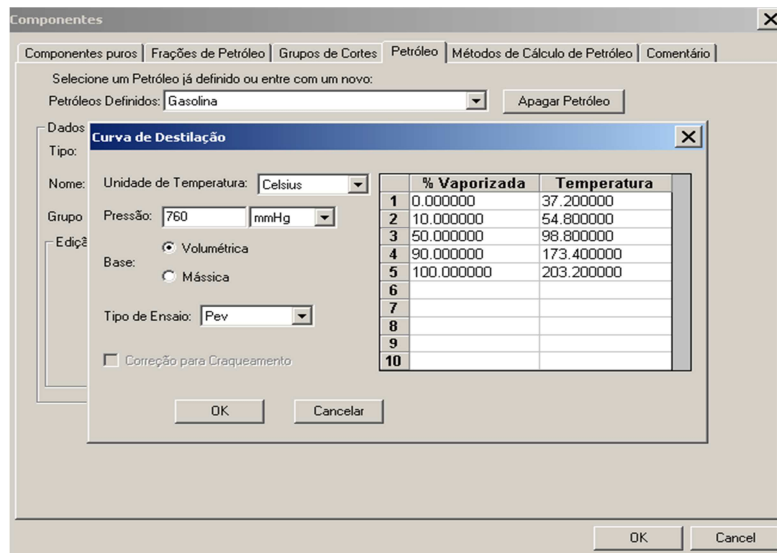


Figura 51 – Curva de destilação da gasolina alimentada no Petrox
Fonte: O Autor (2013).

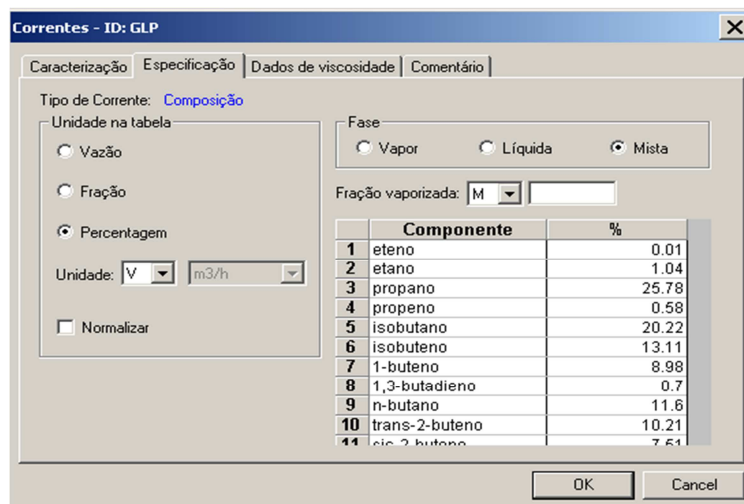


Figura 52 – Composição do GLP alimentada no Petrox
Fonte: O Autor (2013).

A Tabela 29 apresenta a percentagem de GLP na mistura relacionada com o valor da pressão de vapor da gasolina, calculado pelo PETROX em conjunto com o ConBate.

Tabela 29 – Resultados do Petrox e ConBate

Composição de GLP em MIX2	0%	10%	15%	20%	25%	30%	32%	35%
Volume da interface (m ³)	63,61	43,94	42,16	40,69	39,56	38,42	38,10	37,45
Volume de gasolina/GLP absorvido pela gasolina "pura" (m ³)	0	19,67	22,45	24,92	2605	27,19	27,81	28,16
Pressão de Vapor da Gasolina	55,9	57,42	58,50	59,88	60,62	61,41	61,95	62,84

Fonte: O Autor (2013).

Nesta operação, segundo a simulação realizada no PETROX e no ConBate, a percentagem de GLP admissível no volume da interface que permanece com a gasolina seria de 32%. Como o corte inicial da interface foi feito com apenas 1,06% de GLP na mistura.

Analisando agora a segunda região corte da interface, isto é, a região após a interface, onde se inicia no ponto em que o operador do ORSUB desvia o produto do sistema de tratamento de interface para as esferas de GLP. A tabela 28 indica que às 11:15:02 (destacado na Tabela) houve o corte onde se inicia o movimento de transferência do produto para as esferas de GLP. Nesta região deve-se analisar o quanto de gasolina pode ser absorvida pelo GLP puro para que este não saía da sua especificação ANP.

Tabela 30 – Resultados do Petrox e do ConBate

Composição de Gasolina em MIX2	0%	2%	5%	8%	10%	12%
Volume da interface (m ³)	63,61	49,14	46,21	44,42	43,61	42,83
Volume de gasolina/GLP absorvido pelo GLP "pur0" (m ³)	0	14,47	17,40	19,19	20,00	20,78
Intemperismo do GLP	-1,7	-1,1	-0,5	0,8	1,4	2,3

Fonte: O Autor (2013).

Nesta operação, segundo a simulação realizada no Petrox e no ConBate, a percentagem de gasolina admissível na composição da mistura seria de 10% (Tabela 30). Na operação real do ORSUB como já dito anteriormente, o corte foi feito sem nenhuma porcentagem de gasolina na mistura gasolina/GLP que foi deslocada para a esfera de GLP. As simulações demonstram que havia espaço para 10% de gasolina nesta mistura gasolina/GLP.

Deste modo, com base nas simulações feitas nas duas pontas da interface, o corte ótimo seria nos pontos onde se tem 32% de GLP na mistura gasolina/GLP absorvida pela gasolina pura, bem como no ponto onde se tem 10% de gasolina na mistura gasolina/GLP absorvido pelo GLP puro.

Com base nos cortes reais, isto é, os cortes realizados pelo operador do sistema ORSUB, e nos cortes ótimos, isto é, os cortes determinados pelo Petrox com base nas propriedades dos dois produtos, foi confeccionada a Tabela 31.

Tabela 31 – Estimativa do volume de interface gerado pelo ConBate

		Corte Real	Corte Ótimo
Concentração Admissível do GLP na gasolina	0%	1,06%	32%
Concentração Admissível da gasolina no GLP	0%	0.0%	10%
Volume de interface, m ³	63,61	51,24	15,41

Fonte: O Autor (2013).

Conforme é apresentado na Tabela 31, a diferença entre o corte real e o corte ótimo foi de 35,83 m³. Isto representa uma redução de 69,9% do volume da interface nesta operação.

6.2.3

Operação 3 – Recebimento da batelada Gasolina/GLP/Gasolina em Itabuna

Nesta operação é realizado um ciclo completo de bombeio, englobando a transferência de uma batelada de GLP entre duas de Gasolina com a sua chegada no terminal de Itabuna. A sequência de bombeio é Gasolina(1)-GLP-Gasolina(2).

Segue na Tabela 32 a composição do GLP e na Tabela 33, as curvas de destilação das gasolinas utilizadas nesta operação de envio através do ORSUB.

Tabela 32 – Composição do GLP da operação 3

COMPONENTE	GLP
Eteno	0,01
Etano	0,22
Propeno	3,77
Propano	33,49
Isobutano	17,70
Isobuteno	12,34
Buteno-1	8,74
Butadieno-1,3	0,82
N-butano	8,18
Buteno-2-trans	8,66
Buteno-2-cis	5,91
Isopentano	0,17
Densidade (kg/m3)	0,566

Fonte: O Autor (2013).

Tabela 33 – Perfil das curvas de destilação das gasolina (1) e (2)

Percentual Volumétrico Evaporado	Gasolina 1	Gasolina 2
PIE	35,4	34,7
10%	52,0	51,6
50%	99,7	92,1
90%	167,3	153,7
PFE	198,1	191,4
Densidade	0,7344	0,7286

Fonte: O Autor (2013).

A vazão média de bombeio desta operação de recebimento no terminal de Itabuna foi de 104 m³/h.

A Tabela 34 apresenta o volume das três bateladas envolvidas na operação.

Tabela 34 – Volume das bateladas de GLP e das gasolinas na operação 3

Volume da Batelada (m3)	
Gasolina (1)	2.300
GLP	1.600
Gasolina (2)	1.800

Fonte: O Autor (2013).

A Figura 53 apresenta a curva de densidade da batelada Gasolina/GLP/Gasolina durante o bombeio.

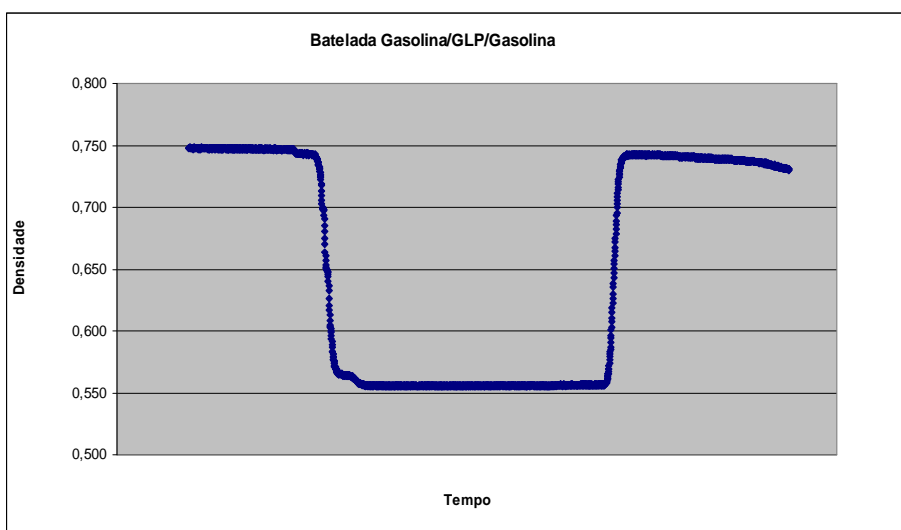


Figura 53 – Perfil da curva de densidade da operação 3
Fonte: O Autor (2013).

Primeiramente será apresentado os resultados da simulação da batelada gasolina (1) com GLP. A Figura 54 apresenta o momento dos cortes de interface entre a gasolina (1) e o GLP realizado pelo operador do sistema.

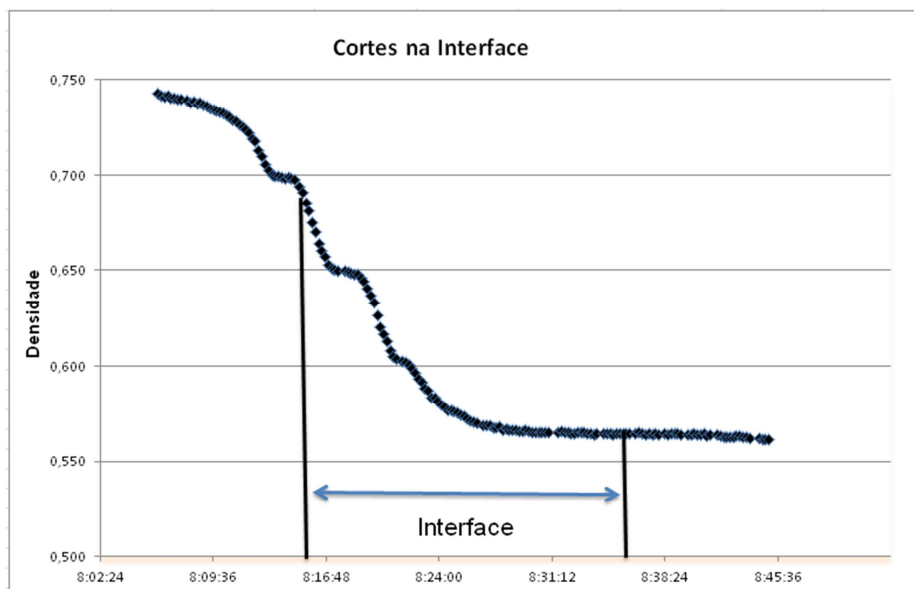


Figura 54 – Cortes de interface entre a gasolina (1) e o GLP
Fonte: O Autor (2013).

Na Tabela 35, considerando os dados das densidades medida na chegada em Itabuna na operação 3, são apresentados os valores estimados do percentual de GLP ao longo da região da interface. São apresentados somente a interação gasolina (1) e GLP.

Tabela 35 – Estimativa do percentual de GLP nos diversos pontos da interface

Tempo	Densidade Observada	Densidade inicial	Densidade corte	Intervalo (s)	Volume de GLP Acumulado	Volume de Gasolina Acumulado	Volume do intervalo Acumulado	% Volume de GLP Acumulado
8:10:03	0,7328							
8:10:16	0,7321	0,7328	0,73211	13,00	0,0040	0,3715	0,3756	1,08%
8:10:28	0,7309	0,7321	0,73089	12,00	0,0097	0,7125	0,7222	1,34%
8:10:40	0,7306	0,7309	0,73065	12,00	0,0167	1,0522	1,0689	1,57%
8:10:52	0,7287	0,7306	0,72869	12,00	0,0259	1,3896	1,4156	1,83%
8:11:05	0,7281	0,7287	0,72808	13,00	0,0386	1,7525	1,7911	2,15%
8:11:17	0,7263	0,7281	0,72625	12,00	0,0526	2,0851	2,1378	2,46%
8:11:30	0,7253	0,7263	0,72528	13,00	0,0708	2,4425	2,5133	2,82%
8:11:42	0,7239	0,7253	0,72393	12,00	0,0899	2,7701	2,8600	3,14%
8:11:54	0,7222	0,7239	0,72222	12,00	0,1119	3,0948	3,2067	3,49%
8:12:07	0,7189	0,7222	0,71893	13,00	0,1410	3,4413	3,5822	3,93%
8:12:19	0,7177	0,7189	0,71771	12,00	0,1722	3,7567	3,9289	4,38%
8:12:32	0,7128	0,7177	0,71282	13,00	0,2125	4,0919	4,3044	4,94%
8:12:44	0,7095	0,7128	0,70952	12,00	0,2576	4,3935	4,6511	5,54%
8:12:57	0,7054	0,7095	0,70537	13,00	0,3144	4,7123	5,0267	6,25%
8:13:10	0,7024	0,7054	0,70244	13,00	0,3786	5,0237	5,4022	7,01%
8:13:22	0,6999	0,7024	0,69988	12,00	0,4432	5,3057	5,7489	7,71%
8:13:35	0,6994	0,6999	0,69939	13,00	0,5163	5,6081	6,1244	8,43%
8:13:47	0,6993	0,6994	0,69927	12,00	0,5845	5,8866	6,4711	9,03%
8:14:00	0,6988	0,6993	0,69878	13,00	0,6590	6,1877	6,8467	9,62%

Tempo	Densidade Observada	Densidade inicial	Densidade corte	Intervalo (s)	Volume de GLP Acumulado	Volume de Gasolina Acumulado	Volume do intervalo Acumulado	% Volume de GLP Acumulado
8:28:55	0,5662	0,5663	0,56618	12,00	17,7600	14,9423	32,7022	54,31%
8:29:08	0,5658	0,5662	0,56581	13,00	18,1145	14,9633	33,0778	54,76%
8:29:20	0,5657	0,5658	0,56569	12,00	18,4422	14,9822	33,4244	55,18%
8:29:32	0,5664	0,5657	0,56642	12,00	18,7693	15,0018	33,7711	55,58%
8:29:45	0,5654	0,5664	0,56545	13,00	19,1240	15,0227	34,1467	56,01%
8:29:57	0,5650	0,5654	0,56496	12,00	19,4528	15,0406	34,4933	56,40%
8:30:10	0,5648	0,5650	0,56484	13,00	19,8096	15,0593	34,8689	56,81%
8:30:23	0,5652	0,5648	0,56520	13,00	20,1662	15,0783	35,2444	57,22%
8:30:35	0,5650	0,5652	0,56496	12,00	20,4952	15,0959	35,5911	57,59%
8:30:48	0,5652	0,5650	0,56520	13,00	20,8516	15,1150	35,9667	57,97%
8:31:01	0,5653	0,5652	0,56532	13,00	21,2077	15,1345	36,3422	58,36%
8:31:37	0,5651	0,5653	0,56508	36,00	22,1940	15,1882	37,3822	59,37%
8:31:49	0,5654	0,5651	0,56545	12,00	22,5227	15,2062	37,7289	59,70%
8:32:02	0,5650	0,5654	0,56496	13,00	22,8789	15,2256	38,1044	60,04%
8:32:15	0,5652	0,5650	0,56520	13,00	23,2353	15,2447	38,4800	60,38%
8:32:27	0,5647	0,5652	0,56471	12,00	23,5646	15,2621	38,8267	60,69%
8:32:39	0,5646	0,5647	0,56459	12,00	23,8944	15,2789	39,1733	61,00%
8:32:52	0,5650	0,5646	0,56496	13,00	24,2515	15,2974	39,5489	61,32%
8:33:04	0,5648	0,5650	0,56484	12,00	24,5809	15,3146	39,8956	61,61%
8:33:17	0,5650	0,5648	0,56496	13,00	24,9377	15,3334	40,2711	61,92%
8:33:29	0,5643	0,5650	0,56435	12,00	25,2676	15,3502	40,6178	62,21%
8:33:42	0,5647	0,5643	0,56471	13,00	25,6252	15,3681	40,9933	62,51%
8:33:54	0,5639	0,5647	0,56386	12,00	25,9558	15,3842	41,3400	62,79%
8:34:06	0,5643	0,5639	0,56435	12,00	26,2867	15,4000	41,6867	63,06%
8:34:31	0,5647	0,5643	0,56471	25,00	26,9744	15,4345	42,4089	63,61%
8:34:44	0,5643	0,5647	0,56435	13,00	27,3320	15,4525	42,7844	63,88%
8:34:56	0,5646	0,5643	0,56459	12,00	27,6622	15,4689	43,1311	64,14%
8:35:09	0,5637	0,5646	0,56374	13,00	28,0206	15,4861	43,5067	64,41%
8:35:21	0,5646	0,5637	0,56459	12,00	28,3514	15,5020	43,8533	64,65%

Fonte: O Autor (2013).

Observa-se que o corte inicial da interface foi feito às 08:15:07 (destacado na Tabela 35). Neste ponto tem-se na mistura gasolina/GLP um volume percentual de GLP igual a 12,07%. O corte final da interface foi feito às 08:35:09 (destacado na Tabela 35).

Após as simulações realizadas no Petrox e no ConBate com variadas composições de mistura de GLP na mistura gasolina/GLP a ser incorporada na gasolina (1), chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 – Resultados do Petrox e do ConBate

Composição de GLP em MIX2	0%	10%	15%	20%	25%	26%	27%	30%
Volume da interface (m ³)	68,23	44,10	42,32	40,86	39,73	39,56	39,24	38,59
Volume de gasolina/GLP absorvido pela gasolina "pura" (m ³)	0	24,13	25,91	27,34	28,50	28,67	28,99	29,64
Pressão de Vapor da Gasolina	55,6	57,87	58,93	60,08	61,22	61,71	62,36	63,08

Fonte: O Autor (2013).

Nesta operação, segundo a simulação realizada no PETROX em conjunto com o ConBate, a percentagem de GLP admissível seria de 26%.

Analisando agora a segunda região corte da interface, isto é, a região após a interface, onde se inicia no ponto em que o operador do ORSUB desvia o produto do sistema de tratamento de interface para as esferas de GLP. A Tabela 35 indica que às 08:35:09 (destacado na Tabela) houve o corte onde se inicia o movimento de transferência do produto para as esferas de GLP. Nesta região deve-se analisar o quanto de gasolina pode ser absorvida pelo GLP puro para que este não saia da sua especificação.

Tabela 37 – Resultados do Petrox e do ConBate

Composição de Gasolina em MIX2	0%	2%	5%	7%	8%	10%
Volume da interface (m ³)	68,23	49,45	46,37	45,24	44,59	43,78
Volume de gasolina/GLP absorvido pelo GLP "puro" (m ³)	0	14,47	17,40	19,19	20,00	20,78
Intemperismo do GLP	-1,5	-0,6	0,8	1,7	2,5	3,7

Fonte: O Autor (2013).

Nesta operação, segundo simulações realizadas no PETROX e no ConBate, a percentagem de gasolina admissível na composição da mistura seria de 7% (Tabela 37).

Deste modo, com base nas simulações feitas nas duas pontas da interface, o corte ótimo seria nos pontos onde se tem 26% de GLP na mistura gasolina/GLP absorvida pela gasolina pura, bem como no ponto onde se tem 7% de gasolina na mistura gasolina/GLP absorvido pelo GLP puro.

Com base nos cortes reais, isto é, os cortes realizados pelo operador do sistema ORSUB, e nos cortes ótimos, isto é, os cortes determinados pelo Petrox com base nas propriedades dos dois produtos, foi confeccionada a Tabela 38.

Tabela 38 – Estimativa do volume de interface gerado pelo ConBate

		Corte Real	Corte Ótimo
Concentração Admissível do GLP na gasolina	0%	12,07%	26%
Concentração Admissível da gasolina no GLP	0%	0,4%	7%
Volume de interface, m ³	68,23	27,89	15,57

Fonte: O Autor (2013).

Conforme observa-se na Tabela 38, a diferença entre o corte real e o corte ótimo, foi de 12,32 m³. Isto representa uma redução de 44,2% do volume da interface na operação entre a gasolina (1) e o GLP.

A segunda etapa desta operação foi o corte de interface entre o GLP e a gasolina (2). A Figura 55 apresenta o momento dos cortes de interface entre a gasolina (2) e o GLP realizado pelo operador do sistema.

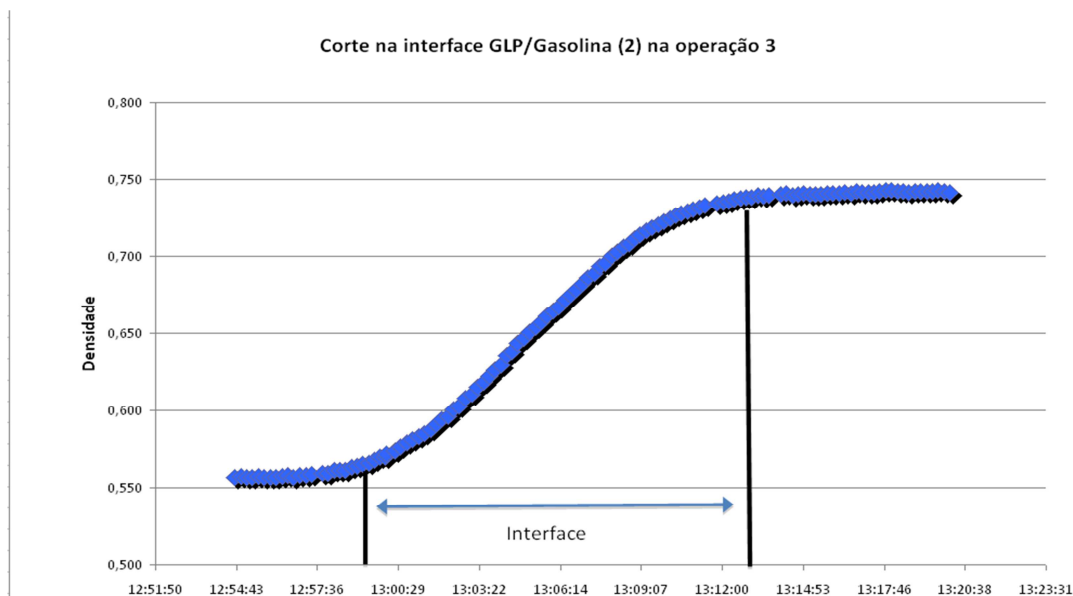


Figura 55 – Cortes na interface GLP/gasolina (2)

Fonte: O Autor (2013).

Na Tabela 39, considerando os dados das densidades medidas na chegada em Itabuna na operação 3, são apresentados os valores estimados do percentual de GLP ao longo da região da interface. São apresentados somente a interação gasolina (2) e GLP.

Tabela 39 – Estimativa das porcentagens de GLP nos diversos pontos da interface

Tempo	Densidade Observada	Densidade inicial	Densidade corte	Volume de GLP Acumulado	Volume de Gasolina Acumulado	Volume do intervalo Acumulado	Volume de GLP Acumulado
12:54:28	0,5560						
12:54:40	0,5568	0,556	0,557	0,3159	0,0007	0,3167	99,77%
12:54:53	0,5573	0,557	0,557	0,6569	0,0028	0,6597	99,57%
12:55:05	0,5565	0,557	0,557	0,9719	0,0045	0,9764	99,54%
12:55:17	0,5568	0,557	0,557	1,2874	0,0057	1,2931	99,56%
12:55:30	0,5571	0,557	0,557	1,6286	0,0076	1,6361	99,54%
12:55:42	0,5568	0,557	0,557	1,9435	0,0093	1,9528	99,52%
12:55:55	0,5565	0,557	0,557	2,2852	0,0106	2,2958	99,54%
12:56:08	0,5568	0,557	0,557	2,6270	0,0119	2,6389	99,55%
12:56:20	0,5570	0,557	0,557	2,9420	0,0135	2,9556	99,54%
12:56:33	0,5576	0,557	0,558	3,2825	0,0161	3,2986	99,51%
12:56:45	0,5569	0,558	0,557	3,5969	0,0184	3,6153	99,49%
12:56:58	0,5576	0,557	0,558	3,9374	0,0209	3,9583	99,47%
12:57:11	0,5578	0,558	0,558	4,2771	0,0243	4,3014	99,44%
12:57:23	0,5585	0,558	0,559	4,5898	0,0282	4,6181	99,39%
12:57:46	0,5591	0,559	0,559	5,1869	0,0381	5,2250	99,27%
12:57:59	0,5593	0,559	0,559	5,5236	0,0444	5,5681	99,20%
12:58:11	0,5611	0,559	0,561	5,8326	0,0521	5,8847	99,11%
12:58:24	0,5613	0,561	0,561	6,1653	0,0625	6,2278	99,00%
12:58:36	0,5615	0,561	0,562	6,4721	0,0724	6,5444	98,89%

Tempo	Densidade Observada	Densidade inicial	Densidade corte	Volume de GLP Acumulado	Volume de Gasolina Acumulado	Volume do intervalo Acumulado	Volume de GLP Acumulado
12:58:48	0,5632	0,562	0,563	6,7771	0,0840	6,8611	98,78%
12:59:01	0,5639	0,563	0,564	7,1051	0,0990	7,2042	98,63%
12:59:13	0,5652	0,564	0,565	7,4061	0,1147	7,5208	98,47%
12:59:25	0,5658	0,565	0,566	7,7054	0,1321	7,8375	98,31%
12:59:38	0,5676	0,566	0,568	8,0271	0,1534	8,1806	98,12%
12:59:50	0,5695	0,568	0,570	8,3208	0,1764	8,4972	97,92%
13:00:00	0,5695	0,570	0,570	8,5640	0,1971	8,7611	97,75%
13:00:03	0,5716	0,570	0,572	8,6365	0,2037	8,8403	97,70%
13:00:21	0,5739	0,572	0,574	9,0654	0,2498	9,3153	97,32%
13:00:34	0,5762	0,574	0,576	9,3706	0,2877	9,6583	97,02%
13:00:47	0,5790	0,576	0,579	9,6707	0,3306	10,0014	96,69%
13:00:59	0,5811	0,579	0,581	9,9433	0,3748	10,3181	96,37%
13:01:12	0,5830	0,581	0,583	10,2346	0,4265	10,6611	96,00%
13:01:24	0,5849	0,583	0,585	10,5000	0,4778	10,9778	95,65%
13:01:37	0,5873	0,585	0,587	10,7832	0,5376	11,3208	95,25%
13:01:49	0,5905	0,587	0,591	11,0395	0,5980	11,6375	94,86%
13:02:02	0,5943	0,591	0,594	11,3102	0,6704	11,9806	94,40%
13:02:14	0,5961	0,594	0,596	11,5549	0,7423	12,2972	93,96%
13:02:27	0,6009	0,596	0,601	11,8135	0,8267	12,6403	93,46%
13:02:39	0,6028	0,601	0,603	12,0461	0,9109	12,9569	92,97%
13:02:52	0,6077	0,603	0,608	12,2912	1,0088	13,3000	92,42%
13:03:05	0,6104	0,608	0,610	12,5289	1,1142	13,6431	91,83%
13:03:17	0,6150	0,610	0,615	12,7415	1,2182	13,9597	91,27%
13:03:30	0,6187	0,615	0,619	12,9636	1,3392	14,3028	90,64%
13:03:42	0,6222	0,619	0,622	13,1620	1,4574	14,6194	90,03%
13:03:54	0,6265	0,622	0,627	13,3533	1,5828	14,9361	89,40%
13:04:07	0,6298	0,627	0,630	13,5529	1,7262	15,2792	88,70%
13:04:19	0,6352	0,630	0,635	13,7293	1,8666	15,5958	88,03%
13:04:31	0,6383	0,635	0,638	13,8978	2,0147	15,9125	87,34%
13:04:43	0,6431	0,638	0,643	14,0590	2,1701	16,2292	86,63%
13:04:56	0,6464	0,643	0,646	14,2257	2,3465	16,5722	85,84%
13:05:09	0,6507	0,646	0,651	14,3848	2,5305	16,9153	85,04%
13:05:21	0,6541	0,651	0,654	14,5246	2,7073	17,2319	84,29%
13:05:33	0,6574	0,654	0,657	14,6583	2,8903	17,5486	83,53%
13:05:46	0,6612	0,657	0,661	14,7960	3,0957	17,8917	82,70%
13:05:58	0,6646	0,661	0,665	14,9165	3,2918	18,2083	81,92%
13:06:10	0,6672	0,665	0,667	15,0316	3,4934	18,5250	81,14%
13:06:24	0,6717	0,667	0,672	15,1582	3,7363	18,8944	80,23%
13:06:36	0,6750	0,672	0,675	15,2596	3,9516	19,2111	79,43%
13:06:48	0,6786	0,675	0,679	15,3546	4,1732	19,5278	78,63%
13:07:01	0,6823	0,679	0,682	15,4503	4,4205	19,8708	77,75%
13:07:14	0,6862	0,682	0,686	15,5384	4,6754	20,2139	76,87%
13:07:26	0,6891	0,686	0,689	15,6136	4,9170	20,5306	76,05%
13:07:39	0,6932	0,689	0,693	15,6880	5,1856	20,8736	75,16%
13:07:51	0,6955	0,693	0,696	15,7508	5,4394	21,1903	74,33%
13:08:04	0,6998	0,696	0,700	15,8124	5,7210	21,5333	73,43%
13:08:16	0,7026	0,700	0,703	15,8626	5,9874	21,8500	72,60%
13:08:29	0,7060	0,703	0,706	15,9109	6,2821	22,1931	71,69%
13:08:41	0,7081	0,706	0,708	15,9505	6,5593	22,5097	70,86%
13:08:53	0,7114	0,708	0,711	15,9851	6,8413	22,8264	70,03%
13:09:05	0,7140	0,711	0,714	16,0142	7,1288	23,1431	69,20%
13:09:18	0,7162	0,714	0,716	16,0411	7,4451	23,4861	68,30%
13:09:30	0,7183	0,716	0,718	16,0619	7,7409	23,8028	67,48%
13:09:43	0,7203	0,718	0,720	16,0804	8,0655	24,1458	66,60%
13:09:56	0,7221	0,720	0,722	16,0951	8,3938	24,4889	65,72%
13:10:09	0,7245	0,722	0,725	16,1056	8,7263	24,8319	64,86%
13:10:21	0,7261	0,725	0,726	16,1117	9,0369	25,1486	64,07%
13:10:33	0,7275	0,726	0,728	16,1150	9,3503	25,4653	63,28%
13:10:46	0,7289	0,728	0,729	16,1158	9,6926	25,8083	62,44%
13:10:58	0,7303	0,729	0,730	16,1142	10,0108	26,1250	61,68%
13:11:11	0,7314	0,729	0,731	16,1114	10,3566	26,4681	60,87%
13:11:23	0,7331	0,729	0,733	16,1073	10,6774	26,7847	60,14%
13:11:48	0,7343	0,729	0,734	16,0964	11,3480	27,4444	58,65%
13:12:01	0,7349	0,729	0,735	16,0901	11,6974	27,7875	57,90%
13:12:13	0,7358	0,729	0,736	16,0835	12,0206	28,1042	57,23%
13:12:25	0,7366	0,729	0,737	16,0762	12,3446	28,4208	56,56%
13:12:38	0,7372	0,729	0,737	16,0676	12,6962	28,7639	55,86%
13:12:50	0,7380	0,729	0,738	16,0590	13,0215	29,0806	55,22%

Tempo	Densidade Observada	Densidade inicial	Densidade corte	Volume de GLP Acumulado	Volume de Gasolina Acumulado	Volume do intervalo Acumulado	Volume de GLP Acumulado
13:13:03	0,7382	0,729	0,738	16,0495	13,3741	29,4236	54,55%
13:13:15	0,7392	0,729	0,739	16,0398	13,7005	29,7403	53,93%
13:13:27	0,7391	0,729	0,739	16,0301	14,0268	30,0569	53,33%
13:13:40	0,7397	0,729	0,740	16,0191	14,3809	30,4000	52,69%
13:14:04	0,7404	0,729	0,740	15,9974	15,0359	31,0333	51,55%
13:14:16	0,7407	0,729	0,741	15,9863	15,3637	31,3500	50,99%

Fonte: O Autor (2013).

Observa-se que o corte inicial da interface foi feito às 12:58:24 (destacado na Tabela 39). Neste ponto da mistura gasolina/GLP há um volume percentual de GLP igual a 99,0%. O corte final da interface foi feito às 13:13:27 (destacado na Tabela 39).

Após as simulações feitas no Petrox e no ConBate, com variadas composições de mistura de gasolina (2) na interface, chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 – Resultados do Petrox e do ConBate

Composição de Gasolina em MIX2	0%	2%	5%	7%	8%	9%
Volume da interface (m ³)	69,07	49,62	46,70	45,56	45,08	44,60
Volume de gasolina/GLP absorvido pelo GLP "pur0" (m ³)	0	14,47	17,40	19,19	20,00	20,78
Intemperismo do GLP	-1,5	-0,8	0,3	1,4	2,1	2,6

Fonte: O Autor (2013).

Nesta operação, segundo a simulação realizada no PETROX em conjunto com o ConBate, a percentagem de gasolina (2) admissível seria de até 8%. Do mesmo para o segundo corte, foi simulado no Petrox e no ConBate e os dados apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Resultados do Petrox e do ConBate

Composição de GLP em MIX2	0%	10%	15%	18%	20%	21%	22%	25%
Volume da interface (m ³)	69,07	43,62	41,83	40,86	40,37	40,05	39,87	39,08
Volume de gasolina/GLP absorvido pela gasolina "pura" (m ³)	0	24,13	25,91	27,34	28,50	28,67	28,99	29,64
Pressão de Vapor da Gasolina	56,72	59,23	60,76	61,48	61,72	61,94	62,36	63,08

Fonte: O Autor (2013).

Nesta operação, segundo simulações realizadas no Petrox e no ConBate, a percentagem de GLP admissível seria de até 21%.

Deste modo, com as simulações feitas nas duas pontas da interface, o corte ótimo seria nos pontos onde se tem 21% de GLP na mistura gasolina/GLP absorvida pela gasolina (2) pura, bem como no ponto onde se tem 8% de gasolina (2) na mistura gasolina/GLP absorvido pelo GLP puro.

Com base nos cortes reais, isto é, os cortes realizados pelo operador do sistema ORSUB, e nos cortes ótimos, isto é, os cortes determinados pelo Petrox com base nas propriedades dos dois produtos, foi confeccionada a Tabela 42.

Tabela 42 – Estimativa do volume de interface gerado pelo ConBate

		Corte Real	Corte Ótimo
Concentração Admissível do GLP na gasolina	0%	8,5%	21%
Concentração Admissível da gasolina no GLP	0%	1%	8%
Volume de interface, m ³	69,07	26,75	16,05

Fonte: O Autor (2013).

Conforme apresentado na Tabela 42, a diferença entre o corte real e o corte ótimo, foi de 10,7 m³. Isto representa uma redução de 40% do volume da interface gerada entre os produtos gasolina (2) e GLP.

Considerando o ganho da primeira interface (Gasolina (1)/GLP) de 12,32 m³, com o ganho da segunda interface (GLP/Gasolina (2)) de 10,7 m³, o ganho total nesta operação seria de 23,02 m³. Isto representa uma redução de 42,2% do volume de produto que seria destinado ao sistema de tratamento de interface.

Resumindo, as três operações estudadas neste capítulo tiveram as seguintes taxas de reduções dos seus respectivos volumes de interfaces:

- Operação 1 (gasolina/GLP em Jequié)= 49,22%
- Operação 2 (gasolina/GLP em Jequié)= 69,9%
- Operação 3 (gasolina/GLP/gasolina em Itabuna)=42,2%

6.2.4

Operação 4 Simulação considerando o cenário mais crítico

Por último foi realizada a simulação considerando o cenário mais crítico de operação no poliduto ORSUB. Este cenário mais crítico, seria a movimentação de um GLP leve entre duas gasolinas pesada. Como já visto no capítulo 5, o GLP

leve tira mais facilmente de especificação a pressão de vapor da gasolina, e da mesma forma, uma gasolina pesada tira de especificação o intemperismo do GLP com mais facilidade que uma gasolina leve.

Para caracterizar o GLP leve e a gasolina pesada foi utilizado o levantamento histórico (Set/2009 a Jun/2012) do perfil destes produtos movimentados no ORSUB. No capítulo 5 é mostrado como se chegou na caracterização destes produtos.

Conhecendo estes perfis, o próximo passo foi substituí-los pelos GLPs e gasolinas apresentados nas operações 1,2 e 3, que foram simuladas neste presente capítulo. Foi mantida as mesmas condições operacionais (vazão, volume da batelada), mudando-se apenas a composição dos produtos envolvidos. Deste modo, as 3 operações foram simuladas novamente com o perfil teórico do GLP leve e da gasolina Pesada.

Abaixo são apresentados as taxas de reduções dos volumes de interface considerando o cenário mais crítico:

- Operação 1 (gasolina/GLP em Jequié)= 21,3%
- Operação 2 (gasolina/GLP em Jequié)= 42,8%
- Operação 3 (gasolina/GLP/gasolina em Itabuna)= 17,5%

Como observado, mesmo na situação crítica de movimentação, isto é, uma mistura de uma gasolina pesada com o GLP leve, houve redução no tamanho da interface em relação ao corte real.

7 Custos Operacionais e Logísticos

No transporte dutoviário, os direitos de acesso, construção, requisitos para controle das estações de bombeamento fazem com que este modal de transporte apresente o custo fixo alto. Outros custos são inerentes nesse modal, como os custos de bombeamento, de estocagem e de formação de interface.

O custo de bombeamento é proporcional à quantidade movimentada em cada duto e varia de acordo com o duto e o tipo de produto transportado. Pode-se dizer que quanto mais distante a base de distribuição estiver da refinaria, maior será o custo associado ao bombeamento do derivado a ser transportado. Os custos de estocagem são diretamente proporcionais às quantidades estocadas dos produtos e ao período pela qual estas mesmas permanecem armazenadas (Rejowski, 2007).

Os custos associados à formação de interfaces, são diferenciados para cada par de produtos que forma esta interface. São devidos aos diferentes tratamentos aplicados às quantidades misturadas, a fim de recuperar as especificações originais dos produtos que as geraram. Esses custos são normalmente medidos pelo volume da interface. Os terminais estocam as interfaces em tanques separados e algumas opções existem para a recuperação do produto. Este aspecto operacional implica em um custo adicional na operação do poliduto.

A interface gera perda de produto dentro do duto, isto é, o produto que poderia ser disponibilizado para suprir a demanda local, vai ficar imobilizado por um tempo até a sua recuperação.

No caso da interface gerada ser superior a capacidade de tratamento no terminal, o produto deve ser transportado até uma refinaria para o seu reprocessamento. Neste caso pode-se ter os seguintes custos:

- custo do transporte rodoviário;

- custo de reprocessamento da interface;
- custos extras laboratoriais e administrativos.

Em alguns casos já ocorridos, em que o sistema de interface está sobrecarregado, e a sua retirada para o reprocessamento na refinaria através de caminhões é menor do que a entrada da interface no sistema de tratamento no terminal, o poliduto num caso extremo pode simplesmente parar. A outra alternativa de programação no duto é deixar de enviar um dos dois produtos que formam a interface. Assim, há falta de pelo menos um dos dois produtos para suprir a demanda local.

Nesses casos, os clientes devem retirar o produto em outras bases. No caso do ORSUB, sempre há a alternativa de se deslocar o mercado do terminal de Jequié para o terminal de Itabuna e vice-versa. Entretanto, o mercado local da base acolhedora pode ser também afetada pelo crescimento da demanda oriunda do deslocamento do mercado da outra base, gerando também um déficit na base acolhedora. A solução é deslocar para mais longe ainda a entrega do produto, no caso do ORSUB, as opções são as refinarias RLAM (Bahia) e REGAP (Minas Gerais).

Por força de contrato todo custo de deslocamento de suprimento dos clientes, por culpa do fornecedor, deve ser arcado por este. Assim, gastos a mais com o aluguel do caminhão, despesas do caminhoneiro, combustível, e quaisquer outros gastos extras são cobrados ao fornecedor dos produtos.

Rejowski (2007) apresenta um estudo sobre os custos variáveis em operações dutoviária. Primeiramente Rejowski faz simulações no sistema OSBRA, que é o poliduto que transporta gasolina, diesel, GLP e QAV da Refinaria de Paulínia (REPLAN) até Brasília. Na Tabela 43 são apresentados as porcentagens de cada item de custo no custo variável total.

Tabela 43 – Resultados dos Custos Variáveis no Poliduto OSBRA

	Simulações		
	1	2	3
Custo de Bombeamento	59,2%	50,1%	56,3%
Custo da Interface	27,3%	33,4%	29,3%
Custo da Estocagem (1)	13,5%	16,5%	14,4%

(1) Custo de Estocagem = custo de estocagem na refinaria + custo de estocagem na base de distribuição.

Fonte: Rejowski (2007)

A Tabela 43 demonstra que o custo da interface nas simulações realizadas no OSBRA, constitui cerca de um terço do custo variável total da movimentação dos derivados através deste poliduto.

Numa outra hipótese de simulação feita por Rejowski (2007), o sistema dutoviário considerado era composto por uma refinaria, um duto e uma base de distribuição. Os produtos envolvidos na operação foram gasolina, óleo diesel, GLP e QAV. Os lotes considerados foram de 2.500 m³. Na Tabela 44 são apresentados as porcentagens de cada custo variável em relação ao custo variável total.

Tabela 44 – Resultados nos Custos Variáveis no Poliduto Hipotético

	Simulações			
	1	2	3	4
Custo de Bombeamento	69,5%	63,3%	47,5%	38,5%
Custo da Interface	21,2%	25,5%	41,8%	48,9%
Custo da Estocagem (1)	9,3%	11,2%	10,7%	12,6%

(1) Custo de Estocagem = custo de estocagem na refinaria + custo de estocagem na base de distribuição.

Rejowski (2007)

Nas simulações 3 e 4 o custo de interface chega próximo à metade do custo variável total do sistema operacional do poliduto.

Techo & Holbrook (1974) fizeram estudos dos custos referentes às movimentações no modal dutoviário. Este estudo demonstra que os custos relacionados com a interface gerada entre os produtos são altos.

Considerando tudo isto, a minimização do volume de interface deve ser um fator que o operador do sistema dutoviário deve sempre buscar, para garantir uma redução em seus custos operacionais e logísticos.

Segundo estimativas, no ORSUB foram gerados cerca de 21.000 m³ de interface no ano de 2012. Considerando que a interface seja formada por 50% de gasolina e 50% de GLP, o volume de produto perdido para entrega imediata aos mercados foi cerca de 10.500 m³ de cada produto. Levando-se em conta as simulações realizadas no capítulo anterior, é possível obter reduções acima de 50% do volume das interfaces geradas nas movimentações de derivados no ORSUB.

8 Conclusões

O modal dutoviário se apresenta como uma ótima solução para a movimentação de petróleo e dos seus derivados. Os polidutos surgiram como a alternativa da multiutilização de um mesmo duto, como forma de otimizar os altos investimentos necessários para a construção de dutos. Entretanto, o transporte em polidutos geram as zonas de interfaces, que compreendem um espaço onde se tem um mix dos dois produtos em contato. Dependendo dos produtos envolvidos na movimentação, essa interface pode ser absorvida por um ou pelos dois produtos transportados ou retirada do poliduto e devidamente tratada.

A partir de 2001, através de suas resoluções e portarias, a ANP modificou parâmetros de qualidade de alguns combustíveis, restringindo ainda mais a especificação vigente na época. Isto teve um impacto no corte das interfaces, já que para garantir a manutenção da qualidade dos produtos, os volumes das interfaces seriam maiores. Por outro lado, um aumento no volume das interfaces esbarrava no limite operacional do sistema de tratamento de interface.

Neste presente trabalho foi observado que há espaço para a melhoria nos cortes de interfaces realizados na operações de movimentação de derivados através de polidutos. A redução do volume de interface como mostrado no capítulo anterior diminui custo e agrega ganhos logísticos, como por exemplo, a pronta disponibilidade do produto para a entrega ao mercado consumidor, não sendo necessário o produto ficar imobilizado no sistema de tratamento de interface.

O estudo de casos operacionais do ORSUB mostram reduções da ordem de 50% no volume de interface a ser tratado. Considerando o volume médio anual movimentado pelo sistema, a redução do volume de interface tratado seria de 10.500 m³. Mesmo considerando o cenário mais crítico de movimentação no poliduto, isto é, uma gasolina pesada com um GLP leve, houve reduções na ordem de 22%.

Para alcançar esses resultados na prática operacional, deve-se aprimorar ferramentas que possibilitem ao operador do sistema dutoviário tomar a decisão do momento dos cortes da interface. Duas ferramentas são fundamentais na tomada desta decisão. Primeiro, o Petrox, que faz a simulação do comportamento das misturas entre estes produtos. Segundo, o ConBate, que estima o volume da interface para cada composição admissível de um produto no outro. A combinação destas três ferramentas em um sistema de controle contribuirá de forma significativa nos ganhos logísticos nas operações de movimentação dutoviária dos derivados do petróleo.

9 Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Portaria ANP nº 310, de 27 de dez. de 2001. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 28 dez. 2001.

_____. Resolução ANP nº 18, de 18 jun. 2009. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 19 jun. 2009.

AQUEDUTO da Carioca. [S.l.]: Wikipédia, a enciclopédia livre, 2012. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Aqueduto_da_Carioca>. Acesso em: 29 jun. 2012.

AUSTIN, J.E. and PALFREY, J.R. **Mixing of miscible but dissimilar liquids in a serial flow in a pipelines**. Proc. Institution of Mechanical Engineers, Vol 178, Part 1, Nº15. Pp 377-395. 1964

BASMADJIAN, D. **Mass transfer and separation processes: principles and applications**. 2nd. ed. [S.l.], CRC Press, 2007.

BOTROS, K. K. Estimating contamination between batches in products lines. **Oil & Gas Journal**, [S.l.], 1984.

CASTELLAN, G. **Physical chemistry**. 3rd. ed. [S.l.]: Addison-Wesley, 1983.

CENPES. **Petrox**: manual do usuário 3.2. Rio de Janeiro, 2011.

COEFICIENTE de Reynolds. [S.l.]: Wikipédia, a enciclopédia livre., 2012. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_Reynolds>. Acesso em: 14 ago. 2012.

FIGUEIREDO, Renata. Gargalos logísticos na distribuição de combustíveis brasileira. **ILOS**, Rio de Janeiro, 10 maio 2006. Disponível em: http://www.ilos.com.br/web/index.php?option=com_content&view=article&id=699%3Aartigos-gargalos-logisticos-na-distribuicao-de-combustiveis-brasileira&catid=4&Itemid=182&lang=br>. Acesso em: 22 jun. 2012.

FOWLER, F.C.; BROWN, G. G. **Contamination by successive flow in pipe lines**. Philadelphia: American institute of chemical engineers, 1943.

- FREIRE, J. L. F. **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: ABMC, 2009.
- HUA, J. Z. ; BRENNECKE, J. F.; STANDTHER, M. A. **Reliable phase stability analysis for cubic equation of state models**. Computer Chemical Engineering, [S.l.], 20, p. 395-400, 1996.
- JANNA, W.S. **Introduction to fluid mechanics**. 3ª Ed. PWS-Kent, 1993
- KASHCHEEV, A. A. . Naftyanoe Khoz, [S.l.], v. 25, no. 9, 1933.
- KENNEDY, J. L. **Oil and gas pipeline fundamentals**. 2. ed. [S.l.]: PennWell, 1993.
- LEVENSPIEL, O. **How much mixing occurs between batches?**. Pipeline industry. pp: 51-54, 1958
- LOGÍSTICA APLICADA WORDPRESS. Site. Disponível em: <www.logisticaaplicada.wordpress.com/home> Acesso em: 28 out. 2012.
- LOURENÇO, J. T. **Sistemas de qualidade e interfaces**. [S.l.: s.n.], 1995.
- PETROBRAS. **RL-4100.51-6000-940-PET-101**: Sistema de tratamento de interface. Rio de Janeiro, 1993.
- MONTENEGRO, João. **CTDUT e Arpel assinam acordo**: site Energia Hoje. Duque de Caxias, Rio de Janeiro: CTDUT, 2012. Disponível: <<http://www.ctdut.org.br/en/node/404>>. Acesso em: 28 out. 2012.
- MOHITPOUT, M. **Pipeline operation & maintenance**: a practical approach. [S.l.]: ASME Press, 2005.
- NETCHVAL, M.V. *et al.* **Mixture formation during the process of sequential pumping of petroleum products of varying viscosities**. Neftyanoy Khoz, Vol. 50, N°8, pp. 57-59. 1972.
- OLIVEIRA, J.L. . Modeling the dispersion phenomenon in batch transfer operations by the theory of structured mixture. **Brazilian Journal of Petroleum and Gas**. v. 4, p.129-138, 2010
- OVÁDI, Z., and TÖRÖK, E, **Examination of pipeline transport from the viewpoint of goods quality**. Köolaj és Földgáz, Vol. 10, n° 4, pp: 121-123 1977.
- PHILLIPS MUSEUM. **Phillips Museum Guide on line**. Disponível em: <www.phillips66museum.com/EN/Documents/Phillips-Museum_guide-online.pdf>. Acesso em: 24 out. 2012.
- RACHID, F. B. **Predicting mixing volumes in serial transport in pipelines**. [S.l.: s.n.], 2002.

REJOWSKI, R. **Otimização da programação de operações dutoviária: formulações eficientes e considerações hidráulicas.** São Paulo: USP, 2007.

SCHODER, E. W. **Contamination oil pipeline.** Cornell Civil Engineer [S.l.], v. 20, no. 3, 1911.

TECHO, R. ; HOLBROOK, D. L. Computer scheduling the world`s biggest product pipeline. **Pipeline Gas Journal**, [S.l.], no. 4, 1974.

TRANSPETRO. **Manual de Operação do ORSUB.** 2010, 44 p. Relatório técnico.

TRANSPETRO. **Apresentando o ORSUB.** 2011. Encontro técnico da Transpetro.

UNIVERSITY OF TEXAS. **Introduction to the oil pipeline industry.** 3. ed. Austin, Texas, 1984.

VÁZQUEZ-ROMÁN, R.; GARCÍA-SANCHEZ, F.G.; SALAS-PADRÓN, A. An efficient flash procedure using cubic equations of state. **Chemical Engineering Journal**, [S.l.], v. 84, p. 201-205, 2001.

VICENT-GENOD, J. **Fundamentals of pipeline engineering.** [S.l.]: Technip. 1984.

VAN WYLEN, G. **Fundamentos da termodinâmica clássica.** 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1995.

YERGIN, D. **O petróleo: uma história de conquistas, poder e dinheiro.** São Paulo: Max Altmann, 2010.