

PROGRAMAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM REDE  
DUTOVIÁRIA USANDO ALGORITMO GENÉTICO

Vanessa Rennó Frota Moraes Alves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO.

Aprovada por:

---

Profº. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

---

Profª. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

---

Profº. Silvio Hamacher, D.Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2007

ALVES, VANESSA RENNÓ FROTA MORAES

Programação de Transferência de Derivados  
de Petróleo em Rede Dutoviária usando  
Algoritmo Genético [Rio de Janeiro] 2007

XI, 102 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia de Produção, 2007)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Malha Dutoviária
2. Algoritmos Genéticos

I. COPPE/UFRJ      II. Título (série)

*Ao meu esposo, Bruno, e  
aos meus pais, Dilson e Cláudia.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao prof. Virgílio, meu orientador, por todas as oportunidades oferecidas e pelo apoio e contribuição ao trabalho desenvolvido.

À Mariza e ao Roger, da área de Distribuição e Logística da Petrobrás, pelas informações prestadas, sem as quais não seria possível a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Dilson e Cláudia, que sempre acreditaram em mim, pelo incentivo e apoio incondicional durante toda a trajetória da minha formação acadêmica que acabou por me trazer até aqui.

Ao Bruno, meu tudo, por toda força nos momentos de dúvidas e angústia, por compartilhar os momentos de alegria e vitórias, e também por ter tido uma enorme paciência e compreendido a minha “ausência” nos vários períodos de muito trabalho que se sucederam ao longo desses dois anos.

Ao meu irmão, Fred, e aos demais familiares pela torcida para que tudo desse certo.

Aos meus colegas, Erito, Nilson, Paulo Roberto e Wagner, pela amizade, apoio, trocas de idéias e experiências. E em especial ao Erito e ao Nilson, fiéis parceiros nos estudos e trabalhos em grupo, pelo compromisso e dedicação.

À Mariane pela experiência transmitida sobre o tema tratado neste trabalho.

A todos os demais amigos e colegas.

À Agência Nacional do Petróleo (ANP), à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), que por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás (PRH-ANP/MCT), forneceram o fomento financeiro indispensável para a realização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## PROGRAMAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM REDE DUTOVIÁRIA USANDO ALGORITMO GENÉTICO

Vanessa Rennó Frota Moraes Alves

Março/2007

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

O modal dutoviário é reconhecido como o meio mais eficaz de se transportar grandes volumes de petróleo e seus derivados por longas distâncias, mas que também exige um grande controle operacional. Isto torna a otimização do transporte de produtos neste sistema dutoviário um problema de alta relevância do ponto de vista econômico, já que o preço final destes produtos depende em grande parte do seu custo de transporte.

Este trabalho trata do problema de transporte de derivados pesados de petróleo em uma rede dutoviária localizada no estado de São Paulo. Inicialmente foi feito um estudo do problema e das dificuldades intrínsecas à elaboração de uma programação de transferência de produtos viável. No entanto, devido às dificuldades de incorporação de todas as suas restrições, foi adotado um problema simplificado, para o qual foi proposto e implementado um modelo em algoritmo genético.

Foram encontradas soluções viáveis para as 5 instâncias criadas para o problema, com horizontes de programação de 7 e 14 dias, discretizados em períodos de 4 horas. O tempo computacional gasto na obtenção destes resultados não ultrapassou 25 minutos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## PIPELINE SCHEDULING OF PETROLEUM DERIVATIVES USING GENETIC ALGORITHM

Vanessa Rennó Frota Moraes Alves

March/2007

Advisor: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Program of Production Engineering

Transportation through pipeline networks is recognized as the most efficient method for carrying high volumes of petroleum and its derivatives for long distances, but it also demands a great operational control. This turns the transport optimization in this pipeline system a problem of high relevance of the economic point of view, since the final price of these products depends to a large extent on its transportation cost.

This work deals with the problem of petroleum derivatives transportation through a pipeline network located in state of São Palulo. First, was made a study of the problem and its intrinsic difficulties to obtain a feasible programming of products transference. However, due to the difficulties to incorporate all of its constraints, a simplified problem was adopted, for which it was considered and implemented a model in genetic algorithm.

It was found feasible solutions for the 5 instances created for the problem, with programming horizon of 7 and 14 days, discretized in 4 h intervals. The time expended for obtaining these results did not exceed 25 minutes.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMA DE TRANSPORTE DUTOVIÁRIO (PTD)</b>	<b>5</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	5
2.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DUTOVIÁRIO .....	6
2.3	RESTRIÇÕES DO PTD .....	7
2.4	CRITÉRIOS DE OTIMIZAÇÃO DO PTD .....	8
2.5	POSSÍVEIS SIMPLIFICAÇÕES PARA O PTD .....	9
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>11</b>
3.1	UM POLIDUTO COM UMA FONTE E UM DESTINO .....	11
3.2	UM POLIDUTO COM UMA FONTE E VÁRIOS DESTINOS .....	12
3.3	UMA REDE DE POLIDUTOS QUE INTERLIGA DIVERSAS ÁREAS DE BOMBEAMENTO E RECEBIMENTO .....	15
3.4	CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	24
<b>4</b>	<b>PROBLEMA DE TRANSPORTE NA REDE DE ESCUROS (PTRE)</b>	<b>26</b>
4.1	DESCRIÇÃO DA REDE .....	26
4.2	CARACTERÍSTICAS DA MOVIMENTAÇÃO DE PRODUTOS .....	29
4.2.1	Rotas de fluxo .....	29
4.2.2	Operações de movimentação .....	29
4.2.3	Reversão em dutos .....	29
4.2.4	Mistura em Tanque e em Duto .....	30
4.3	RESTRIÇÕES DO PTRE .....	30
4.4	OBJETIVO E SOLUÇÃO ATUAL PARA O PTRE .....	31
<b>5</b>	<b>PROBLEMA DE TRANSPORTE NA REDE DE ESCUROS SIMPLIFICADO (PTRES)</b>	<b>34</b>
5.1	CARACTERÍSTICAS DA REDE DE ESCUROS SIMPLIFICADA .....	34
5.2	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	35
5.3	MODIFICAÇÕES NA MOVIMENTAÇÃO DE PRODUTOS .....	36
5.3.1	Discretização do Horizonte de Tempo .....	36

5.3.2	Discretização dos Dutos.....	36
5.4	RESTRIÇÕES DO PTRES .....	38
5.5	OBJETIVO E SOLUÇÃO DO PTRES .....	39
5.5.1	Programação de Transferência de Produtos .....	39
5.6	DEFINIÇÃO DA INSTÂNCIA DO PTRES.....	40
5.7	RESUMO DAS INFORMAÇÕES REFERENTES AO PTRES .....	41
<b>6</b>	<b>MODELAGEM PROPOSTA PARA O PTRES</b>	<b>43</b>
6.1	ALGORITMOS GENÉTICOS .....	44
6.2	ALGORITMO GENÉTICO PARA PROGRAMAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE PRODUTOS (AG-TRANSF).....	45
6.2.1	Representação das Soluções .....	46
6.2.2	Definição da População Inicial .....	48
6.2.3	Avaliação dos Indivíduos .....	48
6.2.4	Método de Seleção .....	50
6.2.5	Operadores Genéticos .....	51
6.2.6	Parâmetros de controle.....	53
6.3	PÓS-PROCESSAMENTO .....	54
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS</b>	<b>56</b>
7.1	INTRODUÇÃO.....	56
7.2	DEFINIÇÃO DA CONFIGURAÇÃO E PARÂMETROS UTILIZADOS PELO AG- TRANSF.....	58
7.3	SOLUÇÕES DAS INSTÂNCIAS.....	65
7.3.1	Instâncias P07-1 e P07-2.....	66
7.3.2	Instâncias P14-1 e P14-2.....	71
7.3.3	Instância P07-3 .....	72
7.4	CONCLUSÕES SOBRE OS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS EXECUTADOS.....	74
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE I: DADOS DE ENTRADA DAS INSTÂNCIAS</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE II: TABELAS COM AS MÉDIAS DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA CADA INSTÂNCIA</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE III: GRÁFICOS DE BOMBEAMENTO E RELATÓRIOS DE PROGRAMAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE PRODUTOS</b>	<b>93</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Malha Brasileira de Oleodutos - 2005 .....	1
Figura 4.1: Esquema da rede de distribuição de petróleo e derivados escuros localizada no estado de São Paulo. Em destaque, a Rede de Escuros. ....	27
Figura 4.2: Operação de reversão em dutos .....	30
Figura 5.1: Grafo da Rede de Escuros Simplificada.....	34
Figura 5.2: Exemplo de discretização de um duto.....	37
Figura 5.3: Exemplo de movimentação de produto em um duto discretizado.....	38
Figura 5.4: Exemplo de uma programação de transferência de produtos em uma rede com três áreas e dois dutos, para um horizonte de quatro períodos de tempo .....	40
Figura 6.1: Pseudocódigo do AG-TRANSF .....	45
Figura 6.2: Codificação do indivíduo do AG-TRANSF1.....	47
Figura 6.3: Codificação do indivíduo do AG-TRANSF2.....	47
Figura 6.4: Pseudocódigo do procedimento que simula a evolução do escoamento de produtos na rede, para uma programação de transferência de produtos dada por um indivíduo do AG-TRANSF .....	49
Figura 6.5: Exemplo da operação realizada pelo Crossover Uniforme .....	52
Figura 6.6: Exemplo da operação realizada pela Mutação por Troca .....	52
Figura 6.7: Exemplo da opera�o realizada pela Muta�o por Vizinhaça.....	53
Figura 6.8: Exemplo de parada nos dutos. O indivíduo apresenta 4 paradas.....	54
Figura 6.9: Pseudocódigo da heurística responsável pelo pós-processamento das solu�es obtidas pelo AG-TRANSF .....	55
Figura 6.10: Resultado da aplica�o do pós-processamento em um indivíduo .....	55
Figura 7.1: Arquivo com os dados de entrada da Rede de Escuros Simplificada.....	58
Figura 7.2: Gráfico de bombeamento de produtos para a instância P07-1 .....	68
Figura 7.3: Gráfico de bombeamento de produtos para a instância P07-2 .....	69
Figura 7.4: Relatório de programa�o de transferência de produtos da instância P07-2.....	71

## ÍNDICE DE TABELAS

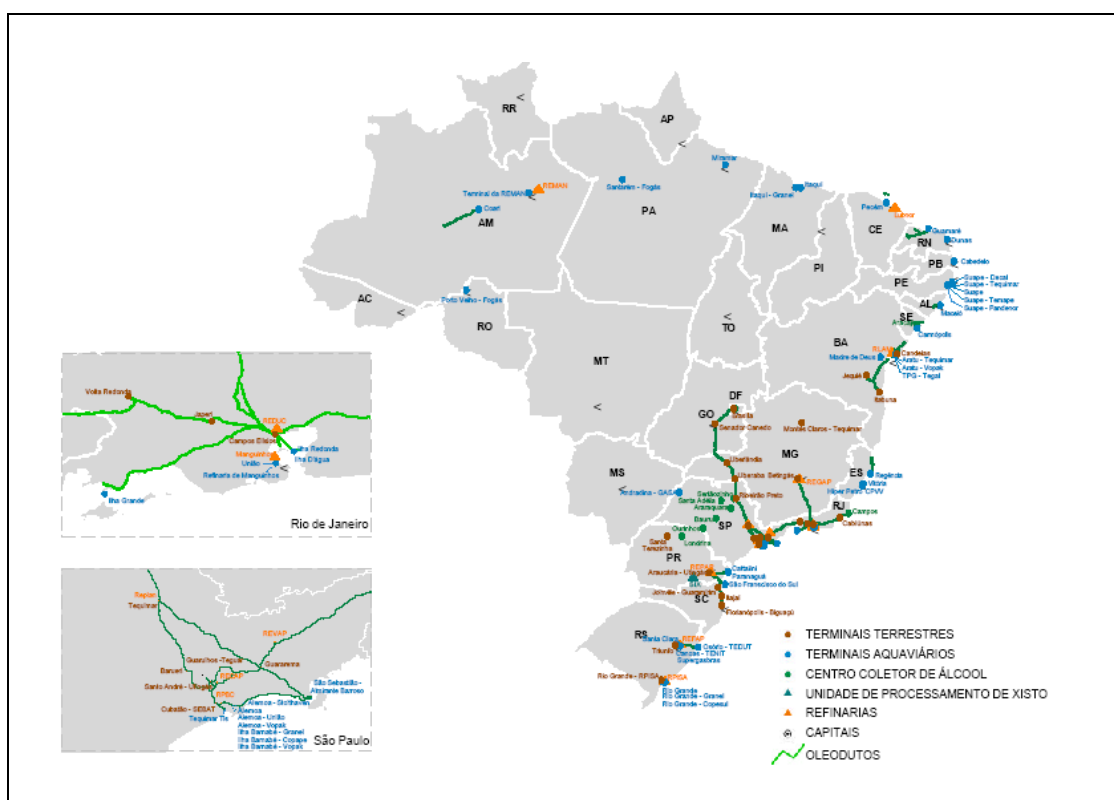
Tabela 1.1: Quantidade e extensão dos dutos da malha brasileira em 31/12/2005.....	3
Tabela 3.1: Resumo da literatura existente em relação ao problema de transporte dutoviário em sistemas compostos de apenas um duto .....	22
Tabela 3.2: Resumo da literatura existente em relação ao problema de transporte em rede dutoviária .....	23
Tabela 4.1: Terminais e refinarias da Rede de Escuros.....	28
Tabela 4.2: Extensão e capacidade dos dutos da Rede de Escuros .....	28
Tabela 4.3: Produtos transportados pela Rede de Escuros .....	28
Tabela 5.1: Produtos transportados na Rede de Escuros Simplificada .....	35
Tabela 5.2: Informações sobre a discretização dos dutos da Rede de Escuros Simplificada, considerando períodos de tempo de quatro horas .....	37
Tabela 5.3: Resumo das informações referentes ao PTRES.....	41
Tabela 6.1: Códigos utilizados na representação dos produtos e dutos .....	46
Tabela 7.1: Valores testados para os parâmetros.....	59
Tabela 7.2: Correlação entre parâmetros de controle, função de avaliação e tempo execução do algoritmo .....	59
Tabela 7.3: Média dos resultados das rodadas realizadas com a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação por Vizinhança.....	60
Tabela 7.4: Média dos resultados das rodadas realizadas com a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação por Troca .....	61
Tabela 7.5: Média dos resultados das rodadas realizadas com a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação Troca+Viz .....	62
Tabela 7.6: Comparação da média dos resultados das rodadas realizadas com e sem elitismo e pós-processamento, para a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação por Vizinhança. ....	63
Tabela 7.7: Comparação da média dos resultados das rodadas realizadas com e sem elitismo e pós-processamento, para a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação por Troca. ....	63
Tabela 7.8: Comparação da média dos resultados das rodadas realizadas com e sem elitismo e pós-processamento, para a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação Troca+Viz.....	64
Tabela 7.9: Configuração escolhida para o AG-TRANSF: características e valores dos parâmetros .....	65

Tabela 7.10: Resultados das soluções viáveis conhecidas para as instâncias do PTRES .....	65
Tabela 7.11: Instância P07-1. Melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.....	66
Tabela 7.12: Instância P07-2. Melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.....	67
Tabela 7.13: Instância P14-1. Melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.....	72
Tabela 7.14: Instância P14-2. Melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.....	72
Tabela 7.15: Instância P07-3. Melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.....	73

# 1 INTRODUÇÃO

O transporte de petróleo e seus derivados através de dutos desempenha um importante papel na cadeia logística de abastecimento e distribuição da indústria do petróleo. O sistema de dutos interliga regiões produtoras, plataformas, terminais marítimos, refinarias e bases de distribuição.

Apesar do seu investimento inicial ser alto, os dutos são o meio mais econômico para o transporte de grandes volumes de produtos a grandes distâncias, se comparado a outros modais, tais como ferroviário, marítimo e rodoviário, além das perdas serem menores e de ter alta confiabilidade (SASIKUMAR *et al.*, 1997). Vale ressaltar, que eles também exigem um grande controle sob os pontos de vista operacional e ambiental.



Fonte: ANP, 2007

Figura 1.1: Malha Brasileira de Oleodutos - 2005

Segundo os dados do último levantamento da Agência Nacional do Petróleo (ANP), o Brasil possui uma malha dutoviária de 15.069 km de extensão, com 446 dutos que interligam 27 terminais terrestres, 53 terminais aquaviários e 9 centros coletores de álcool. Desta malha, 7.404 km são oleodutos, destinados à movimentação de petróleo, seus derivados e álcool, distribuídos conforme indicado na Figura 1.1. Os outros 7.665 km transportam gás natural e são denominados gasodutos.

Em novembro de 1995 a Emenda Constitucional N°. 9 mudou o setor petrolífero brasileiro permitindo que atividades, até então sob o monopólio da União, pudessem ser exercidas por outras empresas além da Petrobras. Essa flexibilização começou a ser regulamentada pela Lei 9.478 de 1997, conhecida como Lei do Petróleo. A partir de então, qualquer empresa, independentemente da origem de seu capital, pode realizar atividades de exploração, produção, transporte, refino, importação e exportação do petróleo (TRANSPETRO, 2007a).

A mesma lei ainda permite que outras empresas possam utilizar-se dos dutos existentes ou a serem construídos, que estejam classificados como dutos de transporte. Tais instalações são aquelas que não podem ser qualificadas como de interesse exclusivo de seu proprietário, porém a sua utilização deve respeitar as características operacionais e a preferência do proprietário. Os demais dutos são classificados como de transferência e servem a um propósito específico. A Tabela 1.1 apresenta a quantidade e extensão dos dutos da malha brasileira classificados quanto ao tipo de produto movimentado e à função que cada um exerce.

Visando facilitar o acesso de terceiros a essa estrutura, a Lei do Petróleo exigiu da Petrobras a criação de uma subsidiária com atribuições específicas de operar e construir seus dutos, terminais marítimos e embarcações para transporte de petróleo, seus derivados e gás natural. Assim, em 1998 surgiu a Petrobras Transporte S. A.- Transpetro, que atualmente opera uma frota de 51 navios, 44 terminais terrestres e aquaviários e 10 mil quilômetros de malha dutoviária (TRANSPETRO, 2007b).

**Tabela 1.1: Quantidade e extensão dos dutos da malha brasileira em 31/12/2005**

Produtos movimentados	Dutos em operação		
	Função	Quantidade	Extensão (km)
Derivados <sup>1</sup>	Transferência	220	905
	Transporte	92	4.529
Gás natural	Transferência	58	2.233
	Transporte	23	5.432
Petróleo <sup>2</sup>	Transferência	25	1.932
Outros <sup>3</sup>	Transferência	24	22
	Transporte	4	16
<b>Total</b>		<b>446</b>	<b>15.069</b>

<sup>1</sup>Inclui dutos para movimentação de gasolina, óleo diesel, óleo combustível, querosene de aviação, GLP, propeno, butano, lubrificantes, LGN, óleo tratado, resíduo, asfalto, nafta, óleos básicos, óleo leve de reciclo, n-parafina, propano, hexano, querosene iluminante, extrato aromático, claros, resíduo asfáltico, óleo combustível para navios (bunker), tolueno, xileno e benzeno.

<sup>2</sup>Outros 34 dutos para petróleo, totalizando 1.084 km, foram contemplados dentro de planos de concessão para exploração e produção e, portanto, não estão contabilizados nesta tabela.

<sup>3</sup>Inclui dutos para movimentação de aguarrás, álcool, solvente e metanol.

Fonte: IBP, 2007

A operação dessas redes de dutos é bastante complexa e a otimização do transporte de produtos neste sistema é um problema de alta relevância do ponto de vista econômico, já que uma parte não negligenciável do custo final do petróleo e de seus derivados depende de seu custo de transporte (LIPORACE, 2005). Isto aliado à abertura do mercado exige que a Transpetro tenha um maior domínio das ferramentas computacionais para controle e elaboração de atividades operacionais.

SANGINETO (2006) elaborou uma lista com os custos que fazem com que a empresa tenha grande interesse na obtenção de uma boa programação do transporte de produtos em uma malha dutoviária. Estes custos são oriundos de:

- Formação de interfaces (quando são transportados produtos diferentes dentro do mesmo duto, a zona de contato entre ambos tende a se expandir conforme as bateladas percorrem o duto, gerando assim, uma degradação de qualidade do produto mais nobre);
- Falhas no atendimento à demanda devido a uma programação imperfeita;
- Falta de otimização quanto ao custo operacional do sistema (energia necessária para bombeamento dos produtos). Durante os horários de pico de demanda de energia elétrica (em geral no começo da noite), o custo da

energia elétrica é maior e necessita-se, sempre que possível, reduzir (ou mesmo evitar) o bombeamento de produtos durante estas janelas de tempo; e

- Tratamento imediato de imprevistos (quebra de bombas, parada de dutos para manutenção, falta de petróleo em um terminal devido a um eventual atraso do navio, entre outros).

O caso considerado no presente trabalho é o do transporte de derivados pesados de petróleo pela Rede de Escuros operada pela Transpetro situada no estado de São Paulo. Esta rede é constituída por 4 refinarias, 5 terminais e 8 dutos que transportam 6 produtos distintos. Vale ressaltar que três das quatro refinarias que compõem essa rede são responsáveis por 41% do refino de petróleo no Brasil, isto inclui produção de derivados leves e pesados (ANP, 2007).

Atualmente, a programação de bombeamento de produtos por essa rede é feita para um período de duas semanas a partir de um planejamento mensal que indica a capacidade dos tanques de armazenamento e a produção e demanda das áreas (refinarias e terminais) por cada produto. Esta programação é elaborada com base na experiência dos operadores dos dutos, e sua viabilidade é verificada por um software.

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma ferramenta computacional, baseada em Algoritmos Genéticos, que gere uma programação adequada de transferência de produtos entre as áreas da rede em questão. Esta programação deve atender às demandas, otimizar o uso das instalações existentes, minimizar os custos operacionais e determinar a capacidade ociosa da malha para comercialização.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 o Problema de Transporte Dutoviário é descrito de uma forma genérica, servindo de introdução à revisão bibliográfica apresentada no capítulo 3. O capítulo 4 apresenta o Problema de Transporte Dutoviário específico para a Rede de Escuros do estado de São Paulo, denominado PTRE. Já no capítulo 5, é apresentada uma versão simplificada do PTRE, sendo este o problema que este trabalho propõe-se a resolver. A modelagem proposta para a solução do PTRE Simplificado é apresentada no capítulo 6. No capítulo 7 são apresentados e analisados os resultados dos experimentos computacionais realizados. Por fim, no capítulo 8, são apresentadas as conclusões bem como ações para uma futura continuidade deste estudo.

## **2 PROBLEMA DE TRANSPORTE DUTOVIÁRIO (PTD)**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

Neste trabalho, é chamado de Problema de Transporte Dutoviário (PTD) o problema de encontrar uma programação de transferência de produtos, que satisfaça as restrições de operação do sistema dutoviário e que minimize uma função objetivo para um dado horizonte de tempo. Essa programação consiste na determinação de uma seqüência de bateladas de produtos a serem bombeados a partir de cada área do sistema. Cada batelada está definida por: tipo de produto, volume a ser transportado, vazão de bombeamento e possíveis áreas de recebimento.

O PTD estudado restringe-se ao transporte de produtos em estado líquido na indústria do petróleo. Neste setor, tais produtos, como o petróleo, seus derivados e também o álcool, são transportados por oleodutos. Estes podem ser exclusivos para o uso de apenas um produto ou de vários produtos, e neste caso, são chamados de polidutos. Já os produtos em estado gasoso são transportados por gasodutos.

A principal diferença entre polidutos e gasodutos está na forma de como o balanço de massa do duto se comporta. Como os polidutos operam sempre pressurizados, ou seja, completamente cheios de líquido, o bombeamento de uma quantidade de líquido em uma extremidade do poliduto tem como conseqüência a saída, em sua outra extremidade, da mesma quantidade bombeada. Isto não é verdadeiro no caso de gasodutos (LIPORACE, 2005). Esse processo é que permite o escoamento dos fluidos dentro do duto, os produtos bombeados empurram os demais produtos dentro do duto fazendo-os chegar ao destino desejado.

Como o problema estudado restringe-se ao caso de redes de polidutos, daqui em diante polidutos, oleodutos ou simplesmente dutos serão utilizados como sinônimos.



## 2.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DUTOVIÁRIO

Os principais componentes de um sistema dutoviário são as áreas, os dutos, os produtos e os tanques de armazenagem localizados em cada área. A sua estrutura pode ser dividida nas seguintes categorias:

- Quanto ao número de dutos utilizados:
  - um único duto
  - vários dutos (rede de dutos, que pode ter uma estrutura de uma árvore, um grafo acíclico ou um grafo qualquer)
- Quanto à quantidade de produtos escoados:
  - um único produto
  - vários produtos (polidutos)
- Quanto à direção do fluxo no duto:
  - unidirecional
  - bidirecional
- Quanto à quantidade de áreas que bombeiam os produtos transportados em um mesmo duto:
  - uma única fonte
  - várias fontes
- Quanto à quantidade de áreas que recebem os produtos transportados por um mesmo duto:
  - um único destino
  - vários destinos

As áreas representam as refinarias, portos marítimos e terminais de distribuição. Em geral, existe mais de um tanque destinado a um mesmo produto em cada área, mas por motivo de simplificação eles podem ser tratados como um único tanque com o valor de sua capacidade de armazenamento agregada.

Os dutos conectam as áreas, podendo haver mais de um duto interligando as mesmas áreas. Em alguns casos todo o transporte de produtos deve ocorrer por meio de uma rota de fluxo pré-cadastrada. Uma rota de fluxo é um conjunto de dutos através dos qual um volume de produto é transportado de uma área de origem a uma área de destino, sem que precise necessariamente ser recebido e rebombeado pelas áreas intermediárias da rota.

O transporte dos produtos pelos dutos é feito sem nenhuma separação física entre eles e por isso a mistura e uma conseqüente contaminação de parte dos produtos é inevitável (SASIKUMAR *et al.*, 1997). Esta contaminação ocorre na região de interface entre os produtos transportados, e tende a se expandir conforme a distância percorrida pelos produtos no interior do duto aumenta. Isto pode obrigar o descarte de uma quantidade de produto pelo fato deste não atender mais às especificações pré-definidas (JOLY, 1999). Esta quantidade descartada deve ser destinada a um tanque próprio para ser reprocessada, mas caso os produtos sejam similares, como por exemplo, dois tipos de gasolina, a mistura pode ser colocada junto com o produto menos nobre (JITTAMAI, 2004).

Os produtos que serão transportados pelo sistema dutoviário, durante o horizonte de programação, são determinados previamente pelas ordens de serviço, que podem ser de dois tipos:

- Ordens que definem as quantidades produzidas e demandadas de cada produto em cada área.
- Ordens que definem um conjunto de bateladas de produtos, onde cada batelada está acompanhada da informação de sua área de origem e de destino.

Para o primeiro caso, as demandas podem ser atendidas por qualquer volume de produto contido no duto, independente de sua área de origem. Nos dutos que operam desta forma, os produtos são chamados de fungíveis ou intercambiáveis (LIPORACE, 2005).

## **2.3 RESTRIÇÕES DO PTD**

A seguir são listadas as principais restrições consideradas para esse problema, que são referentes às características e condições de operação na rede dutoviária:

- Atendimento à demanda: para os casos onde as ordens de serviço definem produção e demanda em cada área, os produtos devem estar disponíveis nos tanques de armazenamento para satisfazer as demandas da área. Para os casos onde as ordens de serviço fornecem um conjunto de bateladas, todas essas bateladas devem ser entregues aos seus destinos até o final do horizonte de programação. Para as duas situações, normalmente são estabelecidos prazos de entrega.

- Capacidade de armazenamento: os tanques possuem capacidades mínima e máxima de armazenamento de produtos.
- Estoques: pode ser desejável que os estoques nos tanques de armazenamento se mantenham mínimos ou em um nível pré-estabelecido.
- Bombeamento de produtos: as estações de bombeamento possuem limites mínimo e máximo para a vazão de produtos. Além disso, pode-se querer considerar o não acionamento das bombas nos horários de pico de consumo de energia elétrica, devido ao alto custo de bombeamento neste horário.
- Compatibilidade de produtos, também pode ser chamada de restrição de seqüenciamento: devido ao custo elevado para o tratamento de interfaces de alguns produtos, estes são proibidos de entrarem em contato durante seu transporte pelos dutos. Na prática pode-se resolver tal questão colocando-se pequenas quantidades de produtos compatíveis entre dois outros incompatíveis. Tal procedimento é conhecido como selo (SANGINETO, 2006).
- Tamanho das bateladas: também devido à contaminação na interface dos produtos, uma batelada deve ter um volume mínimo, caso contrário, todo o seu volume se misturaria aos produtos adjacentes.
- Manutenção programada: o duto pode não estar disponível durante certo período de tempo devido a operações de manutenção.
- Restrições locais: são particulares à operação de uma dada área. O complexo de conexões internas às áreas implica a impossibilidade de execução concomitante de certas operações. Por exemplo, algumas áreas podem ter restrições quanto ao número de operações simultâneas de bombeamento e/ou recebimento de determinados produtos.

## **2.4 CRITÉRIOS DE OTIMIZAÇÃO DO PTD**

A função objetivo para esse problema pode adotar diferentes perspectivas. Normalmente, o que se quer é minimizar os custos de operação do sistema ou parâmetros relacionados a esses custos, para o caso onde seja difícil estabelecê-los. Também podem ser minimizados parâmetros que causem a inviabilidade do problema. A seguir são listados os critérios de otimização freqüentemente incorporados pela função objetivo:

- Custos de bombeamento: dependem do duto e da distância até a área para onde se está bombeando o produto. Pode ser considerada também uma alteração nos custos nos horários de pico de utilização de energia elétrica.
- Custos associados à formação de interfaces, ou simplesmente custos de interface: são diferenciados para cada par de produtos que formam a interface. São devidos aos diferentes tratamentos aplicados às quantidades misturadas a fim de recuperar as especificações originais dos produtos que as geraram.
- Custo por atraso nas entregas dos produtos: se a programação admite atrasos nas entregas dos produtos, os custos associados a esses atrasos devem ser contabilizados.
- Custos de estocagem.
- Quantidade de produto bombeada durante o horizonte de programação, ou número de operações de bombeamento realizadas.
- Número total de interfaces formadas no sistema durante o horizonte de programação.
- Quantidade de produto que foi entregue com atraso.
- Quantidade de demanda não atendida.
- Quantidade de produto que violou o estoque máximo dos tanques de armazenamento.
- Tempo necessário para entrega das bateladas definidas pela ordem serviço.

## **2.5 POSSÍVEIS SIMPLIFICAÇÕES PARA O PTD**

Devido à sua natureza combinatória, este é um problema difícil de ser resolvido. De fato, o problema de transporte de derivados em uma rede com um único duto e com restrição de compatibilidade de produtos é NP-Completo (MILIDIÚ e LIPORACE, 2003).

Por esta razão, nem todas as restrições reais do problema são consideradas em sua formulação e muitas vezes o objetivo é encontrar apenas uma solução viável. Assim, as abordagens feitas para esse problema podem variar bastante, dependendo da estrutura do sistema dutoviário, das restrições, da função objetivo e das simplificações consideradas.

São apresentadas aqui as possíveis fontes de simplificação encontradas na literatura para esse problema:

- Simplificações de carácter topológico: a estrutura dutoviária mais simples que se pode considerar é a formada por apenas uma área de origem e uma área de destino conectadas por um único duto.
- Simplificações das dimensões do sistema dutoviário: número de dutos e áreas.
- Simplificações através da limitação do horizonte temporal a algumas horas ou dias.
- Simplificações de algumas condições de operação do duto: discretização de bateladas, cálculo de interfaces, cálculo de vazão nos diferentes dutos.
- Simplificações na seleção dos elementos relevantes que condicionam a busca da programação dutoviária ou na estimativa desses elementos relevantes.
- Simplificações derivadas da inexistência de seqüências de produtos incompatíveis.
- Simplificações no cálculo do tamanho e custo associado à contaminação de produtos na região de interface.

A construção das listas de restrições, de critérios de otimização e de fontes de simplificações para o PTD, foram baseadas no trabalho de SÁNCHEZ e MIER (2005). Neste artigo os autores também apresentam uma revisão bibliográfica para esse problema.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aqui são apresentadas as abordagens encontradas na literatura para o problema de transporte dutoviário. Esta revisão bibliográfica é uma versão ampliada e revisada do artigo de SOUZA FILHO *et al.* (2006). Os trabalhos estão divididos em seções organizadas segundo a estrutura do sistema dutoviário estudado (vide seção 2.2).

#### 3.1 UM POLIDUTO COM UMA FONTE E UM DESTINO

No problema abordado por SHAH (1996), o duto transporta alguns tipos de petróleo e o sistema (refinaria, porto e duto) foi decomposto em dois subproblemas que foram modelados usando Programação Linear Inteira Mista com discretização do horizonte de tempo em intervalos de igual duração. O primeiro subproblema determina como a refinaria é operada e como será abastecida pelo duto, com o objetivo de minimizar a quantidade de material que resta nos tanques após estes terem alimentado as unidades de destilação. O segundo determina como descarregar os navios e como os tanques do porto devem alimentar o duto, uma vez que o *schedule* do duto já foi estabelecido, com o objetivo de encontrar uma solução viável.

Em MAGATÃO *et al.* (2004), o oleoduto transporta diferentes tipos de commodities (gasolina, diesel, querosene, álcool, GLP, etc.) que podem ser bombeados tanto da refinaria para o porto, como do porto para a refinaria. O problema consiste em fazer a programação de transferência de produtos no oleoduto em um horizonte de tempo limitado, visando procedimentos de baixo custo operacional. O modelo foi formulado usando Programação Linear Inteira Mista com discretização uniforme do tempo e foram consideradas as disponibilidades de produtos, restrições de armazenamento, seqüências de bombeamento, determinação da taxa de fluxo, além de uma variedade de restrições operacionais.

Para lidar com problemas de larga escala encontrados no mundo real, os autores propõem uma estratégia de decomposição envolvendo dois modelos em Programação Linear Inteira Mista (um principal e um auxiliar), uma rotina auxiliar e um

banco de dados. O problema foi resolvido para algumas instâncias, resultando em melhorias significativas.

Em PINTO *et al.* (2000) são apresentadas várias aplicações reais de modelos de planejamento e *scheduling* em refinarias de petróleo. Os autores usaram Programação Linear Inteira Mista para lidar com várias subseções da refinaria, como as descritas pelos problemas a seguir:

- Problema de gerenciamento de estoque de petróleo para uma refinaria, que recebe vários tipos de óleo através de um duto. Para um dado horizonte de tempo, o número, tipo, horário de início e fim das bateladas de óleo são conhecidas a priori.
- Problema de produção e distribuição em uma refinaria com várias unidades de processamento que produzem diversos produtos que são armazenados em tanques intermediários e posteriormente enviados para os oleodutos como produtos finais ou misturados a outros produtos para obter o *blend* desejado. Os oleodutos estão ligados aos mercados consumidores.
- Problema de *scheduling* de produção de óleo combustível e asfalto com gerenciamento de operações que inclui mistura, armazenamento e distribuição. A produção de óleo combustível e asfalto é armazenada em tanques para produtos finais que depois serão distribuídos por dois dutos ou por caminhões.

Para todos esses problemas foram considerados custos de interface dos produtos.

### **3.2 UM POLIDUTO COM UMA FONTE E VÁRIOS DESTINOS**

Em HANE e RATLIFF (1995) o planejamento do transporte de produtos é feito para um conjunto de ordens de serviço cíclicas no tempo, onde cada batelada de produto tem o seu destino já estabelecido. O objetivo é encontrar o *schedule* dos produtos que minimize o número de vezes que o duto retoma à sua vazão normal após esta ter sido interrompida para fazer uma entrega de um produto. Esta foi a maneira encontrada pelos autores para tratar, de uma forma simplificada, os custos de bombeamento.

Não são incluídas restrições de armazenagem, de compatibilidade de produtos e nem prazos de entrega. Para a solução do problema foi construído um algoritmo

guloso e um algoritmo *branch-and-bound* (B&B). O algoritmo B&B utiliza o algoritmo guloso para obter uma boa solução viável inicial. Foram feitos testes computacionais para um conjunto de dados gerado aleatoriamente com base em um grande oleoduto de uma companhia americana. O B&B chegou à solução ótima para todos os problemas testados, não ultrapassando o tempo de execução de 2,5 minutos, para o caso onde o duto tinha 24 nós de destino. Já o algoritmo guloso obteve soluções satisfatórias em poucos segundos.

Em SASIKUMAR *et al.* (1997) são apontadas desvantagens dos modelos numéricos em relação a problemas de *scheduling*, sendo a mais crítica, a inability de se tolerar mudanças de especificação no sistema. As restrições e funções de avaliação podem mudar de tempos em tempos, ocasionando modificações significativas na estrutura do modelo. Isto aliado ao fato de que, em sistemas muito complexos, a viabilidade da solução é mais importante que a otimalidade, justificaram uma abordagem heurística para a resolução desse problema. Foi utilizada uma técnica de inteligência artificial denominada *beam search*, que gera uma boa programação mensal para o duto, e que leva em conta as exigências e disponibilidade de produtos, enquanto satisfaz uma grande variedade de restrições incluindo níveis de estoques permitidos e restrições de seqüenciamento.

O modelo faz uso de penalidades incorporadas à função heurística de avaliação, devido ao fato de algumas restrições serem mais importantes que outras, como por exemplo, o fornecimento dos produtos a todos os destinos, minimização de *shutdowns*, etc. O problema foi implementado e colocado em uso em um sistema dutoviário indiano.

REJOWSKI (2001) e REJOWSKI e PINTO (2003) estudaram um problema baseado no sistema OSBRA da Petrobras, onde uma refinaria (REPLAN) distribui gasolina, óleo diesel, GLP e querosene de aviação para cinco bases de distribuição, e desenvolveram dois modelos em Programação Linear Inteira Mista com representação discreta do tempo. O primeiro modelo divide o duto em lotes de mesma capacidade, enquanto o segundo admite lotes de capacidades diferentes.

Os modelos foram baseados inicialmente em programação disjuntiva e depois foram linearizados a partir da envoltória convexa. Em REJOWSKI (2001) foi utilizada também a formulação Big M para a linearização. Os modelos incorporam várias restrições de operação como balanço de massa, demanda de produtos, restrições de



capacidade e restrições de seqüenciamento de produtos. O objetivo é determinar, para um horizonte de tempo de três dias, as operações de bombeamento de novos produtos para o duto e as operações de carga e descarga dos tanques na refinaria e nos depósitos, de tal forma que os custos de estoque, bombeamento e de interface dos produtos sejam minimizados. Os modelos não encontraram soluções ótimas para os exemplos apresentados.

Com o objetivo de melhorar a eficiência desta formulação, REJOWSKI e PINTO (2004) propõem a introdução de restrições e cortes ao modelo de Programação Linear Inteira Mista original. As restrições são não intuitivas e impõem que um seguimento do duto só pode ficar inativo se estiver preenchido por apenas um produto e os cortes são baseados nas demandas e no estoque inicial dos segmentos do duto. Essas alterações foram testadas em três exemplos com diferentes demandas por produtos. A solução ótima foi alcançada em todos os exemplos apresentados e em alguns casos houve uma melhora significativa no tempo computacional.

Para resolver o problema de transporte dutoviário, CAFARO e CERDÁ (2004) utilizaram uma formulação de Programação Linear Inteira Mista com representação contínua do tempo. O modelo leva em conta restrições tais como balanço de massa, níveis permitidos nos tanques e restrições de seqüenciamento de produtos. Se necessário o modelo pode inserir selos para evitar interfaces não desejáveis. O objetivo do problema é minimizar os custos de estoque, de interface dos produtos e de bombeamento, podendo incluir custos mais altos de bombeamento nos períodos de pico. A solução ótima foi encontrada para os dois problemas apresentados, que foram extraídos do trabalho de REJOWSKI e PINTO (2003). Segundo os autores, a representação contínua do tempo permitiu uma descrição mais rigorosa do problema, uma severa redução das variáveis binárias, das restrições e do tempo computacional.

Em sua tese, JITTAMAI (2004) estudou o problema de *schedule* de produtos em um poliduto, sendo que estes devem ser entregues aos terminais de destino dentro de janelas de tempo. Os produtos a serem transportados são dados por um conjunto de ordens de serviços cíclicas, onde cada ordem de serviço corresponde a uma quantidade de produto que deve ser entregue dentro de uma janela de tempo a um determinado destino. Foi provado que este problema é NP-Completo.

Para a solução do problema foi desenvolvido um algoritmo de fluxo reverso, que consiste em se estabelecer a seqüência de entregas desejadas de produto e fazer

o caminho inverso no duto obtendo a seqüência de entrada. Como o objetivo do problema é minimizar sua inviabilidade, essa seqüência de entregas de produtos deve minimizar a violação das janelas de tempo. Não foram contempladas as restrições de compatibilidade de produtos e de capacidade de armazenamento nos tanques. Para os testes computacionais um conjunto de instâncias foi gerado aleatoriamente com base em um grande oleoduto de uma companhia americana. O algoritmo forneceu bons resultados quando comparados às soluções ótimas dessas instâncias (obtidas por busca exaustiva).

O trabalho também traz um estudo preliminar para o caso onde o poliduto tem várias fontes. O algoritmo de fluxo reverso é adaptado para esse problema e também é testado com instâncias geradas aleatoriamente.

SANGINETO (2006) utilizou algoritmos genéticos para abordar o problema de transporte dutoviário do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA) que transporta cinco tipos de produtos, de uma refinaria (REPLAN) a cinco terminais. Foram consideradas restrições de compatibilidade de produtos, de capacidade de armazenamento, atendimento a demanda e estocagem (é desejável manter um estoque baixo nos tanques), além de custos de bombeamento, interface e estocagem. As restrições foram incorporadas à função de avaliação através do método de minimização de energia.

O algoritmo foi testado e comparado a uma programação real fornecida pela Petrobrás, com horizonte de planejamento de uma semana, discretizado em períodos de uma hora. Os resultados obtidos foram satisfatórios, correspondendo aos objetivos de melhorar o atendimento da demanda, reduzir interfaces e custos de bombeamento, o pior resultado ocorreu no estoque médio, devido ao alto número de faltas de estoque na programação real.

### **3.3 UMA REDE DE POLIDUTOS QUE INTERLIGA DIVERSAS ÁREAS DE BOMBEAMENTO E RECEBIMENTO**

O sistema dutoviário considerado nesta seção interliga diversas áreas, sendo que cada duto possui apenas uma fonte e um destino.

A dissertação de CAMPONOVARA (1995) trata do problema de transporte de derivados de petróleo (gasolina, diesel, querosene de aviação, nafta, GLP, álcool anidro e álcool hidratado) por uma rede de dutos bidirecionais, baseado na rede de

claros da Petrobras. Inicialmente foi elaborado um modelo de Programação Matemática, baseado no Modelo de Fluxo em Rede com Multiperíodos, para o problema. Mas devido à dificuldade em se obter soluções para o modelo, a alternativa escolhida pelo autor, foi a de usar uma abordagem heurística. Assim, o problema foi decomposto em 3 problemas menores: a geração das operações de transporte (*jobs*); a escolha da rota entre a base produtora e a consumidora de cada *job*; e a programação das operações (escalonamento). Esses componentes foram integrados em um algoritmo de Times Assíncrono (*A-Team*), que pode ser visto como uma organização de software descentralizada para cooperação de algoritmos.

O modelo heurístico obedece às restrições de demanda, restrições de capacidade e restrições de seqüenciamento de produtos e tem como objetivo encontrar uma solução viável. Com isso, a restrição de atendimento às demandas torna-se o objetivo e o modelo procura minimizar a inviabilidade. As rotas são escolhidas dentre um conjunto pré-estabelecido com base na experiência da Petrobras. Para os exemplos apresentados não foi encontrada nenhuma solução que atendesse à demanda dos mercados consumidores durante o horizonte de tempo de 120 horas, houve desabastecimento a partir de 100 horas e de 80 horas.

Em CRANE *et al.* (1999), os autores utilizam o algoritmo genético para abordar uma versão bem simplificada do problema de transporte em rede de dutos. É considerada uma rede de dutos com a topologia de uma árvore direcionada com apenas 8 terminais e dois produtos. Os volumes dos tanques de armazenagem em cada terminal são discretizados, podendo assumir somente os valores 0, 1 ou 2. Não são consideradas restrições de compatibilidade de produtos, as bateladas de produtos têm volume unitário e cada trecho de duto comporta apenas uma batelada.

A estratégia selecionada para usar o algoritmo genético é utilizar uma representação binária para o cromossomo, onde cada gene do cromossomo irá estabelecer um possível estado para cada terminal e uma ação a ser tomada dentro de um conjunto de ações pré-estabelecido. O objetivo é atingir as metas pré-estabelecidas para o nível de cada tanque de armazenagem de todos os terminais.

O algoritmo foi aplicado a uma pequena instância e chegou à solução ótima. Porém, dado que o comprimento do cromossomo é proporcional ao número de estados possíveis para cada terminal, para um problema do mundo real o tamanho do cromossomo iria crescer exponencialmente, impossibilitando o uso deste método.

O trabalho de MILIDIÚ *et al.* (2001) descreve um método heurístico do tipo GRASP para resolver o problema de transporte de derivados de petróleo em rede de dutos, apresentado por CAMPONOGARA (1995). O método desenvolvido utiliza as soluções obtidas pela heurística *A-Teams*, desenvolvida por esse autor, como pontos de partida para buscas locais. Estas buscas locais obtêm soluções refinadas dentre as quais a de menor custo é retornada pelo método. O custo da solução representa a soma dos volumes totais de produto faltando ou transbordando em cada hora de simulação. Os autores resolveram a mesma instância apresentada por CAMPONOGARA (1995), com e sem o método GRASP para fazer a busca local. Foi obtida solução viável apenas com o uso do método GRASP.

BRACONI (2002) também propôs uma abordagem heurística para encontrar soluções viáveis para o problema de transporte de derivados em dutos bidirecionais. Essa heurística é dividida em duas etapas. Na primeira, é obtido o planejamento dos produtos a serem transportados com suas respectivas rotas e volumes. Nesta etapa é resolvido um problema de programação linear. Este problema foi derivado de uma relaxação da formulação original do problema como um problema de programação linear mista inteira, que teve como base o modelo de fluxo em rede com multiperíodos. Na segunda etapa é utilizada uma heurística para definir o escalonamento dos produtos de forma que sejam respeitadas as restrições de seqüenciamento de produtos e de capacidade de armazenamento dos tanques, entre outras restrições que asseguram o funcionamento correto dos dutos. São realizadas diversas iterações entre as etapas da heurística até que seja encontrada uma solução viável para o problema.

Para testar a heurística foram utilizadas cinco instâncias baseadas na rede de Claros e Escuros da Petrobras. Foram encontradas soluções viáveis para todas as instâncias, com um horizonte de programação variando de 5 a 30 dias e com tempos computacionais inferiores a 20 minutos.

DE LA CRUZ *et al.* (2003; 2005) abordam a problemática de rede de dutos bidirecionais mediante algoritmos evolucionários multiobjetivos (MOEA) e programação matemática (MILP), obtendo resultados similares com ambas as técnicas. Em DE LA CRUZ *et al.* (2005) os autores ainda implementaram um método híbrido, onde os dois métodos, MOEA e MILP, são executados em paralelo, e as soluções obtidas pelo MILP são usadas como soluções imigrantes para o algoritmo evolucionário.

O uso dessa técnica híbrida permite obtenção de soluções viáveis em um menor tempo de execução computacional. Tais resultados foram obtidos para uma rede que transporta quatro tipos de produtos de dois terminais fontes para três terminais de destino, passando por dois terminais intermediários. Dos dutos dessa rede, apenas um é bidirecional.

São considerados prazos de entrega para as demandas e restrições de capacidade e de colisão nos dutos bidirecionais. No algoritmo evolucionário, algumas destas restrições são penalizadas na função objetivo, enquanto outras exigem uma reparação da solução. Embora não sejam consideradas restrições de compatibilidade de produtos, um dos objetivos é reduzir o número de interfaces de produtos dentro de cada duto. O outro objetivo é reduzir o tempo final para realizar a entrega de todas as demandas.

O problema de transporte por dutos (PTD) tratado por PESSOA (2003) não considera as restrições de seqüenciamento de produtos e de capacidade de armazenamento. É dado um conjunto de ordens de serviço com a quantidade de produto a ser transportada (dado em bateladas unitárias) e com destino já definido para cada ordem. É definido também um subconjunto de ordens proteláveis, que servirão para empurrar as outras ordens aos seus destinos. Foi provado que esse problema é NP-Difícil, mesmo que o grafo que representa a rede de dutos seja acíclico.

Foi feita uma simplificação do problema, PTDS, onde todas as bateladas proteláveis são armazenadas em nós no estado inicial. Isto permitiu o desenvolvimento de um algoritmo polinomial BPA (Batch-to-Pipe Assignment) capaz de obter soluções viáveis para qualquer grafo com o objetivo de minimizar uma função de custo de operações. No caso do grafo ser acíclico, essa solução é ótima.

Para o caso em que se queira minimizar o *makespan* no PTDS foi demonstrado que não existe algoritmo polinomial para a solução do problema, mesmo que o grafo seja acíclico e planar. Podendo o algoritmo BPA fornecer uma solução m-aproximada, onde m é número de dutos da rede, quando o grafo for acíclico.

Como o objetivo principal do trabalho foi encontrar resultados teóricos que permitam um maior entendimento da estrutura combinatória inerente ao problema, nenhuma instância foi resolvida. Esses resultados também são encontrados em MILIDIÚ *et al.* (2002) e MILIDIÚ, PESSOA e LABER (2003).

Em MÁ S e PINTO (2003) foi estudado o problema de *scheduling* de curto prazo petróleo em complexos contendo portos, refinarias e uma infra-estrutura de oleodutos unidirecionais capaz de transferir petróleo dos portos para as refinarias. Os portos contêm píeres que recebem petroleiros para descarga, tanques de armazenagem e uma rede de tubulações que os interconectam. As refinarias possuem sua própria infra-estrutura de armazenagem. O problema também considera a armazenagem intermediária em subestações.

Devido à sua complexidade, o problema foi formulado por meio de dois modelos distintos de Programação Linear Inteira Mista (MILP) de tempo contínuo com base em eventos, que giram em torno dos elementos da estrutura física do sistema. O primeiro modelo engloba a estrutura do porto e considera uma representação agregada dos oleodutos e armazenagem intermediária. A sua solução envolve a alocação de petroleiros a píeres assim como operações de descarga de petroleiros e carga de oleodutos. Estas informações são utilizadas pelo segundo modelo que representa, de forma detalhada, a infra-estrutura das subestações que contêm oleodutos e tanques intermediários. As variáveis de decisão, neste caso, envolvem operações de carga e descarga de tanques e oleodutos.

Os autores apresentaram um exemplo de *scheduling* de óleo cru para um complexo contendo um porto, quatro refinarias e duas subestações, treze petroleiros, quatro píeres e quatorze tipos de petróleo. Essa instância foi modelada usando uma vez o modelo de porto e três vezes o modelo de subestação, que foram resolvidos em cascata, obedecendo à direção do porto para as refinarias. Foi encontrada uma solução viável para o problema em tempos computacionais razoáveis. Neste trabalho algumas interfaces indesejáveis de produtos nos oleodutos foram penalizadas através da introdução de uma parcela de custos de interface na função objetivo dos modelos.

NEIRO e PINTO (2004) propõem um modelo de otimização para o planejamento de uma cadeia de suprimentos de petróleo que compreende terminais de petróleo, refinarias e centros de distribuição e uma rede de dutos unidirecionais para suprimento de petróleo e outra para distribuição de produtos. A distribuição através dos dutos é definida dos terminais de petróleo para as refinarias e das refinarias para terminais intermediários ou para centros de distribuição. Foi feito um estudo de caso para um complexo contendo quatro refinarias e cinco terminais (inclui terminais de petróleo e centros de distribuição).

Todo esse complexo foi modelado a partir de três estruturas básicas que representam unidades de processamento, tanques e dutos. Essas estruturas compõem o conjunto de restrições do problema de otimização de toda a cadeia, que corresponde a um problema de Programação Não Linear Inteiro Misto de grande escala. Foi encontrada solução para o exemplo apresentado. No entanto, a abordagem para a estrutura de dutos é muito simplificada e não leva em consideração as perdas ocorridas nas interfaces dos produtos.

Em LIPORACE (2005), o problema de transporte em oleodutos serviu como inspiração para a elaboração de um novo domínio para o desenvolvimento de planejadores de propósito geral. Este domínio, Pipesworld, foi especificado em PDDL<sup>1</sup> e incorporado ao *benchmark* oficial da “4th International Planner Competition”. A primeira versão do Pipesworld também pode ser encontrada em MILIDIÚ, LIPORACE e LUCENA (2003).

O autor também demonstra que problemas de transporte de derivados em uma rede com um único duto e com restrições de seqüenciamento de produtos é NP-Completo. O que implica que esses problemas com restrições de seqüenciamento são difíceis para qualquer topologia de rede, com dutos unidirecionais ou bidirecionais. Essa mesma demonstração também é apresentada em MILIDIÚ e LIPORACE (2003).

A contribuição maior deste trabalho é uma estrutura de software de código livre, PLANSIM, que conta com simuladores a evento discreto, estratégias de busca e buscas heurísticas (com técnicas de inteligência artificial) para facilitar a construção de planejadores especializados. Utilizando essa ferramenta, foi construído o PLUMBER, um aplicativo voltado para a solução do problema de planejamento de transporte em redes dutoviárias. Foram consideradas restrições de seqüenciamento de produtos e de capacidade de armazenamento, e as bateladas não foram definidas a priori. Foi resolvida uma instância para a rede de Claros da Petrobras com 13 áreas, 25 dutos e 16 produtos, porém com um número bem limitado de demandas. O objetivo é atender às demandas no menor número de operações possível.

Em sua dissertação de mestrado, MARCELLINO (2006) trata o problema de transporte de derivados de petróleo, em uma rede de dutos bidirecionais, como um problema de planejamento para o período de uma semana, com o objetivo mais abrangente de encontrar os fluxos de produtos em cada oleoduto durante todo o

---

<sup>1</sup>*Planning Domain Definition Language*: é uma linguagem utilizada como padrão pela comunidade de planejamento em inteligência artificial.

horizonte de tempo, e os estoques de produtos em cada área ao final deste período de tempo.

O trabalho merece destaque por ser o primeiro a levar em conta a realidade atual vivida pela indústria do petróleo no Brasil, que aponta para uma tendência de independência crescente entre os envolvidos com a distribuição dutoviária. Este novo cenário exigirá maior segurança e privacidade da informação trocada entre os participantes, impossibilitando um processo de solução centralizado como o atual. Sendo assim, o problema é modelado como um Problema de Satisfação de Restrições Distribuído com Otimização, onde as variáveis e restrições são distribuídas entre múltiplos agentes autônomos, que representam diferentes terminais e refinarias, de forma a manter a privacidade das informações associadas a cada um deles. Para a solução foi utilizado o algoritmo Adopt (Assíncorno Distribuído com Otimização).

Cinco instâncias foram geradas aleatoriamente com base em dados históricos reais da Rede de Claros da Transpetro. Cada instância foi ajustada em vários níveis de complexidade onde eram variados os números de dutos, bases e produtos transportados pela rede. A solução ótima foi obtida para vários níveis de complexidade das instâncias.

Um resumo da literatura existente sobre o problema de transporte dutoviário em sistemas compostos por apenas um duto é exibido na Tabela 3.1, e sobre sistemas compostos de redes de dutos na Tabela 3.2.



**Tabela 3.1: Resumo da literatura existente em relação ao problema de transporte dutoviário em sistemas compostos de apenas um duto**

<b>Autor(es)</b>	<b>Nº de fontes</b>	<b>Nº de destinos</b>	<b>Técnica utilizada</b>	<b>Horizonte de tempo e Solução alcançada</b>
<b>Shah</b> (1996)	uma	um	<b>PLIM<sup>1</sup></b> (com discretização uniforme do horizonte de tempo)	1 mês Solução viável
<b>Magatão <i>et al.</i></b> (2004)	uma	um	<b>PLIM<sup>1</sup></b> (com discretização uniforme do horizonte de tempo)	120 horas Solução ótima
<b>Hane e Ratliff</b> (1995)	uma	vários	<b>Algoritmo Guloso + Branch-and-Bound</b>	-- Solução ótima
<b>Sasikumar <i>et al.</i></b> (1997)	uma	vários	<b>Beam Search</b> (Inteligência Artificial)	1 mês Solução viável
<b>Rejowski</b> (2001 e 2003)	uma	vários	<b>PLIM<sup>1</sup></b> (com discretização uniforme do horizonte de tempo)	75 horas Solução viável
<b>Rejowski e Pinto</b> (2004)	uma	vários	<b>PLIM<sup>1</sup></b> (com discretização uniforme do horizonte de tempo)	75 horas Solução ótima
<b>Cafaro e Cerdá</b> (2004)	uma	vários	<b>PLIM<sup>1</sup></b> (com representação contínua de tempo)	75 horas Solução ótima
<b>Jittamai</b> (2004)	uma / várias	vários	<b>Heurística de Fluxo Reverso</b>	-- Solução viável
<b>Sangineto</b> (2006)	uma	vários	<b>Algoritmo Genético</b>	168 horas Solução viável

<sup>1</sup> Programação Linear Inteira Mista

**Tabela 3.2: Resumo da literatura existente em relação ao problema de transporte em rede dutoviária**

<b>Autor(es)</b>	<b>Nº de áreas de bombeamento<sup>5</sup></b>	<b>Nº de áreas de recebimento<sup>5</sup></b>	<b>Técnica utilizada</b>	<b>Horizonte de tempo e Solução alcançada</b>
<b>Camponogara (1995)</b>	várias	várias	Heurística <b>A-Team</b> <sup>1</sup>	120 h Solução Inviável
<b>Crane et al. (1999)</b>	uma	várias	<b>Algoritmo Genético</b>	-- Solução Viável
<b>Milidiú et al. (2001)</b>	várias	várias	<b>GRASP</b>	120 h Solução viável
<b>Braconi (2002)</b>	várias	várias	<b>PL</b> <sup>2</sup> (com discretização do horizonte de tempo) + <b>Heurística</b>	5 – 30 dias Solução viável
<b>De la Cruz et al. (2003 e 2005)</b>	várias	várias	<b>Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo e PLIM</b> <sup>3</sup>	65 períodos de tempo Solução viável
<b>Pessoa (2003)</b>	várias	várias	<b>Heurística</b>	Solução viável / ótima (resultados teóricos)
<b>Más e Pinto (2003)</b>	uma	várias	<b>PLIM</b> <sup>3</sup> de tempo contínuo baseado em eventos	168 horas Solução viável
<b>Neiro e Pinto (2004)</b>	várias	várias	<b>PNLIM</b> <sup>4</sup> (com discretização do horizonte de tempo)	2 períodos de tempo Solução ótima local
<b>Liporace (2005)</b>	várias	várias	<b>Busca Heurísticas (Inteligência Artificial) + Simuladores</b>	-- Solução viável
<b>Marcellino (2006)</b>	várias	várias	<b>Problema de Satisfação de Restrições Distribuído com Otimização</b>	1 semana Soluções viáveis/ótimas

<sup>1</sup> Times Assíncrono

<sup>2</sup> Programação Linear

<sup>3</sup> Programação Linear Inteira Mista

<sup>4</sup> Programação Não Linear Inteira Mista

<sup>5</sup> A rede dutoviária considerada nestes trabalhos interliga diversas áreas, sendo que cada duto possui apenas uma fonte e um destino.

### 3.4 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo do PTD é recente e ainda não dispõe de uma literatura extensa. Entretanto, os últimos anos atestam um aumento na literatura do gênero, fruto da importância que a eficiência no transporte de petróleo e seus derivados adquiriu. A maioria dos trabalhos encontrados procura desenvolver ferramentas computacionais para encontrar uma solução para o problema, mas também existem trabalhos com interesse em se conseguir resultados teóricos sobre o problema, como os de MILIDIÚ e LIPORACE (2003) e PESSOA (2003).

A revisão bibliográfica mostra que, para trabalhos que abordam o transporte de produtos em apenas um duto, os autores se dividem entre o uso de programação matemática (mais especificamente, Programação Linear Inteira Mista) e de heurísticas para encontrar soluções para o problema (vide Tabela 3.1).

O uso de técnicas exatas implica na necessidade de serem feitas muitas simplificações na modelagem do problema, geralmente obtendo soluções ótimas apenas para problemas de menor porte, como é o caso dos trabalhos de MAGATÃO *et al.* (2004), REJOWSKI e PINTO (2004) e CAFARO e CERDÁ (2004) onde o horizonte de tempo de programação é de 120h para o primeiro trabalho e 75h para os outros dois. E o trabalho de NEIRO e PINTO (2004) que trata do problema em uma rede de dutos e consegue um solução ótima local para apenas 2 períodos de tempo.

O inconveniente dos métodos exatos é que eles demandam uma quantidade significativa de esforço computacional em problemas de otimização combinatória, que é o caso do problema de transporte dutoviário. Assim, o tipo de representação do horizonte de tempo constitui um ponto crucial. A literatura atual tem dado preferência pela representação discreta, entretanto a representação contínua, como a utilizada por MÁZ e PINTO (2003) e CAFARO e CERDÁ (2004), constitui uma alternativa potencial da qual ainda se fez pouco uso. Com este tipo de representação do tempo, CAFARO e CERDÁ (2004) resolvem otimamente os problemas apresentados por REJOWSKI e PINTO (2003) em menos de um minuto, enquanto estes, levaram algumas horas para encontrar apenas uma solução viável.

Para o caso de transporte de produtos em uma rede de dutos, a maioria dos autores utiliza métodos heurísticos (vide Tabela 3.2). Dentre as heurísticas utilizadas estão, Grasp, Algoritmos Genéticos, Algoritmos Evolucionários, heurísticas baseadas em Inteligência Artificial e outras desenvolvidas especificamente para a solução do

problema estudado. Além disso, alguns autores ainda fazem uso de heurísticas combinadas a técnicas de programação matemática (BRACONI, 2002; DE LA CRUZ *et al.*, 2003; 2005).

Com a utilização da Programação Linear em conjunto com uma heurística desenvolvida para o problema, BRACONI (2002) obtém em poucos minutos uma solução viável para o mesmo problema apresentado por CAMPONOGARA (1995), enquanto este não obteve solução viável mesmo após 9h de processamento utilizando Times Assíncronos. MILIDIÚ *et al.* (2001), usando Grasp, necessitou de 57h para chegar a uma solução viável para o mesmo problema. Embora estes dois últimos autores não tenham conseguido obter uma solução viável, ou obtê-la de maneira ineficiente, o que se percebe nos demais trabalhos é que as heurísticas têm se mostrado uma ferramenta de grande valia, permitindo a obtenção de soluções viáveis em tempos computacionais aceitáveis (menores do que 1 hora e, em alguns casos, em poucos segundos).

O uso de métodos heurísticos pela maioria dos autores que abordam o problema de transporte em uma rede dutoviária se deve ao fato destes problemas serem mais complexos do que aqueles com transporte de produtos em apenas um duto. Esta maior complexidade dificulta a obtenção de soluções ótimas em um tempo computacional razoável e também faz com que as abordagens para esses problemas admitam mais simplificações do que para problemas de transporte em apenas um oleoduto.

Assim, com base na experiência destes autores, foi escolhido um método heurístico para a obtenção de uma solução viável para o PTD abordado neste trabalho, que trata do transporte de derivados de petróleo em uma rede de dutos, a Rede de Escuros operada pela Transpetro. A heurística utilizada foi algoritmos genéticos.

## **4 PROBLEMA DE TRANSPORTE NA REDE DE ESCUROS (PTRE)**

O Problema de Transporte na Rede de Escuros (PTRE) é o PTD específico da Rede de Escuros do estado de São Paulo. Como já foi dito anteriormente, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional que gere uma programação adequada de transferência de derivados de petróleo nesta rede. Sendo assim, este capítulo visa apresentar seus principais aspectos e características operacionais.

### **4.1 DESCRIÇÃO DA REDE**

A Rede de Escuros é parte integrante do sistema dutoviário do estado de São Paulo, que é operado pela Transpetro. Este sistema possui uma complexa malha de oleodutos que interliga quatro refinarias a diversos terminais de distribuição.

As refinarias e terminais (áreas) são responsáveis pela produção e distribuição dos derivados de petróleo aos mercados consumidores. As campanhas de produção das refinarias e de consumo dos mercados consumidores são traduzidas em termos de valores estimados de produção e demanda em cada área da rede. Sendo assim, para cada produto derivado do petróleo, em uma determinada área, são apresentadas capacidades de armazenamento, produção e demanda dentro do período de tempo considerado. As áreas não são auto-suficientes no suprimento de seus mercados locais, isto implica na necessidade de transporte entre as mesmas, o que é feito, em sua grande maioria, através do sistema dutoviário. Este transporte deve repor as perdas dos estoques das áreas, evitando a falta de produto, e escoar a produção estocada nas refinarias, evitando exceder as capacidades dos tanques (BRACONI, 2002).

Os produtos são transportados por três malhas de oleodutos distintas que operam de forma independente. Uma delas é a Rede de Escuros que é responsável pelo transporte dos derivados pesados do petróleo, como o óleo combustível, óleo combustível marítimo (bunker), gásóleo para craqueamento e resíduo atmosférico, que

são produtos com coloração escura e alta viscosidade. As outras duas são a Rede de Claros, que transporta produtos de alto valor agregado tais como o álcool etílico e os derivados leves do petróleo (gasolina, nafta, diesel, gás liquefeito de petróleo (GLP) e querosene de aviação), e a rede responsável pela distribuição do petróleo para as refinarias do estado.

A Rede de Claros é a que possui a estrutura mais complexa do sistema, com 28 dutos interligando 7 terminais de distribuição e as 4 refinarias. As outras duas malhas são menores e a suas estruturas podem ser vistas na Figura 4.1, com a Rede de Escuros em destaque.

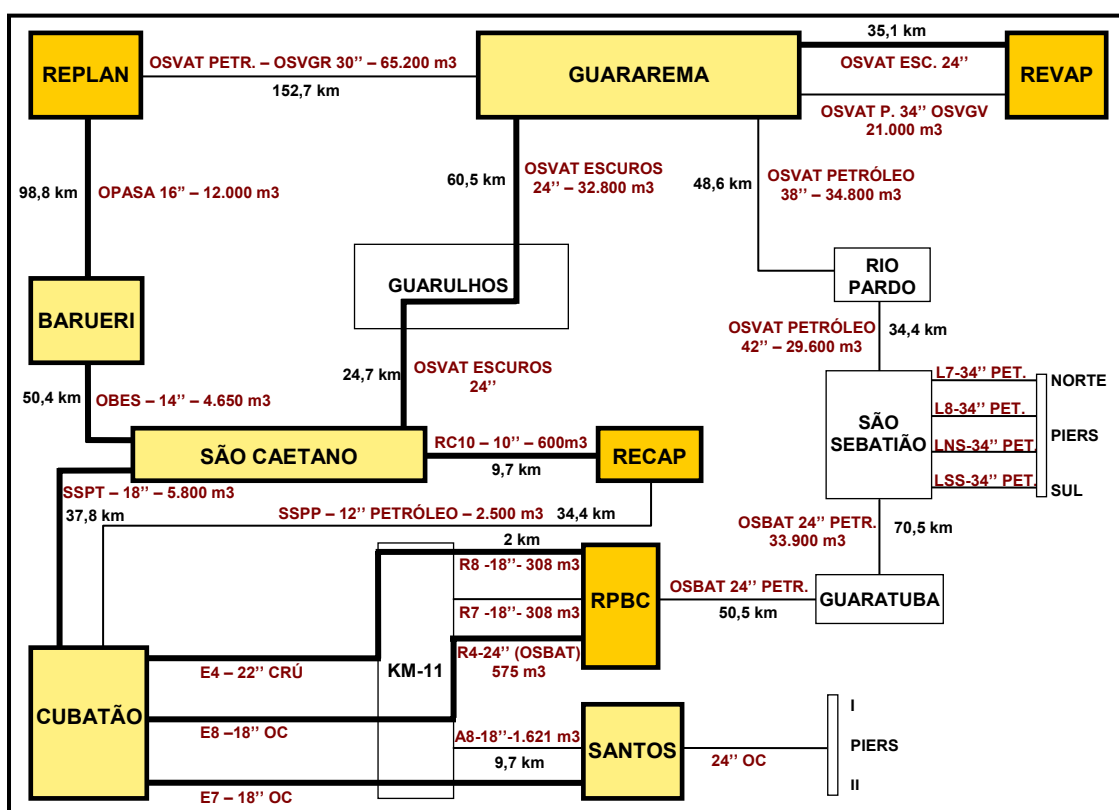


Figura 4.1: Esquema da rede de distribuição de petróleo e derivados escuros localizada no estado de São Paulo. Em destaque, a Rede de Escuros.

Quanto à sua estrutura, a Rede de Escuros pode ser classificada (vide seção 2.2) como uma rede de polidutos bidirecionais, onde cada duto possui apenas uma fonte e um destino.

A Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 contêm a relação dos terminais, refinarias e dutos que compõem a Rede de Escuros, incluindo a extensão e capacidade volumétrica de

cada duto. A Tabela 4.3 contém os produtos transportados, que são no total de 9 produtos, de 6 tipos distintos.

**Tabela 4.1: Terminais e refinarias da Rede de Escuros**

<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>	<b>Localidade</b>
CUBATÃO	Terminal Cubatão	Cubatão
SANTOS	Terminal Santos	Santos
S.CAETANO	Terminal São Caetano	São Caetano do Sul
BARUERI	Terminal Barueri	Barueri
GUARAREMA	Terminal Guararema	Guararema
RPBC	Refinaria Presidente Bernardes	Cubatão
RECAP	Refinaria de Capuava	Mauá
REPLAN	Refinaria de Paulínea	Paulínea
REVAP	Refinaria Henrique Lages	São José dos Campos

**Tabela 4.2: Extensão e capacidade dos dutos da Rede de Escuros**

<b>Nome do duto</b>	<b>Origem/Destino</b>	<b>Extensão (km)</b>	<b>Volume (m3)</b>
OPASA 16	REPLAN/BARUERI	98,8	12.000
OBES	BARUERI/S.CAETANO	50,4	4.650
OSVAT-OC 24	REVAP/S.CAETANO	120,3	32.800
SSPT	CUBATÃO /S.CAETANO	37,9	5.800
A8	CUBATÃO/SANTOS	9,7	1.700
R7	RPBC/CUBATÃO	2,0	300
R8	RPBC/CUBATÃO	2,0	300
RC10	RECAP/S.CAETANO	9,7	600

**Tabela 4.3: Produtos transportados pela Rede de Escuros**

<b>Nome do produto</b>
Gasóleo para craqueamento
Óleo leve de reciclo - LCO (Light Cycle Oil)
Resíduo Atmosférico A e B
Óleo combustível A e B
Óleo combustível marítimo (bunker)
Óleo combustível exportação A e B

## **4.2 CARACTERÍSTICAS DA MOVIMENTAÇÃO DE PRODUTOS**

Os polidutos operam sempre pressurizados, ou seja, completamente cheios de líquido. Assim, o bombeamento de uma quantidade de líquido em uma extremidade do poliduto tem como consequência a saída, em sua outra extremidade, da mesma quantidade bombeada.

### **4.2.1 Rotas de fluxo**

Todo transporte de produtos deve ser feito por meio de uma rota de fluxo cadastrada. Uma rota de fluxo é uma seqüência de um ou mais dutos que são alinhados em cada área intermediária, de forma que o fluxo proveniente de um deles é repassado diretamente ao seu sucessor (operação de passagem). A vazão de uma rota de fluxo é definida em função dos valores de vazão associados a cada duto que compõe a rota. Vale ressaltar ainda que, se uma determinada rota  $r$  está ativa em determinado instante, ou seja, se neste instante ocorre transporte de produto através da mesma, então nenhuma outra rota que utilize algum dos dutos que compõem  $r$  poderá estar ativa.

### **4.2.2 Operações de movimentação**

Além do bombeamento, recebimento e passagem, existem ainda outras duas operações de movimentação de produtos que podem ser realizadas pelas áreas da rede. Uma é a operação pulmão, que é a operação de recebimento de produto em um tanque, simultaneamente a uma operação de envio de produto a partir deste mesmo tanque, com vazão igual ou não àquela do recebimento. A outra é a operação de injeção, que ocorre quando uma batelada que está sendo transportada por um duto principal recebe um volume adicional de produto através de um duto secundário, aumentando assim o seu tamanho e sua vazão.

### **4.2.3 Reversão em dutos**

Como os dutos da Rede de Escuros são bidirecionais, existe a possibilidade de reversão de sentido de escoamento do produto. A operação que altera o sentido de escoamento no duto é chamada de reversão e é ilustrada na Figura 4.2. Supondo que inicialmente os produtos estão sendo transportados da área 2 para a área 1, a operação de reversão consiste em preencher todo o duto com óleo leve de reciclo (LCO), de forma a empurrar todos os produtos para a área 1. Logo após, o sentido de



escoamento é alterado e os produtos passam a ser bombeados da área 1 para a área 2 e todo o óleo leve de reciclo que estava no duto retorna para a área de 2. Uma observação é que os dutos podem apresentar vazões diferentes para cada sentido.

O número de reversões nos dutos da rede é pequeno, e normalmente não ultrapassam duas reversões por duto no período de um mês.

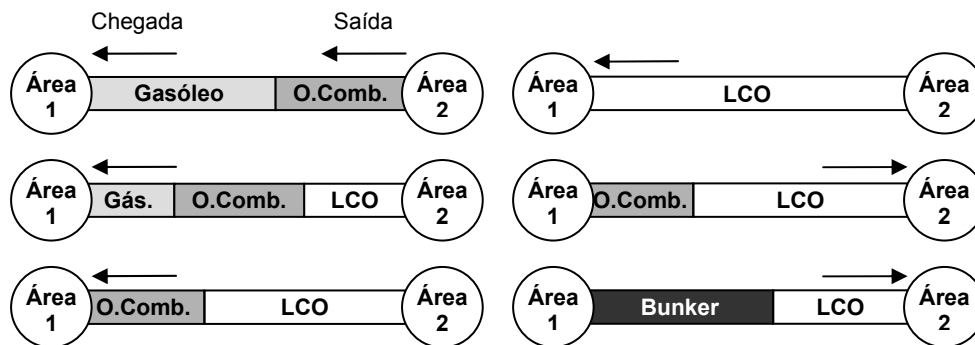


Figura 4.2: Operação de reversão em dutos

#### 4.2.4 Mistura em Tanque e em Duto

O óleo combustível de exportação é feito através da mistura de óleo combustível e diluente. Esta mistura pode ser realizada em tanque ou em duto. No primeiro caso, o óleo combustível e o diluente são enviados na proporção correta para um tanque; no segundo, são enviados simultaneamente o óleo combustível e o diluente, na proporção correta, em um mesmo duto de transporte.

### 4.3 RESTRIÇÕES DO PTRE

As restrições listadas a seguir, são as mesmas do PTD vistas na seção 2.3. Porém, são acrescentados mais alguns dados pertinentes ao problema em questão:

- Atendimento à demanda: neste problema os produtos são fungíveis, ou seja, qualquer volume de determinado produto contido na rede, independente de sua área de origem, pode abastecer os tanques de armazenamento deste produto para satisfazer as demandas das áreas.
- Capacidade de armazenamento dos tanques: os tanques comportam um determinado volume de produto, no entanto, eles devem ser operados dentro de um limite mínimo e máximo, que em geral são, respectivamente, maiores do que zero e menores do que o volume total do tanque.

- Estoques: é desejável que ao final do horizonte de programação os estoques de produto em cada área da rede estejam nos níveis pré-estabelecidos (estoques meta).
- Limites de vazão: o transporte de produtos em cada rota de fluxo deve operar dentro dos limites de vazão estabelecidos.
- Compatibilidade de produtos: se for necessário transportar em seqüência dois produtos incompatíveis, é feito o uso de selos.
- Tamanho das bateladas: é desejável que as bateladas sejam compostas por todo o volume de um tanque, que varia de acordo com a área a que pertence e com o produto que armazena.
- Manutenção programada: períodos de tempo pré-definidos durante os quais um duto, ou os tanques de armazenagem de um dado produto ficam indisponíveis para uso em razão de manutenção.
- Locais: determinadas áreas tem limitações quanto ao número de operações simultâneas de bombeamento e/ou recebimento de determinados produtos.
- Aquecimento: na Rede de Escuras, os produtos transportados são muito viscosos e precisam ser aquecidos nas áreas para poderem escoar pelo duto. Ficar muito tempo parado dentro do duto causa o esfriamento e, conseqüentemente, a solidificação do produto, o que pode implicar perda do duto. Então é preciso respeitar os limites de tempo de parada em cada duto. Dos produtos transportados, apenas o LCO que é um tipo de diluente, não precisa ser aquecido. Por isso, caso um duto tenha que ficar inoperante por um tempo superior ao permitido, ele deve ser preenchido com esse produto.

Na Rede de Escuras não são consideradas restrições de funcionamento das bombas nos horários de pico de consumo de energia elétrica devido à restrição de aquecimento.

As restrições de atendimento à demanda e de estoques são passíveis de serem violadas, no entanto esta violação deve ser a menor possível.

#### **4.4 OBJETIVO E SOLUÇÃO ATUAL PARA O PTRE**

O objetivo do problema é determinar como operar a rede de oleodutos durante um determinado horizonte de tempo, satisfazendo as restrições operacionais descritas acima e visando o atendimento à demanda e aos estoques meta, além da redução dos

custos com o transporte, estocagem e interface dos produtos. O custo de transporte é proporcional à quantidade transferida em cada duto, e varia de acordo com o duto e tipo de produto transportado e os custos de interface são devidos aos diferentes tratamentos aplicados às quantidades misturadas.

Atualmente o PTD na Rede de Claros e Escuros é resolvido em duas etapas com auxílio dos sistemas Bandeira SP e CONSUELO. Na primeira etapa é feito um planejamento mensal das movimentações de derivados de petróleo através da rede de oleodutos. Na segunda etapa é determinado como esta rede deverá ser operada no horizonte de aproximadamente 15 dias para a Rede de Escuros e 10 dias para a Rede de Claros. Vale lembrar que a programação destas duas redes é feita separadamente, visto que não há interdependência operacional entre ambas.

Os sistemas responsáveis por essas etapas foram desenvolvidos pelo próprio departamento de Tecnologia da Informação da Petrobras em São Paulo. Uma descrição destas aplicações pode ser encontrada no trabalho de MARCELLINO (2006) e será apresentada a seguir:

- Bandeira SP: ferramenta de apoio ao planejamento mensal das movimentações de derivados de petróleo através da rede de oleodutos de São Paulo. Ela permite o acompanhamento da situação de estoques de derivados e projeção destes estoques para cada ponto de produção e demanda de derivados, considerando as previsões de produção fornecidas pelas refinarias e as previsões de demanda fornecidas pela área comercial. Faz também uma verificação de viabilidade das transferências propostas pela área de logística para os oleodutos, navios, ferrovias e rodovias. Esta ferramenta trabalha com dados agregados mensais e um horizonte de previsão de até três meses, utilizando a técnica de Programação por Restrições para a geração automática de uma proposta inicial de solução. Desta forma, ela funciona tanto como um solucionador quanto como um verificador de soluções para o Problema de Planejamento acima mencionado. Em virtude da complexidade e dependência humana na solução deste problema, o objetivo atual do sistema tem se limitado a encontrar uma solução válida, mas não necessariamente ótima.
- CONSUELO: Controle do Suprimento dos Derivados e das Limitações Operacionais nos Dutos de São Paulo e Centro Oeste. Este sistema tem o objetivo de determinar antecipadamente como deverá operar a rede de

oleodutos no horizonte de aproximadamente 14 dias (para o caso da Rede de Escuros, para a Rede de Claros o horizonte é de 10 dias). Assim, o principal resultado da sua execução é a geração diária da programação das movimentações de derivados através das malhas de oleodutos de São Paulo dentro deste horizonte, de forma a atender as demandas contratadas no mercado, satisfazendo as restrições operacionais e de negócio, com baixos custos de transporte e operação do sistema. O CONSUELO tem como núcleo básico um simulador que valida as propostas submetidas pelo pessoal especializado da área de logística através de uma interface gráfica. No caso de qualquer inviabilidade, reporta as inconsistências para que a proposta original seja corrigida e o ciclo se reinicie, até a obtenção de uma proposta de movimentação válida, que é então disponibilizada automaticamente via intranet para todos os órgãos operacionais envolvidos.

## 5 PROBLEMA DE TRANSPORTE NA REDE DE ESCUROS SIMPLIFICADO (PTRES)

Em função da dificuldade de implementação de todas as restrições e detalhes do PTRE, e de aquisição de dados reais, foi adotado o Problema de Transporte na Rede de Escuros Simplificado (PTRES). Na sua apresentação serão discutidas as diferenças do problema simplificado em relação ao problema real.

### 5.1 CARACTERÍSTICAS DA REDE DE ESCUROS SIMPLIFICADA

A primeira diferença está na rede em si. No PTRES o Terminal Guararema (vide Figura 4.1) é desconsiderado e é assumido que os dutos podem operar em apenas um sentido. A malha de oleodutos é então um grafo orientado, onde os vértices são as áreas e os arcos os dutos através dos quais é feito o transporte dos produtos (Figura 5.1).

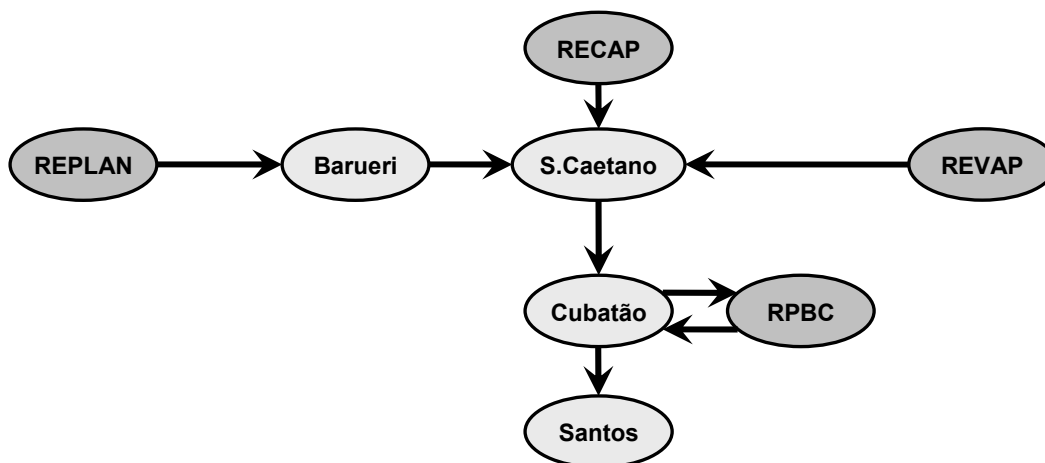


Figura 5.1: Grafo da Rede de Escuros Simplificada

Esta nova rede será denominada Rede de Escuros Simplificada e pode ser classificada, segundo as categorias descritas na seção 2.2, como uma rede onde cada poliduto possui apenas uma fonte e um destino, e todos eles são unidirecionais, o que descarta a necessidade da operação de reversão dos dutos.

Os sentidos dos dutos foram escolhidos de acordo com o sentido de operação mais utilizado, que é o de escoamento dos produtos para o Terminal Santos, para serem exportados. De fato, em 2005, o volume exportado de óleo combustível e óleo combustível marítimo em todo o Brasil somou um total de 9,3 milhões de m<sup>3</sup>. E a importação de óleo combustível foi de 52,9 m<sup>3</sup> (ANP, 2007).

Dos nove produtos transportados pela Rede de Escuros serão considerados no problema simplificado apenas 5, que são listados na Tabela 5.1. É assumido que o óleo combustível exportação está pronto para ser transportado, ou seja, não são consideradas misturas em tanque ou em duto para obtê-lo.

**Tabela 5.1: Produtos transportados na Rede de Escuros Simplificada**

Nome do produto
Gasóleo para craqueamento
Óleo leve de reciclo - LCO (Light Cycle Oil)
Óleo combustível
Óleo combustível marítimo (bunker)
Óleo combustível exportação

## 5.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

- Inicialmente, e durante toda a operação de transferência de produtos, os dutos estão sempre totalmente preenchidos.
- Tancagem agregada: cada área possui um conjunto de tanques para armazenar cada tipo de produto. Porém, será considerado para cada área e para cada tipo de produto apenas um tanque com capacidade equivalente à de todo o conjunto de tanques destinado ao armazenamento de tal produto.
- As vazões são constantes para cada duto.
- Horizonte de programação: 14 dias discretizado em períodos de 4 horas, resultando num total de 84 períodos de tempo. Também foram estudados problemas com horizonte de tempo de 7 dias, com 42 períodos de tempo.
- Produção e demanda: A demanda pode existir para qualquer área (refinaria ou terminal) e significa que a área não tem estoque ou produção (no caso das refinarias) suficientes para atender seu próprio consumo ou do mercado local durante o período de planejamento. Já a produção é considerada como a quantidade excedente da produção das refinarias, e são descontados o consumo próprio e do mercado local. Os terminais não

possuem produção, visto que são centros de distribuição de derivados. Portanto, para cada produto em cada área poderá estar associado apenas um valor, de produção (positivo) ou de demanda (negativo), que serão contabilizadas a cada período de tempo. Como normalmente são conhecidos apenas os valores mensais, considera-se que a produção (demanda) para cada período de tempo é dada pela razão entre o valor mensal e o número de períodos de tempo em um mês.

### **5.3 MODIFICAÇÕES NA MOVIMENTAÇÃO DE PRODUTOS**

No PTRE Simplificado não são utilizadas rotas de fluxo. Isto quer dizer que todo o produto bombeado em um duto deverá ser recebido pela área localizada na extremidade oposta deste duto. Se necessário poderá ser rebombeado para um outro duto. Portanto, não existe a operação de passagem. As operações de injeção e pulmão são desconsideradas.

#### **5.3.1 Discretização do Horizonte de Tempo**

A principal modificação no modo como os dutos são operados no PTRES é devida à discretização do horizonte de tempo. No PTRE o tempo é tratado de forma contínua. O início e término do bombeamento de uma batelada de produto podem ocorrer a qualquer instante de tempo, sendo o seu volume dado em função da vazão e do período de bombeamento, podendo assumir qualquer valor real. No PTRES o horizonte de programação é discretizado em períodos de tempo de tamanho uniforme e as vazões são constantes para cada duto, o que implica que o volume de produto (lote<sup>1</sup>) bombeado durante cada período de tempo é fixo para cada duto. Assim, o volume da batelada pode assumir apenas valores discretos, que variam de acordo com o número de períodos de tempo em que houve bombeamento do produto.

#### **5.3.2 Discretização dos Dutos**

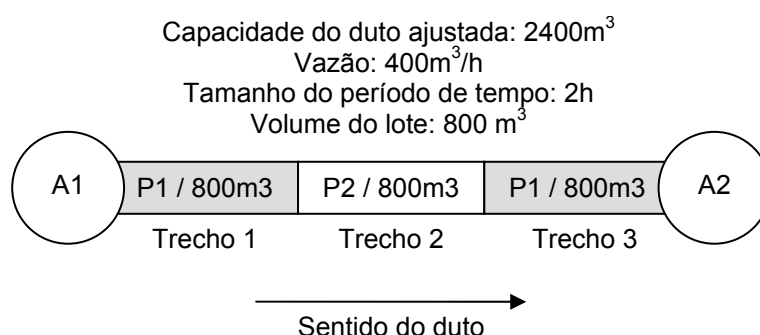
As capacidades dos dutos também são discretizadas. Eles são divididos em trechos iguais, cujas capacidades são dadas pelos volumes dos lotes que eles transportam. Como são permitidos apenas números inteiros de trechos para cada

---

<sup>1</sup> O termo lote se refere especificamente à quantidade de produto bombeada para um duto durante 1 período de tempo, com o seu volume dependente da vazão no duto. Já o termo batelada será usado de forma mais genérica, para se referir a um volume contínuo de produto bombeado no duto durante um determinado intervalo de tempo.

duto, e os tamanhos dos lotes já estão fixos, as capacidades máximas dos dutos devem ajustadas.

Por exemplo, seja um duto com capacidade de  $2300 \text{ m}^3$  de produto e uma vazão de  $400 \text{ m}^3/\text{h}$ , e um horizonte de programação dividido em períodos de 2 horas. A cada período de tempo é possível transportar um lote de  $800 \text{ m}^3$ , logo, o duto seria dividido em 2,8 ( $2300 \text{ m}^3 / 800 \text{ m}^3$ ) trechos. Como é necessário o número de trechos seja inteiro, esse valor é arredondado para 3 e a capacidade do duto é aumentada para  $2400 \text{ m}^3$ . Assim o duto é dividido em 3 trechos, com volume de  $800 \text{ m}^3$  cada um, conforme mostra a Figura 5.2.



**Figura 5.2: Exemplo de discretização de um duto**

O resultado da discretização dos dutos da Rede de Escuros Simplificada é apresentado na Tabela 5.2. São dados o valor da vazão em cada duto, a quantidade e volume dos trechos, e o volume total do duto já modificado. No cálculo dos volumes dos trechos foi considerado um período de tempo igual a quatro horas.

**Tabela 5.2: Informações sobre a discretização dos dutos da Rede de Escuros Simplificada, considerando períodos de tempo de quatro horas**

Sentido	Vazão ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Nº de Trechos	Volume do Trecho ( $\text{m}^3$ )	Volume total do duto ( $\text{m}^3$ )
REPLAN - Barueri	350	9	1.400	12.600
Barueri - S.Caetano	350	3	1.400	4.200
REVAP - S.Caetano	520	16	2.080	33280
S.Caetano - Cubatão	600	3	2.400	7200
Cubatão - Santos	400	2	1.600	3200
Cubatão - RPBC	250	1	1.000	1000
RPBC - Cubatão	250	1	1.000	1000
RECAP - S.Caetano	150	1	600	600



Para facilitar a modelagem do problema, é assumido que os lotes podem ser formados por apenas um tipo de produto.

A movimentação dos produtos em duto discretizado é exemplificada na Figura 5.3, onde o objetivo é transportar um lote de óleo combustível da área A1 para a área A2. O duto é dividido em dois trechos, que no instante inicial estavam preenchidos com LCO. No período de tempo  $t = 1$  foi bombeado um lote de óleo combustível a partir de A1, conseqüentemente um lote de LCO foi recebido em A2. Para forçar o recebimento de óleo combustível em A2 é preciso bombear mais dois lotes de qualquer outro produto. Assim, em  $t = 2$  foi bombeado um lote de bunker, e mais um lote de LCO foi recebido em A2. Em  $t = 3$ , outro lote de bunker foi bombeado a partir de A1 e, finalmente, o óleo combustível foi recebido em A2.

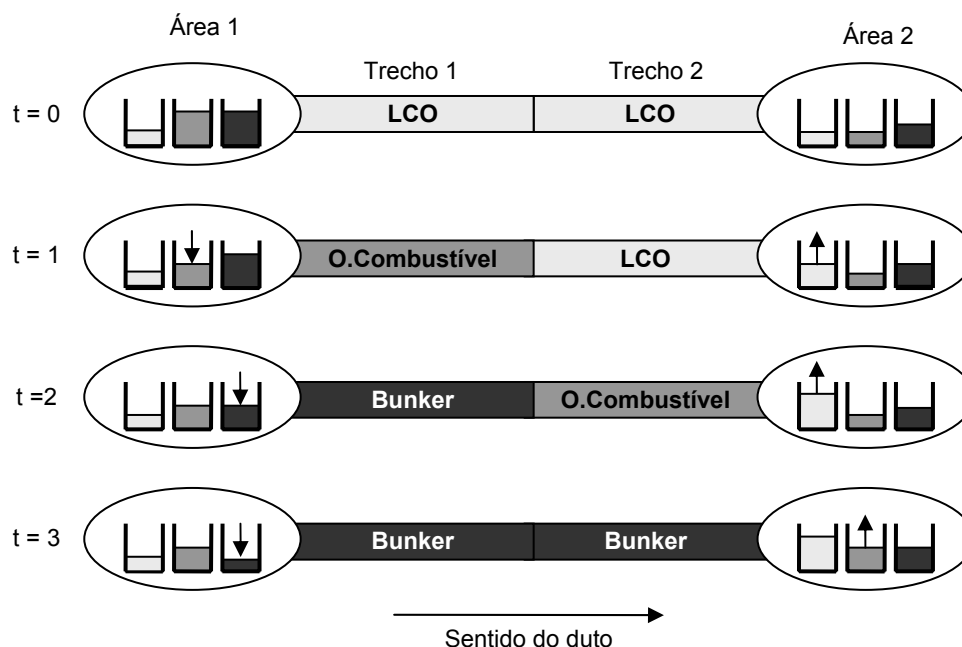


Figura 5.3: Exemplo de movimentação de produto em um duto discretizado

## 5.4 RESTRIÇÕES DO PTRES

Devido à dificuldade em se modelar todas as restrições do problema original, muitas delas foram desconsideradas, restando apenas as restrições de:

- Atendimento à demanda: no PTRES esta restrição não admite violação. Para que a violação não aconteça, os produtos devem estar disponíveis nos tanques de armazenamento no momento em que forem demandados pelas áreas.

- Capacidade de armazenamento dos tanques: os limites mínimo e máximo considerados são, respectivamente, zero e o volume total do tanque.

As restrições de estoque, de compatibilidade de produtos, de tamanho das bateladas, de manutenção programada, de aquecimento e locais não são consideradas. Assim como no PTRE, também não são consideradas as restrições de funcionamento das bombas nos horários de pico de consumo de energia elétrica.

## **5.5 OBJETIVO E SOLUÇÃO DO PTRES**

Em relação às simplificações nos critérios de otimização do PTRE, foram desconsiderados os custos de estocagem, e os custos de transporte e interface de produtos foram substituídos por parâmetros relacionados a eles. Então, no problema simplificado, são minimizados a quantidade de produto transportada e o número de interfaces ao longo do horizonte de programação.

No problema original as restrições de atendimento à demanda e de capacidade de armazenamento dos tanques são passíveis de violação, e por isso são tratadas como critérios de otimização. Mas no PTRES a não satisfação destas restrições torna inviável a solução do problema.

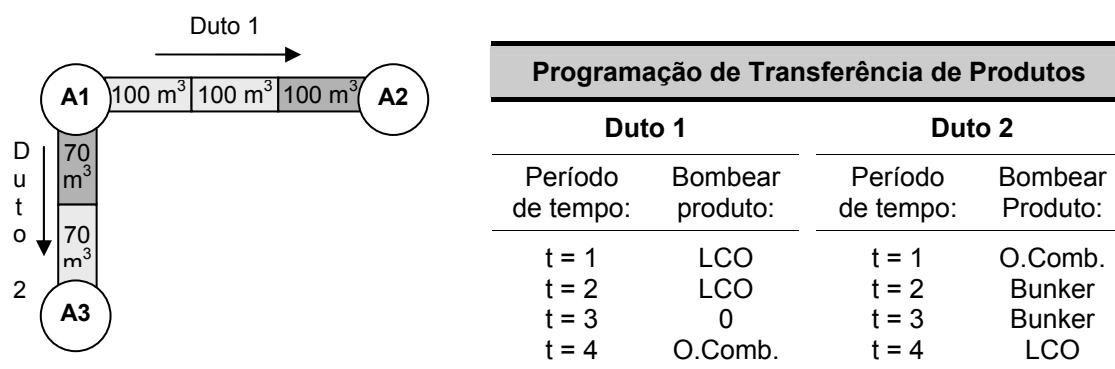
Portanto, o objetivo do PTRES é encontrar uma programação de transferência de produtos, para um determinado horizonte de tempo, que atenda às demandas das áreas, respeite os limites de capacidade de armazenamento dos tanques e que ainda minimize o número de interfaces e a quantidade de produto bombeada. A minimização do número de interfaces é prioridade em relação à minimização da quantidade de produto bombeada.

### **5.5.1 Programação de Transferência de Produtos**

A programação de transferência de produtos é a solução do PTRES. Ela estabelece as seqüências e quantidades transferidas de cada produto através de cada um dos dutos. Para cada período do horizonte de tempo e para cada duto, a programação determina se deve haver, ou não, o bombeamento de um lote de produto a partir da área de origem do duto, e em caso afirmativo, qual o tipo do produto deve ser bombeado.

Considere uma rede com três áreas e dois dutos cujas discretizações resultaram em dois trechos para o duto 1, com volume de  $100 \text{ m}^3$ , e em três trechos

para o duto 2, com volume de  $70 \text{ m}^3$ . Um exemplo de programação de transferência de produtos para um horizonte de programação de 4 períodos de tempo é apresentada na Figura 5.4.



**Figura 5.4: Exemplo de uma programação de transferência de produtos em uma rede com três áreas e dois dutos, para um horizonte de quatro períodos de tempo**

Esta programação estabelece que no duto 1, tanto no período 1 quanto no período 2, deve ser bombeado um lote de LCO; no período seguinte não deve haver bombeamento e no período 4 deve ser bombeado um lote de óleo combustível. Esses bombeamentos devem respeitar o sentido de operação do duto, ou seja, devem ser feitos a partir da área A1 da rede. A quantidade de produto a ser bombeada, o tamanho do lote, equivale ao volume do trecho do duto, que é igual a  $100 \text{ m}^3$ . O mesmo raciocínio vale para o duto 2. Os produtos são bombeados a partir da área A1 na seguinte seqüência: um lote de óleo combustível, dois lotes de bunker e um outro lote de LCO. Cada lote com volume igual a  $70 \text{ m}^3$ .

## 5.6 DEFINIÇÃO DA INSTÂNCIA DO PTRES

Para a definição de uma instância do problema são necessárias as seguintes informações:

- Horizonte de programação: que é discretizado em períodos de tempo de tamanho uniforme.
- Tamanho do período de tempo.
- Condições iniciais da rede: referem-se às informações sobre o estado da rede no instante inicial do horizonte de programação. São elas:
  - Estoque inicial nos tanques: dado para cada área e cada produto.
  - Conteúdo inicial dos dutos: descrito por uma lista dos produtos contidos nos trechos de cada duto, ordenada pelo sentido de operação do duto.

- Capacidade mínima e máxima de armazenamento dos tanques: dado para cada área e cada produto. A capacidade mínima foi assumida como sendo zero para todos os tanques.
- Produção e demanda mensais: dado para cada área e cada produto.

O grafo da rede, os produtos, volumes e vazão dos dutos são considerados dados inerentes ao problema.

## 5.7 RESUMO DAS INFORMAÇÕES REFERENTES AO PTRES

Nesta seção são reunidas todas as informações que definem o PTRES. Suas principais características, considerações, restrições, critérios de otimização e dados de entrada são apresentadas na Tabela 5.3 na coluna “Informações”. A coluna “*Status*” indica se determinada informação foi considerada no problema ou não.

**Tabela 5.3: Resumo das informações referentes ao PTRES**

<b>Status</b>	<b>Informações</b>	<b>Observações</b>
-	Rede Considerada	Rede de Escuros Simplificada
-	Tipo dos dutos	Polidutos unidirecionais com apenas uma fonte e um destino
-	Quantidade de áreas (terminais e refinarias)	8
-	Quantidade de produtos transportados	5
-	Horizonte de programação	14 (7) dias discretizado em períodos de 4 horas, totalizando 84 (42) períodos de tempo.
-	Produção (demanda)	Contabilizada ao final de cada período de tempo. Equivale a 1/180 da produção (demanda) mensal.
✓	Estoque inicial nos tanques	
✓	Conteúdo inicial dos dutos	
✓	Produtos fungíveis	As demandas nas áreas podem ser atendidas por qualquer volume de produto, independente de sua área de origem.
✓	Tancagem agregada	

Status	Informações	Observações
✓	Discretização dos dutos	Os dutos são divididos em trechos de volumes iguais e, a cada período de tempo, os produtos são bombeados em lotes com o mesmo volume destes trechos.
✓	Duto opera sempre cheio de líquido	O bombeamento de um lote de produto em uma extremidade do duto causa a saída de outro lote na sua extremidade oposta.
✗	Rotas de fluxo	
✗	Operações de passagem, de injeção e pulmão	
✗	Reversão em dutos	
✗	Mistura em tanque e em duto	
✓	Restrição de atendimento à demanda	
✓	Restrição de capacidade de armazenamento dos tanques	
✗	Restrição de estoques	
✗	Restrição de limites de vazão	Cada duto opera com uma vazão constante.
✗	Restrição de compatibilidade de produtos	Não, e também não foi feito uso de selos.
✗	Restrição de tamanho das bateladas	
✗	Restrição de manutenção programada	
✗	Restrições locais	
✗	Restrição de aquecimento	
✗	Restrição de funcionamento das bombas em horário de pico de energia elétrica	
✗	Custo de transporte	Não, mas é minimizada a quantidade de produto transportada.
✗	Custo de interface	Não, mas é minimizado o número de interfaces de produtos.
✗	Custo de estocagem	

## 6 MODELAGEM PROPOSTA PARA O PTRES

O PTRES, assim como todos os problemas de otimização combinatória, tem um amplo espaço de soluções. A quantidade de possíveis programações de transferência de produtos varia com o número de dutos, de produtos transportados e de períodos do horizonte de tempo. Mesmo para o caso da Rede de Escuros Simplificada, que possui 8 dutos, transporta 5 produtos e o horizonte de programação contém 84 períodos de tempo, uma busca exaustiva em todo o espaço de soluções para encontrar uma programação ótima seria computacionalmente impraticável.

Assim, é preciso um meio eficiente para encontrar soluções para o problema. Como já foi visto (Capítulo 3), a literatura aponta vantagens em relação ao uso de métodos heurísticos para a solução do problema de transporte de produtos em rede dutoviária. Pois são métodos que têm permitido a obtenção de soluções viáveis em tempos computacionais aceitáveis.

Para encontrar a solução do PTRES foi escolhido o método heurístico Algoritmo Genético (AG), que tem sido provado, teórica e empiricamente, ser um método robusto de busca em espaços de soluções complexos (GOLDBERG, 1989). Aqui se entende robustez como o balanço entre a eficiência e eficácia necessária para a sobrevivência em vários ambientes diferentes. De fato, o AG é um método que apresenta bom desempenho para uma grande escala de problemas.

O modelo desenvolvido para o PTRES foi dividido em duas partes. A primeira, denominada AG-TRANSF, faz uso de AGs para encontrar soluções (programações de transferência de produtos) viáveis para o PTRES. Foram criadas duas versões, AG-TRANSF1 e AG-TRANSF2, que se diferenciam apenas na maneira como é feita a representação da solução. Já a segunda parte é responsável por executar um pós-processamento nas soluções encontradas pelo AG-TRANSF.

## 6.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos Genéticos são ferramentas de busca baseados em mecanismos de seleção natural e de genética (GOLDBERG, 1989). Eles consistem em encontrar, para um dado conjunto de indivíduos, que representam pontos no espaço de busca, aquele que melhor atende a certas condições especificadas.

Dado que cada indivíduo possui um valor de aptidão associado, a busca do melhor indivíduo é feita da seguinte forma: a cada iteração do algoritmo (geração), a população de indivíduos é transformada com base em princípios de reprodução e sobrevivência do mais apto. Para isso são aplicados operadores genéticos tais como, recombinação (crossover) e mutação. Os novos indivíduos gerados (novos pontos no espaço de busca) são então avaliados e reintroduzidos na população. Geração após geração, a população evolui de tal modo que os melhores indivíduos sobrevivem aos piores. As iterações são executadas até que um critério de parada seja satisfeito, retornando-se o melhor indivíduo encontrado, que é a melhor solução para o problema.

Segundo GOLDBERG (1989), os algoritmos genéticos diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização (métodos baseados em cálculo de gradientes, enumerativos e de busca aleatória), principalmente em quatro aspectos:

- AGs trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros do problema, e não com os parâmetros propriamente ditos;
- AGs fazem buscas a partir de uma população de pontos, e não a partir de um ponto isolado;
- AGs necessitam somente de informação sobre o valor de aptidão de cada membro da população, e não requerem derivadas ou qualquer outro tipo de conhecimento;
- AGs usam regras de transições probabilísticas, e não determinísticas.

Os algoritmos genéticos são indicados para a solução aproximada de problemas de otimização combinatória envolvendo um grande número de variáveis e, conseqüentemente, espaços de soluções de dimensões elevadas (BARBOZA, 2005). Entretanto, existem várias outras aplicações para o algoritmo. Diversos exemplos podem ser encontrados nos trabalhos de GOLDBERG (1989), MAN *et al.* (1996), MICHALEWICZ (1996) e BARBOZA (2005). Dentre elas estão aplicações em

problemas de otimização não linear, estatística, mineração de dados, reconhecimento de padrões.

## 6.2 ALGORITMO GENÉTICO PARA PROGRAMAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE PRODUTOS (AG-TRANSF)

Existem inúmeras maneiras de se modelar um problema usando algoritmos genéticos, elas variam de acordo com os procedimentos e operadores empregados. Nesta seção serão apresentados as particularidades e os componentes utilizados pelo AG-TRANSF.

Os passos para a execução do AG-TRANSF são apresentados na Figura 6.1.

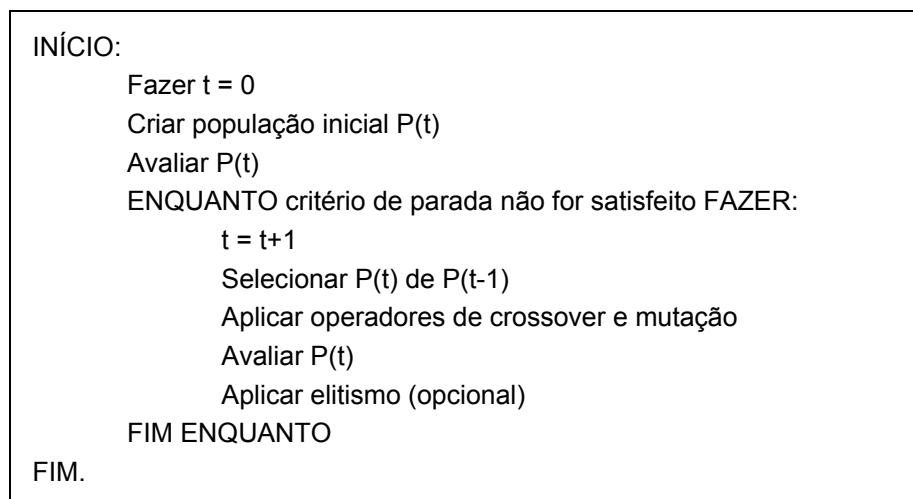


Figura 6.1: Pseudocódigo do AG-TRANSF

Para a implementação do AG-TRANSF é necessário que sejam feitas algumas definições a respeito dos seguintes componentes do AG (baseado em MICHALEWICZ (1996)):

- uma representação genética para as soluções do problema,
- uma maneira de se criar a população inicial de soluções potenciais,
- uma função de avaliação que faça o papel do ambiente, avaliando as soluções nos termos de suas aptidões,
- método de seleção,
- operadores genéticos de crossover e mutação, e
- valores para os vários parâmetros que o AG necessita, que são: tamanho da população, probabilidades de se aplicar os operadores genéticos, e número de gerações.



### 6.2.1 Representação das Soluções

O AG-TRANSF possui duas versões que diferem entre si pela maneira como as soluções são representadas. Na realidade, a representação utilizada pela versão 2 é uma extensão da representação utilizada pela versão 1 que é apresentada a seguir.

No AG as soluções do espaço de busca do problema são representadas por indivíduos, também chamados de cromossomos.

Como já foi dito, uma solução para o PTRES determina para cada período do horizonte de tempo e para cada duto, o produto a ser bombeado a partir da área de origem do duto, ou se não deve haver nenhum bombeamento.

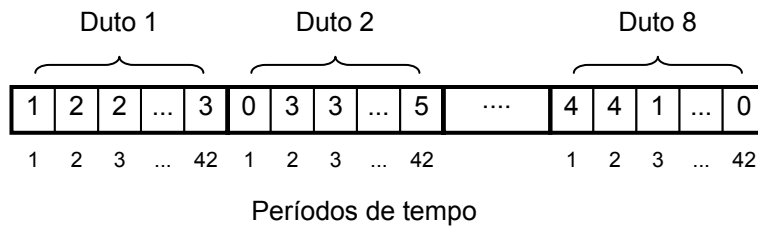
Uma codificação natural para essa programação de transferência de lotes de produtos para cada duto é a representação do indivíduo como um vetor de números inteiros, onde cada elemento (gene) deste vetor representa o tipo de produto do lote que está sendo bombeado no duto  $d$ , no período de tempo  $t$ .

Para cada indivíduo, os primeiros  $n$  elementos armazenam os tipos de produtos bombeados no duto 1, ao longo do horizonte de planejamento. Os  $n$  elementos seguintes armazenam os tipos de produtos bombeados no duto 2, e assim por diante. Onde  $n$  é o número de períodos de tempo resultante da discretização do horizonte de programação. Para tanto foi utilizada uma codificação, mostrada na Tabela 6.1, para os produtos e dutos da Rede de Escuros Simplificada.

**Tabela 6.1: Códigos utilizados na representação dos produtos e dutos**

Código	Produto	Código	Duto
0	Nenhum produto bombeado	1	REPLAN => Barueri
1	Óleo combustível exportação	2	Barueri => S.Caetano
2	Óleo combustível	3	REVAP => S.Caetano
3	LCO	4	S.Caetano => Cubatão
4	Bunker	5	Cubatão => Santos
5	Gasóleo para craqueamento	6	Cubatão => RPBC
		7	RPBC => Cubatão
		8	RECAP => S.Caetano

A Figura 6.2 mostra um exemplo de um indivíduo codificado do AG-TRANSF1 para o problema um com horizonte de programação de 7 dias discretizado em 42 períodos de tempo.



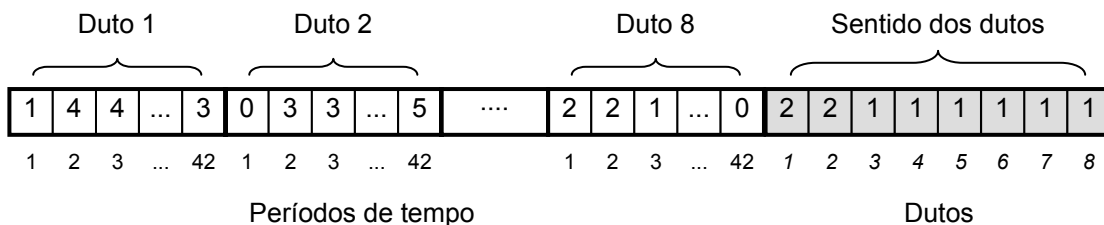
**Figura 6.2: Codificação do indivíduo do AG-TRANSF1**

Para este indivíduo, a programação do duto 2, por exemplo, deve seguir a seqüência: no período 1 não há bombeamento de produtos, nos dois períodos seguintes devem ser bombeados dois lotes de LCO de Barueri para S. Caetano, e assim por diante. Os volumes dos lotes correspondem aos volumes dos trechos de dutos para onde eles são bombeados. Os volumes dos trechos foram dados na Tabela 5.2.

A representação utilizada no AG-TRANSF2 é dada de tal forma que seja possível ao algoritmo escolher o sentido de operação nos dutos, que serão denominados sentido normal ou reverso. O sentido de operação mais comum é definido como normal e é o sentido considerado pelo grafo da Figura 5.1, e também pela Tabela 6.1 acima. O sentido oposto é definido como reverso.

Assim, foi acrescentada à codificação do indivíduo definida na versão 1, mais uma quantidade de elementos correspondentes ao número de dutos da rede, que indicam em que sentido o duto deve ser operado. O número 1 indica sentido normal, e o número 2 o sentido reverso.

A Figura 6.3 mostra um exemplo de um indivíduo codificado do AG-TRANSF2 para o problema um com horizonte de programação de 7 dias discretizado em 42 períodos de tempo.



**Figura 6.3: Codificação do indivíduo do AG-TRANSF2**

Para este indivíduo, a programação indica que os dutos 1 e 2 devem operar no sentido reverso e os demais no sentido normal. Assim, para o duto 1, a seqüência de bombeamento de produtos de Barueri para a REPLAN deve ser: um lote de óleo

combustível exportação, dois lotes de bunker, e assim por diante, finalizando com um lote de LCO.

### 6.2.2 Definição da População Inicial

A população é representada por uma matriz, onde cada linha contém um indivíduo. Todos os elementos dos indivíduos da população inicial são gerados de forma totalmente aleatória. Não é utilizado nenhum tipo de procedimento para descarte de indivíduos inviáveis.

### 6.2.3 Avaliação dos Indivíduos

O objetivo do PTRES é encontrar uma programação de transferência de produtos que:

- satisfaça restrição de atendimento à demanda,
- satisfaça as restrições de limites de capacidade de armazenamento,
- minimize o número de interfaces, e
- minimize a quantidade de produto bombeada.

Sendo que, a minimização do número de interfaces tem prioridade em relação à minimização da quantidade de produto bombeada.

Para o atendimento da demanda nas áreas, os produtos são retirados dos tanques de armazenamento. Logo, a não violação das restrições dos limites inferiores de capacidades dos tanques<sup>1</sup>, durante todo o período de programação, garante que todas as demandas tenham sido atendidas. Com isso, as duas restrições do problema podem ser reduzidas a apenas uma, a de limites de capacidade de armazenamento.

Uma das maneiras do AG lidar com restrições é utilizando o método de penalidade. Nele, são associadas penalidades às violações das restrições, que são incluídas na função de avaliação dos indivíduos. Isto diminui a aptidão dos indivíduos inviáveis. Outros métodos podem ser encontrados em MICHALEWICZ (1996).

Assim, a Função de Avaliação utilizada no AG-TRANSF é uma soma ponderada definida pela equação

$$FA = w_1 \cdot VB + w_2 \cdot NI + w_p \cdot VT \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> No PTRES, o limite inferior de capacidade de todos os tanques foi considerado zero.

onde,  $VB$  é o volume total de produto bombeado,  $NI$  é o número total de interfaces e  $VT$  é a violação total dos tanques, dada pela soma dos volumes de produto que violaram as capacidades mínimas e máximas dos tanques em cada período de tempo. A constante  $w_p$  é a penalidade imposta à violação da restrição de capacidade. As constantes  $w_1$  e  $w_2$  são os pesos dados aos critérios de otimização do problema.

A função de avaliação abrange quantidades volumétricas e número de interfaces. Portanto, o valor de  $w_2$  deve ser escolhido de tal forma que a parcela  $NI$  não seja desprezível em relação às demais.

Foram assumidos os seguintes valores para os pesos da função de avaliação:

- $w_1 = 1$ .
- $w_2 = 1.10^5$ , o volume máximo que pode ser bombeado durante o horizonte de programação de 7 dias é  $482.160 \text{ m}^3$ , e para um horizonte de 14 dias é  $964.320 \text{ m}^3$ . Este valor de  $w_2$  corrige a ordem de grandeza da parcela  $NI$  e ainda dá prioridade à minimização deste critério.
- $w_p = 1.10^7$ , se a restrição de capacidade de armazenamento dos dutos for violada ( $VT \neq 0$ ), ela deve ser penalizada com um peso grande na função de avaliação.

As parcelas da função de avaliação são calculadas através de um procedimento que verifica a programação de transferência de produtos dada por cada indivíduo. As etapas deste procedimento são ilustradas na Figura 6.4.

```
PARA cada período de tempo t FAZER:
  Acrescentar(retirar) produtos dos tanques referentes à produção (demanda)
  PARA cada duto d, SE há bombeamento de produto, FAZER:
    Atualizar a quantidade de produto bombeada VB
    Atualizar número de interfaces NI se produto bombeado for diferente do
      produto contido no primeiro trecho do duto
    Retirar quantidade de produto bombeado do tanque na área de origem
      do duto
    Acrescentar no tanque da área de destino, a quantidade de produto que
      estava no último trecho do duto no período anterior
    Atualizar o conteúdo dos trechos do duto fazendo o deslocamento dos
      produtos em direção à área de destino
  FIM
  Calcular as violações das capacidades dos tanques e atualizar VT
FIM
```

**Figura 6.4: Pseudocódigo do procedimento que simula a evolução do escoamento de produtos na rede, para uma programação de transferência de produtos dada por um indivíduo do AG-TRANSF**

#### 6.2.4 Método de Seleção

O processo de seleção constrói uma população intermediária, de onde serão selecionados os indivíduos para a operação de crossover e mutação.

##### Torneio Binário

No AG-TRANSF, a seleção é feita por torneio binário. Neste procedimento, um par de indivíduos é escolhido aleatoriamente na população atual e o indivíduo com o menor valor para função de avaliação é copiado para a população intermediária, e então o par de indivíduos é recolocado na população original (BEASLEY *et al.*, 1993). O processo se repete até preencher a população intermediária, que tem o mesmo tamanho da população atual.

##### Elitismo

O elitismo é normalmente acoplado a outros métodos de seleção para forçar o AG a reter certo número de melhores indivíduos em cada geração. Tais indivíduos podem ser perdidos se eles não são selecionados para reprodução ou se eles são destruídos pelo crossover ou mutação.

A principal vantagem é o fato de se garantir a convergência, ou seja, caso o ótimo global seja descoberto durante o processo de busca, o AG deve convergir pra tal solução. Sua desvantagem é a possibilidade de forçar a busca, pela presença de mais de uma cópia do melhor indivíduo, em direção a algum ponto ótimo local que tenha sido descoberto antes do global, embora normalmente o AG consiga escapar de tais armadilhas. O que pode ser feito é guardar separadamente a melhor solução encontrada durante a evolução, para no final da execução designá-la como o indivíduo ótimo encontrado, mesmo que ele não esteja presente na última geração do processo (BARBOZA, 2005).

No AG-TRANSF, o elitismo é executado da seguinte forma: dada a população atual  $P(t)$ , caso o melhor indivíduo da população anterior  $P(t-1)$  seja mais apto que o melhor indivíduo de  $P(t)$ , o primeiro substitui o pior indivíduo da população atual. Na implementação do algoritmo, o uso do elitismo é opcional, e caso ele não seja usado, o algoritmo guarda o melhor dos melhores indivíduos encontrados durante suas gerações, e o apresenta como solução encontrada.

### **6.2.5 Operadores Genéticos**

O AG trabalha com dois operadores genéticos, crossover e mutação. O operador de crossover é responsável pela troca de informação genética entre os indivíduos, sendo o principal mecanismo na geração de novos pontos no espaço de otimização. Já a mutação tem a função de introduzir novas características, ou mesmo restaurar características que tenham sido perdidas pela operação de crossover.

Dada a população intermediária, construída pelo método de seleção, cada indivíduo tem uma probabilidade, chamada de taxa de crossover, de participar dessa operação. O operador atua sobre os indivíduos selecionados (pais) gerando novos indivíduos (filhos), que substituem seus pais na população intermediária.

Após a operação de crossover, é aplicado o operador de mutação. Na maioria dos AGs, a mutação é executada de tal forma que cada gene do indivíduo tem uma probabilidade, denominada taxa de mutação, de participar da operação. No entanto, no AG-TRANSF, essa probabilidade foi aplicada a cada parcela do indivíduo que representa um duto. Os indivíduos mutados substituem imediatamente os indivíduos antigos na população intermediária.

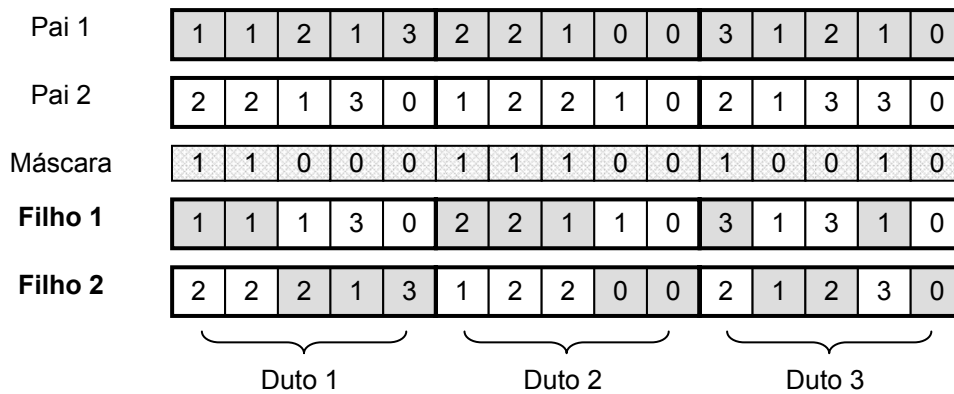
Finalmente, a população intermediária substitui totalmente a população atual, e é avaliada.

A seguir são apresentados os operadores utilizados no AG-TRANSF.

#### **Crossover Uniforme**

É gerada uma máscara de zeros e uns de forma aleatória. O filho 1 é criado copiando-se as posições do pai 1, que correspondem ao número 1 na máscara, e ocupando as posições restantes com material do pai 2. Para o filho 2 o procedimento é invertido e realizado de forma análoga. A Figura 6.5 ilustra a operação.

Tanto para este, quanto para os exemplos das operações de mutação serão utilizados indivíduos para um problema com uma rede composta por 3 dutos, que transporta 3 tipos diferentes de produtos e um horizonte de 5 períodos de tempo.

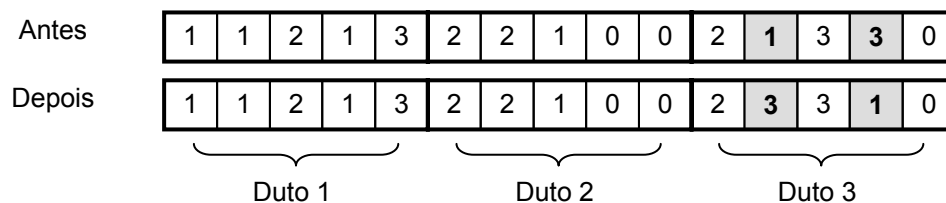


**Figura 6.5: Exemplo da operação realizada pelo Crossover Uniforme**

Para a mutação foram implementados dois operadores no AG-TRANSF. Sendo possível a escolha entre um ou outro operador, ou a combinação de ambos para a execução do algoritmo.

### Mutação por Troca

Caso o duto  $d$  tenha sido selecionado para a operação, dois genes são escolhidos aleatoriamente, dentro da parcela do indivíduo que representa esse duto, e suas posições são trocadas. A Figura 6.6 apresenta um exemplo desta operação, onde os lotes de produtos 1 e 3 tiveram sua ordem de bombeamento trocada no duto 3.



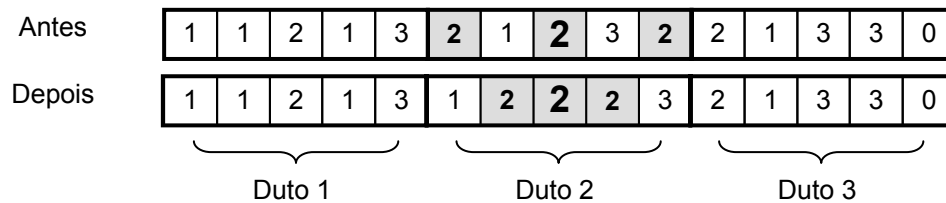
**Figura 6.6: Exemplo da operação realizada pela Mutação por Troca**

### Mutação por Vizinhaça

É o método proposto por ALMEIDA *et al.* (2003), que visa a formação de lotes maiores, minimizando assim o numero de interfaces de produtos na programação de bombeamentos. Foi utilizado também por SANGINETO (2006).

Caso o duto  $d$  tenha sido selecionado para a operação, um gene é selecionado aleatoriamente e à sua esquerda e direita são procurados outros genes iguais. Então, as posições dos genes encontrados são trocadas com as posições dos genes mais próximos ao gene escolhido no início do procedimento. A busca pelos genes idênticos

acontece somente dentro da parcela do indivíduo que representa o duto  $d$ . A Figura 6.7 apresenta um exemplo desta operação, onde os lotes do produto 2 são agrupados no duto 2. O número de interfaces nesse duto caiu de quatro para apenas duas.



**Figura 6.7: Exemplo da operação realizada pela Mutação por Vizinhança**

Os operadores genéticos apresentados são utilizados nas duas versões do AG-TRANSF. Porém é necessário dizer que o único operador que tem influência na modificação dos elementos do indivíduo que indicam o sentido de operação dos dutos é o crossover. A máscara para o crossover é gerada para o indivíduo completo.

### 6.2.6 Parâmetros de controle

A seguir são apresentados os parâmetros de controle de um AG:

- Tamanho da população: grandes populações apresentam uma maior diversidade de soluções, contudo exigem um maior esforço computacional. Por outro lado, pequenas populações restringem o espaço de busca e podem convergir prematuramente.
- Taxa de crossover: quanto maior esta taxa, mais rapidamente novos indivíduos serão introduzidos na população. Mas se esta for muito alta, a maior parte da população será substituída e podem ocorrer perdas de estruturas de boa aptidão. Com um valor muito baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento.
- Taxa de mutação: a mutação tem o objetivo de inserir novas informações na população, aumentando sua diversidade e as possibilidades de obtenção de boas soluções. Porém, uma taxa muito alta torna a busca essencialmente aleatória.
- Número de gerações (BARBOZA, 2005): depende da complexidade do problema e deve ser determinado experimentalmente. Como o AG resolve problemas de otimização, o ideal seria que o algoritmo terminasse assim que o ponto ótimo fosse encontrado. No entanto, como se trata de um algoritmo heurístico, não se pode afirmar com certeza se um dado ponto ótimo corresponde a um ótimo global. Desta forma, algum critério deve ser



especificado para o término do processamento do algoritmo. Normalmente, usa-se o critério de número máximo de gerações ou um tempo limite de processamento para encerrar o processo. Outro critério utiliza a idéia de estagnação, ou seja, o processo é encerrado quando não se observa melhoria da população depois de várias gerações consecutivas. Neste caso, a análise da convergência pode ser feita através de vários fatores, tais como: valores máximo, mínimo, médio, desvio padrão da população e outros.

A eficiência e o funcionamento de um AG são altamente dependentes dos valores desses parâmetros.

Existem vários estudos sobre a escolha dos valores desses parâmetros na literatura, como por exemplo, os trabalhos de HINTERDING *et al.* (1997) e LOBO e GOLDBERG (2004). Porém, não determinam regras claras quanto a esta escolha.

Assim, os valores para o conjunto de parâmetros do AG-TRANSF foram determinados por tentativa e erro, através da realização de vários experimentos computacionais que serão apresentados no próximo capítulo.

### 6.3 PÓS-PROCESSAMENTO

Iniciados os experimentos computacionais com o AG-TRANSF, foi observada a necessidade de se realizar um pós-processamento nas soluções obtidas, pois em alguns casos as soluções apresentavam muitas paradas nos dutos.

Entende-se que há uma parada no duto quando, em determinado período de tempo, existe o bombeamento de um lote de produto, e no período seguinte não há nenhum bombeamento. Por exemplo, a Figura 6.8 apresenta um indivíduo que corresponde a uma programação com 4 paradas nos dutos. O não bombeamento de produto no primeiro período de tempo não é contabilizado como parada.

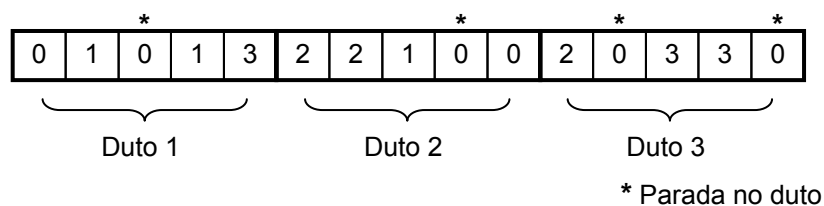
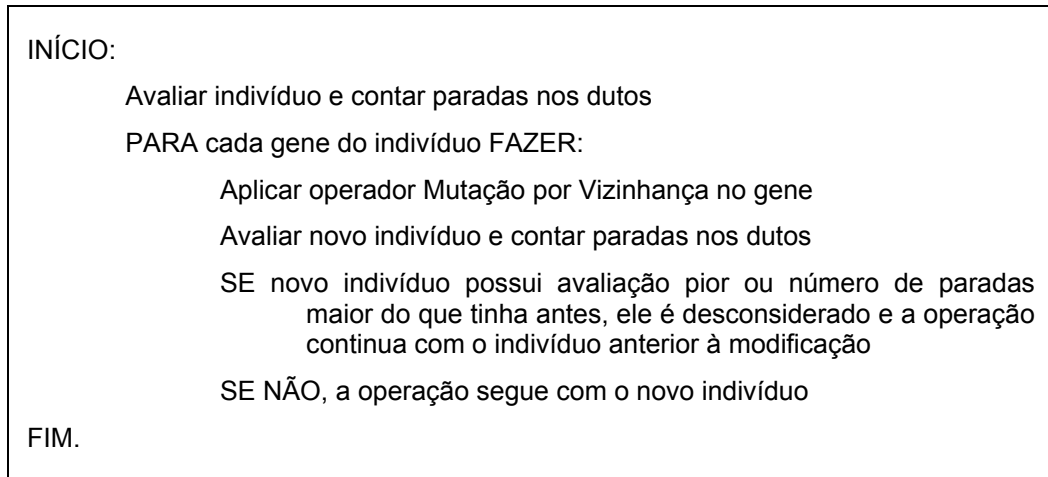


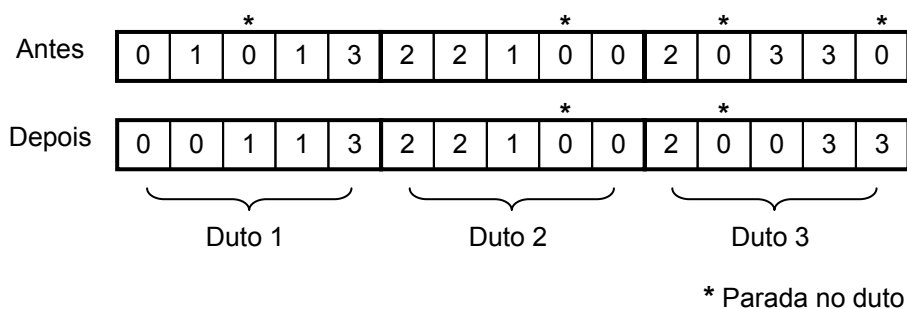
Figura 6.8: Exemplo de parada nos dutos. O indivíduo apresenta 4 paradas.

O pós-processamento é executado através de uma heurística baseada no operador Mutação por Vizinhança, pois o objetivo é agrupar os lotes de produtos para que o número de paradas nos dutos diminua. A heurística consiste em aplicar esse operador a cada gene do indivíduo, visando uma melhoria do mesmo. A Figura 6.9, mostra as etapas dessa heurística.



**Figura 6.9: Pseudocódigo da heurística responsável pelo pós-processamento das soluções obtidas pelo AG-TRANSF**

A aplicação do pós-processamento no indivíduo apresentado na Figura 6.8, gera um novo indivíduo com apenas duas paradas nos dutos, supondo que todas as modificações não tenham piorado seu desempenho. O indivíduo antes e depois do pós-processamento é apresentado na Figura 6.10.



**Figura 6.10: Resultado da aplicação do pós-processamento em um indivíduo**

## 7 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

### 7.1 INTRODUÇÃO

As implementações computacionais dos algoritmos de pós-processamento e AG-TRANSF foram feitas em MATLAB versão 6.5, e executadas numa máquina Pentium III 800Mhz com 512MB de memória RAM.

Para testar as duas versões do AG-TRANSF, foram construídas 5 instâncias baseadas nas informações de um relatório do bombeamento realizado na Rede de Escuros durante todo o mês de julho de 2002, e de outro relatório com os dados de capacidade dos tanques e com o planejamento mensal de produção e demanda nas áreas, feito no início do mês de julho.

As instâncias foram construídas da seguinte forma: foram escolhidos intervalos de 7 e 14 dias no relatório dos bombeamentos realizados. Os bombeamentos executados nestes intervalos serviram de base para gerar 5 programações de transferência de produtos para o PTRES, para um horizonte de programação de 7 e 14 dias, discretizados em períodos de 4 horas. Para cada uma dessas programações foram definidas, com base no relatório de planejamento mensal, as condições iniciais da rede (estoque nos tanques e conteúdo dos dutos), as capacidades mínima e máxima dos tanques, e as produções e demandas das áreas no horizonte de tempo considerado; de tal forma que a programação fosse viável. Este conjunto de dados criado para cada programação forma uma instância do problema. Assim, para todas as instâncias se conhece uma solução viável.

Para facilitar a apresentação dos resultados, as instâncias receberam uma identificação no formato PXX-N, onde XX se refere ao horizonte de programação, e N ao número da instância. Assim, P07-2 é a instância número 2 do PTRES para um horizonte de programação de 7 dias.

Os dados das instâncias foram passados ao algoritmo através de dois arquivos de entrada. Um com os dados da rede, e o outro com os dados da instância

propriamente dita. Desse modo, o algoritmo pode ser usado para resolver outros problemas com as mesmas características de operação do PTRES, mas que possuam redes com outras topologias.

Os conteúdos destes arquivos são dados a seguir:

- Dados da Rede:
  - N<sup>o</sup>. de áreas (m)
  - N<sup>o</sup>. de dutos (n)
  - Matriz de incidência<sup>1</sup> (m x n) do grafo que representa a rede
  - N<sup>o</sup>. de produtos (k)
  - N<sup>o</sup>. de trechos de cada duto - vetor (1 x n)
  - Volume do trecho de cada duto (m<sup>3</sup>) - vetor (1 x n)
- Dados da Instância:
  - Horizonte de programação (dias)
  - Tamanho do período de tempo (horas)
  - Produção/demanda correspondente ao horizonte de programação (m<sup>3</sup>) - matriz(m x k)
  - Capacidade mínima dos tanques (m<sup>3</sup>) - matriz (m x k)
  - Capacidade máxima dos tanques (m<sup>3</sup>) - matriz (m x k)
  - Estoque inicial nos tanques (m<sup>3</sup>) - matriz (m x k)
  - Conteúdo inicial nos dutos - lista de n vetores, onde cada um armazena o produto contido em cada trecho do duto

A Figura 7.1 apresenta o arquivo de entrada com os dados da Rede de Escuros Simplificada. Os demais arquivos com os dados de entrada das instâncias se encontram no Apêndice I.

As etapas executadas na realização dos experimentos computacionais foram:

- Determinação da melhor configuração para o AG-TRANSF. Esta configuração inclui a definição:
  - Do operador de mutação utilizado. Foram implementados três tipos, a mutação por vizinhança, a mutação por troca e a combinação destes dois operadores que foi denominada mutação Troca+Viz,

---

<sup>1</sup> Matriz de incidência: contém uma linha para cada vértice do grafo e uma coluna para cada arco. A coluna correspondente ao arco (i,j) tem apenas dois elementos diferentes de zero: ela tem +1 na linha correspondente ao vértice i e -1 na linha correspondente ao nó j.

- Dos parâmetros de controle, tamanho da população, número de gerações, taxas de crossover e mutação
- Do uso ou não do elitismo.
- Do critério de parada do algoritmo.
- Solução das instâncias criadas para o PTRES utilizando a configuração do AG-TRANSF definida na etapa anterior.

```

Rede de escuros.txt:
8
8

1 0 0 0 0 0 0 0
-1 1 0 0 0 0 0 0
0 -1 -1 1 0 0 0 -1
0 0 1 0 0 0 0 0
0 0 0 -1 1 1 -1 0
0 0 0 0 -1 0 0 0
0 0 0 0 0 -1 1 0
0 0 0 0 0 0 0 1

5
9 3 16 3 2 1 1 1
1400 1400 2080 2400 1600 1000 1000 600

```

Figura 7.1: Arquivo com os dados de entrada da Rede de Escuros Simplificada

## 7.2 DEFINIÇÃO DA CONFIGURAÇÃO E PARÂMETROS UTILIZADOS PELO AG-TRANSF

A configuração para o AG-TRANSF foi determinada com base em testes realizados com a sua versão 1 e com a instância P07-2.

As duas primeiras configurações testadas para o AG-TRANSF1 utilizaram uma, a mutação por vizinhança, e a outra, mutação por troca. Não foi considerado o uso do elitismo e as soluções não sofreram pós-processamento. O critério de parada utilizado foi o número máximo de gerações ou convergência dos resultados, que acontece quando a mesma solução (valor da função de avaliação) é obtida por um determinado número de gerações consecutivas.

Essas configurações foram testadas para um conjunto de valores de parâmetros, dados na Tabela 7.1. Para cada uma das configurações e das possíveis combinações de valores de parâmetros, foram executadas 6 rodadas do algoritmo, o que gerou um banco de dados com 216 soluções.

**Tabela 7.1: Valores testados para os parâmetros**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores testados</b>
Tamanho da população	100 - 150 - 200
Número máximo de gerações	2.500
Taxa de crossover	0,7 - 0,9
Taxa de mutação para mutação por troca	0,1 - 0,3 - 0,5
Taxa de mutação para mutação por vizinhança	0,5 - 0,7 - 0,9

A partir do banco de dados gerado foi calculado, para cada uma das configurações, a correlação entre os parâmetros de controle, as parcelas da função de avaliação e o tempo de execução do algoritmo, conforme Tabela 7.2.

**Tabela 7.2: Correlação entre parâmetros de controle, função de avaliação e tempo execução do algoritmo**

	<b>Mutação por Vizinhança</b>			<b>Mutação por Troca</b>		
	<b>Tamanho população</b>	<b>Tx. Crossover</b>	<b>Tx. Mutação</b>	<b>Tamanho população</b>	<b>Tx. Crossover</b>	<b>Tx. Mutação</b>
Função de Avaliação	-0,3647	-0,2753	-0,0173	-0,1287	0,1501	-0,1839
Violação cap.tanques	-0,3647	-0,2753	-0,0172	-0,1287	0,1501	-0,1838
Número interfaces	-0,0630	-0,0294	-0,1736	-0,3355	0,1450	-0,2020
Quantidade bombeada	-0,2805	-0,1866	-0,1015	-0,1203	0,0224	0,8402
Tempo de execução	0,6929	0,1325	0,0583	0,8789	0,1672	0,2915

Para a análise foram considerados relevantes apenas os índices de correlação maiores que 0,1.

Na mutação por vizinhança, a taxa de crossover é inversamente proporcional à violação dos tanques e à quantidade bombeada, apresentando uma influência moderada no primeiro item. A taxa de mutação exerce uma pequena influência na diminuição do número de interfaces. Já na mutação por troca, a taxa de mutação é diretamente proporcional e tem grande influência na quantidade bombeada. A taxa de crossover é diretamente proporcional à violação na capacidade dos tanques e ao número de interfaces, acontecendo o oposto com a taxa de mutação. Entretanto ambos os parâmetros exercem pouca influência sobre estas parcelas.

O aumento das taxas de crossover e mutação influenciam diretamente no aumento do tempo de execução do algoritmo, no entanto, esta influência é muito pequena. Quanto ao tamanho da população, verificou-se que este parâmetro é

inversamente proporcional às parcelas da função de avaliação, tendo uma influência moderada em alguns itens. Entretanto, é diretamente proporcional e tem grande influência no tempo de execução do algoritmo. Por esse motivo, decidiu-se pelo uso de uma população de 150 indivíduos, que é o valor intermediário dentre os testados para esse parâmetro.

Com esta definição, foram extraídas do banco de dados apenas as soluções obtidas com o tamanho de população igual a 150. Assim, as taxas de crossover e mutação foram escolhidas com base na média da função de avaliação destas soluções. A Tabela 7.3 e a Tabela 7.4 apresentam as médias dos resultados desse subconjunto de soluções. Observe que a violação média da capacidade dos tanques ser igual a zero implica que todas as soluções obtidas são viáveis.

**Tabela 7.3: Média dos resultados das rodadas realizadas com a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação por Vizinhaça.**

Tx. Crossover	Média dos Resultados	Tx. Mutação		
		0,5	0,7	0,9
<b>0,7</b>	Função de avaliação	1,00E+09	7,00E+09	5,00E+09
	Violação cap. tanques (m <sup>3</sup> )	600,0	4.200,0	3.000,0
	Número de interfaces	24,0	20,7	16,2
	Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	229.933,3	222.360,0	226.926,7
	Tempo execução (s)	300,8	260,1	277,9
	Número iterações	1.031,2	890,8	953,5
<b>0,9</b>	Função de avaliação	1,01E+09	1,80E+06	<b>1,74E+06</b>
	Violação cap. tanques	600,0	0,0	<b>0,0</b>
	Número de interfaces	47,8	16,0	<b>15,3</b>
	Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	262.120,0	202.640,0	<b>210.620,0</b>
	Tempo execução (s)	284,7	324,4	<b>316,6</b>
	Número iterações	969,2	1.092,2	<b>1.091,3</b>

**Tabela 7.4: Média dos resultados das rodadas realizadas com a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação por Troca**

Tx. Crossover	Média dos Resultados	Tx. Mutação		
		0,1	0,3	0,5
<b>0,7</b>	Função de avaliação	3,45E+06	2,02E+06	2,75E+06
	Violação cap. tanques (m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0
	Número interfaces	32,7	17,5	24,3
	Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	186.026,7	272.606,7	319.320,0
	Tempo execução (s)	504,1	667,7	680,2
	Número de iterações	1.987,8	2.500,0	2.500,0
<b>0,9</b>	Função de avaliação	1,67E+09	<b>1,77E+06</b>	3,75E+06
	Violação cap. tanques (m <sup>3</sup> )	1.000,0	<b>0,0</b>	0,0
	Número de interfaces	29,5	<b>14,7</b>	34,0
	Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	188.240,0	<b>298.617,8</b>	349.353,3
	Tempo execução (s)	635,4	<b>745,2</b>	727,4
	Número iterações	2.451,0	<b>2.500,0</b>	2.500,0

Com base nestas informações, as taxas escolhidas para a configuração que utiliza mutação por vizinhança foram: 0,9 para taxa crossover e também 0,9 para taxa de mutação. E para a configuração que utiliza mutação por vizinhança foram escolhidos os valores: 0,9 para taxa de crossover e 0,3 para taxa de mutação. Com esses parâmetros, todas as rodadas executadas geraram soluções viáveis.

A configuração que foi testada em seguida utilizou o operador de mutação Troca+Viz. Este operador funciona da seguinte maneira: dado que um elemento do indivíduo foi escolhido para ser alterado, a probabilidade de ser aplicada a mutação por troca é  $p$ , e de ser aplicada a mutação por vizinhança é  $1-p$ .

Novamente, não foi considerado o uso do elitismo e as soluções não sofreram pós-processamento. O critério de parada continuou sendo o número máximo de gerações ou convergência dos resultados.

Para esta configuração foram utilizados os parâmetros escolhidos anteriormente para a configuração com mutação por vizinhança. Ou seja, tamanho da população 150 e taxas de crossover e mutação iguais a 0,9. Foram testados apenas dois valores para a probabilidade  $p$ , 0,1 e 0,3. Sendo que para cada valor o algoritmo foi rodado 3 vezes. As médias dos resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.5.



**Tabela 7.5: Média dos resultados das rodadas realizadas com a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação Troca+Viz**

Média dos Resultados	<i>p</i>	
	0,1	0,3
Função de avaliação	<b>1,02E+06</b>	1,91E+06
Violação cap. tanques (m <sup>3</sup> )	<b>0,0</b>	0,0
Número de interfaces	<b>8,3</b>	16,3
Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	<b>184.546,7</b>	275.400,0
Tempo execução (s)	<b>668,2</b>	725,9
Número iterações	<b>2.500,0</b>	2.500,0

De posse destes dados, e daqueles resultantes das configurações anteriores, fica evidente a superioridade das soluções obtidas com o operador de mutação Troca+Viz com  $p = 0,1$ , já que o número de interfaces, a quantidade bombeada, e conseqüentemente o valor função de avaliação, são bem menores. Além de terem sido obtidas soluções viáveis para todas as rodadas executadas. Deste ponto em diante, quando mencionado a mutação Troca+Viz, considera-se  $p = 0,1$ .

A fim de se verificar a influência do uso do elitismo e do pós-processamento na qualidade das soluções, foram executadas 6 rodadas do algoritmo para cada configuração testada até agora, três utilizando elitismo e três não, totalizando 18 experimentos. E ainda, para cada experimento foi realizado o pós-processamento das soluções obtidas. O critério de parada utilizado anteriormente provocou a convergência prematura das soluções obtidas com uso do elitismo. Sendo assim, para todos os experimentos realizados nesta etapa de testes, foi utilizado como critério de parada o número máximo de gerações igual a 2500. Foram encontradas soluções viáveis para todas as rodadas executadas. As médias dos resultados obtidos se encontram nas três tabelas a seguir:

Tabela 7.6: Comparação da média dos resultados das rodadas realizadas com e sem elitismo e pós-processamento, para a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação por Vizinhança.

Elitismo	Média dos Resultados	Algoritmo utilizado	
		AG-TRANSF1	AG-TRANSF1 + Pós-processamento
<b>Não</b>	Função de avaliação	2.174.200,0	2.174.200,0
	Violação cap. tanques (m <sup>3</sup> )	0,0	0,0
	Número interfaces	19,7	19,7
	Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	207.533,3	207.533,3
	Número de paradas	19,3	12,0
	Tempo execução (s)	704,29	0,73
<b>Sim</b>	Função de avaliação	1.792.840,0	<b>1.759.506,7</b>
	Violação cap. tanques (m <sup>3</sup> )	0,0	<b>0,0</b>
	Número de interfaces	15,7	<b>15,3</b>
	Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	226.173,3	<b>226.173,3</b>
	Número de paradas	14,0	<b>9,3</b>
	Tempo execução (s)	705,35	<b>0,90</b>

Tabela 7.7: Comparação da média dos resultados das rodadas realizadas com e sem elitismo e pós-processamento, para a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação por Troca.

Elitismo	Média dos Resultados	Algoritmo utilizado	
		AG-TRANSF1	AG-TRANSF1 + Pós-processamento
<b>Não</b>	Função de avaliação	1.987.946,7	<b>1.787.946,7</b>
	Violação cap. tanques (m <sup>3</sup> )	0,0	<b>0,0</b>
	Número interfaces	16,7	<b>14,7</b>
	Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	321.280,0	<b>321.280,0</b>
	Número de paradas	42,3	<b>9,7</b>
	Tempo execução (s)	778,57	<b>0,63</b>
<b>Sim</b>	Função de avaliação	3.318.066,7	2.418.066,7
	Violação cap. tanques (m <sup>3</sup> )	0,0	0,0
	Número de interfaces	30,3	21,3
	Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	284.733,3	284.733,3
	Número de paradas	52,0	12,0
	Tempo execução (s)	704,59	0,75

**Tabela 7.8: Comparação da média dos resultados das rodadas realizadas com e sem elitismo e pós-processamento, para a configuração do AG-TRANSF1 que utiliza Mutação Troca+Viz.**

Elitismo	Média dos Resultados	Algoritmo utilizado	
		AG-TRANSF1	AG-TRANSF1 + Pós-processamento
<b>Não</b>	Função de avaliação	1.134.666,7	1.101.333,3
	Violação cap. tanques (m <sup>3</sup> )	0,0	0,0
	Número interfaces	9,3	9,0
	Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	201.333,3	201.333,3
	Número de paradas	33,3	8,7
	Tempo execução (s)	728,33	0,82
<b>Sim</b>	Função de avaliação	976.453,3	<b>943.120,0</b>
	Violação cap. tanques (m <sup>3</sup> )	0,0	<b>0,0</b>
	Número de interfaces	8,0	<b>7,7</b>
	Quantidade bombeada (m <sup>3</sup> )	176.453,3	<b>176.453,3</b>
	Número de paradas	28,0	<b>8,7</b>
	Tempo execução (s)	735,90	<b>0,85</b>

A análise dos dados das tabelas anteriores confirma a superioridade da configuração que utiliza mutação Troca+Viz em relação às demais. Ela obteve os melhores resultados para todas as combinações testadas.

O uso do elitismo só não foi favorável na configuração que utiliza a mutação por troca. Já o pós-processamento melhorou a média dos resultados obtidos com todas as configurações testadas. O número de paradas teve uma redução maior para as configurações que usaram mutação por troca e Troca+Viz. Isto porque o uso da mutação por vizinhança já garante um agrupamento maior dos lotes de produtos, reduzindo, por consequência, o número de paradas que ocorrem nos dutos. Por este motivo também, a redução do número de interfaces foi maior para a configuração que utiliza a mutação por troca. E esta redução só não foi maior na configuração com mutação Troca+Viz, pois ela inicialmente já obteve soluções com um número pequeno de interfaces.

Portanto, a configuração escolhida para o AG-TRANSF, versões 1 e 2, é a que faz uso do operador mutação Troca+Viz, e que possui as características apresentadas na Tabela 7.9.

**Tabela 7.9: Configuração escolhida para o AG-TRANSF: características e valores dos parâmetros**

Parâmetros	Valores
Mutação	Troca+Viz ( $p = 0,1$ )
Critério de parada	Número máximo de gerações
Número máximo de gerações	2.500
Tamanho da população	150
Taxa de crossover	0,9
Taxa de mutação	0,9

Embora a configuração que utiliza mutação Troca+Viz tenha obtido melhores soluções com o elitismo, a sua eficiência ainda será testada na resolução das demais instâncias do problema.

### 7.3 SOLUÇÕES DAS INSTÂNCIAS

Como já foi dito, na seção 7.1, são conhecidas soluções viáveis para todas as instâncias criadas. Estas soluções foram avaliadas segundo os critérios do PTRES e seus resultados são reportados na Tabela 7.10.

**Tabela 7.10: Resultados das soluções viáveis conhecidas para as instâncias do PTRES**

Resultados	P07-1	P07-2	P07-3	P14-1	P14-2
Função de avaliação	1.592.320	1.588.120	1.726.720	2.663.680	2.565.680
Violação cap. tanques (m3)	0	0	0	0	0
Número de interfaces	12	12	14	19	18
Quantidade bombeada (m3)	392.320	388.120	326.720	763.680	765.680
Número de paradas	1	3	4	2	3

Todas as instâncias criadas para o PTRES foram resolvidas utilizando a configuração do AG-TRANSF definida na seção anterior. Cada instância foi testada com suas duas versões, e também com e sem o uso do elitismo. Sendo rodadas três vezes para cada uma dessas combinações. O pós-processamento foi aplicado a todas as soluções obtidas.

Estes experimentos geraram um conjunto de dados que foi agrupado em 10 tabelas com as médias dos resultados obtidos para cada instância e cada versão do AG-TRANSF utilizada. Tais tabelas se encontram no Apêndice II.

A seguir é feita uma análise dos melhores resultados obtidos tanto pelo AG-TRANSF1 como para o AG-TRANSF2. Como o pós-processamento sempre gera soluções melhores, a análise dos dois algoritmos será feita com base apenas nas informações obtidas com o pós-processamento das soluções.

### 7.3.1 Instâncias P07-1 e P07-2

A diferença entre essas duas instâncias é que as condições iniciais do sistema dutoviário e os valores de demanda e produção para o horizonte de planejamento para a instância 1 são mais “justas” do que para a instância 2.

Isto faz com que seja mais difícil para o AG-TRANSF obter sempre boas soluções. O que pode ser observado, na Tabela 7.11, pela média dos resultados obtidos com os dois algoritmos para a instância 1, elas são bem maiores do que a melhor solução encontrada.

**Tabela 7.11: Instância P07-1. Melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.**

Resultados	AG-TRANSF1		AG-TRANSF2	
	Valores médios	Melhor solução	Valores médios	Melhor solução
Função de avaliação	176.511.666,7	<b>842.960,0</b>	2.165.613,3	969.400,0
Violação cap. tanques (m3)	17,5	<b>0,0</b>	0,0	0,0
Número de interfaces	17,0	<b>7,0</b>	19,3	8,0
Quantidade bombeada (m3)	208.480,0	<b>142.960,0</b>	232.280,0	169.400,0
Número de paradas	9,7	<b>5,0</b>	7,7	6,0
Número de soluções viáveis	2	<b>1</b>	3	1
Elitismo	SIM	<b>NÃO</b>	SIM	SIM

No caso do AG-TRANSF1, o alto valor para a média da função de avaliação se explica pela violação da capacidade dos tanques na solução de uma das rodadas executadas (das três soluções obtidas, uma é inviável), e também pelo alto valor do número de interfaces encontrado em uma das rodadas, o que elevou a média do número de interfaces das soluções. A obtenção de uma solução com um número elevado de interfaces também explica o alto valor para a média da função de avaliação das soluções encontradas pelo AG-TRANSF2.

O mesmo não acontece com a instância P07-2, o desvio padrão dos resultados encontrados é pequeno, indicando que em todas as rodadas executadas, os algoritmos sempre obtiveram boas soluções (vide Tabela 7.12).

**Tabela 7.12: Instância P07-2. Melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.**

Resultados	AG-TRANSF1		AG-TRANSF2	
	Valores médios	Melhor solução	Valores médios	Melhor solução
Função de avaliação	943.120,0	<b>901.680,0</b>	1.102.360,0	996.160,0
Violação cap. tanques (m3)	0,0	<b>0,0</b>	0,0	0,0
Número de interfaces	7,7	<b>7,0</b>	9,0	8,0
Quantidade bombeada (m3)	176.453,3	<b>201.680,0</b>	202.360,0	196.160,0
Número de paradas	8,7	<b>9,0</b>	7,3	7,0
Número de soluções viáveis	3	<b>1</b>	3	1
Elitismo	SIM	<b>SIM</b>	NÃO	SIM

Ambos os algoritmos encontraram soluções melhores do que as já conhecidas para estas duas instâncias, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.10.

A seguir, na Figura 7.2 e na Figura 7.3, são apresentados os gráficos dos bombeamentos de produtos referentes à melhor solução encontrada para as instâncias P07-1 e P07-2, ambas obtidas pelo AG-TRANSF1. Cada barra no gráfico representa o bombeamento de um lote de determinado produto.

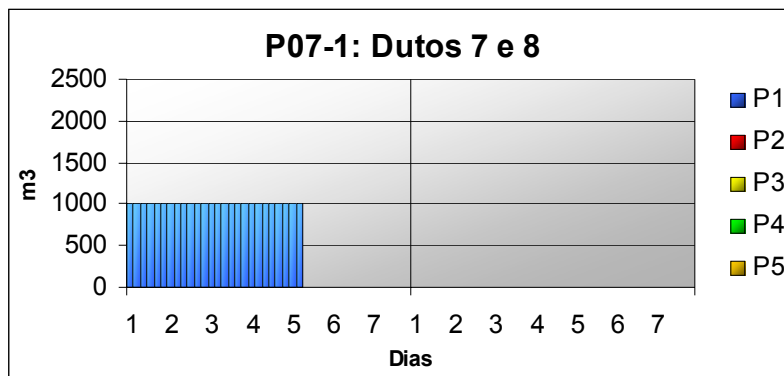
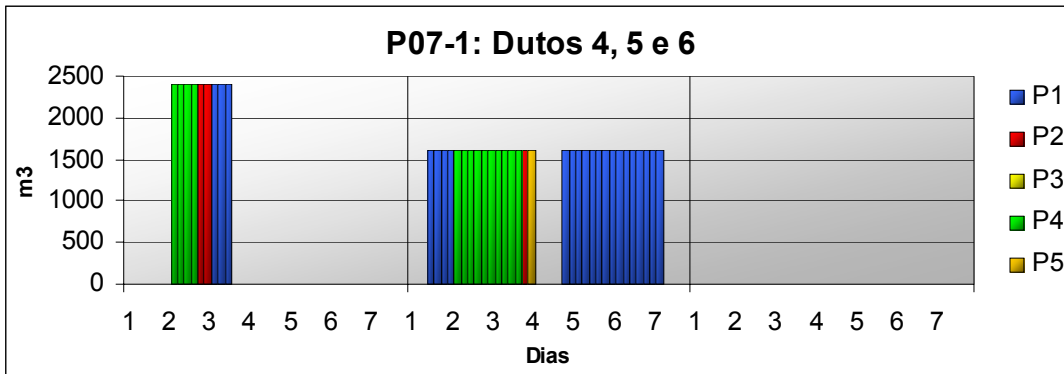
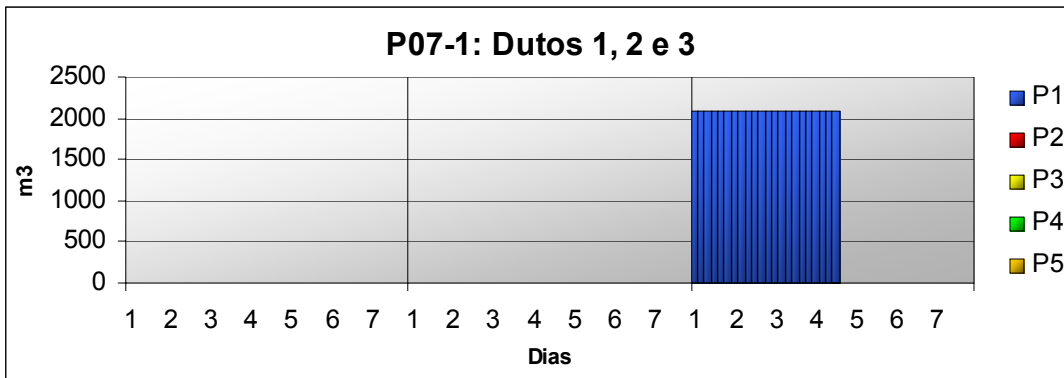


Figura 7.2: Gráfico de bombeamento de produtos para a instância P07-1

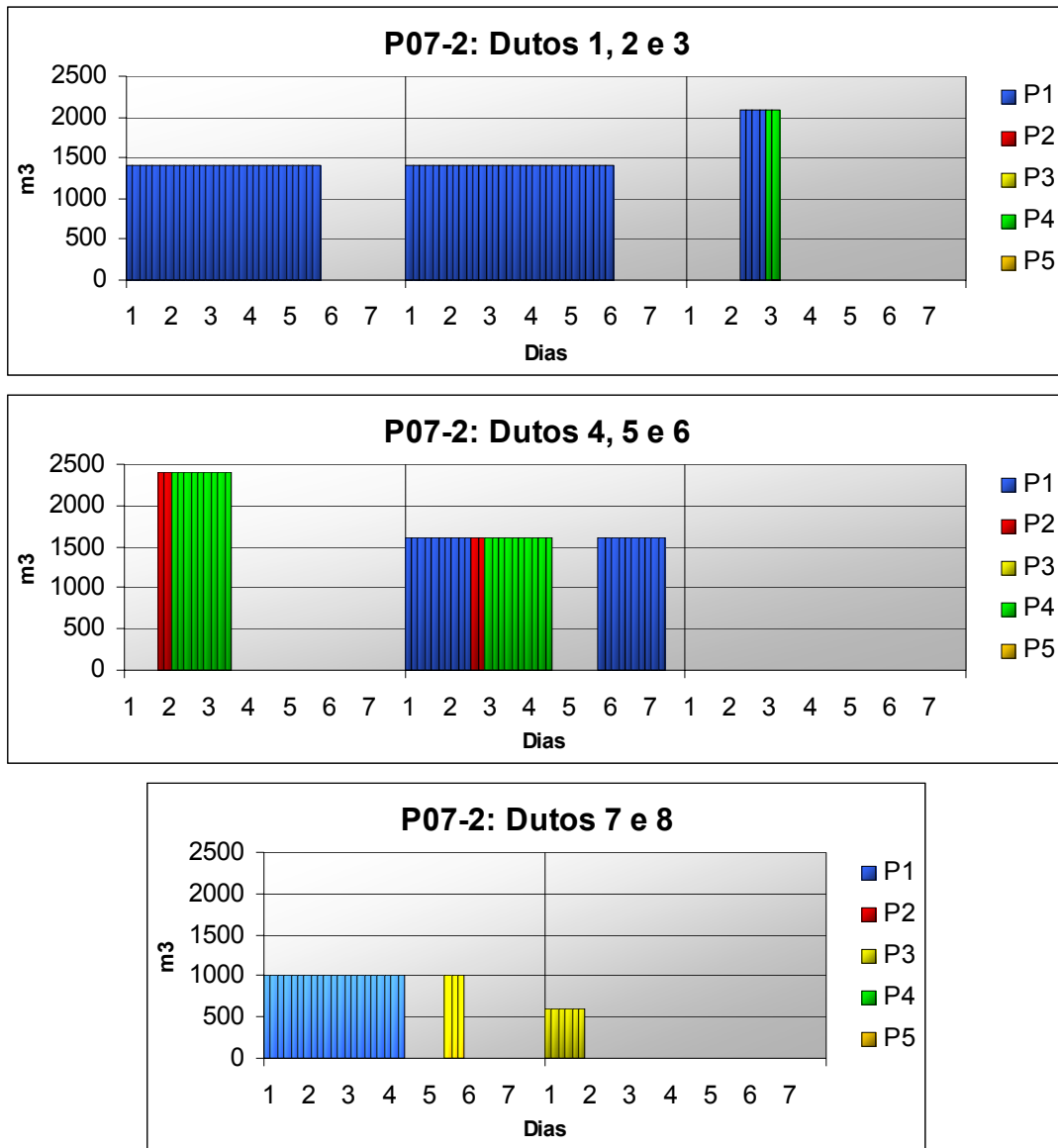


Figura 7.3: Gráfico de bombeamento de produtos para a instância P07-2

Além disso, também é apresentado logo abaixo, o relatório da programação de transferência de produtos referente à melhor solução encontrada para a instância P07-2. Este relatório, gerado pelo algoritmo, agrupa as informações contidas no gráfico de bombeamento, e informa para cada duto, o início e fim do período de bombeamento de cada batelada de produto, bem como a capacidade ociosa dos dutos.



%---- Relatorio de Programação de Transferencia de Produtos ----%

%----- Instancia P07-2 -----%

Quantidade total de produtos bombeados: 201680 m3  
Numero de interfaces: 7  
Numero de paradas nos dutos: 9  
Violação total da capacidade dos tanques: 0  
Avaliação da Programação: 9.0168e+005

%-----%

Duto 1: REPLAN ==> Barueri

00:00 / 1 - 19:59 / 5 : Produto 1 - 40600 m3.  
20:00 / 5 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 31.0 %

Duto 2: Barueri ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 03:59 / 6 : Produto 1 - 43400 m3.  
04:00 / 6 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 26.2 %

Duto 3: REVAP ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 07:59 / 2 : Parado  
08:00 / 2 - 23:59 / 2 : Produto 1 - 8320 m3.  
00:00 / 3 - 07:59 / 3 : Produto 4 - 4160 m3.  
08:00 / 3 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 85.7 %

Duto 4: S.Caet. ==> Cubatao

00:00 / 1 - 19:59 / 1 : Parado  
20:00 / 1 - 03:59 / 2 : Produto 2 - 4800 m3.  
04:00 / 2 - 15:59 / 3 : Produto 4 - 21600 m3.  
16:00 / 3 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 73.8 %

Duto 5: Cubatao ==> Santos

00:00 / 1 - 15:59 / 2 : Produto 1 - 16000 m3.  
16:00 / 2 - 23:59 / 2 : Produto 2 - 3200 m3.  
00:00 / 3 - 15:59 / 4 : Produto 4 - 16000 m3.  
16:00 / 4 - 19:59 / 5 : Parado  
20:00 / 5 - 11:59 / 7 : Produto 1 - 16000 m3.  
12:00 / 7 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 23.8 %

Duto 6: Cubatao ==> RPBC

00:00 / 1 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 100.0 %

```
Duto 7:  RPBC      ==> Cubatao

00:00 / 1 - 11:59 / 4 : Produto 1 - 21000 m3.
12:00 / 4 - 11:59 / 5 : Parado
12:00 / 5 - 23:59 / 5 : Produto 5 - 3000 m3.
00:00 / 6 - 23:59 / 7 : Parado
-----
Capacidade ociosa: 42.9 %

Duto 8:  RECAP     ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 23:59 / 1 : Produto 3 - 3600 m3.
00:00 / 2 - 23:59 / 7 : Parado
-----
Capacidade ociosa: 85.7 %
```

**Figura 7.4: Relatório de programação de transferência de produtos da instância P07-2**

Os gráficos de bombeamento e os relatórios de programação de transferência de produtos para as demais instâncias, incluindo a P07-1, são apresentados no Apêndice III.

### **7.3.2 Instâncias P14-1 e P14-2**

Estas duas instâncias têm as mesmas características das instâncias apresentadas anteriormente, com relação à sua dificuldade de solução.

A dificuldade da instância P14-1 fica evidenciada pelo número de soluções viáveis encontradas pelos dois algoritmos: apenas uma (vide Tabela 7.13). A violação da capacidade dos tanques nas soluções inviáveis faz com que o valor da função de avaliação seja alto. Assim, a média da função de avaliação das rodadas ficou bem mais alta do que o valor da função de avaliação encontrado para a melhor solução. Note que a média do número de interfaces encontrada por cada algoritmo é menor do que o número de interfaces da melhor solução. Isto porque, para essa instância, o algoritmo obteve soluções inviáveis com número de interfaces bem menor do que para a solução viável encontrada.

Este foi o pior resultado do AG-TRANSF em relação às melhores soluções obtidas, já que os dois algoritmos encontraram soluções piores que aquela conhecida para esta instância, cujos resultados são dados na Tabela 7.10.

**Tabela 7.13: Instância P14-1. Melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.**

Resultados	AG-TRANSF1		AG-TRANSF2	
	Valores médios	Melhor solução	Valores médios	Melhor solução
Função de avaliação	1,290E+09	<b>4,771E+06</b>	1,462E+10	6,556E+06
Violação cap. tanques (m3)	128,6	<b>0,0</b>	1.461,9	0,0
Número de interfaces	33,0	<b>40,0</b>	30,0	58,0
Quantidade bombeada (m3)	731.573,3	<b>770.560,0</b>	662.960,0	755.640,0
Número de paradas	13,3	<b>14,0</b>	13,0	19,0
Número de soluções viáveis	1	<b>1</b>	1	1
Elitismo	NÃO	<b>NÃO</b>	NÃO	NÃO

Já para a instância P14-2 todas as rodadas dos algoritmos geraram boas soluções, fazendo com que a média dos resultados se aproximasse do valor da melhor solução encontrada (vide Tabela 7.14). E estas soluções encontradas são melhores do que a solução conhecida para essa instância, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.10.

**Tabela 7.14: Instância P14-2. Melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.**

Resultados	AG-TRANSF1		AG-TRANSF2	
	Valores médios	Melhor solução	Valores médios	Melhor solução
Função de avaliação	2,714E+06	<b>2,255E+06</b>	3,019E+06	2,363E+06
Violação cap. tanques (m3)	0,0	<b>0,0</b>	0,0	0,0
Número de interfaces	20,0	<b>16,0</b>	22,3	16,0
Quantidade bombeada (m3)	713.733,3	<b>655.000,0</b>	785.386,7	762.840,0
Número de paradas	7,3	<b>7,0</b>	7,3	10,0
Número de soluções viáveis	3	<b>1</b>	3	1
Elitismo	NÃO	<b>NÃO</b>	NÃO	NÃO

### 7.3.3 Instância P07-3

As instâncias resolvidas até agora, foram construídas para a Rede de Escuros Simplificada apresentada na Figura 5.1. Assim para estas instâncias, as soluções

viáveis obtidas pelo AG-TRANSF2 devem indicar para todos os dutos o sentido normal de operação, o que de fato ocorreu.

A fim de testar se o algoritmo encontraria soluções para o caso onde o melhor sentido de operação dos dutos fosse o reverso, foi criada esta instância de número 3, apenas para o horizonte de programação de 7 dias. Ela foi construída de tal forma que obrigasse uma transferência de produtos nos dutos 1 e 2 nos seus sentidos reversos.

Uma observação a ser feita é que, para executar essa instância utilizando o AG-TRANSF1, a direção dos dutos 1 e 2 teve que ser alterada no grafo que representa a rede.

A Tabela 7.15 apresenta os resultados obtidos pelos dois algoritmos.

**Tabela 7.15: Instância P07-3. Melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.**

Resultados	AG-TRANSF1		AG-TRANSF2	
	Valores médios	Melhor solução	Valores médios	Melhor solução
Função de avaliação	1,836E+06	<b>1,457E+06</b>	2,375E+11	1,557E+06
Violação cap. tanques (m3)	0,0	<b>0,0</b>	23.746,0	0,0
Número de interfaces	15,3	<b>12,0</b>	19,3	13,0
Quantidade bombeada (m3)	302.960,0	<b>257.160,0</b>	239.786,7	256.960,0
Número de paradas	6,3	<b>9,0</b>	9,3	8,0
Número de soluções viáveis	3	<b>1</b>	2	1
Elitismo	NÃO	<b>NÃO</b>	SIM	NÃO

As soluções encontradas são melhores do que a solução conhecida para essa instância, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.10, no início desta seção. O AG-TRANSF2, embora não tenha obtido resultados tão bons quanto o AG-TRANSF1, se mostrou eficaz em encontrar soluções viáveis para essa instância, já que indicou corretamente o sentido de operação dos dutos: sentido reverso para os duto 1 e 2, sentido normal para os demais dutos.

## 7.4 CONCLUSÕES SOBRE OS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS EXECUTADOS

A partir da análise dos resultados obtidos pelos experimentos computacionais pode-se dizer que:

- Os algoritmos AG-TRANSF1 e 2 foram considerados satisfatórios para solucionar as instâncias apresentadas para o PTRES. Pois para quatro das cinco instâncias testadas, foram encontradas soluções melhores do que aquelas já conhecidas.
- O AG-TRANSF2 obteve soluções bem próximas, porém piores, que aquelas encontradas pelo AG-TRANSF1 para todas as instâncias testadas. O fato das soluções serem piores se deve à quantidade adicional de decisões a serem tomadas pelo algoritmo, que são os sentidos de operação dos dutos. Porém, a proximidade das soluções obtidas com o AG-TRANSF2 em relação às melhores soluções encontradas para as instâncias faz com que o seu uso seja considerado.
- O uso do elitismo não foi garantia para obtenção das melhores soluções para as instâncias testadas. O uso do AG-TRANSF associado ao elitismo obteve a melhor solução para apenas uma instância no caso da versão 1 do algoritmo, e duas instâncias para o caso da versão 2. No entanto seu uso não pode ser descartado antes que se faça uma série de testes com outras instâncias e mais rodadas dos algoritmos para confirmar tal fato.
- O pós-processamento além de reduzir o número de paradas nos dutos, em alguns casos reduz significativamente o número de interfaces de produtos. Por esse motivo, dentre as rodadas executadas para cada instância, nem sempre a melhor solução obtida com esse procedimento provém da melhor solução gerada apenas pelo AG-TRANSF. Em nenhum dos testes realizados o pós-processamento alterou a quantidade violada da capacidade dos tanques.
- Os tempos computacionais gastos na execução dos algoritmos variam somente com o horizonte de programação considerado. O AG-TRANSF é executado em média em 11 minutos para o horizonte de 7 dias e em 25 minutos para o horizonte de 14 dias. Já o algoritmo que faz o pós-processamento gasta menos de 3 segundos para realizar suas operações.

## 8 CONCLUSÕES

O Problema de Transporte Dutoviário tem como objetivo determinar quais produtos e em que seqüência eles devem ser bombeados nos dutos. Isto deve ser feito de modo que as restrições operacionais do sistema sejam satisfeitas e que custos associados ao transporte dos produtos ou outros critérios sejam minimizados.

O objetivo desse trabalho foi desenvolver uma ferramenta computacional para encontrar soluções viáveis para uma versão simplificada do Problema de Transporte de produtos na Rede de Escuros operada pela Transpetro, que foi denominado PTRE. As simplificações do problema incluem: considerar que os dutos da rede podem operar em apenas um sentido e que não existem restrições de compatibilidade entre os produtos que são transportados contiguamente pelos dutos.

A literatura sobre o problema de transporte dutoviário, mesmo que ainda escassa, aponta uma tendência dos autores a utilizarem métodos heurísticos para tratar dos problemas de transporte em rede de dutos. Assim, seguindo esta tendência, foi proposto e implementado um modelo em Algoritmo Genético para a solução do PTRE Simplificado.

Foram feitas duas versões para o modelo em algoritmo genético, ambas com o objetivo de encontrar uma programação de transferência de produtos viável para uma instância do PTRE Simplificado. Porém a primeira, AG-TRANSF1, considera que os sentidos de operação dos dutos da rede estão fixos. E a segunda, AG-TRANSF2, determina quais devem ser os sentidos de operação dos dutos. Além disso, ainda foi criado um algoritmo de pós-processamento que reduz o número de paradas nos dutos, e em alguns casos o número de interfaces de produtos das programações obtidas pelo AG-TRANSF1 e 2.

Pelos experimentos computacionais realizados, as duas versões do AG-TRANSF em conjunto com o pós-processamento, obtiveram soluções viáveis para as 5 instâncias testadas. Cada instância foi construída a partir de uma solução viável. Assim, estas soluções viáveis são as soluções conhecidas para cada instância.

Somente para uma das instâncias os resultados obtidos foram piores que a solução conhecida para a mesma. Isto demonstra um resultado satisfatório dos algoritmos para as instâncias testadas e cumpre com o objetivo deste trabalho.

O fato do AG-TRANSF1 não precisar decidir o melhor sentido de operação para os dutos, explica seu melhor desempenho em relação à outra versão. Porém, a proximidade dos resultados obtidos pelas duas versões inspira o acréscimo de novas características ao AG-TRANSF2, de forma a torná-lo mais representativo para o problema real de transporte de produtos na Rede de Escuros.

Infelizmente, por dificuldade na obtenção de dados, não foi possível realizar uma comparação das soluções obtidas pelo AG-TRANSF com a programação de transferência de produtos elaborada pela Transpetro. O material que se tinha disponível, e inclusive foi utilizado para a criação das instâncias para o PTRES, eram um relatório de planejamento mensal com informações sobre capacidade dos tanques, produção e demanda, e um relatório dos bombeamentos de produtos realizados na Rede de Escuros neste mesmo intervalo de tempo. Porém, os bombeamentos realizados não seguem a programação inicialmente elaborada com as informações do planejamento mensal, pois a programação é refeita diariamente para acompanhar as alterações das condições de operação do sistema dutoviário, como perda de produção numa refinaria, parada de dutos, terminais, etc.

Sobre o modelo em Algoritmo Genético, conclui-se que ele representou bem o PTRES e que ainda tem potencial para ser melhorado através da incorporação de outras restrições do problema original. O uso do elitismo foi testado e se mostrou ineficiente para obter as melhores soluções para a maioria das instâncias. A dificuldade encontrada na técnica utilizada foi a determinação dos parâmetros de controle do AG, foram necessários muitos testes para se chegar a um conjunto de valores satisfatório. Quanto ao tempo computacional gasto na solução das instâncias, este ficou em torno de 10 minutos para instâncias com horizonte de programação de 7 dias, e 25 minutos para o horizonte de 14 dias.

As sugestões de continuidade para este trabalho são:

- Inclusão da restrição de compatibilidade de produtos e/ou levar em consideração o uso de selos
- Inclusão da operação de reversão nos dutos

- Redução do intervalo de discretização do horizonte de tempo ou elaboração de um método para tratar os dutos de pequena capacidade da rede. Isto porque, devido à discretização feita nos dutos, as suas capacidades tiveram que ser alteradas para que se tivesse um número inteiro de trechos para cada duto. Com isso, os dutos que interligam a RPBC e o terminal de Cubatão ficaram super dimensionados.
- Criação de um conjunto grande de instâncias para testes dos algoritmos



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M.R., HAMACHER, S., PACHECO, M.A.C. e VELLASCO, M.M.B.R., 2003, "Optimizing the production scheduling of a petroleum refinery through genetic algorithms", *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice*, v.10, n.1, pp.35-44.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2007, *Anuário Estatístico 2006*. Disponível em: <[http://www.anp.gov.br/conheca/anuario\\_2006.asp](http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2006.asp)>, acessado em: 25 de fevereiro.
- BARBOZA, A.O., 2005, *Simulação e técnicas da computação evolucionária aplicadas a problemas de programação linear inteira mista*. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.
- BEASLEY, D., BULL, D.R. e MARTIN, R.R., 1993, "An overview of genetic algorithms: part 1, fundamentals", *University Computing*, v.15, n.2, pp.58-69.
- BRACONI, V.M., 2002, *Heurísticas multifluxo para roteamento de produtos em redes dutoviárias*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Informática, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CAFARO, D.C. e CERDÁ, J., 2004, "Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation", *Computers & Chemical Engineering*, v.28, n.10, pp.2053-2068.
- CAMPONOGARA, E., 1995, *A-Teams para um problema de transporte de derivados de petróleo*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- CRANE, D.S., WAINWRIGHT, R.L. e SCHOENEFELD, D.A., 1999. "Scheduling of multi-product fungible liquid pipelines using genetic algorithms". In: *Proceedings of the 1999 ACM Symposium on Applied Computing*, pp. 280-285, San Antonio, Texas, USA, March.
- DE LA CRUZ, J.M., DE ANDRÉS-TORO, B., HERRAN, A., PORTA, E.B. e BLANCO, P.F., 2003. "Multiobjective optimization of the transport in oil pipelines networks". In: *Proceedings of the IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2003)*, v. 1, pp. 566-573, Lisboa, Portugal, September.

- DE LA CRUZ, J.M., HERRAN-GONZÁLEZ, A., RISCO-MARTÍN, J.L. e ANDRÉS-TORO, B., 2005, "Hybrid heuristic and mathematical programming in oil pipelines networks: Use of immigrants", *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, v.6A, n.1, pp.9-19.
- GOLDBERG, D.E., 1989, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. 1 ed. USA, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- HANE, C.A. e RATLIFF, H.D., 1995, "Sequencing inputs to multi-commodity pipelines", *Annals of Operations Research*, v.57, n.1, pp.73-101.
- HINTERDING, R., MICHALEWICZ, Z. e EIBEN, A.E., 1997. "Adaptation in evolutionary computation: a survey". In: *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 65-69. , Indianapolis, USA, April.
- IBP - INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS, 2007, *Informações sobre a indústria: Transportes e Dutos*. Disponível em: <<http://www.ibp.org.br/planilhas/t.16.1.xls>>, acessado em: 26 de fevereiro.
- JITTAMAI, P., 2004, *Analysis of oil-pipeline distribution of multiple products subject to delivery time-windows*. Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
- JOLY, M., 1999, *Técnicas de otimização mista-inteira para o scheduling e gerenciamento da produção em refinarias de petróleo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- LIPORACE, F.D.S., 2005, *Planejadores para transporte em poldutos*. Tese de Doutorado, Departamento de Informática, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- LOBO, F.G. e GOLDBERG, D.E., 2004, "The parameter-less genetic algorithm in practice", *Information Sciences*, v.167, n.1-4, pp.217-232.
- MAGATAO, L., ARRUDA, L.V.R. e NEVES, J.F., 2004, "A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline", *Computers & Chemical Engineering*, v.28, n.1-2, pp.171-185.
- MAN, K.F., TANG, K.S. e KWONG, S., 1996, "Genetic algorithms: concepts and applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v.43, n.5, pp.519-534.
- MARCELLINO, F.J.M., 2006, *Solução do problema de transporte de derivados de petróleo em oleodutos através de um modelo de satisfação de restrições distribuído com otimização*. Dissertação de Mestrado, Área de Informática, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil.

- MÁS, R. e PINTO, J.M., 2003, "A mixed-integer optimization strategy for oil supply in distribution complexes", *Optimization and Engineering*, v.4, n.1, pp.23-64.
- MICHALEWICZ, Z., 1996, *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. 3 ed. New York, Springer-Verlag.
- MILIDIÚ, R.L. e LIPORACE, F.D.S., 2003, Planning of pipeline oil transportation with interface restrictions is a difficult problem, PUC-Rio Inf.MCC56/03.
- MILIDIÚ, R.L., LIPORACE, F.D.S. e LUCENA, C.J.P.D., 2003. "Pipesworld: planning pipeline transportation of petroleum derivatives". In: *Proceedings of ICAPS'03 Workshop on the Competition: Impact, Organization, Evaluation, Benchmarks*, pp. 6, Trento, Itália, June.
- MILIDIÚ, R.L., PESSOA, A.A., BRACONI, V., LABER, E.S. e REY, P.A., 2001. "Um algoritmo Grasp para o problema de transporte de derivados de petróleo em oleodutos". In: *Anais do XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, pp. 237-246, Campos do Jordão, SP.
- MILIDIÚ, R.L., PESSOA, A.A. e LABER, E.S., 2002. "Pipeline transportation of petroleum products with no due dates". In: *Proceedings of 5th Latin American Symposium on Theoretical Informatics (LATIN 2002)*, v. 2286, pp. 248-262, Cancun, Mexico, April.
- MILIDIÚ, R.L., PESSOA, A.A. e LABER, E.S., 2003, "The complexity of makespan minimization for pipeline transportation", *Theoretical Computer Science*, v.306, n.1-3, pp.339-351.
- NEIRO, S.M.S. e PINTO, J.M., 2004, "A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains", *Computers & Chemical Engineering*, v.28, n.6-7, pp.871-896.
- PESSOA, A.A., 2003, *Dois problemas de otimização em grafos: Transporte em redes de dutos e Busca com custos de acesso*. Tese de Doutorado, Departamento de Informática, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PINTO, J.M., JOLY, M. e MORO, L.F.L., 2000, "Planning and scheduling models for refinery operations", *Computers & Chemical Engineering*, v.24, n.9-10, pp.2259-2276.
- REJOWSKI JR., R., 2001, *Programação de distribuição dutoviária de derivados de petróleo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- REJOWSKI JR., R. e PINTO, J.M., 2003, "Scheduling of a multiproduct pipeline system", *Computers & Chemical Engineering*, v.27, n.8-9, pp.1229-1246.

- REJOWSKI JR., R. e PINTO, J.M., 2004, "Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling", *Computers & Chemical Engineering*, v.28, n.8, pp.1511-1528.
- SÁNCHEZ, Á.G. e MIER, M.O., 2005. "Programación de oleoductos: presentación del problema y revisión de enfoques". In: *Anales del IX Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2005)*, pp. 10, Gijón, Espanha, Setembro.
- SANGINETO, M.L.T., 2006, Um algoritmo genético para a programação de transferências em um poliduto. *Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- SASIKUMAR, M., RAVI PRAKASH, P., PATIL, S.M. e RAMANI, S., 1997, "Pipes: A heuristic search model for pipeline schedule generation", *Knowledge-Based Systems*, v.10, n.3, pp.169-175.
- SHAH, N., 1996, "Mathematical programming techniques for crude oil scheduling", *Computers & Chemical Engineering*, v.20, n.Supplement 2, pp.S1227-S1232.
- SOUZA FILHO, E.M.D., ALVES, V.R.F.M. e FERREIRA FILHO, V.J.M., 2006. "Utilização de técnicas de pesquisa operacional em problemas de distribuição dutoviária: uma revisão". In: *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, pp. 1873-1880, Goiânia, GO, Setembro.
- TRANSPETRO, 2007a, A Empresa: Transpetro, Lei No 9.478. Disponível em: <<http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/transpetro/lei9487.shtml>>, acessado em: 23 de fevereiro.
- TRANSPETRO, 2007b, A Empresa: Transpetro. Disponível em: <<http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/transpetro/transpetro.shtml>>, acessado em: 23 de fevereiro.

# APÊNDICE I: DADOS DE ENTRADA DAS INSTÂNCIAS

Arquivos de entrada para as instâncias criadas para o PTRES.

## Instancia P07-1.ini

7

4

37000	5000	500	-1000	-2000
0	0	0	0	0
-45000	0	0	0	0
30000	6000	3000	20500	-3500
-13000	-4000	0	-7000	0
-55000	-6000	0	-25000	-2000
0	0	0	0	5500
0	0	4500	0	0

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

111000	20000	44000	42000	82000
15000	12000	14000	15000	8000
50000	23000	17000	46000	18000
119000	15000	153000	37000	88000
30000	11000	6000	20000	10000
56000	20000	0	29000	10000
70000	0	29000	0	120000
8000	0	18000	0	0

22200	10000	9500	22000	35000
4000	6000	14000	3000	2000
22360	20000	6000	14000	5000
35520	8000	77000	6620	17500
10400	3000	5000	13800	3000
24600	5000	0	9000	1950
28000	0	11000	0	95500
7000	0	12500	0	0

1 1 1 1 1 1 1 1 1  
1 1 1  
1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 1  
1 1 1  
1 1  
1  
1  
1  
3

Instancia P07-2.ini

7

4

37000	5000	500	-1000	-2000
0	0	0	0	0
-55000	0	-9000	0	0
30000	6000	3000	15000	-4000
0	-4000	0	0	0
-55000	-6000	0	-24000	-3500
0	0	0	0	9000
0	0	4500	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

111000	20000	44000	42000	82000
15000	12000	14000	15000	8000
50000	23000	17000	46000	18000
119000	15000	153000	37000	88000
30000	11000	6000	20000	10000
56000	20000	0	29000	10000
70000	0	29000	0	100000
8000	0	18000	0	0

22200	10000	10000	22000	35000
4000	6000	14000	3000	2000
12000	20000	6000	14000	5000
36000	8000	77000	23000	17000
5500	3000	5000	2000	1000
24000	5000	0	9000	4000
28000	0	11000	0	94000
6000	0	12500	0	0

1 1 1 1 1 1 1 1 1  
1 1 1  
1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 1  
1 1 1  
1 1  
1  
1  
3

Instancia P07-3.ini

7

4

37000	5000	-20000	-1000	-2000
0	0	0	0	0
-5000	0	-9000	0	0
30000	6000	3000	15000	-4000
0	-4000	0	0	0
-55000	-6000	0	-24000	-3500
0	0	0	0	9000
0	0	7000	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

111000	20000	44000	42000	82000
15000	12000	14000	15000	8000
50000	23000	17000	46000	18000
119000	15000	153000	37000	88000
30000	11000	6000	20000	10000
56000	20000	0	29000	10000
70000	0	29000	0	100000
8000	0	20000	0	0

22200	10000	12000	22000	35000
4000	6000	6000	3000	2000
14000	20000	6000	14000	7000
36000	8000	77000	23000	17000
5500	3000	5000	2000	1000
24000	5000	0	9000	4000
28000	0	11000	0	94000
6000	0	17000	0	0

1 1 1 1 1 1 1 1 1  
1 1 1  
1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 1  
1 1 1  
1 1  
1  
1  
3

Instancia P14-1.ini

14

4

74000	10000	1000	-2000	-4000
0	0	0	0	0
-90000	0	0	0	0
60000	12000	6000	41000	-7000
-26000	-8500	0	-14000	0
-110000	-12000	0	-50000	-3000
0	0	0	0	11000
0	0	9000	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

111000	20000	44000	42000	82000
15000	12000	14000	15000	8000
50000	23000	17000	46000	18000
119000	15000	153000	37000	88000
30000	10000	6000	20000	10000
56000	20000	0	29000	10000
70000	0	29000	0	120000
8000	0	18000	0	0

44000	5000	9000	23000	37000
4000	6000	14000	3000	2000
14000	20000	6000	22000	5000
70000	2000	74000	9000	21000
1000	7200	5000	8000	5000
30000	11000	0	18000	2900
28000	0	11000	0	90000
7000	0	8000	0	0

1 1 1 1 1 1 1 1 1  
1 1 1  
4 4 4 4 4 4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  
1 1 1  
1 1  
1  
1  
3



Instancia P14-2.ini

14

4

90000	10000	1000	-2000	-4000
0	0	0	0	0
-95000	0	0	0	0
46000	12000	6000	41000	-7000
-30000	-12000	0	-22000	0
-110000	-11000	0	-50000	-16000
0	0	0	0	38000
0	0	9000	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

111000	20000	44000	42000	82000
15000	12000	14000	15000	8000
55000	23000	17000	46000	18000
119000	15000	153000	37000	88000
33000	15000	6000	18000	10000
56000	20000	0	29000	15000
70000	0	29000	0	120000
8000	0	18000	0	0

110000	5000	9000	23000	37000
4000	6000	12000	3000	2000
14000	20000	6000	32000	5000
100000	2000	74000	15000	21000
2000	8000	5000	5000	6000
38000	7000	0	23000	12000
28000	0	11000	0	90000
7000	0	10000	0	0

1 1 1 1 1 1 1 1 1  
1 1 1  
4 4 4 4 4 4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1  
1 1 1  
1 1  
1  
1  
3

## APÊNDICE II: TABELAS COM AS MÉDIAS DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA CADA INSTÂNCIA

Tabelas com as médias dos resultados obtidos para cada instância, após 3 rodadas com cada uma das versões do AG-TRANSF. O pós-processamento foi aplicado a todas as soluções encontradas pelo AG-TRANSF.

P07-1	Resultados	AG-TRANSF1		AG-TRANSF1 + Pós-processamento	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Elitismo	Função de avaliação	178.792.600,0		176.859.266,7	
			299.485.858,6		301.125.112,7
	Violação cap. tanques (m3)	17,5		17,5	
			30,2		30,2
	Número de interfaces	39,7		20,3	
			46,9		19,6
	Quantidade bombeada (m3)	222.746,7		222.746,7	
			107.867,8		107.867,8
Número de paradas	30,0		8,7		
		13,1		4,7	
Tempo exec. (s)	601,93		0,79		
	Soluções viáveis	2		2	
Não	Função de avaliação	176.578.333,3		176.511.666,7	
			301.265.006,9		301.322.190,3
	Violação cap. tanques (m3)	17,5		17,5	
			30,2		30,2
	Número de interfaces	17,7		17,0	
			15,8		14,9
	Quantidade bombeada (m3)	208.480,0		208.480,0	
			103.581,6		103.581,6
Número de paradas	27,3		9,7		
		11,9		6,4	
Tempo exec. (s)	845,54		0,83		
	Soluções viáveis	2		2	
Sim	Função de avaliação	176.578.333,3		176.511.666,7	
			301.265.006,9		301.322.190,3
	Violação cap. tanques (m3)	17,5		17,5	
			30,2		30,2
	Número de interfaces	17,7		17,0	
			15,8		14,9
	Quantidade bombeada (m3)	208.480,0		208.480,0	
			103.581,6		103.581,6
Número de paradas	27,3		9,7		
		11,9		6,4	
Tempo exec. (s)	845,54		0,83		
	Soluções viáveis	2		2	

P07-1	Resultados	AG-TRANSF2		AG-TRANSF2 + Pós-processamento	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Elitismo	Função de avaliação	10.680.840,0		4.614.173,3	
			824.998,9		376.441,9
	Violação cap. tanques (m3)	0,0		0,0	
			0,0		0,0
	Número de interfaces	103,3		42,7	
			6,9		2,9
	Quantidade bombeada (m3)	347.506,7		347.506,7	
			21.486,4		21.486,4
Número de paradas	56,3		13,0		
		4,7		1,0	
Tempo exec. (s)	678,00		0,90		
	Soluções viáveis	3		3	
Não	Função de avaliação	2.365.613,3		2.165.613,3	
			2.406.959,1		2.060.550,5
	Violação cap. tanques (m3)	0,0		0,0	
			0,0		0,0
	Número de interfaces	21,3		19,3	
			18,9		16,0
	Quantidade bombeada (m3)	232.280,0		232.280,0	
			79.828,4		79.828,4
Número de paradas	30,7		7,7		
		10,0		5,7	
Tempo exec. (s)	703,95		0,92		
	Soluções viáveis	3		3	
Sim	Função de avaliação	2.365.613,3		2.165.613,3	
			2.406.959,1		2.060.550,5
Violação cap. tanques (m3)	0,0		0,0		
		0,0		0,0	
Número de interfaces	21,3		19,3		
		18,9		16,0	
Quantidade bombeada (m3)	232.280,0		232.280,0		
		79.828,4		79.828,4	
Número de paradas	30,7		7,7		
		10,0		5,7	
Tempo exec. (s)	703,95		0,92		
	Soluções viáveis	3		3	

P07-2 Elitismo	AG-TRANSF1		AG-TRANSF1 + Pós-processamento		
	Resultados	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
	Função de avaliação	1.134.666,7	103.832,2	1.101.333,3	138.120,0
	Violação cap. tanques (m3)	0,0	0,0	0,0	0,0
	Número de interfaces	9,3	0,5	9,0	0,8
<b>Não</b>	Quantidade bombeada (m3)	201.333,3	38.132,5	201.333,3	38.132,5
	Número de paradas	33,3	9,5	8,7	1,5
	Tempo exec. (s)	728,24		0,78	
	Soluções viáveis	3		3	
	Função de avaliação	976.453,3	21.879,9	943.120,0	35.908,1
	Violação cap. tanques (m3)	0,0	0,0	0,0	0,0
	Número de interfaces	8,0	0,0	7,7	0,5
<b>Sim</b>	Quantidade bombeada (m3)	176.453,3	17.864,8	176.453,3	17.864,8
	Número de paradas	28,0	3,6	8,7	0,6
	Tempo exec. (s)	735,89		0,75	
	Soluções viáveis	3		3	

P07-2 Elitismo	AG-TRANSF2		AG-TRANSF2 + Pós-processamento		
	Resultados	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
	Função de avaliação	1.202.360,0	88.599,4	1.102.360,0	22.491,1
	Violação cap. tanques (m3)	0,0	0,0	0,0	0,0
	Número de interfaces	10,0	0,8	9,0	0,0
<b>Não</b>	Quantidade bombeada (m3)	202.360,0	18.363,9	202.360,0	18.363,9
	Número de paradas	28,0	10,1	7,3	2,1
	Tempo exec. (s)	698,46		0,80	
	Soluções viáveis	3		3	
	Função de avaliação	1.303.560,0	311.891,6	1.236.893,3	363.441,5
	Violação cap. tanques (m3)	0,0	0,0	0,0	0,0
	Número de interfaces	11,0	2,2	10,3	2,6
<b>Sim</b>	Quantidade bombeada (m3)	203.560,0	39.296,8	203.560,0	39.296,8
	Número de paradas	23,3	13,0	9,3	2,5
	Tempo exec. (s)	706,93		0,81	
	Soluções viáveis	3		3	

P07-3 Elitismo	AG-TRANSF1		AG-TRANSF1 + Pós-processamento		
	Resultados	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
	Função de avaliação	2.669.626,7	1.404.154,1	1.836.293,3	350.098,3
	Violação cap. tanques (m3)	0,0	0,0	0,0	0,0
	Número de interfaces	23,7	11,1	15,3	2,5
<b>Não</b>	Quantidade bombeada (m3)	302.960,0	36.837,3	302.960,0	36.837,3
	Número de paradas	30,0	5,3	6,3	2,3
	Tempo exec. (s)	658,18		0,90	
	Soluções viáveis	3		3	
	Função de avaliação	13.336.922.653,3	23.092.279.312,6	13.336.455.986,7	23.092.683.453,8
	Violação cap. tanques (m3)	1.333,3	2.309,4	1.333,3	2.309,4
	Número de interfaces	33,0	14,2	28,3	10,5
<b>Sim</b>	Quantidade bombeada (m3)	290.666,7	69.578,5	290.666,7	69.578,5
	Número de paradas	36,3	0,6	14,3	1,2
	Tempo exec. (s)	711,88		0,84	
	Soluções viáveis	2		2	

P07-3 Elitismo	AG-TRANSF2		AG-TRANSF2 + Pós-processamento		
	Resultados	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
	Função de avaliação	474.921.885.653,3	411.293.069.422,1	474.921.852.320,0	411.293.040.554,6
	Violação cap. tanques (m3)	47.492,1	41.129,3	47.492,1	41.129,3
	Número de interfaces	10,7	1,7	10,3	1,9
<b>Não</b>	Quantidade bombeada (m3)	176.213,3	59.209,6	176.213,3	59.209,6
	Número de paradas	24,0	10,5	6,3	2,1
	Tempo exec. (s)	658,66		0,75	
	Soluções viáveis	1		1	
	Função de avaliação	237.462.935.013,3	411.291.975.023,0	237.462.501.680,0	411.292.350.298,9
	Violação cap. tanques (m3)	23.746,0	41.129,3	23.746,0	41.129,3
	Número de interfaces	23,7	16,0	19,3	10,7
<b>Sim</b>	Quantidade bombeada (m3)	239.786,7	101.015,9	239.786,7	101.015,9
	Número de paradas	28,7	7,5	9,3	2,3
	Tempo exec. (s)	723,79		0,81	
	Soluções viáveis	2		2	

P14-1 Elitismo	AG-TRANSF1		AG-TRANSF1 + Pós-processamento		
	Resultados	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
	Função de avaliação	1.295.445.853,3	1.110.932.582,6	1.289.745.853,3	1.112.822.356,9
	Violação cap. tanques (m3)	128,6	111,3	128,6	111,3
	Número de interfaces	90,0	53,5	33,0	13,6
<b>Não</b>	Quantidade bombeada (m3)	731.573,3	32.603,8	731.573,3	32.603,8
	Número de paradas	70,0	18,5	13,3	5,0
	Tempo exec. (s)	1.569,30		3,02	
	Soluções viáveis	1		1	
	Função de avaliação	13.983.937.160,0	22.557.015.715,9	13.982.103.826,7	22.557.265.618,5
	Violação cap. tanques (m3)	1.397,6	2.255,8	1.397,6	2.255,8
	Número de interfaces	69,7	13,0	51,3	6,1
<b>Sim</b>	Quantidade bombeada (m3)	779.320,0	18.075,1	779.320,0	18.075,1
	Número de paradas	58,7	4,6	19,3	1,5
	Tempo exec. (s)	1.604,36		3,01	
	Soluções viáveis	1		1	

P14-1 Elitismo	AG-TRANSF2		AG-TRANSF2 + Pós-processamento		
	Resultados	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
	Função de avaliação	14.627.243.213,3	23.665.204.696,8	14.622.709.880,0	23.669.121.098,6
	Violação cap. tanques (m3)	1.461,9	2.367,0	1.461,9	2.367,0
	Número de interfaces	75,3	79,0	30,0	19,8
<b>Não</b>	Quantidade bombeada (m3)	662.960,0	66.827,3	662.960,0	66.827,3
	Número de paradas	61,7	26,1	13,0	5,3
	Tempo exec. (s)	1.577,84		2,96	
	Soluções viáveis	1		1	
	Função de avaliação	1.936.415.666,7	1.542.155,1	1.934.782.333,3	1.193.500,0
	Violação cap. tanques (m3)	192,9	0,0	192,9	0,0
	Número de interfaces	71,0	12,4	54,7	9,5
<b>Sim</b>	Quantidade bombeada (m3)	744.120,0	30.267,1	744.120,0	30.267,1
	Número de paradas	64,7	9,3	19,7	1,5
	Tempo exec. (s)	1.502,50		3,16	
	Soluções viáveis	0		0	

P14-2 Elitismo	AG-TRANSF1		AG-TRANSF1 + Pós-processamento		
	Resultados	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
	Função de avaliação	4.913.733,3	4.331.496,3	2.713.733,3	696.411,0
	Violação cap. tanques (m3)	0,0	0,0	0,0	0,0
	Número de interfaces	42,0	34,7	20,0	5,0
<b>Não</b>	Quantidade bombeada (m3)	713.733,3	71.964,5	713.733,3	71.964,5
	Número de paradas	37,0	7,8	7,3	1,5
	Tempo exec. (s)	1.512,99		3,04	
	Soluções viáveis	3		3	
	Função de avaliação	6.186.106,7	3.062.503,2	4.552.773,3	1.559.849,4
	Violação cap. tanques (m3)	0,0	0,0	0,0	0,0
	Número de interfaces	54,3	24,3	38,0	12,0
<b>Sim</b>	Quantidade bombeada (m3)	752.773,3	81.281,8	752.773,3	81.281,8
	Número de paradas	49,0	5,6	13,7	0,6
	Tempo exec. (s)	1.490,61		3,02	
	Soluções viáveis	3		3	

P14-2 Elitismo	AG-TRANSF2		AG-TRANSF2 + Pós-processamento		
	Resultados	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
	Função de avaliação	5.718.720,0	2.735.434,6	3.018.720,0	584.142,6
	Violação cap. tanques (m3)	0,0	0,0	0,0	0,0
	Número de interfaces	49,3	22,2	22,3	4,6
<b>Não</b>	Quantidade bombeada (m3)	785.386,7	19.457,0	785.386,7	19.457,0
	Número de paradas	43,0	8,5	7,3	2,3
	Tempo exec. (s)	1.509,65		3,19	
	Soluções viáveis	3		3	
	Função de avaliação	5.507.106,7	2.824.549,8	4.307.106,7	1.714.079,8
	Violação cap. tanques (m3)	0,0	0,0	0,0	0,0
	Número de interfaces	47,7	22,1	35,7	13,0
<b>Sim</b>	Quantidade bombeada (m3)	740.440,0	99.719,8	740.440,0	99.719,8
	Número de paradas	39,7	4,0	13,3	1,2
	Tempo exec. (s)	1.518,46		3,03	
	Soluções viáveis	3		3	

## APÊNDICE III: GRÁFICOS DE BOMBEAMENTO E RELATÓRIOS DE PROGRAMAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE PRODUTOS

A seguir são apresentados os gráficos de bombeamento e os relatórios de programação de transferência de produtos para as instâncias P07-1, P07-3, P14-1 e P14-2, referentes às melhores soluções encontradas pelo AG-TRANSF. O relatório para a instância P07-2 e os gráficos para as instâncias P07-1 e P07-2 se encontram na seção 7.3.

```
%---- Relatorio de Programação de Transferencia de Produtos ----%
%----- Instancia P07-1 -----%

Quantidade total de produtos bombeados: 142960 m3
Numero de interfaces: 7
Numero de paradas nos dutos: 5
Violação total da capacidade dos tanques: 0
Avaliação da Programação: 8.4296e+005

%-----%

Duto 1: REPLAN ==> Barueri

00:00 / 1 - 23:59 / 7 : Parado
-----
Capacidade ociosa: 100.0 %

Duto 2: Barueri ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 23:59 / 7 : Parado
-----
Capacidade ociosa: 100.0 %

Duto 3: REVAP ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 15:59 / 4 : Produto 1 - 45760 m3.
16:00 / 4 - 23:59 / 7 : Parado
-----
Capacidade ociosa: 47.6 %
```



Duto 4: S.Caet. ==> Cubatao

00:00 / 1 - 03:59 / 2 : Parado  
04:00 / 2 - 19:59 / 2 : Produto 4 - 9600 m3.  
20:00 / 2 - 03:59 / 3 : Produto 2 - 4800 m3.  
04:00 / 3 - 15:59 / 3 : Produto 1 - 7200 m3.  
16:00 / 3 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 78.6 %

Duto 5: Cubatao ==> Santos

00:00 / 1 - 11:59 / 1 : Parado  
12:00 / 1 - 03:59 / 2 : Produto 1 - 6400 m3.  
04:00 / 2 - 19:59 / 3 : Produto 4 - 16000 m3.  
20:00 / 3 - 23:59 / 3 : Produto 2 - 1600 m3.  
00:00 / 4 - 03:59 / 4 : Produto 5 - 1600 m3.  
04:00 / 4 - 19:59 / 4 : Parado  
20:00 / 4 - 07:59 / 7 : Produto 1 - 24000 m3.  
08:00 / 7 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 26.2 %

Duto 6: Cubatao ==> RPBC

00:00 / 1 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 100.0 %

Duto 7: RPBC ==> Cubatao

00:00 / 1 - 07:59 / 5 : Produto 1 - 26000 m3.  
08:00 / 5 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 38.1 %

Duto 8: RECAP ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 100.0 %

%---- Relatorio de Programação de Transferencia de Produtos ----%

%----- Instancia P07-3 -----%

Quantidade total de produtos bombeados: 257160 m3  
Numero de interfaces: 12  
Numero de paradas nos dutos: 9  
Violação total da capacidade dos tanques: 0  
Avaliação da Programação: 1.4572e+006

%-----%

Duto 1: Barueri ==> REPLAN

00:00 / 1 - 11:59 / 3 : Parado  
12:00 / 3 - 03:59 / 6 : Produto 3 - 22400 m3.  
04:00 / 6 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 61.9 %

Duto 2: S.Caet. ==> Barueri

00:00 / 1 - 11:59 / 3 : Parado  
12:00 / 3 - 19:59 / 6 : Produto 3 - 28000 m3.  
20:00 / 6 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 52.4 %

Duto 3: REVAP ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 11:59 / 2 : Produto 3 - 18720 m3.  
12:00 / 2 - 11:59 / 7 : Produto 1 - 62400 m3.  
12:00 / 7 - 23:59 / 7 : Produto 4 - 6240 m3.

-----  
Capacidade ociosa: 0.0 %

Duto 4: S.Caet. ==> Cubatao

00:00 / 1 - 11:59 / 1 : Parado  
12:00 / 1 - 15:59 / 2 : Produto 4 - 16800 m3.  
16:00 / 2 - 07:59 / 3 : Parado  
08:00 / 3 - 15:59 / 3 : Produto 2 - 4800 m3.  
16:00 / 3 - 11:59 / 5 : Produto 1 - 26400 m3.  
12:00 / 5 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 52.4 %

Duto 5: Cubatao ==> Santos

00:00 / 1 - 03:59 / 1 : Parado  
04:00 / 1 - 11:59 / 2 : Produto 1 - 12800 m3.  
12:00 / 2 - 03:59 / 4 : Produto 4 - 16000 m3.  
04:00 / 4 - 23:59 / 4 : Parado  
00:00 / 5 - 03:59 / 5 : Produto 2 - 1600 m3.  
04:00 / 5 - 03:59 / 7 : Produto 1 - 19200 m3.  
04:00 / 7 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 26.2 %

Duto 6: Cubatao ==> RPBC

00:00 / 1 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 100.0 %

Duto 7: RPBC ==> Cubatao

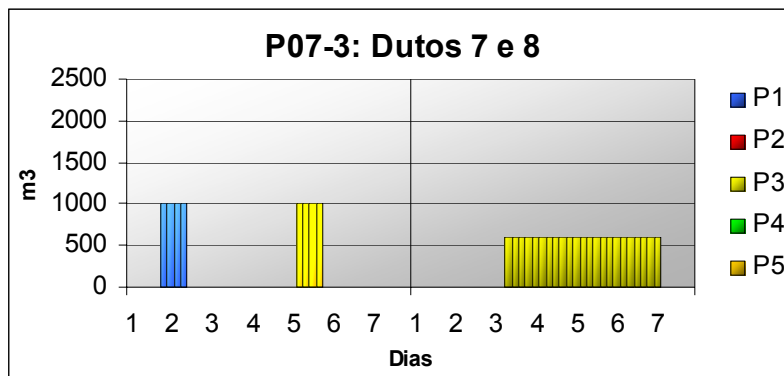
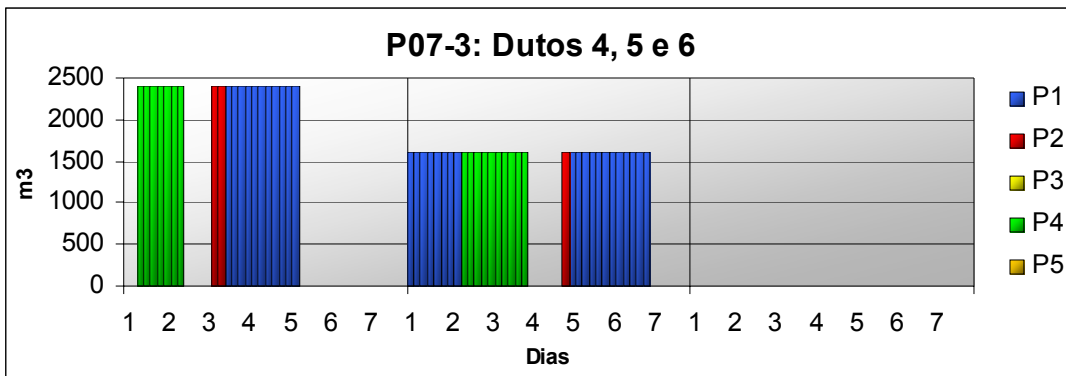
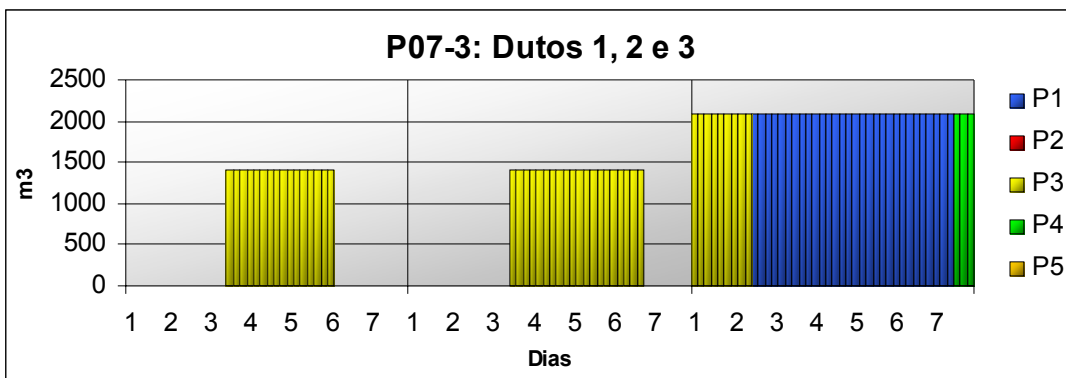
00:00 / 1 - 03:59 / 2 : Parado  
 04:00 / 2 - 19:59 / 2 : Produto 1 - 4000 m3.  
 20:00 / 2 - 11:59 / 5 : Parado  
 12:00 / 5 - 03:59 / 6 : Produto 5 - 4000 m3.  
 04:00 / 6 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
 Capacidade ociosa: 81.0 %

Duto 8: RECAP ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 15:59 / 3 : Parado  
 16:00 / 3 - 11:59 / 7 : Produto 3 - 13800 m3.  
 12:00 / 7 - 23:59 / 7 : Parado

-----  
 Capacidade ociosa: 45.2 %



%---- Relatorio de Programação de Transferencia de Produtos ----%

%----- Instancia P14-1 -----%

Quantidade total de produtos bombeados: 770560 m3  
Numero de interfaces: 40  
Numero de paradas nos dutos: 14  
Violação total da capacidade dos tanques: 0  
Avaliação da Programação: 4.7706e+006

%-----%

Duto 1: REPLAN ==> Barueri

00:00 / 1 - 23:59 / 1 : Produto 1 - 8400 m3.  
00:00 / 2 - 07:59 / 2 : Parado  
08:00 / 2 - 11:59 / 2 : Produto 1 - 1400 m3.  
12:00 / 2 - 11:59 / 3 : Produto 4 - 8400 m3.  
12:00 / 3 - 15:59 / 3 : Produto 5 - 1400 m3.  
16:00 / 3 - 15:59 / 6 : Produto 1 - 25200 m3.  
16:00 / 6 - 23:59 / 7 : Parado  
00:00 / 8 - 23:59 /12 : Produto 1 - 42000 m3.  
00:00 /13 - 07:59 /13 : Produto 4 - 2800 m3.  
08:00 /13 - 03:59 /14 : Produto 2 - 7000 m3.  
04:00 /14 - 23:59 /14 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 17.9 %

Duto 2: Barueri ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 07:59 / 2 : Parado  
08:00 / 2 - 11:59 / 5 : Produto 1 - 26600 m3.  
12:00 / 5 - 15:59 / 5 : Produto 4 - 1400 m3.  
16:00 / 5 - 15:59 / 6 : Parado  
16:00 / 6 - 07:59 / 7 : Produto 4 - 5600 m3.  
08:00 / 7 - 23:59 /13 : Produto 1 - 56000 m3.  
00:00 /14 - 19:59 /14 : Parado  
20:00 /14 - 23:59 /14 : Produto 4 - 1400 m3.

-----  
Capacidade ociosa: 22.6 %

Duto 3: REVAP ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 11:59 / 9 : Produto 1 - 106080 m3.  
12:00 / 9 - 15:59 /12 : Produto 4 - 39520 m3.  
16:00 /12 - 03:59 /13 : Produto 2 - 6240 m3.  
04:00 /13 - 19:59 /13 : Produto 1 - 8320 m3.  
20:00 /13 - 03:59 /14 : Parado  
04:00 /14 - 19:59 /14 : Produto 4 - 8320 m3.  
20:00 /14 - 23:59 /14 : Produto 3 - 2080 m3.

-----  
Capacidade ociosa: 2.4 %

Duto 4: S.Caet. ==> Cubatao

00:00 / 1 - 15:59 / 1 : Produto 4 - 9600 m3.  
16:00 / 1 - 11:59 / 4 : Produto 1 - 40800 m3.  
12:00 / 4 - 19:59 / 5 : Produto 4 - 19200 m3.  
20:00 / 5 - 03:59 / 6 : Produto 2 - 4800 m3.  
04:00 / 6 - 07:59 / 6 : Produto 1 - 2400 m3.  
08:00 / 6 - 19:59 / 7 : Parado  
20:00 / 7 - 15:59 / 8 : Produto 4 - 12000 m3.  
16:00 / 8 - 07:59 /13 : Produto 1 - 67200 m3.  
08:00 /13 - 15:59 /13 : Produto 4 - 4800 m3.  
16:00 /13 - 15:59 /14 : Parado  
16:00 /14 - 23:59 /14 : Produto 1 - 4800 m3.

-----  
Capacidade ociosa: 17.9 %

Duto 5: Cubatao ==> Santos

00:00 / 1 - 07:59 / 2 : Produto 4 - 12800 m3.  
08:00 / 2 - 15:59 / 6 : Produto 1 - 41600 m3.  
16:00 / 6 - 15:59 / 8 : Produto 4 - 19200 m3.  
16:00 / 8 - 03:59 /13 : Produto 1 - 43200 m3.  
04:00 /13 - 07:59 /13 : Produto 2 - 1600 m3.  
08:00 /13 - 23:59 /13 : Produto 1 - 6400 m3.  
00:00 /14 - 03:59 /14 : Produto 5 - 1600 m3.  
04:00 /14 - 23:59 /14 : Produto 1 - 8000 m3.

-----  
Capacidade ociosa: 0.0 %

Duto 6: Cubatao ==> RPBC

00:00 / 1 - 23:59 / 3 : Parado  
00:00 / 4 - 23:59 / 7 : Produto 1 - 24000 m3.  
00:00 / 8 - 19:59 / 8 : Produto 5 - 5000 m3.  
20:00 / 8 - 23:59 /10 : Parado  
00:00 /11 - 11:59 /11 : Produto 3 - 3000 m3.  
12:00 /11 - 15:59 /12 : Parado  
16:00 /12 - 19:59 /13 : Produto 1 - 7000 m3.  
20:00 /13 - 15:59 /14 : Parado  
16:00 /14 - 23:59 /14 : Produto 5 - 2000 m3.

-----  
Capacidade ociosa: 51.2 %

Duto 7: RPBC ==> Cubatao

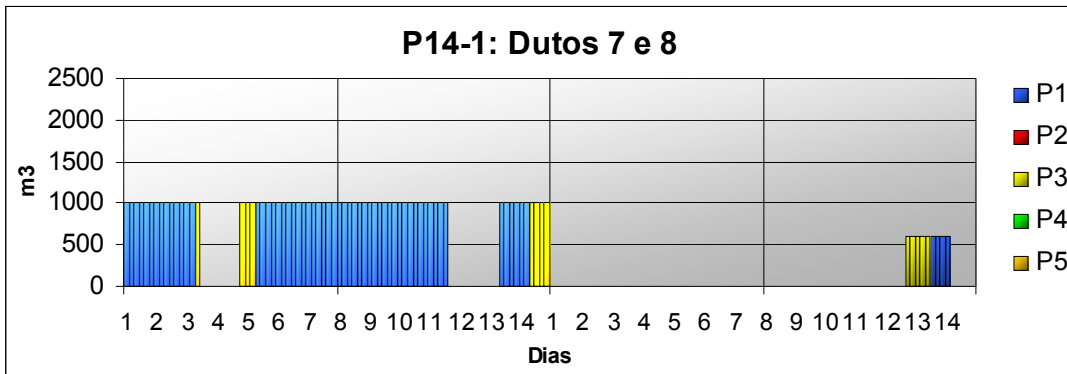
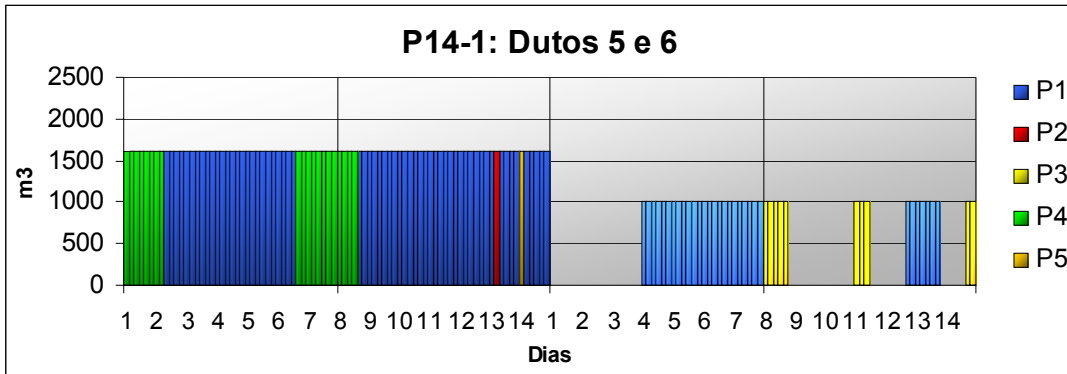
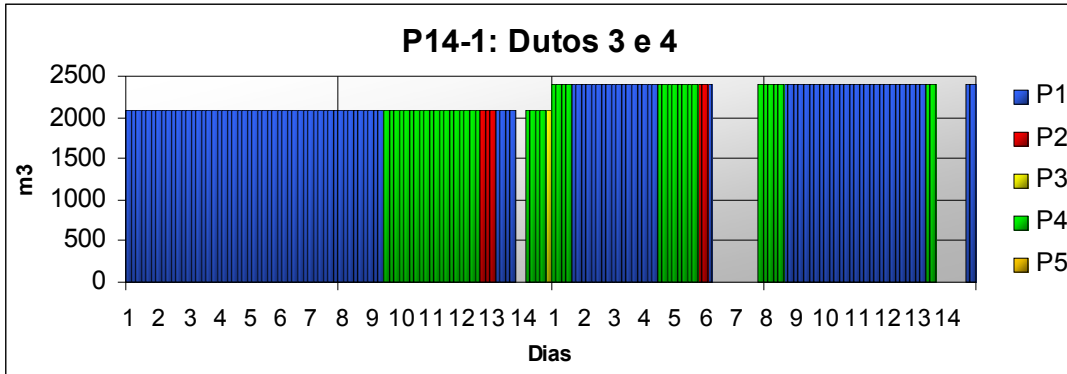
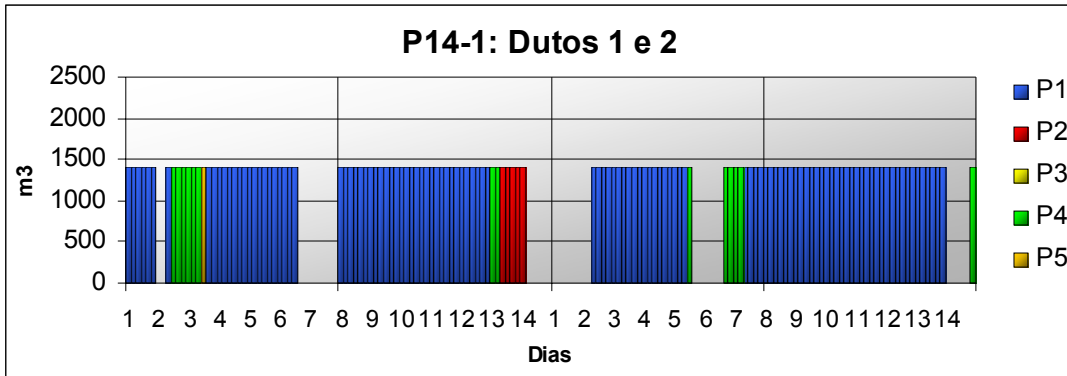
00:00 / 1 - 07:59 / 3 : Produto 1 - 14000 m3.  
08:00 / 3 - 11:59 / 3 : Produto 5 - 1000 m3.  
12:00 / 3 - 19:59 / 4 : Parado  
20:00 / 4 - 07:59 / 5 : Produto 5 - 3000 m3.  
08:00 / 5 - 15:59 /11 : Produto 1 - 38000 m3.  
16:00 /11 - 07:59 /13 : Parado  
08:00 /13 - 07:59 /14 : Produto 1 - 6000 m3.  
08:00 /14 - 19:59 /14 : Produto 3 - 3000 m3.  
20:00 /14 - 23:59 /14 : Produto 5 - 1000 m3.

-----  
Capacidade ociosa: 21.4 %

Duto 8: RECAP ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 15:59 /12 : Parado  
16:00 /12 - 11:59 /13 : Produto 3 - 3000 m3.  
12:00 /13 - 03:59 /14 : Produto 1 - 2400 m3.  
04:00 /14 - 23:59 /14 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 89.3 %



%---- Relatorio de Programação de Transferencia de Produtos ----%

%----- Instancia P14-2 -----%

Quantidade total de produtos bombeados: 655000 m3  
Numero de interfaces: 16  
Numero de paradas nos dutos: 7  
Violação total da capacidade dos tanques: 0  
Avaliação da Programação: 2.2550e+006

%-----%

Duto 1: REPLAN ==> Barueri

00:00 / 1 - 23:59 /14 : Produto 1 - 117600 m3.

-----  
Capacidade ociosa: 0.0 %

Duto 2: Barueri ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 23:59 /14 : Produto 1 - 117600 m3.

-----  
Capacidade ociosa: 0.0 %

Duto 3: REVAP ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 19:59 / 2 : Parado  
20:00 / 2 - 11:59 / 6 : Produto 1 - 45760 m3.  
12:00 / 6 - 07:59 / 8 : Produto 4 - 22880 m3.  
08:00 / 8 - 07:59 /10 : Produto 1 - 24960 m3.  
08:00 /10 - 23:59 /14 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 46.4 %

Duto 4: S.Caet. ==> Cubatao

00:00 / 1 - 15:59 / 1 : Produto 1 - 9600 m3.  
16:00 / 1 - 11:59 / 3 : Produto 4 - 26400 m3.  
12:00 / 3 - 07:59 / 8 : Produto 1 - 69600 m3.  
08:00 / 8 - 07:59 / 9 : Produto 2 - 14400 m3.  
08:00 / 9 - 19:59 / 9 : Parado  
20:00 / 9 - 23:59 /11 : Produto 4 - 31200 m3.  
00:00 /12 - 15:59 /13 : Parado  
16:00 /13 - 15:59 /14 : Produto 1 - 14400 m3.  
16:00 /14 - 23:59 /14 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 17.9 %

Duto 5: Cubatao ==> Santos

00:00 / 1 - 15:59 / 2 : Produto 1 - 16000 m3.  
16:00 / 2 - 23:59 / 3 : Produto 4 - 12800 m3.  
00:00 / 4 - 23:59 / 8 : Produto 1 - 48000 m3.  
00:00 / 9 - 07:59 / 9 : Produto 5 - 3200 m3.  
08:00 / 9 - 03:59 /10 : Produto 2 - 8000 m3.  
04:00 /10 - 11:59 /12 : Produto 4 - 22400 m3.  
12:00 /12 - 11:59 /13 : Produto 5 - 9600 m3.  
12:00 /13 - 23:59 /14 : Produto 1 - 14400 m3.

-----  
Capacidade ociosa: 0.0 %

Duto 6: Cubatao ==> RPBC

00:00 / 1 - 23:59 /14 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 100.0 %

Duto 7: RPBC ==> Cubatao

00:00 / 1 - 07:59 / 2 : Parado

08:00 / 2 - 23:59 / 4 : Produto 1 - 16000 m3.

00:00 / 5 - 19:59 /11 : Parado

20:00 /11 - 07:59 /13 : Produto 5 - 9000 m3.

08:00 /13 - 23:59 /14 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 70.2 %

Duto 8: RECAP ==> S.Caet.

00:00 / 1 - 03:59 /13 : Parado

04:00 /13 - 11:59 /13 : Produto 3 - 1200 m3.

12:00 /13 - 23:59 /14 : Parado

-----  
Capacidade ociosa: 97.6 %



