

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

Vanessa Rennó Frota Moraes Alves¹ (COPPE/UFRJ), Virgílio José Martins Ferreira Filho² (COPPE/UFRJ)

¹vanfrota@yahoo.com.br

²virgilio@ufrj.com.br

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. Este novo problema considera restrições de capacidade de armazenamento nos tanques e de atendimento à demanda, e tem como objetivo encontrar a programação de transferência de produtos que minimize a quantidade de produtos bombeada e o número de interfaces entre produtos. Para o problema simplificado foi proposto e implementado um modelo em algoritmo genético e um procedimento para fazer o pós-processamento das soluções obtidas pelo algoritmo. Foi testado o uso do elitismo e ainda dois tipos de operadores de mutação, que podem ser usados separadamente ou em conjunto. 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.

dutoviário, derivados de petróleo, algoritmo genético

1. INTRODUÇÃO

Em novembro de 1995 a Emenda Constitucional Nº 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, que exigiu da Petrobras a criação de uma subsidiária com atribuições específicas de operar e construir seus dutos, entre outras. Assim, em 1998 surgiu a Transpetro, que atualmente opera uma frota de 51 navios, 44 terminais terrestres e aquaviários e 10 mil quilômetros de malha dutoviária (Transpetro, 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 interesse na obtenção de uma boa programação do transporte de produtos em uma malha dutoviária. Estes custos são oriundos de interfaces de produtos, falhas no atendimento à demanda devido a uma programação imperfeita, tratamento imediato de imprevistos.

Ao problema de se determinar quais produtos e em que sequência eles devem ser bombeados nos dutos, de forma que as restrições operacionais do sistema sejam satisfeitas e que custos associados ao transporte dos produtos ou outros critérios sejam minimizados foi dado o nome de Problema de Transporte Dutoviário (PTD).

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional, baseada em Algoritmos Genéticos, que resolva o PTD para a 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).

2. REVISÃO DA LITERATURA

Uma revisão bibliográfica sobre as abordagens encontradas na literatura para o PTD, incluindo transporte em um único duto e em redes de dutos, pode ser encontrada nos trabalhos de Alves (2007), Souza Filho (2007) e

Souza Filho *et al.* (2006). Esta seção apresenta um resumo da revisão apresentada nesses trabalhos, focando o problema de transporte em redes dutoviárias.

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, como os de Milidiú e Liporace (2003) e Pessoa (2003).

Para o caso de transporte de produtos em uma rede de dutos, a maioria dos autores utiliza métodos heurísticos (Tabela 1). Além disso, alguns autores ainda fazem uso de heurísticas combinadas a técnicas de programação matemática (Braconi, 2002; De La Cruz *et al.*, 2005). O que se percebe nos trabalhos é que as heurísticas têm se mostrado uma ferramenta de grande valia, permitindo a obtenção de soluções viáveis em tempos computacionais aceitáveis.

Tabela 1. Resumo da literatura existente em relação ao problema de transporte em rede dutoviária.

Autor(es)	Técnica utilizada	Horizonte de tempo e Solução alcançada
Camponogara (1995)	Heurística A-Team ¹	120 h Solução Inviável
Crane <i>et al.</i> (1999)	Algoritmo Genético	-- Solução Viável
Milidiú <i>et al.</i> (2001)	GRASP	120 h Solução viável
Braconi (2002)	PL ² (com discretização do horizonte de tempo) + Heurística	5 – 30 dias Solução viável
De la Cruz <i>et al.</i> (2005)	Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo e PLIM ³	65 períodos de tempo Solução viável
Pessoa (2003)	Heurística	Solução viável / ótima (resultados teóricos)
Más e Pinto (2003)	PLIM ³ de tempo contínuo baseado em eventos	168 horas Solução viável
Neiro e Pinto (2004)	PNLIM ⁴ (com discretização do horizonte de tempo)	2 períodos de tempo Solução ótima local
Liporace (2005)	Busca Heurísticas (Inteligência Artificial) + Simuladores	-- Solução viável
Marcellino (2006)	Problema de Satisfação de Restrições Distribuído com Otimização	1 semana Soluções viáveis/ótimas

¹ Times Assíncrono, ² Programação Linear, ³ Programação Linear Inteira Mista, ⁴ Programação Não Linear Inteira Mista.

3. PROBLEMA DE TRANSPORTE NA REDE DE ESCUROS (PTRE)

O Problema de Transporte na Rede de Escuros (PTRE) é o problema de transporte dutoviário específico da Rede de Escuros. Esta rede é responsável pelo transporte dos derivados pesados do petróleo, como o óleo combustível, óleo combustível marítimo (bunker), gasóleo para craqueamento e resíduo atmosférico, que são produtos com coloração escura e alta viscosidade, ela transporta também o óleo leve de reciclo (LCO), que é um diluente. Os dutos são bidirecionais, ou seja, podem operar nos dois sentidos.

3.1 Características da Movimentação de Produtos

- Os polidutos operam sempre cheios de líquido. Os líquidos são considerados incompressíveis. Assim, a mesma quantidade de líquido bombeada na entrada do duto, deve ser recebida na sua saída. Os produtos bombeados empurram os demais produtos dentro do duto fazendo-os chegar ao destino desejado.
- Rotas de fluxo: é uma seqüência de um ou mais dutos que são alinhados em cada área intermediária, de forma que o fluxo de cada um deles é repassado diretamente ao seu sucessor.
- Operação pulmão: é o recebimento de produto em um tanque, simultaneamente ao envio de produto a partir deste mesmo tanque.

- Operação de injeção: ocorre quando uma batelada que está sendo transportada por um duto principal recebe um volume adicional de produto através de um duto secundário.
- Operação de reversão em dutos: inverte o sentido de operação do duto após o seu preenchimento total com LCO. Normalmente tem-se menos que duas reversões por duto no período de um mês.

3.2 Restrições do PTRE

- Atendimento à demanda: os produtos devem estar disponíveis nos tanques de armazenamento para satisfazer as demandas da área.
- Capacidade de armazenamento dos tanques: os tanques devem ser operados dentro de um limite mínimo e máximo.
- 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 pelos dutos que compõem a rota.
- Compatibilidade de produtos: devido ao custo elevado para o tratamento de interfaces de alguns produtos, estes são proibidos de entrarem em contato durante seu transporte pelos dutos. Mas se for necessário transportar em sequência dois produtos incompatíveis, é feito o uso de selos, que são pequenas quantidades de produtos compatíveis que são colocadas entre dois outros produtos incompatíveis.
- 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: 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: devido à alta viscosidade dos produtos transportados, estes precisam ser aquecidos nas áreas para poderem escoar pelo duto. Ficar muito tempo parado dentro do duto causa o esfriamento e, consequentemente, a solidificação do produto, o que pode implicar perda do duto. Então é preciso respeitar os limites de tempo de parada em cada duto.

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

3.3 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 problema é resolvido em duas etapas. Na primeira etapa, é feito um planejamento mensal das movimentações de derivados de petróleo através da rede de oleodutos. Na segunda etapa é determinado, com base na experiência dos operadores dos dutos, como esta rede deverá ser operada no horizonte de aproximadamente 15 dias.

4. 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, foram adotadas simplificações e definido o Problema de Transporte na Rede de Escuros Simplificado (PTRES).

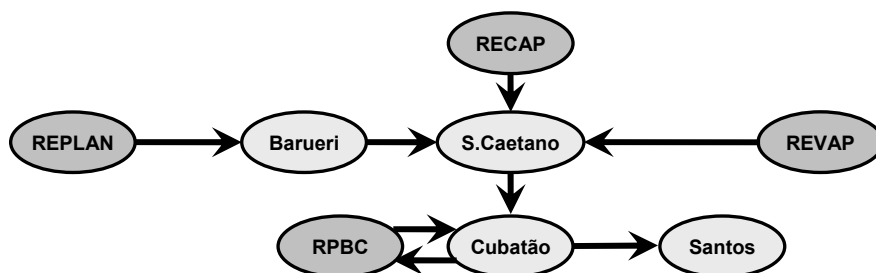


Figura 1. Rede de Escuros Simplificada.

Nesta rede foi assumido que os dutos podem operar em apenas um sentido, o que descarta a necessidade da operação de reversão dos dutos. 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 1). 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. Foi considerado o transporte de 5 tipos de produtos: gasóleo para craqueamento, LCO, bunker e óleo combustível normal e para exportação.

4.1 Considerações iniciais

- Tancagem agregada: os tanques destinados a um mesmo produto foram tratados como um único tanque com o valor de sua capacidade de armazenamento agregada.
- As vazões são constantes para cada duto.
- Horizonte de programação: 14 dias discretizado em períodos de 4 horas, resultando 84 períodos de tempo. Também foram estudados problemas com horizonte de tempo de 7 dias, com 42 períodos de tempo.
- Produção e demanda: para cada produto em cada área está associado apenas um valor, de produção (positivo) ou de demanda (negativo), que será contabilizado a cada período de tempo. Seu valor equivale à produção (demanda) mensal dividida pelo número de períodos de tempo em um mês.

4.2 Modificações na Movimentação de Produtos

No PTRES 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. As operações de injeção e pulmão são desconsideradas.

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) bombeado durante cada período de tempo é fixo para cada duto.

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

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

4.3 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: esta restrição não admite violação. Para que isso 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.

4.4 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. 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.

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.

5. MODELAGEM PROPOSTA PARA O PTRES

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.

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.

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 (considera fixos os sentidos de operação dos dutos) e AG-TRANSF2 (escolhe o melhor sentido de operação para os dutos), 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.

5.1 Algoritmo Genético para Programação de Transferência de Produtos (AG-TRANSF)

Nesta seção serão apresentadas as particularidades e os componentes utilizados pelo AG-TRANSF.

Representação das Soluções:

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 deve ser bombeado, no período de tempo t , a partir da área de origem do duto d .

A Figura 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.

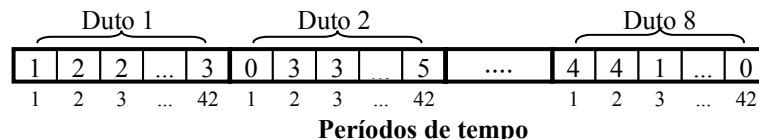


Figura 2. Codificação do indivíduo do AG-TRANSF1.

Para este indivíduo, a programação do duto 2, por exemplo, deve seguir a sequência: no período 1 não deve haver bombeamento de produtos, nos dois períodos seguintes devem ser bombeados dois lotes do produto 3, e assim por diante. Os volumes dos lotes correspondem aos volumes dos trechos de dutos para onde eles são bombeados.

Para a representação utilizada no AG-TRANSF2 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 (1 para sentido normal e 2 para sentido reverso). O sentido normal é o sentido considerado pelo grafo da Figura 1.

A Figura 3 mostra um exemplo de um indivíduo codificado 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.

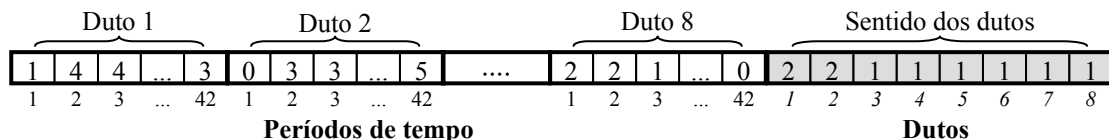


Figura 3. Codificação do indivíduo do AG-TRANSF2.

Definição da População Inicial:

A população é representada por uma matriz, onde cada linha contém um indivíduo. 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.

Avaliação dos Indivíduos:

As duas restrições do PTRES podem ser reduzidas a apenas uma, a de capacidade de armazenamento. Isto por que, para o atendimento da demanda nas áreas, os produtos são retirados dos tanques. Logo, a não violação dos limites inferiores de capacidades dos tanques, durante o período de programação, garante que as demandas tenham sido atendidas.

Para lidar com essa restrição foi utilizado o método de penalidade. Nele, são associadas penalidades às violações das restrições, que são incluídas na função de avaliação dos indivíduos. Assim, a Função de Avaliação utilizada no AG-TRANSF é uma soma ponderada definida pela equação

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

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. Estas parcelas são calculadas através de um procedimento que verifica a programação de transferência de produtos dada por cada indivíduo.

Foram assumidos os seguintes valores para os pesos dos critérios de avaliação: $w_1 = 1$ e $w_2 = 1 \times 10^5$, este valor corrige a ordem de grandeza da parcela NI e ainda dá prioridade à minimização deste critério. Para a penalidade imposta à violação da restrição de capacidade foi assumido $w_p = 1 \times 10^7$.

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: um par de indivíduos é escolhido aleatoriamente na população atual e o indivíduo com menor valor de função de avaliação é copiado para a população intermediária, 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: 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.

Operadores Genéticos:

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 4 ilustra a operação. Após a geração dos filhos, estes substituem seus pais na população intermediária.

Pai 1	1	1	2	1	3	2	2	1	0	0	3	1	2	1	0
Pai 2	2	2	1	3	0	1	2	2	1	0	2	1	3	3	0
Máscara	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0
Filho 1	1	1	1	3	0	2	2	1	1	0	3	1	3	1	0
Filho 2	2	2	2	1	3	1	2	2	0	0	2	1	2	3	0
	Duto 1					Duto 2					Duto 3				

Figura 4. Exemplo da operação realizada pelo Crossover Uniforme.

Tanto para este, quanto para os exemplos das operações de mutação são 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.

Para a mutação foram implementados dois operadores, 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.

Mutação por Vizinhança: Método proposto por Almeida *et al.* (2003), que visa a formação de lotes maiores, minimizando assim o número 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 5 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.

Antes	1	1	2	1	3	2	1	2	3	2	2	1	3	3	0
Depois	1	1	2	1	3	1	2	2	2	3	2	1	3	3	0
	Duto 1					Duto 2					Duto 3				

Figura 5: Exemplo da operação realizada pela Mutação por Vizinhança

Os indivíduos mutados substituem os indivíduos antigos na população intermediária. Finalmente, a população intermediária substitui totalmente a população atual e é avaliada.

Os operadores genéticos apresentados são utilizados nas duas versões do AG-TRANSF. Mas 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.

5.1 Pós-processamento

Este procedimento reduz o número de 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. 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.

Um exemplo da aplicação do pós-processamento em um indivíduo é mostrado na Figura 6. Inicialmente o indivíduo correspondia a uma programação com 4 paradas nos dutos, o pós-processamento gera um novo indivíduo com apenas duas paradas nos dutos, supondo que todas as modificações não tenham piorado seu desempenho.

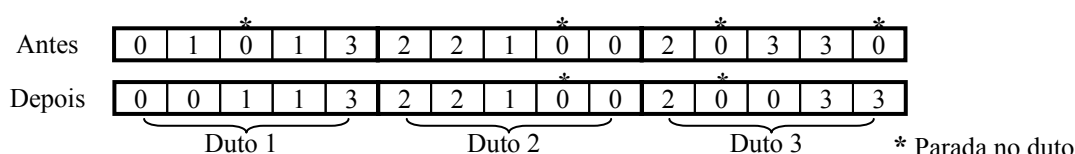


Figura 6. Resultado da aplicação do pós-processamento em um indivíduo.

6. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

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 relatórios do bombeamento de planejamento mensal de produção e demanda nas áreas. Cada instância foi construída a partir de uma solução viável. Sendo assim, todas as instâncias têm uma solução viável conhecida.

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.

A definição dos valores para o conjunto de parâmetros e configuração do AG-TRANSF foi determinada através da realização de vários experimentos computacionais, utilizando a versão 1 do AG-TRANSF e a instância P07-2. Foram testados três operadores de mutação: por troca, por vizinhança e a combinação destes dois operadores, que foi denominada 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 $1-p$.

A configuração escolhida para o AG-TRANSF, versões 1 e 2, é a que faz uso do operador mutação Troca+Viz, com $p = 0,1$, o critério de parada é o número máximo de gerações (2.500), o tamanho da população é de 150 indivíduos e a taxa de crossover e mutação são ambas iguais a 0,9. Embora a configuração que utiliza mutação Troca+Viz tenha obtido melhores soluções com o elitismo, a sua eficiência ainda foi testada na resolução das demais instâncias do problema.

6.1 Soluções das instâncias

Todas as instâncias criadas para o PTRES foram resolvidas utilizando a configuração do AG-TRANSF definida anteriormente. 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.

A seguir é feita uma análise dos melhores resultados obtidos com o pós-processamento das soluções geradas tanto pelo AG-TRANSF1 quanto pelo AG-TRANSF2. O pós-processamento sempre melhora as soluções, reduzindo o número de paradas nos dutos, e em alguns casos reduz também o número de interfaces de produtos.

Instâncias P07-1, P07-2, P14-1 e P14-2:

A diferença entre as instâncias de número 1 e 2 para cada horizonte de planejamento 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 para as instâncias de número 1. De fato, nem todas as rodadas executadas chegaram a uma solução viável e para a instância P14-1 os algoritmos encontraram soluções piores do que a conhecida (Tabela 3). Mas para P07-1 a melhor solução encontrada pelos algoritmos é melhor do que a solução conhecida para essa instância (Tabela 2).

Tabela 2. Instância P07-1. Melhor solução obtida com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.

Resultados	AG-TRANSF1	AG-TRANSF2	Solução conhecida
Função de avaliação	842.960,0	969.400,0	1.592.320
Número de interfaces	7,0	8,0	12
Quantidade bombeada (m3)	142.960,0	169.400,0	392.320
Número de paradas	5,0	6,0	1
Elitismo	NÃO	SIM	

Tabela 3. Instância P14-1. Melhor solução obtida com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.

Resultados	AG-TRANSF1	AG-TRANSF2	Solução conhecida
Função de avaliação	4,771E+06	6,556E+06	2,664E+06
Número de interfaces	40,0	58,0	19
Quantidade bombeada (m3)	770.560,0	755.640,0	763.680
Número de paradas	14,0	19,0	2
Elitismo	NÃO	NÃO	

O mesmo não acontece com as instâncias de número 2, para todas as rodadas executadas foram obtidas soluções viáveis. As melhores soluções obtidas pelos algoritmos são melhores do que as soluções conhecidas para essas instâncias, como se pode observar pelas tabelas abaixo.

Tabela 4. Instância P07-2. Melhor solução obtida com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.

Resultados	AG-TRANSF1	AG-TRANSF2	Solução conhecida
Função de avaliação	901.680,0	996.160,0	1.588.120
Número de interfaces	7,0	8,0	12
Quantidade bombeada (m3)	201.680,0	196.160,0	388.120
Número de paradas	9,0	7,0	3
Elitismo	SIM	SIM	

Tabela 5. Instância P14-2. Melhor solução obtida com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.

Resultados	AG-TRANSF1	AG-TRANSF2	Solução conhecida
Função de avaliação	2,255E+06	2,363E+06	2,565E+06
Número de interfaces	16,0	16,0	18
Quantidade bombeada (m3)	655.000,0	762.840,0	765.680
Número de paradas	7,0	10,0	3
Elitismo	NÃO	NÃO	

Instância P07-3:

As instâncias resolvidas até agora foram construídas de forma que todos os dutos tivessem que operar no sentido normal. Mas com o propósito 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.

As soluções encontradas são melhores do que a solução conhecida para essa instância (Tabela 6). O AG-TRANSF2 indicou corretamente o sentido de operação dos dutos: sentido reverso para os duto 1 e 2, sentido normal para os demais dutos.

Tabela 6. Instância P07-3. Melhor solução obtida com o pós-processamento das soluções geradas pelas duas versões do AG-TRANSF.

Resultados	AG-TRANSF1	AG-TRANSF2	Solução conhecida
Função de avaliação	1,457E+06	1,557E+06	1.726.720
Número de interfaces	12,0	13,0	14
Quantidade bombeada (m3)	257.160,0	256.960,0	326.720
Número de paradas	9,0	8,0	4
Elitismo	NÃO	NÃO	

7. CONCLUSÕES

Pelos experimentos computacionais realizados, as duas versões do AG-TRANSF em conjunto com o pós-processamento, obtiveram soluções viáveis para as 5 instâncias testadas. 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.

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.

O modelo em Algoritmo Genético representou bem o PTRES e ainda tem potencial para ser melhorado através da incorporação de outras restrições do problema original. O uso do elitismo se mostrou ineficiente para obter as melhores soluções para a maioria das instâncias. 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: a inclusão da restrição de compatibilidade de produtos e/ou levar em consideração o uso de selos, a inclusão da operação de reversão nos dutos e a criação de um conjunto grande de instâncias para testes dos algoritmos.

8. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT.

9. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M.R., HAMACHER, S., PACHECO, M.A.C. e VELLASCO, M.M.B.R. Optimizing the production scheduling of a petroleum refinery through genetic algorithms. **International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications And Practice**, v.10, n.1, p.35-44, 2003.
- ALVES, V.R.F.M. **Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária usando algoritmo genético**. 2007. 113 p. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, Anuário Estatístico 2006. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2006.asp>, acessado em: 25 de fevereiro de 2007.
- BEASLEY, D., BULL, D.R. e MARTIN, R.R. An overview of genetic algorithms: part 1, fundamentals. **University Computing**, v.15, n.2, p.58-69, 1993.
- BRACONI, V.M. **Heurísticas multifluxo para roteamento de produtos em redes dutoviárias**. 2002. 78 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Informática, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

- CAMPONOGARA, E. **A-Teams para um problema de transporte de derivados de petróleo**. 1995. 185 p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1995.
- CRANE, D.S., WAINWRIGHT, R.L. e SCHOENEFELD, D.A. Scheduling of multi-product fungible liquid pipelines using genetic algorithms. In: ACM Symposium on Applied Computing, 1999, San Antonio, Texas, USA. **Proceedings of the 1999 ACM Symposium on Applied Computing**, 1999, p.280-285.
- DE LA CRUZ, J.M., HERRAN-GONZÁLEZ, A., RISCO-MARTÍN, J.L. e ANDRÉS-TORO, B. Hybrid heuristic and mathematical programming in oil pipelines networks: Use of immigrants. **Journal of Zhejiang University SCIENCE**, v.6A, n.1, p.9-19, 2005.
- GOLDBERG, D.E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. 1 ed. USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989.
- LIPORACE, F.D.S. **Planejadores para transporte em polidutos**. 2005. 120 p. Tese de Doutorado. Departamento de Informática, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- MARCELLINO, F.J.M. **Solução do problema de transporte de derivados de petróleo em oleodutos através de um modelo de satisfação de restrições distribuído com otimização**. 2006. 210 p. Dissertação de Mestrado. Área de Informática, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil, 2006.
- MÁS, R. e PINTO, J.M. A mixed-integer optimization strategy for oil supply in distribution complexes. **Optimization and Engineering**, v.4, n.1, p.23-64, 2003.
- MILIDIÚ, R.L. e LIPORACE, F.D.S. **Planning of pipeline oil transportation with interface restrictions is a difficult problem**, PUC-Rio Inf.MCC56/03, 2003.
- MILIDIÚ, R.L., PESSOA, A.A., BRACONI, V., LABER, E.S. e REY, P.A. Um algoritmo Grasp para o problema de transporte de derivados de petróleo em oleodutos. In: XXXIII SBPO, 2001, Campos do Jordão, SP. **Anais do XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2001, p.237-246.
- NEIRO, S.M.S. e PINTO, J.M. A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. **Computers & Chemical Engineering**, v.28, n.6-7, p.871-896, 2004.
- PESSOA, A.A. **Dois problemas de otimização em grafos: Transporte em redes de dutos e Busca com custos de acesso**. 2003. 110 p. Tese de Doutorado. Departamento de Informática, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- SANGINETO, M.L.T. **Um algoritmo genético para a programação de transferências em um poliduto**. 2006. 93 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- SOUZA FILHO, E.M.D. **Variable Neighborhood Search (VNS) aplicado problema de distribuição dutoviária**. 2007. 304 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- SOUZA FILHO, E.M.D., ALVES, V.R.F.M. e FERREIRA FILHO, V.J.M. Utilização de técnicas de pesquisa operacional em problemas de distribuição dutoviária: uma revisão. In: XXXVIII SBPO, 2006, Goiânia, GO. **Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2006, p.1873-1880.
- TRANSPETRO, A Empresa: Transpetro. Disponível em: <http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/transpetro/transpetro.shtml>, acessado em: 23 de fevereiro de 2007.

PIPELINE SCHEDULING OF PETROLEUM DERIVATIVES USING GENETIC ALGORITHM

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 Paulo. 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.

pipeline, petroleum derivatives, genetic algorithm

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.