



ALOCAÇÃO DE BATELADAS DE DERIVADOS LEVES DE PETRÓLEO EM UMA REDE DUTOVIÁRIA

Helton Luis Polli, Liège Bauer Klüppel,

Leandro Magatão, Flávio Neves Junior, Lúcia Valéria Ramos de Arruda

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) /

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)

Av. Sete de Setembro, 3165, 80230-901, Curitiba, PR

helton.polli@gmail.com, liege.bauer@gmail.com,

magatao@utfpr.edu.br, neves@utfpr.edu.br, lvrarruda@utfpr.edu.br

Paulo Cesar Ribas

PETROBRAS / CENPES

Avenida Jequitiba, 950, Expansão 3º andar, 21941-915, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ

paulo.ribas@petrobras.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um algoritmo para auxiliar a alocação de bateladas de derivados de petróleo em uma rede dutoviária. A alocação de recursos é uma das fases primordiais para a obtenção do *scheduling* dutoviário final na rede em estudo. O algoritmo proposto está imerso em uma estratégia de decomposição do *scheduling* apresentada em Boschetto *et al.* (2010). O algoritmo determina prioridades de envio das bateladas, de forma a cumprir prazos estipulados tendo por base: uma análise dos planos de produção e demanda, estoques, entrada e saída de produtos dos órgãos, além de otimizar a utilização de recursos. O algoritmo proposto é utilizado em cooperação com um modelo em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) apresentado por Polli (2014). A associação permitiu superar dificuldades computacionais detectadas no trabalho de Magatão *et al.* (2012). Os resultados obtidos mostraram-se próximos ao solicitado pelos especialistas da rede, auxiliando-os na tomada de decisões operacionais.

PALAVRAS CHAVE. Alocação, *Scheduling*, Rede de dutos.

Área principal. P&G (PO na Área de Petróleo e Gás), L&T (Logística e Transportes), IND (PO na indústria).

ABSTRACT

This work presents an algorithm to assist the allocation of oil batches in a pipeline network. The allocation of resources is a fundamental task to obtain the final scheduling within the considered pipeline network. The algorithm is embedded in a scheduling decomposition approach proposed by Boschetto *et al.* (2010). The algorithm determines priorities for sending batches in order to meet deadlines. This proposal uses an analysis of production and demand plans, inventories, input and output of products in terminals, trying to optimize the use of resources. The proposed algorithm is used in cooperation with a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model presented by Polli (2014). This cooperation allowed overcoming computation difficulties indicated by Magatão *et al.* (2012). The results proved to be close to the requested by the network specialists, assisting them in the decision-making process.

KEYWORDS. Allocation. *Scheduling*. Pipeline network.

Main area. P&G (OR in Oil and Gas), L&T (Logistics and Transportation), IND (OR in Industry).

1. Introdução

Redes dutoviárias fornecem uma maneira eficiente para o transporte de petróleo e gás (Kennedy, 1993), e fazer bom uso desse meio de transporte é crucial para a indústria do petróleo. Devido a sua economia em relação a outros sistemas de transporte de grandes volumes e por ser ambientalmente mais seguro, tem sido crescente o incremento do uso do modal dutoviário. O gerenciamento operacional otimizado de sistemas de transporte de fluidos claros e escuros em redes dutoviárias é um fator decisivo no lucro das indústrias de refino de petróleo. Neste contexto, um pequeno conjunto de decisões implica diferenças significativas de custo para o transporte, podendo determinar limites à produção e ao consumo em refinarias, variações na distribuição nos terminais de estocagem, utilização dos dutos, entre outros fatores que dependem da movimentação dos produtos. Desta forma, a otimização da logística do transporte dutoviário brasileiro pode propiciar ganhos relevantes.

Atualmente, a tomada de decisões operacionais em sistemas de dutos é baseada na experiência de especialistas, com a ajuda de cálculos manuais auxiliado apenas por sistemas que realizam a consistência das operações (Ribas, 2012). Todavia, o crescente interesse da indústria petrolífera vem motivando o desenvolvimento de ferramentas capazes de auxiliar no processo de tomada de decisão, em especial as que fazem uso de técnicas de otimização, visando à utilização dos recursos de forma mais eficiente, segura e lucrativa. Algumas abordagens de otimização para as atividades de programação operacional de curto prazo, ou *scheduling* de curto prazo, de dutos podem ser encontradas na literatura, tais como em (Moura *et al.*, 2008; Rejowski e Pinto 2008; Cafaro e Cerdá 2008; Felizari, 2009; Boschetto *et al.*, 2010; Lopes *et al.*, 2010; Magatão *et al.*, 2012). Estes trabalhos indicam que os problemas de *scheduling* dutoviário de curto prazo são problemas de otimização combinatória de difícil resolução (Ribas, 2012). Assim, diversos autores têm empregado estratégias de decomposição (*e.g.*, Neves-Jr *et al.*, 2007; Moura *et al.*, 2008; Boschetto *et al.*, 2010; Magatão *et al.*, 2012) com o objetivo de reduzir a complexidade combinatorial, viabilizando a aplicação em redes de dutos.

O presente artigo aborda uma rede de dutos real, apresentada por Boschetto *et al.* (2010) e, devido à complexidade do problema, este trabalho considera a subdivisão do cenário em estudo, tendo por base os três elementos chave do *scheduling*, segundo Reklaitis (1992): a alocação dos recursos a serem utilizados, o sequenciamento das atividades e a temporização do uso dos recursos pelas atividades. Este trabalho tem seu foco na etapa (módulo) de Alocação de recursos, a qual é detalhada a *posteriori* na seção de metodologia.

2. Descrição do problema e abordagem proposta

Nesta seção são abordadas as características específicas da rede analisada. Esta rede é composta por diferentes áreas operacionais como refinarias, terminais de distribuição, terminais portuários e clientes finais interligados por trechos de dutos, os quais operam o transporte de produtos (derivados de petróleo e etanol). O cenário em estudo, ilustrado na Figura 1, é composto de 14 órgãos, representados por nós, e 30 trechos de dutos, representados pelas setas, que também indicam o sentido em que podem trafegar os produtos através dos dutos. O cenário apresentado envolve 4 refinarias (nós N3, N4, N5 e N6), 2 terminais portuários (N7 e N10), 2 clientes finais (N2 e N14) que recebem ou enviam produtos por meio de 5 terminais de distribuição (N8, N9, N11, N12 e N13). Em particular, o nó N1 não possui tanques para armazenamento de produtos, representando apenas um entroncamento de válvulas e bombas. Os órgãos são interligados através de 30 dutos unidirecionais ou bidirecionais, os quais podem ter seu sentido de fluxo revertido. Mais de 14 tipos de derivados de petróleo podem ser transportados nesta rede. A seguir elencam-se as principais considerações e restrições operacionais que influenciam no *scheduling* da rede de dutos. Detalhes adicionais podem ser obtidos em Boschetto *et al.* (2010).

- Pela mesma rota podem trafegar diferentes bateladas de diferentes produtos a diferentes vazões.
- Cada órgão possui um conjunto de tanques para cada produto. Entretanto, existem limites mínimo, máximo e meta de inventário para cada produto.

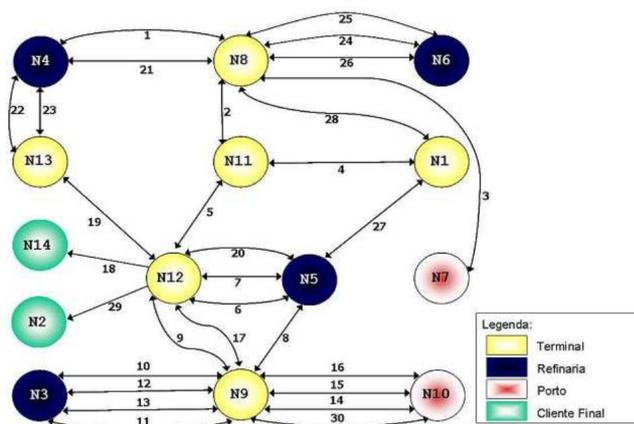


Figura 1. Ilustração da rede de dutos em estudo.
 (Boschetto *et al.*, 2010).

- Operações chamadas de “pulmão” ocorrem quando um órgão está recebendo uma batelada a uma determinada vazão e a rebombeia para outro órgão em uma vazão diferente. Neste caso, armazenamento intermediário deve ser realizado.
- Todos os dutos inicializam completamente preenchidos com algumas bateladas que já foram bombeadas. Essas bateladas são chamadas de “estoque duto”.
- Alguns dutos podem ter seu sentido de fluxo revertido, ou seja, pode ocorrer bombeio a partir das duas extremidades do duto. Esta operação é chamada de “reversão”. Neste caso, uma batelada adicional deve ser considerada para a efetiva entrega das bateladas nos seus destinos.

Em virtude da complexidade do problema envolvido, foi proposta uma estratégia de decomposição do problema de *scheduling* dutoviário. A estratégia de decomposição foi adotada a fim de desenvolver um solucionador que obtivesse resultados operacionais em um tempo computacional não proibitivo, da ordem de poucos minutos. A Figura 2 ilustra essa abordagem e destaca a imersão do trabalho proposto no procedimento de solução. Os dados do cenário em análise, tais como: previsões de produção e demanda, estoque inicial dos tanques e estado inicial dos dutos são utilizados nos três módulos. Primeiramente, o módulo de alocação dos recursos determina as bateladas a serem bombeadas. Em seguida, o módulo de sequenciamento das atividades determina a ordem de passagem das bateladas pelos dutos da rede. Por último, o módulo de determinação temporal define os tempos de bombeio e recebimento das bateladas, indicando detalhes operacionais do *scheduling* de curto prazo. Esta estratégia de decomposição e passagem de informações entre módulos é detalhada em Boschetto *et al.* (2010).

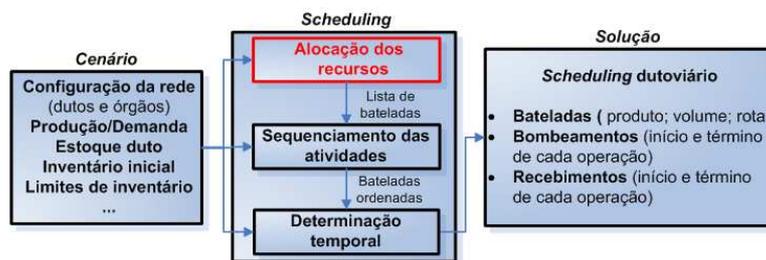


Figura 2. Abordagem de decomposição baseada nos três elementos chave do *scheduling*.
 (adaptado de Boschetto *et al.*, 2010).

A seção a seguir detalha o processo de execução do módulo de Alocação dos recursos, foco deste trabalho. Este módulo está inserido no desenvolvimento de um trabalho de maior escopo, o qual realiza as três etapas necessárias do *scheduling*, já citadas. A Alocação de recursos sugere, ainda, análises prévias para o módulo de Sequenciamento de atividades que, basicamente, otimiza a ordem das bateladas a serem transferidas entre os órgãos. Polli (2014) apresenta um

modelo em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o módulo de Sequenciamento de atividades. Este módulo, portanto, depende dos resultados obtidos pelo módulo proposto no presente trabalho. Os parâmetros determinados pela Alocação de recursos são fundamentais para a redução do custo computacional no Sequenciamento de atividades e, por consequência, na Determinação temporal, módulo final da abordagem proposta. O módulo de Determinação temporal é o qual determina detalhes do *scheduling* das operações de curto prazo, fundamentais no processo de auxílio à tomada de decisões operacionais, conforme apresentado em Boschetto *et al.* (2010). Contudo, este módulo recebe informações de volumes a serem transportados e ordem correta de movimentação já obtida pelos módulos de Alocação e Sequenciamento.

Alternativamente, em Magatão *et al.* (2012) desenvolveu-se um modelo PLIM para englobar os módulos de Alocação de recursos e Sequenciamento de atividades. A carga computacional evidenciada foi elevada para o escopo desejado (várias horas de processamento) e, desta forma, o módulo de Alocação de recursos proposto, em cooperação ao modelo PLIM apresentado em Polli (2014), configura elemento essencial da abordagem de solução adotada.

3. Metodologia

A metodologia proposta estabelece o transporte de produtos através da formação de bateladas na rede de dutos. Estas bateladas baseiam-se nas previsões de produção e consumo nos órgãos em estudo, determinando os períodos de tempo nos quais cada transferência de produto deve ser realizada.

O módulo proposto é desenvolvido a partir do conceito de propagação de janelas de tempo, sendo implementado em linguagem de programação Java. É responsável pela geração das bateladas a serem transportadas pela rede, determinando todas as características das bateladas. A Figura 3 ilustra as etapas deste módulo. Dividiu-se o processo em três etapas: pré-alocação, cálculo das bateladas propriamente dito e pós-alocação. Tais etapas serão explicadas detalhadamente nas próximas subseções deste trabalho.

O cálculo das bateladas é baseado no controle do estoque de cada órgão, que é realizado separadamente para cada produto, como se a rede fosse dedicada. Verificam-se as evoluções dos estoques em cada órgão onde existe o produto em análise através de uma curva de acompanhamento de estoque, utilizando, para isso, os dados de produção e demanda. Essa abstração permite conhecer o estoque em qualquer momento do cenário em estudo, assim como representar produções e demandas não-lineares, o que é bastante comum nos terminais portuários, por exemplo. Nestes tipos de terminais, a produção e o consumo – representando, por exemplo, a chegada de um navio a ser descarregado e carregado – ocorre através de surtos (rajadas ou picos), e não de forma aproximadamente constante ao longo do mês, como nas refinarias. Dessa forma, são evitados problemas decorrentes de erros na aproximação da distribuição da produção e demanda no momento em que esses dados são inseridos no sistema. O algoritmo trabalha durante todo o intervalo temporal considerado com uma representação acurada do estoque em cada órgão, resultando numa carteira de bateladas coerente com a realidade.

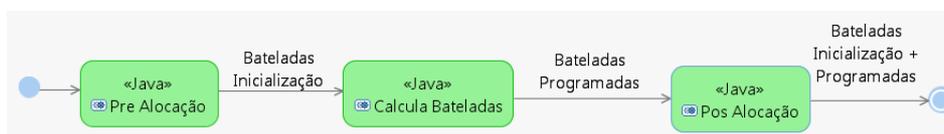


Figura 3. Fluxo de execução do módulo de Alocação de bateladas.

Para determinar a necessidade de alocação de bateladas nos órgãos foram calculados valores de tempo que auxiliam o algoritmo na formação das bateladas. O solucionador utiliza o conceito de janelas de tempo para os órgãos de origem e destino. Assim, os módulos seguintes gerenciam violações de janelas de tempo. A Figura 4 ilustra a formação da janela de tempo de envio na origem, compreendendo o intervalo de tempo entre o TED (Tempo de Envio Disponível) e o TEC (Tempo de Envio Crítico). O TED é determinado como o instante em que o órgão de origem atinge o valor de estoque suficiente para enviar uma batelada completa e o TEC,

como o instante em que o órgão atinge o valor de estoque máximo. Analogamente, a janela de tempo de recebimento no destino, ilustrada pela Figura 5, é compreendida entre o TRD (Tempo de Recebimento Disponível) e o TRC (Tempo de Recebimento Crítico). O TRD é definido como o instante em que o órgão de destino alcança o valor de estoque que possibilite o armazenamento completo de uma nova batelada e o TRC, como o instante em que o órgão alcança o valor de estoque mínimo. Com isso, têm-se uma janela de tempo no órgão de origem entre TED e o TEC, indicando o intervalo quando pode e quando deve ocorrer o envio do produto. Outra janela é configurada no órgão de destino entre TRD e TRC, indicando o intervalo quando o recebimento do produto pode e quando deve ocorrer.

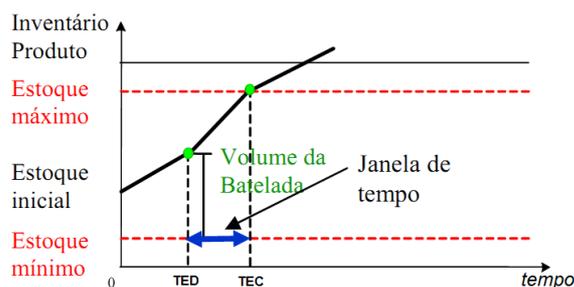


Figura 4. Janelas de tempo na origem. (Boschetto *et al.*, 2010).

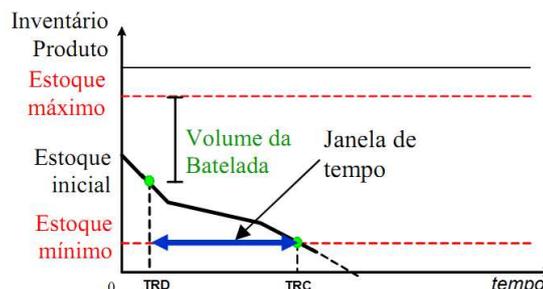


Figura 5. Janelas de tempo no destino. (Boschetto *et al.*, 2010).

As janelas de tempo são calculadas em função de três faixas de estocagem, ilustradas na Figura 6. A primeira faixa está compreendida entre a capacidade e o lastro, e é definida como faixa de capacidade (CAP); a segunda faixa está compreendida entre o estoque mínimo e o estoque máximo e é definida como faixa de estoque Min-Max (MnMx); e por fim, a faixa de estoque compreendida entre o estoque meta mínimo e o estoque meta máximo, definida como faixa de estoque meta (Meta). Deste modo, a Alocação de recursos gera três janelas de tempo para cada batelada, cada janela referente a uma faixa de estoque.

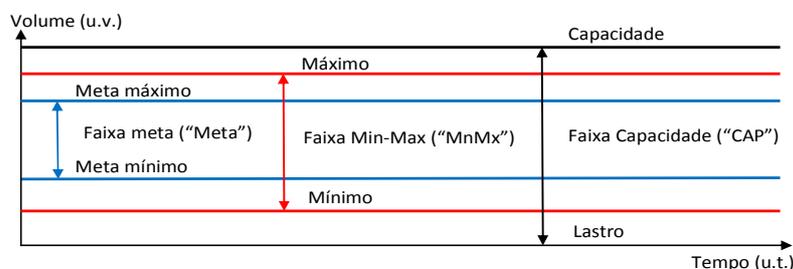


Figura 6. Definição das faixas de estoque.

3.1 Pré Alocação

A Figura 7 ilustra o pré-processamento do módulo de alocação. Inicialmente, realiza-se a ordenação das bateladas que estão presentes no duto conforme o seu posicionamento e a rota de fluxo associada a cada batelada. Em seguida, é feita a inicialização dos pares órgãos-produtos. Adicionalmente, este processo realiza a geração das bateladas de inicialização (estoque em dutos e bateladas agendadas) na formatação que o solucionador requer, inclusive com as informações das janelas de tempo. Para finalizar, executa o processo de geração dos pares de alocação, em que realiza a adaptação dos volumes planejados de forma a serem condizentes com a formatação requerida pelo processo de alocação das bateladas.

A relação dos pares órgãos-produtos é obtida através do estoque inicial dos tanques de cada órgão. Por exemplo, seja um órgão A com sete tanques, sendo que dois tanques possuem estoque inicial com o produto P1, três tanques com P2 e dois tanques com P3. Têm-se, assim, as seguintes relações: A-P1, A-P2 e A-P3, com capacidade agregada para cada par equivalente à

soma da capacidade dos tanques e estoque inicial equivalente à soma do estoque de cada tanque. Caso exista os produtos P4 e P5, as relações A-P4 e A-P5 não seriam geradas por não existir um tanque no órgão A com estoque inicial de P4 ou P5. Esta metodologia de geração de dados faz com que índices indesejados não sejam gerados e, conseqüentemente, o tempo de execução seja reduzido.

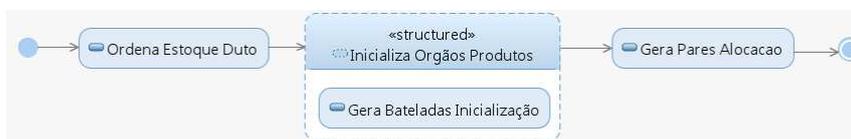


Figura 7. Fluxo de execução da etapa de pré-processamento.

3.2 Cálculo das Bateladas

O algoritmo de cálculo das bateladas foi desenvolvido baseado no processo de trabalho dos especialistas. A Figura 8 ilustra o fluxo de execução do algoritmo. Basicamente, representa um processo cíclico no qual cada ciclo gera uma nova batelada a fim de atender a uma necessidade, tanto de demanda quanto de escoamento da produção, até o momento em que a necessidade de todos os órgãos seja satisfeita. Em cada ciclo executam-se quatro processos principais: cálculo dos tempos críticos, escolha do órgão necessitado, escolha do par e geração da batelada.

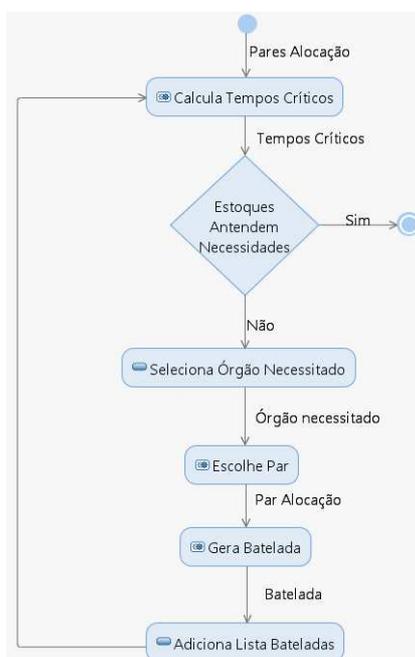


Figura 8. Fluxo de execução do algoritmo de cálculo das bateladas.

3.2.1 Cálculo dos tempos críticos

O processo de cálculo dos tempos críticos, ilustrado na Figura 9, consiste em identificar o momento limite em que o órgão precisará receber, no caso de necessidade de demanda, ou enviar, no caso de necessidade de escoamento. A princípio, seria apenas calcular o TEC para um órgão com necessidade de envio ou TRC para um órgão de recebimento, porém, como o mesmo órgão pode receber de mais de um local, ou enviar para mais de um local, é necessária a avaliação da factibilidade dos tempos críticos. Verifica-se pela Figura 9 que é um processo cíclico no qual todos os pares, para um determinado órgão, são avaliados. Em seguida, para cada par, seleciona-se um volume típico de batelada para realizar o cálculo das janelas de tempo, tanto na origem quanto no destino. Em seguida é avaliado se é possível respeitar as janelas de tempo, considerando o tempo de deslocamento da origem até o destino como sendo o volume da rota sobre a vazão máxima. Caso seja viável, é verificado se o tempo crítico calculado é inferior ao

previamente calculado (o órgão é iniciado com um valor suficientemente alto para que o primeiro par a ser analisado seja escolhido). Ao final da avaliação de todos os pares, o órgão em análise possuirá o tempo crítico calculado.

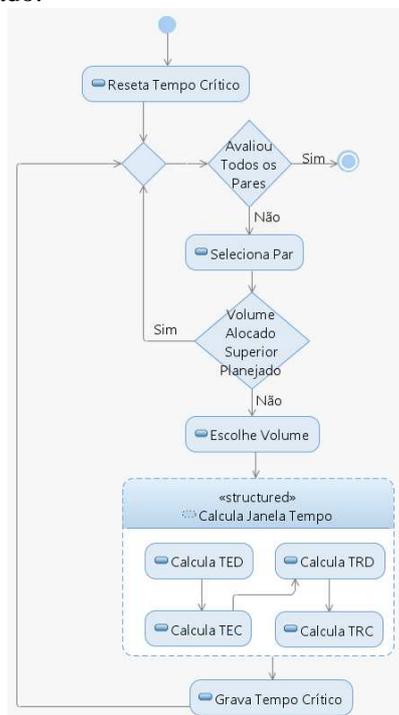


Figura 9. Processo de cálculo dos tempos críticos.

3.2.2 Escolha do órgão necessitado

A escolha do órgão necessitado é realizada selecionando o órgão que possuir o menor tempo crítico calculado anteriormente, independentemente se é um órgão de envio ou recebimento de produto. A próxima etapa consiste em escolher o par que melhor atenderá a necessidade do órgão escolhido nesta etapa.

3.2.3 Escolha do par

A Figura 10 ilustra o fluxo de execução do processo de escolha do órgão que atenderá o órgão necessitado. Primeiramente, é feita a identificação do tipo de necessidade – recebimento ou envio. Caso seja recebimento, será feita a busca por um órgão fornecedor do produto, caso contrário, por um órgão com a possibilidade de receber o produto.



Figura 10. Processo de escolha do órgão a suprir a necessidade do órgão necessitado

Novamente, observa-se que é um processo cíclico, pois avalia todos os pares de movimentação a fim de escolher a melhor opção. Os critérios utilizados levam em consideração o tempo de deslocamento entre os órgãos, diferença de tempos críticos entre os órgãos e diferenças de tempos de disponibilidade. Deste modo, o objetivo é que seja escolhido o órgão que forneça mais garantia de atender às janelas de tempo. Contudo, como o algoritmo não considera as bateladas que já foram criadas, ainda assim não se garante que seja a melhor escolha. Para sanar erros de tomada de decisão deste momento, desenvolveu-se no módulo de ordenação o conceito de janelas de tempo dinâmicas, em que, na prática, ocorre a alteração da ordem de entrega de bateladas em alguns órgãos. Detalhes sobre janelas dinâmicas são amplamente explorados no trabalho de Polli (2014).

3.2.4 Geração da batelada

Esta etapa do processo é a que de fato calcula as características da batelada, sendo que já possui todas as informações definidas, tais como origem, destino, produto, volume e rota. A partir deste momento, o solucionador não considerará mais a capacidade agregada dos tanques, passando a serem avaliadas as janelas de tempo associadas a cada batelada. A partir deste ponto, o gerenciamento de estoques passa a ser feito de forma temporal.

3.3 Pós Alocação

Após a geração das bateladas que satisfazem as necessidades dos órgãos da rede, executa-se o processo de finalização do módulo de Alocação, denominado Pós Alocação, cujos processos estão ilustrados na Figura 11. Este processo tem como objetivo o tratamento de algumas características operacionais descritas a seguir:

- Bateladas de reversão: Avalia todos os dutos verificando se existe a necessidade de realizar a operação de reversão de fluxo. A análise consiste em verificar se duas bateladas com deslocamento em sequência possuem sentido de movimentação contrário no duto. Neste caso, gera-se uma nova batelada com uma rota de reversão a fim de garantir que ambas as bateladas sejam entregues em seus respectivos destinos.
- Bateladas de selo: Verifica todos os dutos avaliando se existe alguma interface proibida entre duas bateladas. Caso seja identificada, uma nova batelada é gerada com o volume mínimo de selo, composta por um produto compatível com as bateladas em contato. Caso não exista um produto que satisfaça a condição de compatibilidade, geram-se duas bateladas de selo que atendam as condições de interface.

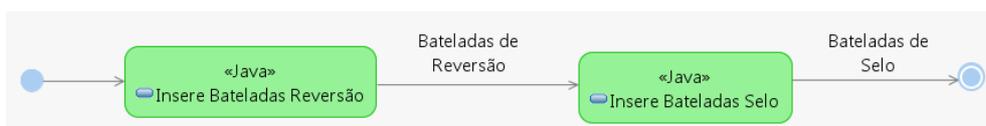


Figura 11. Fluxo de execução da Pós Alocação.

4. Resultados

Inicialmente apresenta-se os resultados obtidos com o módulo de Alocação proposto em si (seção 4.1) e, na sequência (seção 4.2) realiza-se um comparativo computacional com os resultados obtidos em Magatão *et al.* (2012). Por fim, uma resposta obtida com o módulo de Temporização de atividades (vide Figura 2) com a entrada fornecida pelo módulo de Alocação de recursos proposto é mostrada por meio de um gráfico de Gantt (seção 4.3).

Para a realização dos experimentos utilizou-se o *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* 12.5, executando em um computador com processador *Intel core i7- 8* núcleos, *2.4GHz* de *clock*, *4GB* de memória *RAM* e sistema operacional *Windows 7 - 64bits*. A versão do Java utilizada foi a 1.6.

4.1 Resultados: Módulo de Alocação de Recursos

Esta seção apresenta os resultados obtidos do módulo de Alocação dos recursos para um conjunto de 9 cenários testados, cada um compreendendo um período de 30 dias de dados. Detalhes adicionais sobre os cenários são apresentados em Polli (2014).

Na Tabela 1 apresenta-se para cada um dos nove cenários (C1 a C9), o número de bateladas geradas pelo algoritmo de Alocação (Bateladas, valor dado em unidades, ou, simplificado, un.). Na sequência, ilustra-se as informações do número de bateladas de selos e reversão adicionados no processo de Pós-Alocação. Por último, é apresentado o tempo de execução despendido pelo algoritmo. Observa-se que mesmo para um horizonte de 30 dias, onde gera-se entre 250 a 300 bateladas, o tempo de execução do algoritmo é considerado satisfatório para a aplicação na abordagem de solução apresentada.

Tabela 1. Informações do resultado do algoritmo de Alocação de recursos.

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Bateladas (un.)	280	298	263	282	249	264	274	274	271
Selos (un.)	4	11	11	5	7	8	7	7	5
Reversões (un.)	4	11	7	14	14	16	9	6	13
Tempo (s)	2,81	5,22	2,94	3,1	2,23	4,21	4,06	2,99	3,1

A Tabela 2 ilustra um subconjunto do conjunto de bateladas geradas para o cenário C2. Apresentam-se informações que definem as bateladas tais como: identificador (Batelada), produto, rota de fluxo, volume e as janelas de tempos para cada faixa de estoque. Ressalta-se que através da rota de fluxo é possível identificar o nó de origem e destino da batelada, bem como todos os dutos em que esta irá trafegar. Por exemplo, na Batelada 1 da Tabela 2, o nó de origem é N4 e o nó de destino N6. Os dutos 1 e 26, respectivamente, fazem parte da rota do produto 34 em análise. Na Tabela 3 é apresentado o conjunto de bateladas inseridas a fim de realizar as operações de reversões de fluxo. Observa-se que, nestes casos, a rota da batelada de reversão possui o nó de origem igual ao de destino sendo, ainda, trafegada unicamente pelo duto a reverter. Por exemplo, a batelada 215 possui origem e destino no nó N13 preenchendo completamente o duto 22, permitindo que, na sequência, seja bombeada uma batelada de N4 para N13. Já a Tabela 4 ilustra as bateladas de selos inseridos com o intuito de compatibilizar a movimentação. Observa-se que estas bateladas possuem volume típico de 5000 uv.

Tabela 2. Exemplo de bateladas geradas para o cenário C2

Batelada	Produto	Rota	Volume (uv)	Janela	TED	TEC	TRD	TRC
1	34	N4→1→26→N6	8000	Meta	0	720	0	49
				MnMx	0	720	0	49
				Cap	0	720	0	49
2	21	N8→2→5→N12	9745	Meta	0	2	0	29
				MnMx	0	2	0	63
				Cap	0	2	0	117
3	10	N3→10→8→N5	2700	Meta	0	10	15	79
				MnMx	0	44	5	118
				Cap	0	44	5	150
4	6	N4→1→26→N6	8711	Meta	10	15	0	720
				MnMx	0	50	0	720
				Cap	0	50	0	720
...
95	31	N6→24→28→4→N11	15000	Meta	179	462	472	525
				MnMx	156	462	472	562
				Cap	100	462	472	618
96	26	N3→12→15→N10	8000	Meta	323	539	289	333
				MnMx	277	604	294	465
				Cap	277	697	0	465
97	14	N3→10→8→N5	2700	Meta	251	324	331	477
				MnMx	230	370	331	535
				Cap	230	425	331	583
...

201	25	N6→24→28→4→N11	8000	Meta	685	720	660	714
				MnMx	651	720	653	720
				Cap	651	720	648	720
202	34	N5→20→19→N13	12000	Meta	216	716	216	720
				MnMx	216	720	216	720
				Cap	216	720	216	720
203	18	N6→25→2→5→18→N14	23000	Meta	240	720	0	719
				MnMx	89	720	0	720
				Cap	0	720	0	720
...

Tabela 3. Lista de reversões do cenário C2.

Batelada	Produto	Rota	Volume (uv)
215	35	N13→22→N13	9400
216	31	N4→22→N4	9400
217	35	N13→22→N13	9400
218	31	N4→22→N4	9400
221	31	N13→22→N13	9400
222	31	N4→22→N4	9400
223	21	N8→3→N8	22100
224	31	N7→3→N7	22100
225	31	N8→3→N8	22100
226	31	N7→3→N7	22100
227	31	N8→3→N8	22100

Tabela 4. Lista de selos para o cenário C2.

Batelada	Produto	Rota	Volume (uv)
232	21	N4→1→N8	5000
233	21	N4→1→26→N6	5000
234	21	N4→1→26→N6	5000
235	21	N4→1→26→N6	5000
236	34	N4→1→26→N6	5000
237	31	N4→1→N8	5000
238	21	N4→1→N8	5000
239	35	N8→26→N6	5000
240	21	N8→26→N6	5000
241	35	N7→3→N8	5000
242	35	N7→3→N8	5000

4.2 Resultados: Comparativo com Magatão *et al.* (2012)

A Tabela 5 a seguir apresenta, para os nove cenários avaliados, os resultados obtidos com a abordagem de Magatão *et al.* (2012) bem como os resultados obtidos com a execução do módulo de Alocação proposto seguido ao modelo de Sequenciamento de atividades apresentado em Polli (2014).

Destaca-se na tabela, inicialmente, o horizonte de programação alcançado (H), em dias. Na abordagem proposta (Algoritmo de Alocação + modelo PLIM de Sequenciamento), o valor de H foi de 30 dias em um tempo de execução (Tempo) inferior a 600 segundos (10 minutos), existindo convergência do modelo até a otimalidade em todos os cenários avaliados (Gap 0%). Já em Magatão *et al.* (2012), para todos os cenários testados, limitou-se o tempo de execução em 10 horas (36000 segundos), alcançando-se soluções com um Gap de Integralidade superior a 33% (Cenário C2). Adicionalmente, em alguns testes (C3, C6 e C8) ocorreu falha de execução do *solver* devido a insuficiência (estouro) de memória RAM.

Evidencia-se que o ganho computacional obtido com a abordagem proposta (Algoritmo de Alocação + modelo PLIM) é notória em relação a Magatão *et al.* (2012), viabilizando-se a obtenção de resultados em tempos computacionais não proibitivos, adequados ao escopo de uma ferramenta de auxílio ao processo de tomada de decisões dos especialistas do sistema.

Tabela 5. Comparativo da abordagem proposta com o trabalho de Magatão *et al.* (2012)

Abordagem	C1				C2				C3			
	H	N. Bat.	Tempo	Gap	H	N. Bat.	Tempo	Gap	H	N. Bat.	Tempo	Gap
Modelo PLIM (Magatão <i>et al.</i> , 2012)	7	60	36000	76,33	7	60	36000	33,99	7	*		
Módulo de Alocação + Modelo PLIM (Polli, 2014)	30	280	2,81	-	30	298	5,22	-	30	263	2,94	-
			1,95	0			39,23	0			416	0
Abordagem	C4				C5				C6			
	H	N. Bat.	Tempo	Gap	H	N. Bat.	Tempo	Gap	H	N. Bat.	Tempo	Gap
Modelo PLIM (Magatão <i>et al.</i> , 2012)	7	60	36000	89,40	7	60	36000	48,41	7	*		
Módulo de Alocação + Modelo PLIM (Polli, 2014)	30	282	3,1	-	30	249	2,23	-	30	264	4,21	-
			9,83	0			11,54	0			507	0

Abordagem	C7				C8				C9			
	H	N. Bat.	Tempo	Gap	H	N. Bat.	Tempo	Gap	H	N. Bat.	Tempo	Gap
Modelo PLIM (Magatão <i>et al.</i> , 2012)	7	60	36000	52,01	7	*			7	60	36000	36,47
Módulo de Alocação + Modelo PLIM (Polli, 2014)	30	274	4,06 11,61	- 0	30	274	2,99 20,25	- 0	30	271	3,1 14,1	- 0

* Falha de execução do *solver*.

4.3 Resultados: Saída do módulo de Determinação temporal

A Figura 12 ilustra um diagrama de Gantt do *scheduling* de todas as bateladas. A solução foi obtida aplicando a abordagem de solução inicialmente apresentada na Figura 2. O diagrama apresenta os resultados do módulo de Determinação temporal, proposto por Boschetto *et al.* (2010). Contudo, este módulo foi alimentado com os parâmetros obtidos a partir do módulo de Alocação de recursos proposto no presente trabalho. Na Figura 12, cada linha representa um duto da rede e as cores representam os produtos. O eixo horizontal está associado ao tempo. No caso, as bateladas são bombeadas durante um horizonte de mais de 30 dias. A tarja preta vertical representa o limite de 30 dias do horizonte de programação desejado.

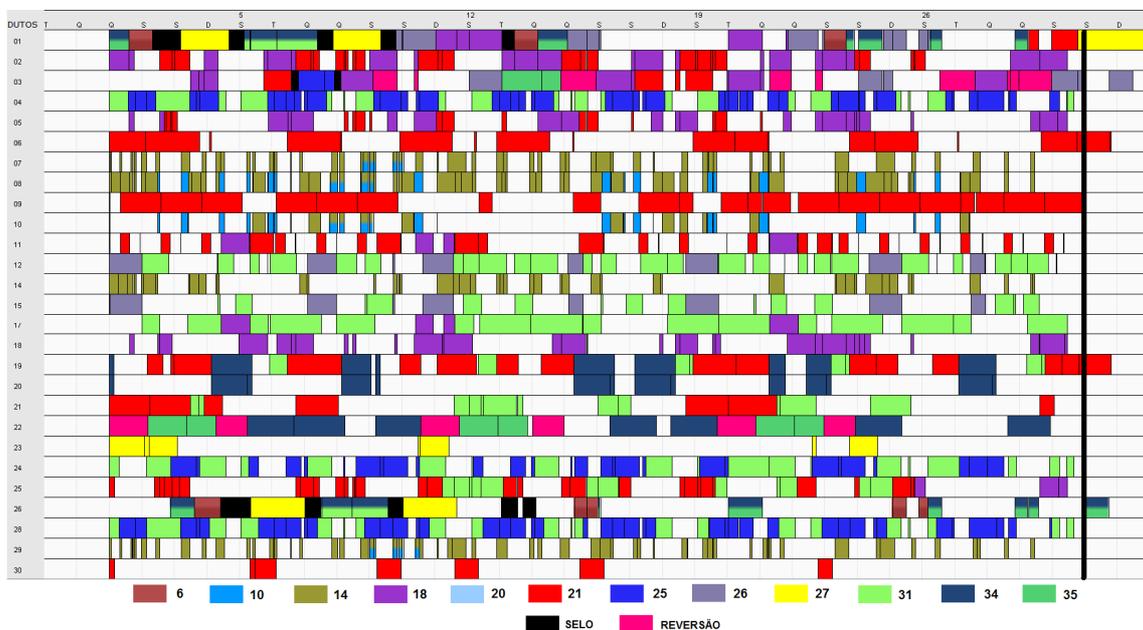


Figura 12. Diagrama de Gantt da solução final do *scheduling*.

4. Conclusão

Este trabalho apresenta um algoritmo para auxiliar a alocação de bateladas de derivados de petróleo em uma rede dutoviária. A alocação de recursos é uma das fases primordiais para a obtenção do *scheduling* final das bateladas na rede em estudo, conforme indica a Figura 2. O algoritmo determina prioridades de envio das bateladas, de forma a cumprir prazos estipulados tendo por base: uma análise dos planos de produção e demanda, estoques, entrada e saída de produtos dos órgãos, além de otimizar a utilização de recursos, conforme indicado na seção de metodologia. Considerando cada produto isoladamente na rede, o cálculo das movimentações baseia-se nas previsões de taxas de produção e demanda em cada órgão, bem como o recebimento e envio de bateladas. Resultados computacionais para o módulo de Alocação de recursos são obtidos em poucos segundos em nove cenários reais, os quais envolveram o bombeio de mais de 240 bateladas durante um horizonte de 30 dias (Tabela 1). O algoritmo obtém informações da batelada, tais como: produto, rota de fluxo, volume e janelas de tempos para cada faixa de estoque (

Tabela 2). Ressalta-se que através da rota de fluxo é possível identificar o nó de origem e destino da batelada, bem como todos os dutos em que esta irá trafegar. Além disso, conforme evidenciado na Tabela 3 e na Tabela 4, o algoritmo também determina bateladas para operações de reversão de fluxo e selos. No escopo final de obtenção do *scheduling* das atividades (Figura 2), o algoritmo proposto é utilizado em cooperação com um modelo em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) apresentado em Polli (2014). A associação permitiu superar dificuldades computacionais detectadas no trabalho de Magatão *et al.* (2012), conforme evidenciado na seção 4.2 (Tabela 5). Os resultados finais obtidos (*e.g.*, seção 4.3) mostraram-se próximos ao solicitado pelos especialistas da rede, auxiliando-os na tomada de decisões, propiciando uma previsão acerca das transferências a serem realizadas.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro da ANP/FINEP (PRH-ANP/FINEP, PRH10/UTFPR), PFRH-PETROBRAS (Acordo 6000.0067933.11.4), CENPES-PETROBRAS (Termo de Cooperação 0050.0066666.11.9) e CNPq (Processos 304037/2010-9, 311877/2009-5, e 305405/2012-8).

Referências

- Boschetto, S.N., Magatão, L., Brondani, W.M., Neves-Jr, F., Arruda, L.V.R., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D., Relvas, S.** An Operational Scheduling Model to Product Distribution through a Pipeline Network. *Ind. & Eng. Chem. Res.*, v. 49, 5661-5682, 2010.
- Cafaro, D., Cerdá, J.** Dynamic Scheduling of Multiproduct Pipelines with Multiple Delivery Due Dates. *Computers and Chemical Engineering*, v. 32, p. 728-753, 2008.
- Felizari, L.C.** Programação das Operações de Transporte de Derivados de Petróleo em Redes de Dutos. *Tese (Doutorado em Eng. Elétrica)* – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.
- Kennedy, J.L.** *Oil and Gas Pipeline Fundamentals*. USA, PennWell Publishing Company, 1993.
- Lopes, T.M.T., Ciré, Souza, C.C., Moura, A.V.** A Hybrid Model for a Multiproduct Pipeline Planning and Scheduling Problem. *Constraints*, v. 15, p. 151-189, 2010.
- Magatão, S.N.B., Magatão, L., Polli, H.L., Neves-Jr, F., Arruda, L.V.R., Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D.** Planning and Sequencing Product Distribution in a Real-World Pipeline Network: An MILP Decomposition Approach. *Ind. & Eng. Chem. Res.*, v. 51, 4591-4609, 2012.
- Moura, A.V., Souza, C.C., Lopes, T.M.T., Ciré, A.A.** Heuristics and Constraint Programming Hybridizations for a Real Pipeline Planning and Scheduling Problem. *11th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering*, p. 455–462, 2008.
- Neves-Jr, F., Arruda, L.V.R., Magatão, L., Stebel, S.L., Lüders, R., Felizari, L.C., Boschetto, S.N., Yamamoto, L., Mori, F.M., Barbosa, V., Bonacin, M.V., Polli, H.L.** An Efficient Approach to the Operational Scheduling of a Real-World Pipeline Network, In: *17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE 17)*, Bucareste, p.697-702, 2007.
- Polli, H.L.** Otimização do Transporte de Derivados Claros de Petróleo em Rede de Dutos Utilizando Programação Linear Inteira Mista. *Dissertação (Mestrado em Eng. de Automação e Sistemas)* — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.
- Reklaitis, G.V.** Overview of Scheduling and Planning of Batch Process Operations, *Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Batch Processing System*, Antalya, Turkey, 660-705, 1992.
- Rejowski, J.R., Pinto, J.** A Novel Continuous Time Representation for the Scheduling of Pipeline Systems with Pumping Yield Rate Constraints. *Computers and Chemical Engineering*, v. 32, p. 1042-1066, 2008.
- Ribas, P.C.** Otimização do *Scheduling* de Movimentações de um Duto com uma Origem e Vários Destinos. *Tese (Doutorado em Eng. de Automação e Sistemas)* — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.