



OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DO SUPRIMENTO DE PETRÓLEO DE TERMINAIS AQUAVIÁRIOS PARA REFINARIAS: UMA ABORDAGEM DE REFORMULAÇÕES EM MODELOS DE PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA

Luiz Cláudio Sayão Cortez

Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria 156, 22210-240, Niterói, RJ
luizclaudiocortez@gmail.com

Artur Alves Pessoa

Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria 156, 22210-240, Niterói, RJ
artur@producao.uff.br

RESUMO

No contexto do processo de suprimento de petróleo, que é parte da cadeia de suprimentos de empresas integradas de petróleo e gás, a otimização da programação de lotes de petróleo se apresenta como um importante e complexo problema de tomada de decisão. Este considera as operações de suprimento de terminais aquaviários para refinarias, incluindo as chegadas de navios, demanda dos blends para suprimento contínuo de unidades de destilação, changeovers, e controle de componentes das misturas. O presente trabalho desenvolveu uma abordagem de reformulações matemáticas para o problema descrito com base em um modelo de programação inteira mista de referência na literatura. As reformulações e cortes desenvolvidos apresentaram significativos ganhos com relação ao gap da relaxação linear e tempo de solução para as instâncias testadas. Além disso, dependendo da quantidade de períodos na discretização do tempo, constatou-se que é possível resolver instancias de tamanho compatível com perfis de suprimento reais.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização, Reformulações, Suprimento.

Área Principal: P&G - PO na Área de Petróleo e Gás, PM – Programação Matemática, L&T - Logística e Transportes.

ABSTRACT

In the context of the crude oil supply process, which is part of the supply chain of oil & gas integrated companies, the crude oil lots schedule optimization rises as an important and complex decision-making problem. It considers the supply operations from water transportation terminals to refineries, including vessel arrivals, blends demand for continuous supply to crude distillation units, changeovers and blend components control. The present article developed a mathematical reformulations approach to the described problem, based on a mixed integer programming model from the literature. The developed reformulations and cuts presented significant gains on the linear relaxation gaps and run times for solving the tested instances. Furthermore, depending on the number of periods adopted on the time discretization, it can be seen that is possible to solve instances of size compatible with actual supply profiles.

KEYWORDS: Optimization, Reformulations, Supply.

Main Area: P&G - OR in Petroleum and Gas Area, MP – Mathematical Programming, L&T – Logistics and Transport.

1. Introdução

1.1. Contextualização e problema de pesquisa

O suprimento de petróleo para unidades de refino, de forma ampla, pode ser caracterizado como um processo decorrente do desdobramento do planejamento logístico de uma empresa integrada do segmento de óleo & gás conforme níveis hierárquicos estratégico, tático e operacional. Os trabalhos de Aires et al. (2004) e Rocha et al. (2009) descrevem o planejamento logístico hierarquizado para a cadeia de suprimento de petróleo da Petrobras, estatal brasileira com regime de economia mista e empresa integrada do setor de energia, com foco no segmento de óleo & gás. Entretanto, suas proposições estão concentradas no nível tático de planejamento logístico, mais especificamente na otimização do processo da alocação das diferentes correntes de petróleos às necessidades das refinarias.

No que se refere ao escopo do presente artigo, centrado no nível operacional, mais especificamente na programação de terminais para suprimento de refinarias, pode ser destacado o trabalho de Lee et al. (1996), que define um modelo de programação linear inteira mista (MILP) com tempo discreto. A formulação e instancias propostas neste trabalho serviram de relevante base para discussões em trabalhos que o sucederam, dos quais podem ser destacados: Jia e Iraperitrou (2004), Karuppiyah et al. (2008), Leiras (2010) e Yüzgec et al. (2010). Este último utiliza uma abordagem de controle preditivo (MPC) que define as ações de controle sobre as decisões da otimização necessárias para assimilar perturbações ocorridas ao longo de um horizonte rolante de programação. Conforme informado no trabalho, algumas modificações na formulação de Lee et al. (1996) e complemento dos dados de entrada foram realizadas para garantir a consistência na resolução do problema.

Com base em Pochet e Wolsey (2006), o problema central do presente trabalho pode ser caracterizado como contido na abordagem genérica de planejamento da produção com características de dimensionamento de lotes, gestão de estoques, blending (mistura), e escalonamento com changeover (set-up por trocas), ou conforme classificação proposta nesta referência: Multi-Item WW-DLS-CC-SC | M1-SQ | PC-U, que consiste no problema de dimensionamento de lotes discreto com múltiplos itens e custos do tipo Wagner-Whitin (descrito por Pochet e Wolsey (2008) como custos não especulativos de produção e estoque, capacidade não decrescente e custos de set-up não crescentes), capacidade limitada constante (sem perda ao longo do tempo), e changeover dependente do sequenciamento.

Dada a preocupação com a consistência e formalização da modelagem, clareza na descrição da entrada de dados e exposição de resultados, além da aderência do modelo à abordagem conceitual de Pochet e Wolsey (2006 e 2008), a formulação modificada de Yüzgec et al. (2010) é o ponto de partida para o presente trabalho. Os modelos descritos nos referenciais teóricos citados anteriormente para o problema em estudo apresentam maior foco e preocupação com a proposta de modelagem sob a perspectiva da representação do problema. Entretanto, sob a perspectiva de eficiência computacional, estes trabalhos apresentam menor ênfase, dados os significativos gaps de integralidade e tempos de solução para as instancias propostas, sendo estas ainda pequenas na comparação com problemas de ordem de grandeza próxima da realidade.

1.2. Objetivo

Dado o contexto exposto, o objetivo do presente trabalho é, partindo do modelo proposto por Yüzgec et al. (2010) para o problema de otimização da programação de lotes de petróleo de terminais para unidades de refino, desenvolver e implementar reformulações e cortes válidos que gerem significativas melhorias na relaxação linear e gap de integralidade do MIP em estudo, e por consequência, torne viável a resolução de instancias de tamanho próximo da realidade via programação matemática com custo computacional significativamente menor do que os trabalhos relacionados da bibliografia existente.

2. Modelagem

2.1. Descrição do problema

Durante o horizonte de tempo, ocorre a chegada de navios de petróleo nos píeres de um terminal aquaviário; cada navio descarrega o petróleo transportado para um ou mais tanques de armazenagem localizados no terminal, e posteriormente desatracam e deixam o píer; cada tanque de armazenagem do terminal envia por duto o petróleo para um ou mais tanques de carga nas refinarias; ocorre a mistura (blend) de diferentes correntes de petróleos (originárias dos tanques nos terminais) nos tanques de carga nas refinarias; as misturas contidas nos tanques de carga alimentam de forma contínua a demanda de uma ou mais unidades de destilação da refinaria (considerando o custo de changeover na troca de tanque de carga). Além disso, os tanques de armazenagem dos terminais e os tanques de carga das refinarias possuem componentes controlados conforme limites percentuais especificados para o petróleo armazenado (por exemplo, enxofre, dada a preocupação com especificações de qualidade, ou percentual de cada corrente de petróleo que compõe a mistura, para compatibilização com elenco das refinarias).

São assumidas as seguintes premissas na modelagem do problema: o tempo é discretizado; a quantidade de petróleo restante no duto é negligenciada; os tempos de mudanças (set-up) de linhas internas (dos terminais e refinarias) e dutos são negligenciados (são pequenos em comparação com o horizonte); assume-se a mistura perfeita nos tanques dos terminais e refinarias (tempo de mistura é negligenciado); a concentração dos componentes controlados nas misturas é definida através de equação bilinear linearizada; em qualquer momento no tempo, um tanque só recebe ou só envia, nunca ambos; o volume enviado é sempre homogêneo (nunca ocorre separação química dos componentes), e só ocorre mistura no tanque de destino dos lotes.

Deseja-se gerar uma programação otimizada de lotes de petróleo desde a chegada dos navios nos terminais até a carga das unidades de destilação nas refinarias, conforme processo detalhado acima, minimizando os custos de descarga e espera dos navios, custos de estoque nos tanques de armazenagem dos terminais e tanques de carga nas refinarias, e o custo de changeover motivado pela troca de tanque de carga (ou seja, da mistura de petróleo) que supre uma determinada unidade de destilação.

Os grupos de restrições que devem ser atendidos podem ser resumidos em: regras de chegada e partida de navios nos terminais; balanços e limites operacionais de volumes totais e dos componentes controlados nos navios, tanques de armazenagem e tanques de carga (incluindo atendimento de demanda); e regras de operação para carga das unidades de destilação.

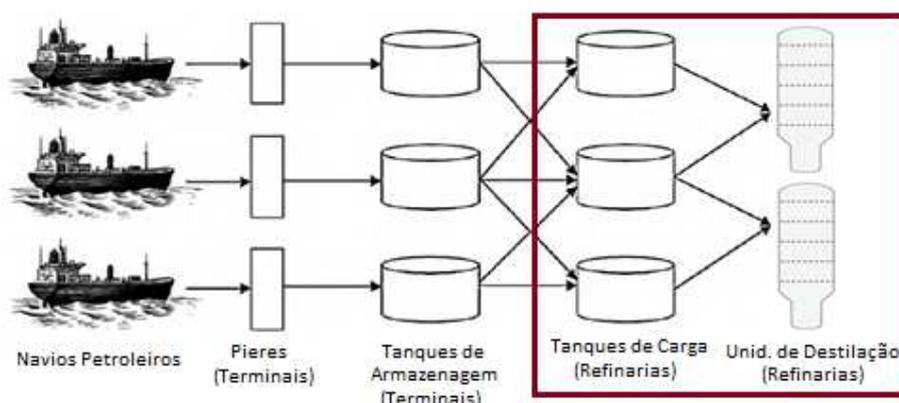


Figura 1 – Processo de suprimento de petróleo de terminais para refinarias, com destaque para enfoque das reformulações e cortes propostos - Adaptação de Yüzgec et al. (2010)

As equações, parâmetros, variáveis e premissas de representação que compõem o modelo de referência para o presente trabalho estão detalhadas em Yüzgec et al. (2010). Sendo assim,

com relação ao detalhamento da abordagem proposta, o enfoque no tópico de modelagem será dado para a formalização e descrição das reformulações e cortes desenvolvidos.

A abordagem proposta está centrada no trecho do processo de suprimento entre os tanques de carga e as unidades de destilação, visto que: o custo de *changeover* é, proporcionalmente, significativamente maior que os demais custos da função objetivo; a ocorrência de *changeover* é decorrente da relação entre o suprimento contínuo das unidades de destilação e o estoque disponível nos tanques de carga; e a demanda de misturas a ser atendida está referenciada nos tanques de carga, o que impacta diretamente em todas as decisões das etapas anteriores do processo de suprimento. Segue abaixo a descrição dos índices, parâmetros e variáveis utilizadas para as reformulações e cortes propostos:

Parâmetros de entrada / Índices:

SCH = Total de períodos t do horizonte de tempo.

NBT = Total de tanques de carga j para as unidades de destilação.

NCDU = Total de unidades de destilação l da refinaria.

$VB_{j,0}$ = Estoque inicial ($t=0$) no tanque de carga j .

$VB_{j,max}$ = Volume máximo do tanque de carga j .

DM_j = Volume total demandado para o tanque de carga j .

$FBC_{j,max}$ = Volume máximo do lote enviado a partir do tanque de carga j .

Variáveis:

$Z_{j,j',l,t}$ = variável binária igual a 1 quando existe *changeover* (troca) do tanque de carga j para o j' no suprimento da unidade de destilação l no tempo t ; e igual a zero caso contrário.

$D_{j,l,t}$ = variável binária igual a 1 quando existe envio (set-up) de lote do tanque de carga j para a unidade de destilação l no tempo t ; e igual a zero caso contrário.

$SU_{j,l,t}$ = variável binária igual a 1 quando existe start-up de suprimento do tanque de carga j para a unidade de destilação l no tempo t ; e igual a zero caso contrário. Um start-up em t ocorre quando $D_{j,l,t-1} = 0$ e $D_{j,l,t} = 1$.

$SO_{j,l,t}$ = variável binária igual a 1 quando existe switch-off de suprimento do tanque de carga j para a unidade de destilação l no tempo t ; e igual a zero caso contrário. Um switch-off em t ocorre quando $D_{j,l,t} = 1$ e $D_{j,l,t+1} = 0$.

$FBC_{j,l,t}$ = variável contínua que determina o volume do lote enviado do tanque de carga j para a unidade de destilação l no tempo t .

$VB_{j,t}$ = variável contínua que determina o volume no tanque de carga j no tempo t .

Pochet e Wolsey (2006) apresenta o problema de sequenciamento de pigmentação, cuja classificação é semelhante a do problema de Yüzgec et al. (2010), apesar de simplificado devido ao enfoque didático: dimensionamento de lotes com múltiplos itens, máquina única, considerando custos de estoque e custo de *changeover* dependente de sequenciamento, sem estoque inicial e com no máximo um item produzido por período. A abordagem considerando múltiplos itens conjuntamente pode ser decomposta em uma derivada dela onde cada item individualmente corresponde a um problema DLS-CC-SC (dimensionamento de lotes com capacidade constante e custos de start-up).

Por outro lado, existem particularidades e complexidades da formulação de Yüzgec et al. (2010) que não são consideradas e tratadas na abordagem simplificada de Pochet e Wolsey (2006), o que demanda adaptação e complementação na utilização como referência de algumas de suas propostas de reformulações.

Sendo assim, nas próximas seções será detalhado o esforço empreendido nestas adaptações e complementações para o problema de pesquisa (suprimento de refinarias a partir de

terminais aquaviários) tendo como base as discussões teóricas para o problema simplificado (sequenciamento de pigmentação) de Pochet e Wolsey (2006). Além disso, adicionalmente à reformulação mencionada, serão explicados e detalhados os cortes criados para melhoria da eficiência computacional com relação à solução do problema de pesquisa.

2.2. Reformulação de variáveis de changeover

A primeira reformulação proposta para o problema de sequenciamento de pigmentação está centrada nas variáveis de changeover. Seguem abaixo as restrições da formulação original de Yüzgec et al. (2010) para representação do changeover no suprimento de uma unidade de destilação:

$$Z_{j,j',l,t} \geq D_{j',l,t} + D_{j,l,t-1} - 1 \quad \forall t = 2, \dots, SCH \mid j \neq j'$$

Em qualquer tempo t do horizonte, ocorre um changeover do tanque de carga j para outro tanque diferente j' quando em $t-1$ uma unidade de destilação l era suprida por j e em t passou a ser suprida por j' . Neste caso, a desigualdade da formulação original foi desdobrada em cinco novas na adaptação da reformulação de Pochet e Wolsey (2006) para o problema em estudo. Esta foi centrada no relacionamento entre as variáveis análogas e inclusão do nível da unidade de destilação, que não possui correspondência no problema simplificado:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{NBT} Z_{j,j',l,t} &\geq D_{j',l,t} && \forall j', l, t \\ \sum_{j'=1}^{NBT} Z_{j,j',l,t} &\geq D_{j,l,t-1} && \forall j, l, t \\ \sum_{j=1}^{NBT} D_{j,l,0} &\geq 1 && \forall l \\ D_{j',l,t} - SU_{j',l,t} &= Z_{j',j',l,t} && \forall j', l, t \\ D_{j',l,t-1} - SO_{j',l,t-1} &= Z_{j',j',l,t} && \forall j', l, t \end{aligned}$$

Os três primeiros grupos de restrições representam os impactos nas decisões de envio dos lotes de petróleo ao longo do tempo causados pela possibilidade de changeover considerando, respectivamente, os tanques de destino e origem das trocas, e tanque inicial do suprimento de uma unidade de destilação l . Já os dois últimos grupos traduzem as variáveis de changeover nas lógicas, respectivamente, de start-up e switch-off.

2.3. Cortes de start-up e switch-off

Além da reformulação adaptada a partir das propostas de Pochet e Wolsey (2006), o presente trabalho propõem cortes adicionais baseados nas necessidades de start-up e switch-off ao longo do horizonte de tempo definidas pela relação entre estoque disponível, capacidade da tancagem, limites de envio, e demanda dos tanques responsáveis pelo suprimento contínuo das unidades de destilação. Também é importante ressaltar a premissa de que um tanque só recebe ou envia lotes em um determinado período de tempo t (nunca ambos).

A necessidade de changeover no tempo t de um tanque de carga j para j' é motivada pela relação entre o estoque $VB_{j,t-1}$ disponível no tanque j no tempo $t-1$, e o consumo contínuo $FBC_{j,l,t}$ de uma unidade de destilação l conforme necessidade de atendimento da demanda DM_j vinculada ao tanque supridor j .

No contexto desta dinâmica, pode-se garantir que, para o primeiro tanque supridor da unidade de destilação l no horizonte, necessariamente ocorrerá um switch-off se o seu estoque inicial não for suficiente para atendimento da respectiva demanda associada ($DM_j > VB_{j,0}$), visto que será necessário que outro tanque continue o suprimento de l .

Entretanto, em algum momento posterior ao longo do horizonte de tempo, este tanque de carga j precisará voltar a abastecer uma unidade de destilação l qualquer, visto que precisará complementar o atendimento da demanda associada a j , implicando necessariamente em um start-up. Por exemplo: se o switch-off do tanque j aconteceu em $t-2$, este terá que pelo menos receber volume dos tanques dos terminais em $t-1$ para voltar a suprir em t uma unidade de destilação l (gerando um start-up em t).

Vale ressaltar que os cortes de switch-off descritos abaixo apenas são válidos para o tanque de carga j que começar o suprimento (ou seja, $\sum_{l=1}^{NCDU} D_{j,l,0} = 1$), enquanto que os cortes de start-up são válidos para qualquer tanque. O uso do termo $\text{Min}[DM_j, t FBC_{j,max}]$ dos cortes de start-up (no lugar de apenas DM_j nos cortes de switch-off) é motivado pelo fato de que $t FBC_{j,max}$ (máximo de fluxo de carga até t) pode gerar um limite válido mais restritivo que o termo DM_j (que considera todo horizonte), o que fortalece a formulação. Este não é válido para os cortes de switch-off porque, sendo $t FBC_{j,max} < DM_j$, pode ser forçada uma troca de tanque de carga desnecessária dada a existência de demanda ainda pendente de ser atendida.

Os dois grupos de restrições abaixo formalizam matematicamente esta explicação, respectivamente, para switch-off e start-up.

$$\sum_{u=1}^{\text{Min}[t-2, T_j-2]} \sum_{l=1}^{NCDU} SO_{j,l,u} \geq \quad \forall j \mid DM_j > VB_{j,0}$$

$$\forall t = 2, \dots, SCH \mid t \notin [T_j - 2, SCH]$$

$$\left(\frac{\sum_{u=1}^t \sum_{l=1}^{NCDU} FBC_{j,l,u} - VB_{j,0}}{DM_j - VB_{j,0}} \right) - 1 + \sum_{l=1}^{NCDU} D_{j,l,0}$$

Dado que:

$$T_j = SCH - \left\lfloor \frac{DM_j - VB_{j,0}}{FBC_{j,max}} \right\rfloor + 1$$

$$\sum_{u=1}^{\text{Min}[t, T_j]} \sum_{l=1}^{NCDU} SU_{j,l,u} \geq \quad \forall j \mid \text{Min}[DM_j, t FBC_{j,max}] > VB_{j,0}$$

$$\forall t = 2, \dots, SCH \mid t \notin [T_j, SCH]$$

Dado que:

$$T_j = SCH - \left\lfloor \frac{\text{Min}[DM_j, t FBC_{j,max}] - VB_{j,0}}{FBC_{j,max}} \right\rfloor + 1$$

Adicionalmente, como proposta de lifting para fortalecimento dos cortes propostos, o tempo T_j foi definido como o tempo máximo (ou mais conservador) em que a demanda não atendida pelo estoque inicial do tanque de carga j deverá motivar um switch-off. Sendo assim, T_j define um limite superior válido para os somatórios nas variáveis de start-up e switch-off, fortalecendo a formulação.

Com estes limites definidos pelos termos $\text{Min}[t-2, T_j-2]$ e $\text{Min}[t, T_j]$ respectivamente para switch-off e start-up, e dado que o fluxo de carga $\sum_{u=1}^t \sum_{l=1}^{NCDU} FBC_{j,l,u}$ é limitado em t , todas as restrições com $t \geq T_j - 2$ (switch-off) ou $t \geq T_j$ (start-up) passam a serem dominadas pela restrição com $t = SCH$ (deixando-as redundantes), e por isso podem ser retiradas, exceto para $t = SCH$ (ou seja, para o horizonte completo).

O corte de start-up descrito anteriormente desconta a demanda já atendida pelo estoque inicial $VB_{j,0}$ na definição dos limites dos start-ups. Entretanto, uma variação adicional e mais abrangente pode ser gerada através do termo $VB_{j,0} \sum_{l=1}^{NCDU} D_{j,l,0}$, proporcionando ao corte a flexibilidade de considerar simultaneamente o desconto do estoque inicial para os tanques de carga que iniciam o suprimento, mas também os tanques que não iniciam o suprimento quando $\sum_{l=1}^{NCDU} D_{j,l,0} = 0$. Desta forma, a formulação é fortalecida através da inclusão de novos limites válidos para a ocorrência de start-ups.

Vale ressaltar que a capacidade máxima $VB_{j,max}$ do tanque de carga j foi inserida na definição do limite dos start-ups, conforme o termo alterado $\text{Min}[DM_j, t \text{ FBC}_{j,max}, VB_{j,max}]$, visto que este pode proporcionar um limite mais restrito particularmente nos casos dos tanques que não iniciam o suprimento, o que também fortalece a formulação.

$$\sum_{u=1}^{\text{Min}[t, T_j]} \sum_{l=1}^{NCDU} SU_{j,l,u} \geq \left(\frac{\sum_{u=1}^t \sum_{l=1}^{NCDU} \text{FBC}_{j,l,u} - VB_{j,0} \sum_{l=1}^{NCDU} D_{j,l,0}}{\text{Min}[DM_j, t \text{ FBC}_{j,max}, VB_{j,max}]} \right)$$

$$\forall j \mid \text{Min}[DM_j, t \text{ FBC}_{j,max}, VB_{j,max}] > VB_{j,0}$$

$$\forall t = 2, \dots, \text{SCH} \mid t \notin [T_j, \text{SCH}[, t \text{ FBC}_{j,max} > VB_{j,0}$$

Dado que:
 $T_j = \text{SCH} + 1 - \left\lfloor \frac{\text{Min}[DM_j, t \text{ FBC}_{j,max}, VB_{j,max}] - VB_{j,0}}{\text{FBC}_{j,max}} \right\rfloor$

Além disso, dado que um switch-off em t é conceitualmente caracterizado por uma interrupção de suprimento para um par: tanque de carga j e unidade de destilação l , é possível estender o corte anterior de switch-off também para cada unidade de destilação l .

Entretanto, esta extensão não é válida no caso do start-up, visto que não é possível afirmar que o mesmo tanque j continuará alimentando a mesma unidade de destilação l que alimentava antes do switch-off após retorno do envio. Por isso, o grupo de restrições imediatamente abaixo apresenta sua abrangência evidenciada nos índices j , l e t apenas para o caso de switch-off.

$$\sum_{u=1}^{\text{Min}[t-2, T_j-2]} SO_{j,l,u} \geq \left(\frac{\sum_{u=1}^t \sum_{l'=1}^{NCDU} \text{FBC}_{j,l',u} - VB_{j,0}}{DM_j - VB_{j,0}} \right) - 1 + D_{j,l,0}$$

$$\forall l$$

$$\forall j \mid DM_j > VB_{j,0}$$

$$\forall t = 2, \dots, \text{SCH} \mid t \notin [T_j - 2, \text{SCH}[$$

Dado que:
 $T_j = \text{SCH} - \left\lfloor \frac{DM_j - VB_{j,0}}{\text{FBC}_{j,max}} \right\rfloor + 1$

Por fim, dado que os tanques de carga não podem receber e enviar simultaneamente em um mesmo período de tempo t , o fluxo de saída de um tanque de carga em um determinado período deve ser proveniente do volume final contido neste mesmo tanque j no período imediatamente anterior.

$$VB_{j,t} \geq \sum_{l=1}^{NCDU} \text{FBC}_{j,l,t+1}$$

$$\forall j$$

$$\forall t = 1, \dots, \text{SCH} - 1$$

3. RESULTADOS

Os experimentos realizados para avaliação dos ganhos de eficiência computacional serão analisados sobre a perspectiva de comparação entre:

- **ORIG:** A formulação original de Yüzgec et al. (2010).
- **A2:** A reformulação das variáveis de changeover de ORIG, desenvolvida com base na proposta simplificada de Pochet e Wolsey (2006).
- **SU:** Inclusão de cortes de start-up e switch-off, adicionalmente à formulação A2.

Para solução das instancias foi utilizado CPLEX 12.5 em um computador com processador Intel® Core™ i5 de 2,50 GHz e 6 GB de RAM. Foram utilizados como parâmetros de comparação entre as formulações: Gap da raiz, Tempo de solução do CPLEX e Quantidade de instancias resolvidas.

As 3 instancias inicialmente resolvidas foram as propostas por Lee et al. (1996) e complementadas por Yüzgec et al. (2010), com o objetivo permitir uma comparação entre os resultados da abordagem proposta neste trabalho e uma referência amplamente utilizada por estes e outros artigos que compõem o referencial teórico sobre o tema.

ID	GAP Raiz : ORIG	GAP Raiz : A2	GAP Raiz : SU
EXEMPLO 1	47.29%	26.32%	4.17%
EXEMPLO 2	49.86%	41.28%	5.91%
EXEMPLO 3	55.80%	37.29%	2.66%
Média	50.98%	34.96%	4.25%

ID	Tempo CPLEX (seg) : ORIG	Tempo CPLEX (seg) : A2	Tempo CPLEX (seg) : SU
EXEMPLO 1	0.22	0.23	0.26
EXEMPLO 2	21.56	5.24	3.06
EXEMPLO 3	214.36	16.30	6.16
Média	78.71	7.26	3.16

Tabela 1 – Comparação: Instancias de Lee et al. (1996) e Yüzgec et al. (2010) x Proposta de Reformulações e Cortes – Gap da Raiz e Tempo de solução

Na média das 3 instancias, pode-se observar que a reformulação SU apresentou ganho de gap (% de ganho na relaxação linear das reformulações em relação à formulação original ORIG) de 91,52% dado o gap da raiz de 4,25%, e uma redução de 96% no tempo de solução. Ademais, pode ser verificado que mesmo a reformulação sem os cortes (ou seja, A2) apresentou melhoria significativa na relaxação e tempo de solução.

Em seguida, para testar a consistência dos resultados da abordagem proposta, foram geradas aleatoriamente mais 69 instancias válidas, formando um total de 72 instancias testadas, divididas conforme os seguintes critérios de complexidade: Número de tanques de carga (determina changeover) e Número de períodos do horizonte de tempo (aspecto combinatorial). Cada grupo tem 6 instancias e é uma combinação destes 2 critérios. Além disso, o critério de tempo foi subdividido em 4 grupos conforme número de períodos: 10 ou menos; entre 11 e 15; entre 16 e 20; e 21 ou mais. Desta forma, é possível verificar o impacto na eficiência computacional conforme aumento gradativo da complexidade de tempo.

Das 72 instancias testadas, 50 foram resolvidas por no mínimo uma das formulações dentro de um tempo máximo estipulado de 900 segundos. As instancias não resolvidas ficaram dentro dos grupos de 3 tanques de carga com 21 ou mais períodos, ou 4 tanques de carga com 11 ou mais períodos (ou seja, as instancias mais complexas).

Nº TQS	Nº PERÍODOS	Média de	Média de	Média de
		GAP Raiz : ORIG	GAP Raiz : A2	GAP Raiz : SU
2 TQS	10 MENOS	36.49%	13.88%	0.69%
	11 A 15	33.67%	25.11%	3.63%
	16 A 20	28.99%	27.39%	9.17%
	21 MAIS	23.39%	21.02%	9.04%
2 TQS Total		30.63%	21.85%	5.64%
3 TQS	10 MENOS	63.32%	52.70%	5.81%
	11 A 15	43.83%	39.94%	6.91%
	16 A 20	31.74%	29.49%	5.59%
	21 MAIS	30.13%	27.56%	11.26%
3 TQS Total		45.45%	40.02%	6.37%
4 TQS	10 MENOS	63.14%	50.34%	2.82%
	11 A 15	51.85%	42.87%	6.43%
4 TQS Total		61.53%	49.28%	3.34%
Total Geral		40.59%	32.59%	5.59%

Tabela 2 – Comparação: Média por Grupos de Instancias Resolvidas - Proposta de Reformulações e Cortes – Gap da Raiz

Nº TQS	Nº PERÍODOS	Total Instancias	Média de	Nº	Média de	Nº	Média de	Nº
			Tempo CPLEX (seg) : ORIG	Resolvidas : ORIG	Tempo CPLEX (seg) : A2	Resolvidas : A2	Tempo CPLEX (seg) : SU	Resolvidas : SU
2 TQS	10 MENOS	6	0.24	6	0.27	6	0.27	6
	11 A 15	6	0.54	6	0.54	6	0.59	6
	16 A 20	6	5.67	6	8.20	6	14.37	6
	21 MAIS	6	34.89	6	30.56	6	42.03	6
2 TQS Total		24	10.34	24	9.90	24	14.31	24
3 TQS	10 MENOS	6	160.33	5	16.96	6	73.10	6
	11 A 15	6	362.60	5	105.08	6	107.08	6
	16 A 20	6	728.71	3	156.42	6	62.78	6
	21 MAIS	6	831.51	1	900.00	0	820.11	1
3 TQS Total		24	520.78	14	294.61	18	265.77	19
4 TQS	10 MENOS	6	656.54	3	591.35	3	349.56	5
	11 A 15	6	900.00	0	852.97	1	758.18	1
	16 A 20	6	900.00	0	900.00	0	900.00	0
	21 MAIS	6	900.00	0	900.00	0	900.00	0
4 TQS Total		24	839.14	3	811.08	4	726.93	6
Total Geral		72	456.75	41	371.86	46	335.67	49

Tabela 3 – Comparação: Média por Grupos de Instancias (Todas) - Proposta de Reformulações e Cortes – Nº de Instancias Resolvidas e Tempo de solução

O grupo de 2 tanques de carga adotou 1 unidade de destilação; o grupo de 3 tanques de carga, 2 unidades de destilação; e para o grupo de 4 tanques de carga, foi definido de forma aleatória 2 ou 3 unidades de destilação.

Pelas tabelas acima, pode-se constatar a consistência dos bons resultados exibidos anteriormente na comparação considerando apenas as instancias de Lee et al. (1996) e Yüzgec et al. (2010). Foram observados ganhos de gap médios de 81,15% (gap da raiz de 5,59%) para a reformulação SU em relação à formulação ORIG, enquanto que a reformulação sem os cortes desenvolvidos (A2) apresentou 18% (gap da raiz de 32,11%). Na comparação entre A2 e SU, pode-se constatar que os ganhos de gap da SU são comparativamente maiores conforme aumento da complexidade das instancias, o que pode ser explicado pelo enfoque dos cortes válidos desenvolvidos exatamente no trecho do processo relativo ao changeover entre tanques de carga e unidades de destilação, que define a complexidade das instancias.

Com relação à robustez das formulações sob o enfoque de número de instancias resolvidas, pode-se constatar que as reformulações A2 e SU resolveram significativamente mais instancias que a formulação original: 5 a mais para A2 e 8 a mais para SU (ambas com tempo de solução médio menor). Ademais, na comparação entre SU e A2 (ou seja, com a inclusão dos cortes propostos), além das 3 instancias a mais resolvidas, o tempo médio total de solução foi aproximadamente 10% menor.

Pelo gráfico abaixo, que considera apenas as instancias resolvidas, pode-se notar pela abertura entre as curvas que, conforme aumento da complexidade das instancias, os tempos médios de solução da reformulação SU melhoram significativamente na evolução comparativa em relação às formulações ORIG e A2.

Desta forma, nota-se que já existem ganhos significativos com a reformulação das variáveis de changeover (A2), porém estes são evidentemente melhorados pelos cortes baseados nas lógicas de start-up e switch-off (SU) desenvolvidos para o suprimento das unidades de destilação.

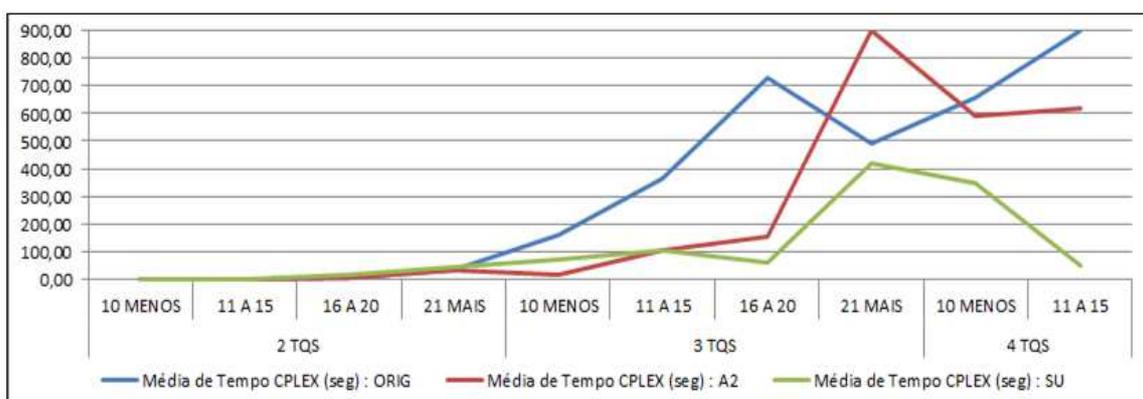


Figura 2 – Evolução: Tempo de solução das formulações (secs.) x Aumento da complexidade das instancias resolvidas

Para as instancias não resolvidas, também são constatados benefícios relevantes da abordagem proposta em relação à formulação original. Apesar de não haver solução inteira para calculo do gap da raiz, é possível utilizar o gap final do CPLEX (do melhor nó dentro do limite dos 900 segundos) para avaliação comparativa sobre a eficiência do algoritmo de solução conforme reformulações propostas. Sendo assim, inclusive para as instancias não resolvidas, pode-se verificar um gap final evidentemente menor da formulação SU (74,4% menor que A2, e 80,7% menor que ORIG), o que mostra uma tendência de solução mais rápida destas instancias quando aumentado o tempo limite.

Nº TQS	Nº PERÍODOS	Média de Gap	Média de Gap	Média de Gap
		Final : ORIG	Final : A2	Final : SU
3 TQS	21 MAIS	19.30%	17.63%	9.25%
3 TQS Total		19.30%	17.63%	9.25%
4 TQS	11 A 15	38.94%	31.91%	5.36%
	16 A 20	32.39%	23.82%	4.40%
	21 MAIS	29.30%	17.96%	4.68%
4 TQS Total		33.22%	24.13%	4.78%
Total Geral		30.06%	22.65%	5.80%

Tabela 4 – Comparação: Média por Grupos de Instancias Não Resolvidas - Proposta de Reformulações e Cortes – Gap Final do CPLEX (melhor nó em 900 segundos)

Dentre as maiores instancias resolvidas, podem ser destacadas as instancias: nº 59 (15 períodos, 4 tanques de carga e 2 unidades de destilação); nº 44 (21 períodos, 3 tanques de carga e 2 unidades de destilação); e nº 42 (20 períodos, 3 tanques de carga e 2 unidades de destilação).

Sendo assim, de forma generalizada, a complexidade das maiores instancias resolvidas no teste realizado é aderente a grande parte de sistemas ou subsistemas de tamanho real. Como comprovação, é possível citar o trabalho de Leiras (2010) aplicado a Petrobras, onde não existe discretização do tempo (representação baseada em ordem das atividades), é utilizada uma heurística com base em algoritmos genéticos, e são considerados 6 tanques de armazenagem, 6 tanques de carga e 2 unidades de destilação na representação do suprimento da REFAP a partir do TEDUT através do oleoduto OSCAN, com controle dos percentuais na mistura do petróleo Marlim e condensado.

É importante ressaltar que, dependendo da quantidade de períodos considerados no horizonte de tempo discretizado para abordagem proposta no presente artigo, é possível resolver instancias de tamanho semelhante. Como exemplo para esta comprovação, foram criadas aleatoriamente mais 3 instancias válidas com 10 períodos de tempo e com a mesma quantidade de tanques, unidades de destilação e controle de componentes de Leiras (2010), que foram resolvidas em uma média de tempo de 1200 segundos, ou seja, 33,3% maior que os 900 segundos de limite arbitrados, porém através de programação matemática.

4. Conclusão

No presente trabalho foi desenvolvida uma abordagem de reformulações matemáticas e criação cortes válidos para o problema de otimização da programação de lotes de petróleo de terminais aquaviários para refinarias, conforme as chegadas dos navios, demanda dos blends (misturas) de petróleo para suprimento contínuo de unidades de destilação, changeovers, e controle de componentes nas misturas. Além disso, foram testadas 72 instancias aleatórias, divididas em grupos conforme suas complexidades, com o objetivo de verificar a consistência e o desempenho computacional da abordagem proposta em relação à modelagem de Yüzgec et al. (2010). Vale ainda destacar como outro referencial importante o trabalho de Pochet e Wolsey (2006), cujas abordagens didáticas serviram de base e inspiração para as adaptações e desenvolvimento das reformulações que compõem a abordagem proposta.

As reformulações desenvolvidas apresentaram resultados significativamente superiores à formulação original em todos os parâmetros de comparação de desempenho utilizados no presente trabalho: gap da raiz (instancias resolvidas) e final (instancias não resolvidas em 900 segundos), número de instancias resolvidas e tempo de solução.

Com o aumento da complexidade das instancias, os tempos médios de solução e os ganhos médios de gap das reformulações desenvolvidas melhoram significativamente na evolução comparativa em relação à formulação original. Este perfil pode ser explicado pelo fato das reformulações serem baseadas em lógicas e variáveis relacionadas ao changeover (start-up, switch-off e set-up), enfoque da complexidade das instancias.

Em instancias maiores e mais complexas, os cortes implementados sobre a formulação A2, gerando a formulação SU, beneficiam o algoritmo de solução do CPLEX com uma relaxação linear de gap significativamente menor que a gerada por A2, evidenciando maior robustez na solução das instancias. Por outro lado, em instancias mais simples e menores podemos observar desempenhos semelhantes, o que reforça a relação direta entre a complexidade de instancias e os benefícios da abordagem de reformulações centrada na lógica de changeover.

A formulação SU resolveu 3 instancias a mais que A2 e 8 instancias a mais que ORIG, com gap médio da raiz 83% menor que A2 e 86% menor que ORIG, e tempo médio de solução das instancias (incluindo as não resolvidas) 10% menor que A2 e 26,5% menor que ORIG.

A abordagem proposta apresentou resultados bem superiores nas 3 instancias de referência de Lee et al. (1996) e Yüzgec et al. (2010). Além disso, os testes em maior escala mostraram que, dependendo da discretização do tempo, pode-se resolver instancias de tamanho compatível com perfis de suprimento reais.

5. Referências

- Aires, M., Lucena, A., Rocha, R., Santiago, C. e Simonetti, L.** (2004). *Optimizing the Petroleum Supply Chain at PETROBRAS*, Anais do ESCAPE 14, Lisboa, Portugal.
- Jia, Z., e Ierapetritou, M. G.** (2004). *Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation*, Computers & Chemical Engineering, 28(6-7), 1001-1019.
- Karuppiyah, R., Furman, K. C. e Grossmann, I. E.** (2008). *Global optimization for scheduling refinery crude oil operations*, Computers and Chemical Engineering, 32(11), 2745–2766.
- Lee, H., Pinto, J. M., Grossmann, I. E. e Park S.** (1996). *Mixed-Integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil unloading with inventory management*, Ind. Eng. Chem. Res., 35, 1630-1641.
- Leiras, A.** (2010). *Otimização de Parâmetros de um Algoritmo Genético*, Inteligência Computacional Aplicada, n.6.
- Pochet, Y. e Wolsey, L. A.** (2006). *Production Planning by Mixed Integer Programming*, New York, Springer Science + Business Media, Inc.
- Pochet, Y. e Wolsey, L. A.** (2008). *Single Item Lot-Sizing with Non-Decreasing Capacities*, Math. Program., DOI 10.1007/s10107-008-0228-7, 121, 123–143.
- Rocha, R., Grossmann, I. E. e Poggi de Aragão, M.** (2009). *Petroleum allocation at PETROBRAS: Mathematical model and a solution algorithm*, Computers & Chemical Engineering, 33(12), 2123-2133.
- Yüzgeç, U., Palazoglu, A., e Romagnoli, J.A.** (2010). *Refinery scheduling of crude oil unloading, storage and processing using a model predictive control strategy*, Computers and Chemical Engineering, 34, 1671-1686.