MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA PARA APOIO À DECISÃO DA PROGRAMAÇÃO DE EMBARCAÇÕES PLSV

Leonardo Helmer Bremenkamp [1]
leonardo.bremenkamp@tecgraf.puc-rio.br

Victor Abu-Marrul Carneiro Da Cunha [1]
victor.cunha@tecgraf.puc-rio.br

Silvio Hamacher [1]
hamacher@puc-rio.br

Luciana de Souza Pessôa [1]
lucianapessoa@puc-rio.br

Paulo Cesar Ribas [2]
paulo.ribas@petrobras.com.br

[1] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
R. Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, 22451-900
Departamento de Engenharia Industrial (DEI)

[2] Petróleo Brasileiro SA (PETROBRAS)
Av. Horácio de Macedo, 950 – Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, 21941-915

RESUMO

Este artigo propõe um modelo de Programação Linear Inteira para a programação de embarcações de uma empresa petrolífera, de maneira a sequenciar atividades de interligação de poços submarinos, visando maximizar a produção de óleo e gás da empresa. As atividades de interligação são realizadas por embarcações do tipo PLSV (Pipe Laying Support Vessel), com alto custo de utilização. O planejamento eficiente destes navios, além de reduzir custos, contribui para a antecipação do início da produção dos poços. Como resultado da aplicação, obtêm-se soluções ótimas que, com os recursos disponíveis, tornam possível a geração de cronograma de execução de atividades que atinge 88% do potencial máximo de produção.

PALAVRAS CHAVE. Programação de embarcações; Produção Petrolífera Offshore

Tópicos: PO na Área de Petróleo e Gás; Programação Matemática

ABSTRACT

This article proposes an Integer Linear Programming model for scheduling vessels of an oil company, by sequencing interconnection activities of subsea wells to maximize the company's oil and gas production. Interconnection activities are done by PLSV (Pipe Laying Support Vessel) ships, which have a high cost of use. The efficient planning of these ships, in addition to reducing costs, also contributes to early starts of production at the wells. As a result of the application, optimal solutions were generated considering the resources availability, making possible to create activities execution schedules that reaches 88% of the maximum production potential.

KEYWORDS. Ship Scheduling; Offshore Petroleum Production

Paper Topics: OR at Oil and Gas Area; Mathematical Programming

1. Introdução

Desde a descoberta de grandes reservas de petróleo na região do pré-sal, em 2006, o foco da exploração de petróleo no Brasil se voltou para esta região, o que permitiu aumentar significativamente a produção brasileira e as exportações (ANP, 2015).

A produção *offshore* requer a utilização de uma gama de estruturas e recursos críticos com especificidades que variam de acordo com as condições dos reservatórios (Devold, 2013). Por se tratar de regiões de águas ultra profundas, a exploração e produção de petróleo do pré-sal ocorre em condições complexas de instalação de equipamentos no leito oceânico e a longas distâncias da costa marítima. Estes fatores intensificam as dificuldades no desenvolvimento tecnológico de equipamentos e na realização de atividades petrolíferas (Morais, 2013).

Em um campo petrolífero, os poços perfurados podem ser de produção, quando visam drenar uma ou mais jazidas, ou de injeção, destinados a injeção de fluidos visando melhorar a recuperação de petróleo ou manter a energia do reservatório (ANP, 2015).

Uma das etapas críticas da construção de poços submarinos é a interligação dos poços à Unidade Estacionária de Produção (UEP). Esta é a última atividade que antecede o início da operação de produção de um poço (Alves, 2012).

A interligação é realizada por embarcações especialmente equipadas para lançar e conectar diversos equipamentos no leito oceânico, através de dutos e umbilicais (Lima, 2007). Essas embarcações são denominadas PLSVs (*Pipe Laying Support Vessels*), que se caracterizam por serem recursos de alto custo (Barboza, 2015). Por se tratar de um estágio crucial na construção de poços, a programação eficiente das atividades de interligação nas embarcações disponíveis permite a conclusão dos projetos de poços submarinos o mais cedo possível, acarretando maiores períodos produtivos e, consequentemente, maior retorno financeiro pelo aumento da produção.

Desta forma, o presente trabalho visa apresentar o problema de programação de atividades de interligação de poços submarinos em PLSVs, enfrentado por uma empresa do setor petrolífero. Para solucioná-lo foi desenvolvido um modelo de Programação Linear Inteira, que se baseia no potencial de produção de cada poço a fim de alocar as atividades às embarcações disponíveis, de forma a maximizar a produção de óleo acumulada.

A modelagem desenvolvida estende as abordagens presentes na literatura, pois permite a combinação de atividades de poços distintos em uma mesma viagem, o que torna a formulação e resolução do problema mais desafiadoras. Desta forma, como resultados desta nova abordagem, apresentam-se um procedimento para criação de blocos de atividades e novas restrições para o problema, que o tornam mais aderente à realidade.

O trabalhado está organizado da seguinte forma: na seção 2 será apresentada uma breve revisão sobre a produção de petróleo *offshore,* bem como sobre os problemas de programação de navios. Na seção 3 será detalhado o problema de programação de PLSVs. Na seção 4 serão especificadas a estratégia de solução do problema, com o procedimento de criação de blocos de atividades e o modelo matemático desenvolvido para o caso. Na seção 5 serão apresentados os resultados da aplicação do modelo, seguidos de uma conclusão acerca do estudo, feita na seção 6.

2. Programação de Navios

O problema de programação em navios, amplamente encontrado na literatura, é geralmente tratado com base em modelos de fluxo em redes, nos quais, associa-se um custo ao deslocamento entre um ponto de atendimento e outro, focando na elaboração de rotas únicas para cada um dos navios, que devem sair e retornar à uma base pré-determinada após o cumprimento da demanda estipulada (Christiansen et al., 2013).

No problema de programação de PLSVs, a localização dos poços é relativamente próxima e o tempo de navegação entre poços é muito menor que o tempo das atividades dos PLSVs. Assim o tempo de navegação entre poços é considerado como constante e, portanto, não existe a preocupação de geração de rotas, mas de atendimento das atividades pelos PLSVs, tendo

como principal função do navio a realização das tarefas a eles alocadas. Deste modo, o problema de programação de navios pode ser modelado como um problema de programação de máquinas paralelas, onde os navios assumem o papel das máquinas a serem programadas.

No problema de programação em máquinas paralelas (PMS - Parallel Machine Scheduling), cada atividade precisa ser processada uma única vez em qualquer uma das máquinas ou naquelas que pertençam a um subconjunto pré-definido capaz de atendê-la, no instante em que uma das máquinas esteja disponível, saindo do sistema no momento da sua conclusão (Cheng e Sin, 1990) (Pinedo, 2008).

De acordo com Senthilkumar e Narayanan (2010) e Pinedo (2008), este problema pode ser classificado como um dos seguintes subtipos:

1) Máquinas Paralelas Idênticas: O tempo de processamento de cada atividade é o mesmo para qualquer máquina.

2) Máquinas Paralelas Uniformes: As máquinas possuem diferentes velocidades de processamento, de forma que a duração de cada atividade em uma máquina é dada pela razão do seu tempo de processamento sobre a velocidade da máquina.

3) Máquinas Paralelas Não Relacionadas: Cada atividade tem um tempo de processamento independente em cada uma das máquinas, não existindo nenhuma relação entre os tempos de processamento das atividades.

Na literatura sobre programação de máquinas paralelas encontram-se algumas aplicações ao problema de embarcações PLSV. Vernalha et al. (2008) propõem dois modelos com o objetivo de minimizar o custo associado à não realização das tarefas no instante mais cedo possível, o que provocaria atrasos no início da produção. O primeiro modelo é orientado à determinação da sequência de atendimento das tarefas, tendo como decisões o instante de início de cada tarefa e a escolha de qual embarcação irá realizá-la. No segundo modelo, é utilizada uma estratégia de partição de conjuntos, em que diversos roteiros viáveis para cada embarcação são gerados previamente para alimentar o modelo, que decide quais roteiros cobrem todo o conjunto de tarefas a um mínimo custo.

Queiroz e Mendes (2012) consideram embarcações heterogêneas e modelam uma variação do problema de máquinas paralelas não-relacionadas, cuja função objetivo penaliza o atraso da execução das tarefas. Neste caso, uma matriz com a penalização de início de tarefa em cada período é gerada como entrada para o modelo, que decide em qual período cada tarefa iniciará. Como forma de resolução, os autores propõem a implementação de uma heurística baseada na metaheurística GRASP (Gendreau e Potvin, 2010).

Moura (2012) apresenta uma formulação similar à de Queiroz e Mendes (2012), utilizando a hipótese simplificadora de que todas as embarcações estão aptas a realizar quaisquer tarefas (frota homogênea). Como forma de resolução do problema, o autor propõe a utilização de técnicas de relaxação lagrangeana e heurística construtiva para gerar limites inferior e superior para o problema. Além disso, é utilizada uma heurística baseada em VNS (Variable Neighborhood Search) (Gendreau e Potvin, 2010).

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho baseia-se em modelos de programação de máquinas paralelas e considera algumas particularidades não abordadas por trabalhos anteriores, como será descrito na próxima seção.

3. O problema de programação de PLSVs

No planejamento de uma empresa de petróleo, é comum o desenvolvimento de metas que devem ser atingidas ao longo do período programado, por meio de entregas intermediárias de poços interligados prontos para produzir. Neste cenário, fixa-se um horizonte de planejamento, no qual é necessário determinar uma sequência de atividades que serão realizadas, levando em consideração a demanda, representada pelas próprias atividades, a frota disponível, os potenciais de produção dos poços e as restrições operacionais.

A cada atividade, associa-se uma data de liberação (data de início), definida em função da disponibilidade de material a ser utilizado, da concessão das licenças necessárias para a

operação, da instalação da UEP e completação do poço que serão interligados. Também se associa a cada atividade uma data máxima para o seu término, que representa a data prevista em que o poço associado àquela atividade deve entrar em produção.

A cada poço é vinculado um potencial de produção diário, a ser atingido com o início da operação do poço, gerando acréscimo nos níveis de produção da empresa. No caso dos poços injetores, este potencial de produção é zero. Desta forma, busca-se antecipar as tarefas dos poços com maior potencial de produção, respeitando as janelas já mencionadas e demais restrições operacionais.

O tempo que uma embarcação leva para executar uma atividade é previamente definido de acordo com a atividade. Para que ela seja realizada, é necessário que haja uma embarcação PLSV apta a executar o serviço. Nem todos os PLSVs executam todas as atividades, porém, para cada atividade, existe sempre ao menos um navio capaz de realizá-la. Contudo, o tempo de execução do serviço tem variação desprezível de embarcação para embarcação. Além disso, os PLSVs operam sob contrato, logo, para que executem uma atividade, o navio deve estar sob uma janela de disponibilidade.

Cada embarcação pode executar somente uma tarefa por vez, não sendo possível que mais de uma embarcação atue na mesma tarefa com o objetivo de adiantar o seu término, mesmo que existam PLSVs ociosos. Além disso, se uma atividade for iniciada, a mesma deverá ser finalizada sem a possibilidade de se interromper o serviço para retomá-lo adiante.

Por questões de segurança e operacionalidade, só é permitido que duas embarcações PLSVs realizem atividades de um mesmo poço concomitantemente, de maneira a evitar conflitos na localização das embarcações e possíveis interferências na atuação.

Para que essas atividades sejam executadas é imprescindível que haja o carregamento de material no porto. Nessa etapa são carregados os dutos e umbilicais para as atividades que necessitam, além de outros equipamentos e materiais a serem utilizados nas interligações. A empresa disponibiliza um porto para a realização do carregamento prévio às atividades em questão, utilizado por toda a frota disponível. Em seguida, a embarcação se dirige para o local previsto para a realização das atividades e, após a conclusão do serviço, regressa ao porto.

É assumido que a troca de tripulação e o abastecimento da embarcação com combustível e suprimentos podem ser realizados nos momentos em que a embarcação está atracada no porto, para carregamento, ou ainda em mar, por veículos auxiliares de apoio offshore, em paralelo com as atividades executadas pelo PLSV. Como este tempo de atracação já está previsto, essas situações não configuram restrição adicional para o problema. Devido à proximidade entre os poços nos quais serão realizadas as atividades e a discretização do tempo a ser adotada, o tempo de deslocamento entre poços também pode ser desconsiderado, visto que passa a ser irrelevante para o planejamento quando comparado com a duração das atividades, carregamentos e navegações entre porto e o local da atividade.

Considerando todos os aspectos acima apontados, busca-se maximizar a produção de óleo, impondo-se que as atividades sejam realizadas dentro de suas janelas de atendimento e dentro do horizonte de planejamento estipulado.

4. Método de resolução

Devido às características do problema, assume-se, para a programação, que serão alocados blocos de atividades compostos por um carregamento, uma navegação do porto ao local da atividade, as atividades a serem realizadas e uma navegação de retorno ao porto. A sequência de realização dos blocos de atividades pode ser indicada pelo instante de início de cada bloco em cada embarcação. O procedimento de criação dos blocos será detalhado a seguir.

4.1. Procedimento de criação de blocos

Um bloco de atividades representa um conjunto de atividades a serem realizadas após etapas prévias de carregamento do material necessário e de navegação entre a base onde o

carregamento é feito e o primeiro local de atendimento. Após o término da última atividade contida no bloco, considera-se mais uma etapa de navegação, desta vez de retorno à base, para que o ciclo possa se iniciar novamente com a realização de um novo carregamento de material para a programação seguinte. Cada bloco pode conter entre uma e quatro atividades, respeitando a capacidade de carga das embarcações.

Para blocos com mais de uma atividade, considera-se que as mesmas são realizadas uma imediatamente após a outra de forma sequencial, sem intervalo ocioso entre elas e sem a contabilização de períodos de deslocamento ou carregamento entre qualquer uma delas. Isso ocorre porque as navegações intermediárias levam poucas horas, não afetando as durações de cada atividade estimadas em dias. Com relação ao carregamento, como mencionado, o mesmo deve ser realizado previamente ao início da primeira atividade entre as que forem agrupadas.

Dessa forma, todo bloco de atividades será composto então por um carregamento (C), a navegação (N) entre a base e a primeira atividade, *n* atividades (A) a realizar, e concluído com a navegação (N) de retorno à base, conforme indica a Figura 1.

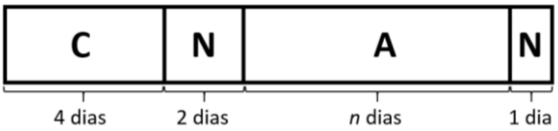

Figura 1 – Composição básica de um bloco de atividades

A partir da combinação dessas atividades, o problema passa a tratar da programação dos blocos e não mais das atividades individualizadas, porém, todos os parâmetros referentes a elas, devem estar contidos nos blocos, para que nenhuma característica do problema seja violada. Os parâmetros referentes aos blocos são:

- IB – Data a partir da qual o bloco pode ser iniciado
- FB – Data limite para finalização do bloco
- DB – Duração do bloco, em períodos
- PB – Relação entre o bloco e os poços
- NB – Relação entre o bloco e os navios
- IRP – Início Relativo do atendimento de cada poço no bloco
- FRP – Fim Relativo do atendimento de cada poço no bloco

O parâmetro IB é definido pela maior data de liberação das atividades que o compõe. A data limite para que o bloco termine, ou seja, o instante de tempo onde todo o processo deve acabar, é definida pelo parâmetro FB, que é calculado com base nas datas de entrega das atividades, de forma que assume o menor valor entre as somas da data entrega de cada atividade com a duração das atividades que a sucedem no bloco mais o período de navegação final. A fim de priorizar as atividades que possuem datas de entrega menores, o bloco é sempre composto de forma que as atividades sejam sequenciadas em ordem crescente de data de entrega.

A duração de um determinado bloco (DB) se dá pelo somatório das durações das atividades que o compõe, acrescido dos tempos de navegação e carregamento. Para a empresa em questão, esses tempos são considerados fixos: o carregamento tem duração de 4 dias e as navegações de ida e volta tem durações de 2 e 1 dias, respectivamente.

O parâmetro PB é responsável por indicar a relação de cada um dos blocos com os poços existentes. Dado que cada atividade está vinculada a um poço, se determinada atividade está no bloco, a relação entre esse bloco e o poço no qual a atividade será realizada, passa a existir. De forma similar, o parâmetro NB indica a relação entre os blocos e os navios, onde ao ser criado um bloco verifica-se quais navios podem atender aquele bloco, criando a relação entre eles, porém se uma determinada combinação de atividades não possuir nenhum navio capaz de atendê-las conjuntamente, o bloco não é criado.

Como é possível a combinação de atividades de diferentes poços em um mesmo bloco, e devido ao fato de existir um limite para realização de atividades de um mesmo poço simultaneamente, é importante identificar dentro de um bloco, o intervalo de tempo no qual um poço está sendo atendido. Dessa forma, são gerados os parâmetros relativos aos instantes de início e fim das atividades de um determinado poço em um bloco, indicados por IRP e FRP. Como não é conhecido a priori, caso o bloco seja alocado, o instante em que ele será programado, esses parâmetros são baseados apenas nas durações dos componentes de cada bloco e calculados pressupondo-se que o bloco esteja alocado no instante zero, conforme indica a Figura 2.

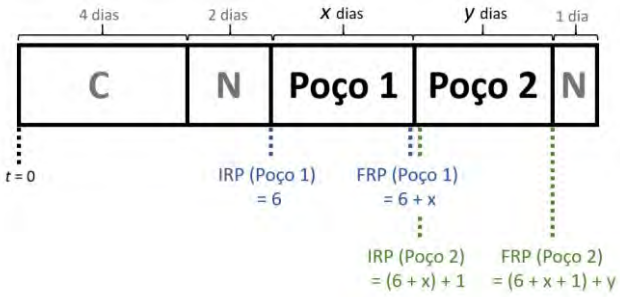

Figura 2 – Bloco com IRP e FRP de 2 poços

Quando um bloco tem sua alocação definida, os instantes reais de início e fim de atendimento nos poços podem ser calculados somando-se o instante *t* real, no qual o bloco foi programado para iniciar, com os parâmetros IRP e FRP pré-estabelecidos.

Para a geração automatizada dos blocos, foi desenvolvido um procedimento no *software AIMMS*, baseado em linguagem própria do programa. Além de gerar os parâmetros supracitados, o procedimento avalia se o bloco é viável. Duas validações são feitas: após o cálculo dos instantes de início e fim limites dos blocos, a primeira validação avalia se a janela programável disponível, dada pela diferença entre FB e IB, é suficiente para comportar o bloco com a duração calculada. A segunda validação baseia-se na mesma janela programável calculada, avaliando a existência de algum navio, apto a atender ao bloco, disponível nesse mesmo período. Caso uma das duas validações seja violada, o bloco não é gerado.

4.2. Formulação do modelo

Nesta seção, uma formulação matemática de programação linear inteira é proposta para solucionar o problema apresentado.

Conjuntos:
t, t' – períodos
a - atividade
b – bloco de atividades
n – embarcações PLSV
p – poços

Conjuntos auxiliares:
AB_a – Blocos que contém a atividade *a*
PB_p – Blocos que atendem o poço *p*
AP_a – Poços associados a atividade *a*
NB_b – Blocos atendidos pelo navio *n*

Parâmetros:
IRP_{pb} – Início Relativo do atendimento do poço *p* no bloco *b*
FRP_{pb} – Fim Relativo do atendimento do poço *p* no bloco *b*

DB_b – Duração, em períodos, do bloco *b*
IB_b – Data a partir da qual o bloco *b* pode ser iniciado
FB_b – Data até a qual o bloco *b* deve ser finalizado
PP_p – Potencial de produção do poço *p*
MaxAP – Máximo de atividades que podem ocorrer em paralelo num mesmo poço
JIN_n – Janela inferior do navio *n*
JFN_n – Janela superior do navio *n*
Nr_APB_{pb} – Número de atividades do poço *p* no bloco *b*
Nr_AP_p – Número de atividades a serem realizadas no poço *p*
H – Horizonte de Planejamento

Variáveis:
$x_{n,b,t} \mid NB_b$, $t \geq \max(IB_b, JIN_n)$ e $t \leq \min(FB_b, t \leq H\text{-}DB_b+1, JFN_n)$. Assume valor 1 caso o PLSV *n* inicie o atendimento ao bloco de atividades *b* no período *t*. Criada somente quando o PLSV *n* esteja apto a realizar as atividades do bloco *b* e o período *t* esteja dentro da janela em que é possível iniciar o bloco, baseado nas datas de início e fim dos blocos
y_{pt} – Assume o valor 1 no instante em que todas as atividades de um poço *p* são atendidas, 0 caso contrário.

FO:

$$MAX \sum_{t} \sum_{p} PP_p \times \; y_{pt} \; \times (H - t + 1)$$

$$(1) \sum_{b} \sum_{t'=t-DB_b+1}^{t} x_{n,b,t'} \; \leq 1 \;\; \forall\, n, t$$

$$(2) \sum_{n} \sum_{b \in AB_a} \sum_{t} x_{n,b,t} \;\; \leq 1 \;\; \forall\, a$$

$$(3) \sum_{n} \sum_{b \in PB_p} \sum_{t'=t-FRP_{p,b}}^{t-IRP_{p,b}} x_{n,b,t'} \; \leq MaxAP \;\; \forall\, p, t$$

$$(4)\; Nr_AP_p \times y_{p,t} \; \leq \sum_{n} \sum_{t'=1}^{t-FRP_{p,b}} \sum_{b \in PB_p \cap NB_n} x_{n,t',b} \times Nr_APB_{p,b} \;\; \forall\, p, t$$

$$(5) \sum_{t} y_{p,t} \; \leq 1 \;\; \forall\, p$$

$$(6) \;\; x_{n,b,t}; y_{p,t} \in \{0,1\}$$

A função objetivo representa a produção gerada dentro do horizonte de planejamento. Onde o potencial de cada poço é multiplicado pelo número de dias que o mesmo ficou em operação, dado pela diferença entre a data final do horizonte de planejamento menos o instante em que cada um foi concluído.

A restrição (1) impede que um navio PLSV esteja alocado a mais de um bloco de atividades ao mesmo tempo. A restrição (2) garante que cada atividade seja realizada no máximo uma vez. A restrição (3) limita o atendimento simultâneo em um mesmo poço a um número máximo de PLSVs. A restrição (4) relaciona as atividades existentes em um poço com as

realizadas no mesmo, atualizando a variável y_{pt} no instante em que todas são atendidas. A restrição (5) garante que um poço só será considerado completo uma única vez em uma única data. A restrição (6) estabelece que as variáveis são binárias.

5. Aplicação do modelo

A aplicação do modelo desenvolvido foi realizada com dados que representam um problema de grande porte, enfrentado por uma empresa petrolífera, que trata da produção de dezenas de milhões de barris de petróleo no período de um ano. Para proteger os dados de produção da empresa, a comparação entre os resultados do modelo será feita com base no potencial máximo de produção, isto é, a produção obtida se todos os poços fossem interligados na data mais cedo possível, considerando que existem tantos navios quantos forem precisos para que esta situação ocorra. Desta forma, o potencial máximo é representado por 100% e os resultados obtidos como resolução dos modelos serão representados por partes percentuais deste valor.

No caso analisado, é necessário programar a execução de 192 atividades, distribuídas por 72 poços. Para a realização do serviço, estão disponíveis, ao longo do período de planejamento, 13 embarcações PLSV com diferentes características, que as tornam aptas ou não à realização de cada atividade. Toda atividade a ser executada possui ao menos um PLSV capaz de realizá-la.

Os parâmetros associados a cada atividade tais como duração, PLSVs aptos a efetuá-la, data de liberação e data máxima para o fim de sua execução são previamente calculados e fornecidos pela empresa.

O período de planejamento, dentro do qual as atividades devem ser realizadas, é de um ano. Além disso, cada embarcação possui uma janela de disponibilidade que representa o seu contrato com a empresa ou o período que está disponível para realização das atividades.

No caso a ser programado, existem 21 poços produtores e 51 poços injetores. Somente a conclusão dos poços produtores adiciona volume de óleo à produção da empresa, espera-se, então, que o modelo priorize a realização das atividades destes poços.

Deste modo, o modelo foi aplicado de acordo com duas estratégias: a estratégia 1 segue o modelo apresentado na Seção 4.2 e visa maximizar o óleo produzido escolhendo, prioritariamente, os projetos de poços com maior potencial de produção.

Na Estratégia 2, a restrição (2) é substituída pela restrição (7), de maneira que a realização de todas as atividades passa a ser obrigatória no período de planejamento. Neste caso, a conclusão de projetos de poços injetores passa a ser obrigatória, representando o problema de maneira mais fiel à realidade, já que estes poços são construídos como forma de manter as condições favoráveis para produção pelos poços produtores.

$$(7) \sum_{n} \sum_{b \in AB_a} \sum_{t} x_{n,b,t} = 1 \ \forall a$$

Os resultados da aplicação do modelo seguindo as duas estratégias são apresentados na seção 5.1, a seguir.

5.1. Resultados e discussão

Para a modelagem e resolução do problema proposto, foi utilizado o software AIMMS 4.18, 64 bits. O *hardware* utilizado para processar o caso apresentado foi um processador *Intel Core* i5-4440 CPU 3.1 GHz e 8GB de memória RAM. O *solver* utilizado pelo *software* para resolver o problema de otimização foi o CPLEX 12.6.3.

O procedimento de criação de blocos apresentado na seção 4.1, gerou 904 blocos de atividades, dentre os quais o modelo decidirá quais serão utilizados, a qual navio cada um será alocado e a ordem de execução dos mesmos dentro de cada navio, de acordo com os objetivos de cada estratégia.

Na Estratégia 1, o modelo alocou 52 blocos, de maneira a atender 61 atividades, concluindo o projeto de 21 poços. Nesta configuração, o modelo opta por realizar somente as atividades dos poços que possuem potencial de produção positivo. Sem realizar as atividades que não irão agregar volume de óleo à produção da empresa, as atividades dos poços produtores são feitas tão cedo quanto possível, de maneira que os poços passem mais tempo produzindo. Com os recursos disponíveis, a produção neste caso foi de 96,2% do potencial máximo de produção. O tempo necessário para resolver o problema foi de aproximadamente 70 segundos.

Na Estratégia 2, o modelo alocou 111 blocos, de forma a atender todas as 192 atividades existentes no período de planejamento, conforme esperado. Dessa forma, o projeto de todos os poços produtores e injetores foram concluídos, totalizando 72 poços. Devido à obrigatoriedade de também realizar as atividades dos poços injetores dentro de suas respectivas janelas, o modelo não consegue finalizar os projetos dos poços produtores tão cedo quanto na Estratégia 1. Dessa forma, a produção ao final do período planejado atingiu 88,0% do potencial máximo de produção. O tempo necessário para resolver este problema foi de aproximadamente 2.664 segundos. Os resultados são apresentados de maneira resumida na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados do modelo para o caso de estudo

	Estratégia 1	**Estratégia 2**
Objetivo	Maximizar produção	Maximizar produção
Realização de todas atividades	Não obrigatória	Obrigatória
Blocos utilizados	52	111
Atividades realizadas	61	192
Poços concluídos	21	72
Produção em relação ao potencial máximo	96,2%	88%
Tempo de Processamento (s)	70	2.664

Como pode ser observado através dos tempos de processamento, a obrigação de realizar todas as atividades dificulta a obtenção de uma solução ótima pelo modelo. Isso acontece devido ao fato de o maior número de atividades sendo programadas acarretar em múltiplas soluções equivalentes, dado que as variações na ordem das alocações dos poços injetores de nada interferem na função objetivo proposta. Além disso, a alocação de mais atividades reduz o tempo disponível dos PLSVs, o que ocorre pela obrigação de que sejam respeitadas as janelas de para execução de cada atividade e as janelas de disponibilidade de cada navio.

Na Figura 3 é apresentado um exemplo de como os blocos foram alocados a um navio PLSV na resolução do problema utilizando-se a Estratégia 2. A área hachurada representa o período de planejamento adotado no problema, porém os blocos de atividades só poderiam ser alocados dentro da janela de disponibilidade do navio, representada pelo intervalo de tempo contido entre os parâmetros JIN e JFN. Com a obrigatoriedade de realização de todas as atividades, o modelo optou por alocar 11 blocos, indicados na figura com sua duração em dias, que preencheram a janela do navio quase em sua totalidade, gerando poucos e pequenos períodos ociosos entre algumas atividades. Como o modelo apresenta o instante de início de cada bloco de atividades em cada navio PLSV, é possível, a partir destes dados, gerar cronogramas de execução, fazendo do modelo uma importante ferramenta de planejamento.

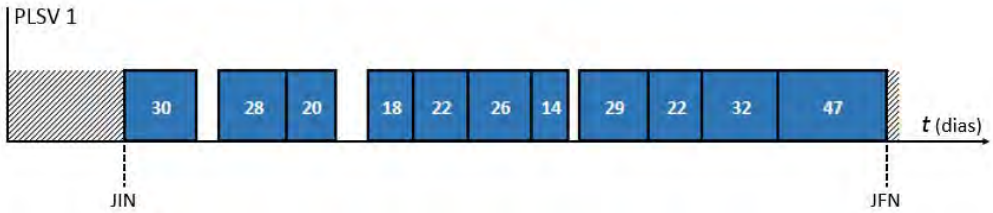

Figura 3 - Exemplo de alocação de blocos a um navio PLSV

6. Conclusão

Este trabalho abordou o problema de programação de embarcações do tipo PLSV em uma empresa petrolífera brasileira, através de um modelo de programação linear inteira, a fim de encontrar o sequenciamento ótimo de atividades para maximização da produção de óleo e gás da companhia. O modelo foi validado com aplicação de um caso real, com base em dados fornecidos pela companhia relativos às atividades a serem realizadas na etapa final de construção dos poços submarinos. Apenas os dados de produção não foram disponibilizados por motivos de confidencialidade.

Os casos validados usaram como objetivo o foco principal da companhia, de maximizar sua produção. Aplicaram-se duas estratégias quanto à realização das atividades. Na primeira estratégia a obrigatoriedade de realização não era considerada, a fim de que fosse conhecido o potencial máximo de produção que aquelas atividades seriam capazes de gerar com os recursos disponíveis. Na segunda etapa, respeitou-se o problema real, obrigando o atendimento de todas as atividades, sendo possível avaliar a diferença de produção entre um cenário e outro.

O modelo se mostrou eficaz sendo capaz de encontrar uma solução ótima em um tempo aceitável de processamento em se tratando de um planejamento anual de grande impacto para a companhia, além de indicar o impacto causado pela obrigação de realização de todas as atividades no potencial que poderia ser gerado pela companhia. Apesar de determinadas atividades ligadas aos poços de injeção, não gerarem potencial diretamente à produção, elas são responsáveis pela manutenção do potencial em poços produtores, tendo impacto na produção futura da empresa. Dessa forma, desenvolver um modelo no qual esses poços sigam uma regra de prioridade, ou até mesmo um potencial produtivo relativo a ser incrementando no valor da função objetivo, pode aproximar ainda mais o modelo desenvolvido do problema real, gerando programações capazes de preparar o melhor cenário possível para programações futuras.

A utilização de tempos determinísticos para as atividades realizadas pelos PLSVs, tornam o modelo mais simples, porém mais distante da realidade. No caso real, esses tempos podem variar por características inerentes a cada navio ou relativas às atividades. Para estudos futuros, essas incertezas podem ser consideradas, utilizando-se tempos estocásticos para a duração de cada atividade baseados em dados históricos.

A possibilidade de gerar cronogramas de execução de atividades de maneira ótima torna o modelo uma importante ferramenta de planejamento para a empresa na qual será aplicado. Devido à sua complexidade, porém, a utilização da otimização em cenários reais pode não ser computacionalmente viável para problemas maiores. Desta forma, propõe-se o desenvolvimento de um método de resolução baseado em meta-heurísticas, capaz de expandir o porte do problema, possibilitando a adição de mais restrições operacionais, e dar maior agilidade quanto à necessidade de mudanças na programação.

Referências

Alves, A.L.R. (2012). *Disponibilidade instantânea de poços submarinos durante a fase de produção: visão de segurança operacional*. 2012. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ANP (2015). *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis*. Rio de Janeiro: ANP. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?dw=78135>. Acesso em: 12 mai 2016.

Barboza, L.D. (2015). *Pipe Laying Support Vessel* – PLSV MEDUSA. Disponível em: <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2015/Luanda/relat1/plsv_luanda_rel1.htm>. Acesso em: 12 mai 2016.

Cheng, T.C.E.; Sin, C.C.S. (1990). A state-of-the-art review of parallel-machine scheduling research. *European Journal of Operational Research*, 47, 271–292.

Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Nygreen, B.; Ronen D. (2013). Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research*, 228 (3), 467–483.

Devold, H. (2013). *Oil and gas production handbook*: an introduction to oil and gas production, transport, refining, and petrochemical industry. 3. ed. Oslo: ABB Oil and Gas.

Gendreau, M.; Potvin, J. (2010). *Handbook of metaheuristics*. 2. ed. Springer.

Lima, H.F. (2007). *Metodologia para a tomada de decisão no projeto de sistemas submarinos de produção de óleo e gás*. 2007. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Morais, J.M. (2013). *Petróleo em águas profundas:* Uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore. Brasília: Ipea, Petrobras.

Moura, V.C. (2012). *Programação de frota de embarcações de lançamento de dutos*. 2012. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo.

Pinedo, M. (2008). *Scheduling:* theory, algorithm, and systems. Nova York: Springer.

Queiroz, M.M; Mendes, A.B. (2012). Heuristic Approach for solving a pipe layer fleet scheduling problem. In: RIZZUTO, E.; SOARES, C.G. (Eds.) *Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources*. Londres: Taylor & Francis Group, 2012. p. 1073-1080.

Senthilkumar P.; Narayanan, S.(2010). Literature review of single machine scheduling problem with uniform parallel machines, *Intelligent Information Management,* 2 (8), 457-474.

Vernalha, F.C.; Kadouaki, B.A.; Moura, V.C.; Cunha, V.C.; Mendes, A.B.; Brinati, M.A. (2008). Programação de embarcações PLV em uma operação "offshore". In: 22º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, 2008, Rio de Janeiro. *Anais...* Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA, 2008.