ABORDAGEM ROBUSTA NA OTIMIZAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO DE PROJETOS DE PLATAFORMAS DE PETRÓLEO PARA ATENDIMENTO DE CLÁUSULAS DE CONTEÚDO NACIONAL

Raphael Ambrico Fagundes, Laura Bahiense e Edilson Fernandes de Arruda
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Engenharia de Produção
Avenida Horácio Macedo, 2030 – Cidade Universitária – Rio de Janeiro – RJ
ambrico@ufrj.br, laura@po.coppe.ufrj.br, efarruda@po.coppe.ufrj.br

RESUMO

Com o crescimento da produção de petróleo no Brasil houve um considerável aumento na demanda por novas embarcações, sondas e plataformas. Para que os novos projetos ocorram de acordo com o planejado, a indústria naval deve ser capaz de atender à demanda no prazo combinado. Para a construção de uma plataforma de produção de petróleo é necessária realização de atividades em estaleiros, que utilizam vagas de cais e dique-seco. Entretanto, o tempo de duração das atividades possui elevado grau de incerteza. Assim, este artigo propõe uma abordagem para o problema baseada em um modelo de programação matemática inspirada nos modelos clássicos de programação de projetos com restrição de recursos, considerando abordagem robusta para lidar com atrasos das atividades. O objetivo do modelo matemático é propor um agendamento de tarefas, considerando o atendimento às exigências de conteúdo local e relativamente insensível a atrasos. Nos casos estudados, foi possível realocar atividades, reduzindo a exposição a multas.

PALAVRAS CHAVE. Programação de projetos, otimização robusta, indústria de óleo e gás.

ABSTRACT

The growth of oil production in Brazil occasioned a considerable increase in demand for new vessels, rigs and platforms. In order for the new projects to occur according to plan, the shipping industry should be able to meet the demand on time. The construction of an oil production platform demands activities on shipbuilding, which makes use of dock spaces and dry docks. However, the duration of the activities poses a high degree of uncertainty. To address this issue, this paper proposes an approach based on a mathematical programming model, inspired by the classic project scheduling models with resource constraints, which employs a robust approach to deal with activity delays. The aim of the mathematical model is to propose a schedule that complies with the local content requirements, while being relatively insensitive to unpredicted delays. In the cases studied, one was able to reallocate activities, thus reducing the exposure to contract penalties.

KEYWORDS. Project scheduling, robust optimization, oil and gas industry.

1. Introdução

As políticas de conteúdo local são aquelas que, ao serem aplicadas em uma empresa ou um conjunto de empresas, dão preferência para fornecedores e para utilização de mão-de-obra e insumos nacionais, em detrimento de importações. Esse tipo de política, que visa o desenvolvimento da indústria e da economia do país que o adota, capacitação de recursos locais e geração de empregos, não é novo. Entretanto, políticas de conteúdo local vêm sendo bastante utilizadas, principalmente em indústrias de óleo e gás de países emergentes, na última década; tais políticas normalmente requerem que uma determinada fração de um bem seja produzida nacionalmente.

No Brasil, a definição de uma política de conteúdo local para o setor de óleo e gás está associada ao fim do monopólio estatal no setor e tem em vista comprometer investidores privados com uma participação relevante em investimentos nessa indústria. De acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP), desde a primeira rodada de licitações, ocorrida em 1999, foram estabelecidos requisitos mínimos de conteúdo local nos contratos de concessão com as operadoras vencedoras, para investimentos em exploração e desenvolvimento da produção.

Em 2003, a partir da rodada cinco, foi criada a cartilha de conteúdo local do PROMINP, com o objetivo de definir uma metodologia única de cálculo, buscando identificar a origem de fabricação dos componentes que compõem cada equipamento, e ponderando através do valor dos insumos. A partir de então, foram definidos níveis mínimos obrigatórios de conteúdo local. No caso destes níveis mínimos não serem atingidos, multas proporcionais ao não atingimento são aplicadas.

Neste cenário de incentivo à indústria nacional, principalmente no setor de óleo e gás no Brasil, a indústria naval se consolidou bastante nas últimas décadas. Isso pode ser observado pelo crescimento médio anual do setor desde 2000, que é de 19,5%, e os investimentos em torno de 150 bilhões de reais, segundo informações do Sindicato da Indústria Naval (SINAVAL). Afirma-se que, devido ao crescimento da exploração de óleo e gás no país, há demandas e investimentos previstos no setor para pelo menos mais 25 anos.

De acordo com informações da Associação Brasileira das Empresas de Construção Naval e Offshore (ABENAV), com esse crescimento nos últimos quinze anos, o setor naval possui hoje mais de 70 mil funcionários no país, frente aos dois mil registrados no início da retomada. O próximo desafio da indústria, segundo a ABENAV, é tornar-se mais competitiva em termos de qualidade, custo e atendimento de cronogramas. Segundo informações da ABENAV, a expectativa é que, até 2020, sejam entregues mais de 80 unidades de plataformas de produção e sondas de perfuração, aproximadamente 200 barcos de apoio e 72 navios petroleiros.

Além disso, outro risco é a capacidade de a indústria naval nacional ser incapaz de atender toda a demanda gerada pelo crescimento da exploração e produção de petróleo no país. Segundo informações da Confederação Nacional da Indústria (CNI), existe um consenso em relação à dificuldade de cumprimento de metas de conteúdo local na situação atual da oferta doméstica de bens e serviços para a indústria de óleo e gás. Essa dificuldade é resultado da incapacidade da oferta local atender os requisitos de preço, qualidade e prazo, bem como da inexistência de capacidade produtiva para responder à demanda gerada pelo programa de investimento do setor.

Por ter ficado muitos anos estagnada, a indústria naval brasileira pode não ser capaz de atender a demanda crescente do setor de óleo e gás no Brasil, principalmente devido aos altos investimentos na área, ocasionados pela descoberta das reservas do pré-sal. Ramos e Godim (2015) argumentam que houve evolução de produtividade e tecnológica aquém do esperado para a cadeia produtiva de óleo e gás como um todo.

Dado o contexto apresentado, o objetivo desta pesquisa é desenvolver um sistema de programação matemática que represente os projetos de plataformas, sondas e navios, em carteira para a área de óleo e gás no Brasil. Busca-se, considerando a quantidade de estaleiros nacionais e sua capacidade, verificar se os recursos disponíveis são capazes de atender toda a demanda,

respeitando o prazo final de cada projeto. Caso isso não se verifique, o objetivo passa a ser de minimizar as atividades não atendidas pela indústria nacional.

Para tratar o problema apresentado, foi desenvolvido um modelo de programação inteira mista, baseado nos modelos clássicos de programação de projetos com restrições de recursos (*resource-constrained project scheduling problem* - RCPSP). O referido modelo pertence à classe dos problemas de otimização combinatória (Ranjbar et al. 2013; Kyriakidis et al. 2011).

Para considerar as incertezas nas durações das atividades, foi desenvolvida uma modelagem baseada na abordagem robusta de Bertsimas e Sim (2004), na qual foi inserido um parâmetro de controle do nível de conservadorismo. Através desse parâmetro, foi possível analisar diferentes cenários, controlando o nível de robustez esperado da solução ótima. Dessa forma, o tomador de decisão pode ter acesso a várias soluções, com diferentes níveis de conservadorismo, o que favorece o processo de tomada de decisão. Para definição do nível de conservadorismo, foi utilizada a probabilidade de atraso de cada atividade, representada por uma distribuição de Bernoulli. Dessa forma, foram considerados diferentes cenários, de acordo com a possibilidade de atrasos dos projetos como um todo.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão teórica sobre o problema de programação de projetos. São apresentadas também algumas abordagens para lidar com parâmetros incertos, com foco na abordagem de programação robusta. No capítulo 3 é descrito o estudo de caso foco deste artigo; já o capítulo 4 é apresenta o modelo proposto. Por fim, nos capítulos 5 e 6 são apresentados os resultados e conclusões, respectivamente.

2. Revisão Bibliográfica

Para Brucker et al. (1999), um projeto consiste na produção de um item único ou de lotes pequenos e sua programação consiste em alocar os recursos ao longo do tempo. De acordo com Hartmann e Briskorn (2010) e Kopanos et al. (2014), a programação de atividades é uma importante tarefa no gerenciamento de projetos.

A constante presença de recursos escassos em gerenciamento de projetos (Hartmann e Briskorn 2010; Brucker et al. 1999), bem como as relações de precedência de atividades, tornam a programação de projetos uma atividade desafiadora (Kopanos et al. 2014). Isso tem atraído, segundo Brucker et al. (1999), atuação de pesquisadores e de profissionais da área no desenvolvimento de técnicas matemáticas de apoio à decisão.

Blazewicz et al. (1983) e Brucker et al. (1999) apresentaram o RCPSP como sendo uma extensão do problema de programação de atividades – conjunto de uma ou mais operações – em máquinas. Neste tipo de problema, uma atividade é realizada por um recurso e cada recurso realiza uma atividade em um instante de tempo. A programação de projetos pode ser vista como uma extensão desse problema (Blazewicz et al., 1983), na qual uma atividade pode ser realizada por *n* recursos; ou seja, partes das atividades podem ser realizadas em diferentes recursos. Um exemplo para este tipo de problema, segundo os autores, é o desenvolvimento de sistemas computacionais.

O processamento das atividades de um projeto necessita, durante a sua duração, de um ou mais recursos que podem ser: energia, máquinas, equipamentos, recursos humanos, caminhões, recursos financeiros, entre outros (Fawzan e Haouari 2005; Bianco et al. 1998). O problema de programação de projetos consiste em organizar a sequência de realização de todas as atividades, levando em consideração as relações de precedência entre as atividades e a disponibilidade dos recursos necessários.

Program Evaluation and Review Technique (PERT) e *Critical Path Method* (CPM) são técnicas de programação de atividades que surgiram na década de 1960. Esse tipo de abordagem buscava resolver o problema de programação de projetos sem considerar limite de recursos (Tsai e Gemmill 1998; Fawzan e Haouari 2005). Na prática, porém, recursos escassos são sempre limitações do problema que devem ser consideradas. A determinação do caminho crítico, quando há escassez de recursos, é sempre mais difícil. Segundo Fawzan e Haouari (2005), ignorar os recursos pode tornar a programação inviável na prática.

Na literatura (Kopanos et al. 2014; Hartmann e Briskorn 2010), o problema de programação de atividades de projetos considerando as limitações de recursos é conhecido como *resource-constrained project scheduling problem* (RCPSP).

Koné et al. (2011) apresentaram diferentes formulações para o problema clássico da literatura (RCPSP). Por sua vez, Hartmann e Briskorn (2010) apresentaram diversas extensões para aplicações reais, baseadas em modelos clássicos da literatura. Existem diferentes abordagens matemáticas para a formulação do RCPSP. Alguns modelos tratam o tempo de forma discreta, com variáveis binárias indexadas por atividade e por tempo. Essas variáveis indicam se a atividade é feita naquele instante do tempo ou não. Esse tipo de abordagem apresenta um grande número de variáveis, o que pode dificultar na resolução do problema, principalmente quando se trata de programação em um longo horizonte de tempo (Koné et al. 2011).

Outro tipo de abordagem apresentada por Koné et al. (2011) é tratar o tempo de forma contínua. Dessa forma, as variáveis de decisão indicam se uma atividade é realizada antes da outra. Segundo os autores, essa abordagem é mais indicada para problemas com maior horizonte de programação, como é o caso da programação de projetos em estaleiros brasileiros, objeto de estudo deste artigo. A desvantagem é que, dependendo da escolha de alguns parâmetros, a relaxação pode trazer resultados ruins, dificultando, dessa forma, a resolução do problema. Kopanos et al. (2014) apresentam diferentes modelos com tempo discreto e tempo contínuo.

Nos últimos anos muito se estudou em modelagem e solução do RCPSP determinístico, estático e com informações conhecidas, e.g., Herroelen e Leus (2005); Vonder et al. (2008). Na maioria das situações reais, entretanto, existem muitas incertezas, como com respeito às durações das atividades, as quais podem ser modeladas como variáveis estocásticas. Utilizar os valores médios pode esconder os efeitos da aleatoriedade (Tsai e Gemmill 1998), além de propiciar soluções inadequadas face às possíveis variações dos parâmetros. De acordo com Brucker et al. (1999) há estudos com duração de atividades estocástica para programação de máquinas, mas poucos estudos que consideram aleatoriedades em programação de projetos.

Herroelen e Leus (2005), listaram algumas formas diferentes de abordar o RCPSP com incertezas: programação reativa; programação estocástica; programação *fuzzy*; programação robusta e análise de sensibilidade. Na programação reativa, o problema é re-otimizado após a ocorrência de um evento não esperado, reparando o cenário base. Geralmente a reprogramação é feita minimizando a diferença entre o cenário original e o cenário futuro (Herroelen e Leus 2005). Segundo os autores, esse tipo de abordagem é pobre, justamente por ser reativa à ocorrência da incerteza.

Programação robusta engloba muitas técnicas recentemente propostas, dentre as quais podemos citar: planejamento de atividades com folgas, como contingências para possíveis eventos não planejados. Outra abordagem é maximizar, na função objetivo, as folgas que não impactam a duração total do projeto; ou ainda propor antecipadamente várias programações para eventuais mudanças em caso de eventos aleatórios (Herroelen e Leus 2005). Tratar a incerteza na solução do problema, apresentando uma solução robusta para o problema de programação de projetos é um campo de pesquisa em crescimento (Vonder et al., 2008).

Outra forma de abordar a incerteza em modelos RCPSP é através de análise de sensibilidade (Herroelen e Leus, 2005). Este tipo de abordagem é bastante recente e é focado em flexibilidade. Através desse tipo de análise é possível responder perguntas do tipo *"e...se?"*, ou seja, testar diferentes cenários e analisar o seu impacto no desempenho global do projeto (Herroelen e Leus 2005). Segundo os autores, existem poucos trabalhos nessa linha no estudo de programação de máquinas e nenhum trabalho que aborde programação de projetos. A Tabela 1, apresentada a seguir, ilustra diferentes abordagens para o RCPSP com parâmetros incertos.

Programação base	Durante execução do projeto
Sem programação base	Programação dinâmica de atividades
Programação base sem variabilidade	Programação reativa e decisões gerenciais
Programação base robusta	Análise de sensibilidade

Tabela 1: Abordagens para programação sob incerteza (adaptado de Herroelen e Leus 2005).

Esta pesquisa visa, através de programação de estaleiros nacionais, aplicar a modelagem robusta para a programação base, buscando uma programação que seja menos sensível a possíveis desvios.

Bertsimas e Sim (2004) apresentaram uma nova abordagem para programação linear robusta. A ideia da programação robusta, segundo os autores, é de aceitar uma solução sub-ótima para os valores esperados de dados incertos, mas que seja viável e próxima da solução ótima quando esses dados variam. Mais que isso, a solução deve ser imune à incerteza nos dados. A ideia central da otimização robusta é buscar soluções para as realizações mais extremas dos parâmetros estocásticos. Ao realizar otimizações considerando valores esperados ou valores nominais, pode-se chegar a soluções que não sejam factíveis para algumas realizações dos parâmetros incertos. Trabalhando-se com patamares mais conservadores, entretanto, obtém-se melhores garantias de factibilidade das soluções obtidas, face às incertezas inerentes ao sistema. É esse raciocínio que motiva a modelagem por meio de programação robusta. Esse tipo de abordagem, segundo Bertsimas e Sim (2004), pode ser muito conservadora, visto que dificilmente todos os parâmetros estocásticos se comportaram como no pior caso. Dessa forma, os autores apresentam uma abordagem mais atrativa, que analisa o equilíbrio entre a robustez do modelo e o grau de conservadorismo. A vantagem do referido modelo, é que a sua formulação se mantém como um problema de otimização linear.

No tocante a aplicações, Lin et al. (2004) apresentaram um modelo robusto para o problema de programação da produção na indústria química, cuja função objeto é maximizar o lucro. Carvalho et al. (2016) apresentaram uma aplicação de modelagem robusta baseada na abordagem desenvolvida por Bertsimas e Sim (2004). Trata-se de uma aplicação para planejamento tático de capacidade em uma indústria do tipo *engineering to order* (ETO). Bertsimas *et al.* (2011), por sua vez, apresentaram uma pesquisa de aplicações de otimização robusta em diferentes áreas, como por exemplo: gerenciamento de portfólio, projeto de circuito integrado e controle de tráfego aéreo.

3. O problema de programação de atividades em estaleiros nacionais

As construções de plataformas para produção de petróleo são realizadas em diversos estaleiros que estão espalhados pelo território nacional. Atualmente, no Brasil, existem disponíveis ou com previsão de disponibilidade para os próximos anos, 18 vagas de cais e 5 vagas de dique-seco para construção de plataformas, segundo Foster et al. (2013). Esses são os recursos disponíveis no país para construção de plataformas do tipo FPSO (*floating production storage and offloading*), considerando um horizonte de planejamento de longo prazo (horizonte de 15 anos).

Além das construções de plataformas do tipo FPSO, devem ser considerados também dados referentes às construções de sondas de exploração e navios para movimentação de petróleo e derivados, visto que são projetos que competem pelos mesmos recursos.

O objetivo do modelo proposto neste artigo é o de minimizar a exposição a conteúdo estrangeiro. Em outras palavras, o objetivo é de minimizar o número de atividades realizadas no exterior. Para isso, o maior número possível de atividades deve ser alocado aos recursos nacionais, respeitando as restrições do problema.

Para cada projeto de FPSO, um casco de navio deve ser convertido ou construído um casco novo. Tanto a conversão quanto a construção são atividades realizadas em duas etapas. A primeira etapa ocorre em uma vaga de dique-seco e concluída em uma vaga de cais. Em seguida, é feita a integração dos módulos: que também necessita de uma vaga de cais. Essa última atividade deve ser realizada no mesmo recurso em que é concluída a primeira atividade. Os módulos são construídos em canteiros apropriados para sua construção. Por não ser considerado um recurso crítico nos projetos de FPSO, os canteiros não foram considerados na modelagem proposta.

As atividades realizadas em dique-seco e cais podem ser feitas em diferentes estaleiros. Quando isso ocorre, existe um tempo de deslocamento entre os estaleiros, em função de sua distância. Cada atividade de cada projeto possui uma duração média definida que é independente do recurso alocado, seja ele nacional ou estrangeiro. Para atividades alocadas em recursos nacionais, há possíveis atrasos que foram considerados no modelo proposto. Não há restrição quanto à alocação de atividades dos projetos em qualquer estaleiro nacional.

A Figura 1, apresentada abaixo, ilustra de forma esquemática a sequência das atividades e os recursos necessários para sua realização.

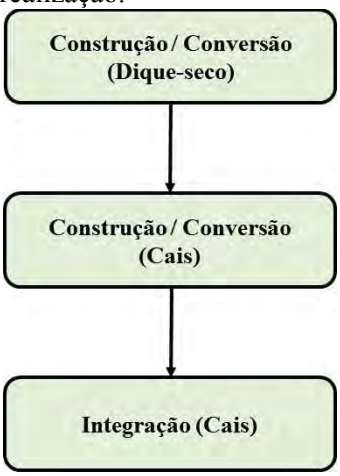

Figura 1: Sequência de atividades para construção de FPSO

Cada projeto de plataforma do tipo FPSO está associado a um projeto de produção de petróleo. Dessa forma, para que não haja atrasos na produção nacional de petróleo, não são permitidos atrasos na data limite de término de cada projeto. Antecipações são permitidas, dentro de um intervalo de tempo razoável e pré-determinado.

No caso de não haver recursos nacionais disponíveis para a realização das atividades necessárias em um dado projeto no prazo definido, uma ou mais atividades podem ser alocadas em recursos no exterior. Essa alocação, entretanto, deve ser evitada, uma vez que resulta em multas.

4. Modelo matemático

O modelo desenvolvido foi baseado na modelagem por tempo contínuo apresentada por Kopanos et al. (2014) e na proposta de abordagem robusta de Bertsimas e Sim (2004).

Conjuntos básicos:

P, conjunto de projetos
A_p, conjunto das atividades que compõe o projeto p
A, conjunto de todas as atividades
TA, conjunto de todos os tipos de atividades.
R, conjunto de todos os recursos disponíveis no Brasil
$R_a = \{r \in R | b_{a,r} = 1\}$, conjunto de todos os recursos que podem ser utilizados pela atividade a
G, conjunto dos pares ordenados de atividades (a_1, a_2) tal que existe relação de precedência entre o instante final da primeira atividade e o instante inicial da segunda atividade
S, conjunto dos pares não ordenados de atividades (a_1, a_2) tal que as atividades podem compartilhar recurso.
H, conjunto dos pares ordenados de atividades $(a_1, a_2) \in G$ tal que, se executadas no Brasil, devem utilizar o mesmo recurso.

Parâmetros:

$b_{a,r} \in \{0,1\}$, indica se a atividade *a* pode usar o recurso *r* para sua execução
d_a, duração média/planejada da atividade *a*
p_a, projeto do qual a atividade *a* faz parte
dv_a, desvio/atraso máximo na duração da atividade *a*
$[li_a, ls_a]$, intervalo de tempo que deve conter integralmente a execução da atividade *a*
ti_{a_1,a_2}, quantidade mínima de tempo que se pode decorrer entre o instante final da primeira atividade e o instante inicial da segunda atividade, $\forall (a_1, a_2) \in G$
ts_{a_1,a_2}, quantidade máxima de tempo que se pode decorrer entre o instante final da primeira atividade e o instante inicial da segunda atividade, $\forall (a_1, a_2) \in G$
TA_a, tipo da atividade *a*
e_r, estaleiro onde o recurso *r* se encontra
td_{e_1,e_2}, tempo de deslocamento entre o estaleiro e_1e o estaleiro e_2
$[di_r, ds_r]$, intervalo de tempo em que o recurso *r* encontra-se disponível
Γ, grau de robustez

Variáveis:

$u_{a,r} \in \{0,1\}$, indica se a atividade *a* vai ser alocada ou não ao recurso *r*
$i_a \in \mathbb{R}$, instante de início da atividade *a*
$f_a \in \mathbb{R}$, instante de término da atividade *a*
$z_a \in \{0,1\}$, variável de controle da robustez do modelo
$w_{a_1,a_2} \in \{0,1\}$, controla a ordem relativa entre atividades que podem compartilhar recursos, $\forall\ (a_1, a_2) \in S$

Função objetivo:

$$\max \sum_{a \in A} \sum_{r \in R_a} u_{a,r}$$

Restrições:

1. $f_a = i_a + d_a + dv_a z_a \quad \forall a \in A$
2. $i_a \geq li_a \quad \forall a \in A$
3. $f_a \leq ls_a \quad \forall a \in A$
4. $i_{a_2} \geq f_{a_1} + ti_{a_1,a_2} \quad \forall (a_1, a_2) \in G$
5. $i_{a_2} \leq f_{a_1} + ts_{a_1,a_2} \quad \forall (a_1, a_2) \in G$
6. $i_{a_2} \geq f_{a_1} + \left(u_{a_1,r_1} + u_{a_2,r_2} - 1\right) td_{er_1,er_2}$
   $\forall (a_1, a_2, r_1, r_2) | TA_{a_1} = Dique, TA_{a_2} = Cais, p_{a1} = p_{a2}, b_{a1,r1} = b_{a2,r2} = 1,$
   $(a_1, a_2) \in G, e_{r1} \neq e_{r2}$
7. $\sum_{r \in R_a} u_{a,r} \leq 1 \quad \forall a \in A$
8. $i_a \geq (di_r - li_a) u_{a,r} + li_a \quad \forall (a, r) | r \in R_a$
9. $f_a \leq ds_r + (ls_a - ds_r)\left(1 - u_{a,r}\right) \quad \forall (a, r) | r \in R_a$
10. $w_{a1,a2} + w_{a2,a1} \geq u_{a1,r} + u_{a2,r} - 1 \quad \forall (a_1, a_2, r) | b_{a1,r} = b_{a2,r} = 1, (a_1, a_2) \in S$
11. $w_{a1,a2} + w_{a2,a1} \leq 1 \quad \forall (a_1, a_2) \in S$
12. $i_{a_2} \geq f_{a_1} - (ls_{a1} - li_{a2})\left(1 - w_{a1,a2}\right) \quad \forall (a_1, a_2) \in S$
13. $u_{a_2,r} \geq u_{a_1,r} \quad \forall (a_1, a_2) \in H$
14. $\sum_{a \in A} z_a = \Gamma$

15. $z_a \leq \sum_{r \in R_a} u_{a,r} \quad \forall a \in A$

A função objetivo é de maximizar a quantidade de atividades alocadas em recursos nacionais. As restrições 1, 2 e 3 determinam a janela de tempo em que uma atividade pode ser realizada no cronograma. As restrições 4 e 5 garantem as relações de precedência entre as atividades, bem como o tempo mínimo e máximo entre elas. A restrição 6 é responsável por modelar o tempo de deslocamento entre os estaleiros para as atividades consecutivas realizadas no dique e no cais de um mesmo projeto. A restrição 7, por sua vez, garante que toda atividade é alocada a, no máximo, um recurso nacional. Atividades que não são alocadas a nenhum recurso são interpretadas como realizadas no exterior. As restrições 8 e 9 garantem que se uma atividade for alocada a um recurso, então a atividade deve ser executada dentro da janela de disponibilidade do recurso. As restrições 10, 11 e 12 ativam as variáveis de sequenciamento quando essas atividades estão alocadas no mesmo recurso. Observando estas restrições, pode-se verificar que se $u_{a_1,r} = 1$ e $u_{a_2,r} = 1$, então exatamente uma das variáveis w_{a_1,a_2} ou w_{a_2,a_1} deve ser igual a 1. A restrição 12 garante que, para atividades alocadas no mesmo recurso, $w_{a_1,a_2} = 1 \Rightarrow a_1$ termina antes de a_2 começar. A restrição 13, por sua vez, garante que os pares de atividades em *H* utilizarão o mesmo recurso, modelagem utilizada para que as atividades de cais não sejam realizadas em diferentes recursos. A restrição 14 é baseada em Bertsimas e Sim (2004) e controle o grau de robustez, através do parâmetro Γ. Esse parâmetro controla quantas atividades serão consideradas como o pior caso (duração máxima) para programar possíveis atrasos. Por fim, a restrição 15 garante que a restrição 14 irá considerar apenas as atividades alocadas no Brasil, que são as atividades de maior interesse no controle dos atrasos e nas quais são mais comuns. Entende-se que, relacionar o parâmetro Γ com o número de atividades atrasadas é uma contribuição deste estudo.

5. Resultados

O modelo proposto e apresentado no capítulo 4 foi implementado no *software* AIMMS, versão 4.2 e solucionado com o *solver* GUROBI. O sistema foi solucionado num computador Intel Core – 2,00 GHz, RAM 8GB e HD de 500GB, Sistema Operacional Windows 7. Em todos os cenários analisados, o tempo de otimização foi de, no máximo, dois minutos; o que é um tempo bastante razoável, por se tratar de um planejamento de médio e longo prazo.

Por se tratar de informações sigilosas, os resultados aqui apresentados são referentes a cenários teste, representando recortes do problema original, que tem como horizonte total de planejamento 15 anos. No recorte proposto, foram consideradas 67 atividades que representam projetos em um horizonte de 5 anos.

O parâmetro Γ representa, segundo Bertsimas e Sim (2004) o grau de conservadorismo considerado na modelagem robusta. Considerando que a proposta do modelo robusto é otimizar para o pior caso, todas as atividades devem ser consideradas, inicialmente, com sua duração máxima. Entretanto, este cenário é pouco provável, na prática, de acontecer. Dessa forma, o parâmetro Γ representa, em termos práticos, quantas atividades serão consideradas como de pior caso em termos de duração.

Para estimar este parâmetro, foram analisados os dados históricos de todas as 67 atividades consideradas e chegou-se à probabilidade de 30% de se estar no pior caso de duração das atividades. Ao se modelar cada atividade como um processo de Bernoulli, chegou-se a uma distribuição binomial que representa a probabilidade de *n* atividades atrasarem ao mesmo tempo. A Tabela 2, apresentada a seguir, ilustra os resultados desta distribuição.

Ao analisar os dados da distribuição, pode-se perceber que existe 80% de probabilidade de ocorrer atrasos em até 23 atividades, de um total de 67. Já em 99% dos casos o número de atividades em atraso não ultrapassará 29. Em outras palavras, ao considerar possíveis atrasos em até 29 atividades, são cobertos 99% dos cenários possíveis, o que é bastante razoável para o planejamento. Dessa forma, foram definidos os cenários a se analisar, alterando o parâmetro Γ. Como a probabilidade de ocorrer atrasos em todas as 67 atividades é muito pequena, este cenário

não foi considerado. O cenário com Γ = 0 representa o cenário determinístico, considerando as durações planejadas das atividades. Neste cenário, foram alocadas 164 atividades em recursos no Brasil.

Os 8 cenários apresentados na Tabela 2, alterando o parâmetro Γ foram analisados e os resultados da função objetivo (atividades alocadas em recursos nacionais) estão apresentados na tabela. Além disso, a Tabela 2 apresenta ainda o desvio (quarta coluna), em percentual, do resultado determinístico, considerando as durações planejadas para todas as atividades (cenário com Γ = 0). No cenário com as durações de atividades planejadas, de um total de 67 atividades, 65 atividades foram alocadas em recursos nacionais.

Percentil	Γ (ativ. com atraso)	Função objetivo	Desvio
Cenário determinístico	0	65	-
1%	12	65	0%
5%	14	64	1,54%
10%	15	62	4,62%
20%	17	61	6,15%
50%	20	58	10,77%
80%	23	56	13,85%
90%	25	55	15,38%
99%	29	54	16,92%

Tabela 2: Resultados para diferentes valores de Γ.

Como pode ser observado na Tabela 2, ao aumentar o valor de Γ, mais a programação se protege em relação a possíveis atrasos nas atividades; dessa forma, mais atividades são alocadas no exterior. Isso implica em maior proteção contra possíveis atrasos, de forma que estes não causem impactos em atividades alocadas posteriormente no mesmo recurso. Entretanto, ao alocar mais atividades em estaleiros no exterior, maior é a exposição a multas pelo não atendimento de cláusulas de conteúdo nacional.

6. Conclusões

Neste artigo, foi proposto um modelo de programação linear inteira mista para programação de atividades em estaleiros, com foco em atendimento a cláusulas de conteúdo local. Para tanto, propõe-se uma abordagem robusta para que a programação seja protegida de possíveis atrasos nas durações das atividades. A modelagem robusta utilizada neste trabalho é particularmente interessante, pois não é necessário conhecimento da distribuição de probabilidade dos atrasos, apenas é necessário conhecer o limite superior. Considerados os dados históricos, verifica-se que, infelizmente, os atrasos são comuns.

O modelo proposto foi implementado e, através da otimização e de cenários analisados, foi possível realocar os projetos de forma a maximizar a utilização dos recursos disponíveis no Brasil e, como consequência, reduzir a exposição a multas de não atendimento de cláusulas de conteúdo nacional. A alocação foi possível, considerando que podem ocorrer atrasos na duração das atividades e buscando respeitar a data de conclusão dos projetos.

Além disso, foi possível obter uma visão gerencial dos projetos ao longo do horizonte de planejamento, identificando onde existem maiores riscos de não se ter capacidade nacional para realização dos projetos.

Como estudo futuro, pode ser desenvolvido um modelo de simulação para verificar a probabilidade de atraso na conclusão de cada um dos projetos, para diferentes valores de grau de conservadorismo. Além disso, pode-se analisar a relação pecuniária entre atraso na entrega, ao realizar o planejamento de acordo com as durações médias ou planejadas, e as multas de conteúdo local, ao alocar atividades no exterior.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo apoio através do Processo E-26/202.789/2015; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio através dos Processos 3003543/2015-9 e 308978/2013-7; e à Petrobras SA pelo apoio à pesquisa e acesso às informações necessárias.

Referências

ABENAV (2015). Associação Brasileira das Empresas de Construção Naval e *Offshore*. Disponível em <http://abenav.org.br/web/>. Acesso em 23 de fevereiro de 2015.

ANP (2016). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em <http://www.anp.gov.br/>. Acesso em 19 de fevereiro de 2016.

BERTSIMAS, D., BROWN, D., CARAMANIS, C. (2011) Theory and applications of Robust Optimization. *SIAM Review* v. 53, pp. 464-501.

BERTSIMAS, D. e SIM, M. (2014) The price of robustness. *Operations Research* v. 52, pp. 35-53.

BIANCO, L., DELLOLMO, P., SPERANZA, M. (1998) Heuristics for multimode scheduling problems with dedicated resources. *European Journal of Operational Research*, v. 107, pp. 260-271.

BLAZEWICZ, J., LENSTRA, J., KAN, A. (1983) Scheduling subject to resource constraints: classifications and complexity. *Discrete Applied Mathematics* v. 5, pp. 11-24.

BRUCKER, P., DREXL, A., MOHRING, R., NEUMANN, K., PESCH, E. (1999) Resource constrained project scheduling: notation, classification, models and methods. *European Journal of Operational Research* v. 107, pp. 272-288.

CARVALHO, A., OLIVEIRA, F., SCAVARDA, L. (2016) Tatical capacity planning in a real-world ETO industry case: a robust optmization approach. *International Journal of Production Economics* v. 167, pp. 187-203.

CNI. (2012) A indústria e o Brasil: Cadeia produtiva de petróleo e gás – Política de Conteúdo Local. *Confederação Nacional da Indústria*.

FAWZAN, A. e HAOUARI, M. (2005) A bi-objective model for robust resource constrained project scheduling. *International Journal of Production Economics* v. 96, pp. 175-187.

FOSTER, M., ALONSO, P., DAN, E., CIMA, F. (2013) Retomada da Indústria Naval e Offshore do Brasil. Rio de Janeiro: Petróleo Brasileiro SA.

HARTMANN, S. e BRISKORN, D. (2010) A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* v. 207, pp. 1-14.

HERROELEN, W. e LEUS, R. (2005) Project scheduling under uncertainty: survey and research potentials. *European Journal of Operational Research* v. 165, pp. 289-306.

KONÉ, O., ARTIGUES, C., LOPEZ, P., MONGEAU, M. (2011) Event-based MILP models for resource constrained project scheduling problems. *Computers & Operations Research* v. 38, pp. 3-13.

KOPANOS, G., KYRIAKIDIS, T., TSIONI, G. (2014) New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems. *Computers and Chemical Engineering* v. 68, pp. 96-106.

KYRIAKIDIS T., KOPANOS, G., TSIONI, G. (2011) MILP formulation for resource-constrained project scheduling problem. *Computer and Chemical Engineering* v.36, pp. 369-385.

LIN, X., JANAK, S., FLOUDAS, C. (2004) A new robust optimization approach for scheduling under uncertainty: bounded uncertainty. *Computers and Chemical Engineering* v. 28, pp. 1069-1085.

PROMINP (2004). Cartilha PROMINP. *Programa de Mobilização da Indústria Nacional de Petróleo e Gás Natural.* Disponível em <http://www.prominp.com.br/prominp/pt_br/conteudo/conteudo-local.htm>. Acesso em 30 de janeiro de 2016.

RAMOS, A.; GODIM, C. (2015). Mudar é preciso: revisitando o conteúdo local para a indústria de óleo e gás. *PWC.*

RANJBAR, M., HOSSEINABADI, S., ABASIAN, F. (2013) Minimizing total weighted late work in the resource constrained project scheduling problem. *Applied Mathematical Modelling*, v. 37, pp. 9776-9785.

SINAVAL (2015) Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval e *Offshore*. Disponível em <http://sinaval.org.br/>. Acesso em 26 de fevereiro de 2015.

TSAI, Y. e GEMMILL, D. (1998) Using tabu search to schedule activities of stochastic resource constrained projects. *European Journal of Operational Research* v. 111, pp. 129-141.

VONDER, S., DEMEULEMEESTER, E., HERROELEN, W. (2008) Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: an experimental analysis. *European Journal of Operational Research* v. 189, pp. 723-733.