

Modelo de programação matemática para suporte à decisão na compra e distribuição de dutos e umbilicais

Flavia Garcia Serpa

Petróleo Brasileiro S.A

Av. República do Chile, 330 – Torre Oeste – 20.andar – Centro - RJ

flaviagserpa@hotmail.com

Silvio Hamacher

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ

Rua Marques de São Vicente, 225 – Gávea - RJ

hamacher@puc-rio.br

Resumo

A atividade de exploração e produção (E&P) de petróleo no segmento *offshore* no Brasil apresentou um crescimento acentuado nos últimos anos e, com a descoberta do pólo pré-sal da bacia de Santos pela PETROBRAS, a expectativa é de haja um incremento ainda maior.

Dentro da cadeia produtiva de E&P, uma etapa fundamental é a interligação dos equipamentos submarinos às Unidades Estacionárias de Produção (UEPs) através de dutos e umbilicais. Este trabalho apresenta um modelo de Programação Linear Inteira Mista cujo objetivo é de apoiar a decisão na compra e distribuição de dutos flexíveis e umbilicais. É proposto um modelo de Programação Estocástica de Dois Estágios, no qual, o primeiro estágio representa as decisões estratégicas, i.e., os contratos de fornecimento de longo prazo e o segundo estágio abarca as decisões táticas, como a otimização do transporte para as bases de suprimento e destas até as UEPs.

Palavras-chaves

Programação Estocástica; Exploração e Produção; Óleo e Gás

Abstract

Offshore oil exploration and production activities in Brazil have presented an enormous increment in recent years and, after PETROBRAS's discovery of pre-salt accumulations in Santos Basin, it is expected an uttermost increase.

In the Exploration & Production (E&P) chain, a fundamental step is the connection of the subsea equipment to the stationary production units. This connection is made through the use of flowlines, risers and umbilicals. This paper presents a Mixed Integral Linear Programming model which aims to support the decision making process in the purchase and distribution of flexible flowlines and umbilicals. A two stage stochastic model is proposed to solve the problem, where the first stage variables represent the strategic decisions, i.e., the long term supplying contracts, where the second stage variables symbolize the tactical decisions, as the optimization of transportation from the factories to the onshore base and from this base to the wells location.

Keywords

Stochastic Programming; Exploration & Production; Oil & Gas

1. Introdução

A PETROBRAS, maior empresa brasileira e quinta empresa petrolífera do mundo, definiu o Planejamento Estratégico 2011-2015 onde prevê um crescimento na produção de petróleo no Brasil de 44% nos próximos 4 anos e de 130% até 2020, com investimento da ordem de US\$ 118 bilhões no segmento de exploração e produção no Brasil até 2015 (PETROBRAS, 2011).

Tendo a maior parcela das suas reservas situadas em campos marítimos, uma parte significativa destes investimentos, se dará na construção das instalações submarinas, atividade com papel fundamental no processo de extração de petróleo, pois é através dela que os poços são ligados às unidades estacionárias de produção, permitindo a elevação e escoamento do petróleo.

Com recursos de capacidade fabril limitada e alta demanda, é crucial para a garantia do aumento na produção de petróleo, o planejamento para a fabricação, aquisição e a gestão dos equipamentos e materiais, garantindo os menores prazos, aliados às melhores relações de custo x benefício com a operação desses recursos, principalmente no tocante a transporte e estoque. Este problema insere-se no contexto da otimização de cadeias de suprimento (*supply chain*).

De acordo com Beamon (1998), o conceito *supply chain* abrange o processo integrado de produção, onde matéria-prima é convertida em produto final seguida pela entrega deste produto aos clientes. O processo de distribuição e logística determina como produtos são coletados e transportados das fábricas até os varejistas. Os produtos podem ser transportados diretamente, ou movimentados para depósitos intermediários para posterior entrega final. A otimização da cadeia de suprimento deve ser acompanhada por decisões eficientes de planejamento, em três níveis, dependendo do horizonte de tempo: estratégico – longo prazo, tático – médio prazo e operacional – curto prazo (Bender, 2002).

O sistema de distribuição de produtos é um assunto estratégico para a maioria das empresas (Klose & Drexl, 2005). O problema não é novo para a comunidade de pesquisa operacional e tem inspirado muitos trabalhos. São encontradas soluções utilizando simples modelos determinísticos lineares até complexos modelos probabilísticos não lineares.

De acordo com Melo *et al.* (2009), apesar dos modelos tradicionais para localização de centros de distribuição não contemplarem todos os aspectos no planejamento estratégico da cadeia de suprimento, têm sido extremamente úteis como base para tomadas de decisão. Neste contexto, os termos *network design* e *supply chain network design* são empregados como sinônimo de planejamento estratégico da cadeia de suprimentos.

A globalização da economia, em conjunto com velocidade de desenvolvimento tecnológico, gera menores ciclos de vida dos produtos e um comportamento muito dinâmico dos consumidores. Este dinamismo leva a um aumento de incerteza da demanda, tornando o *supply chain network design* fundamental para determinar a melhor cadeia de suprimentos.

Mula *et al.* (2010) mostram que, considerando a globalização das atividades, a otimização dos processos, com a utilização de modelos matemáticos é requerida. Apresentam um levantamento bibliográfico, no qual a abordagem mais utilizada é a da programação linear, mais especificamente a que combina variáveis discretas e contínuas. São encontradas também soluções de programação não linear, fuzzy, estocásticas, algoritmos heurísticos e metaheurísticos e modelos híbridos.

Segundo Melo *et al.* (2009), decisões estratégicas devem durar um tempo considerável e de fato, em função dos altos investimentos associados com estas decisões, estabilidade é desejada. Porém, é importante considerar a possibilidade de realizar futuros ajustes na configuração para permitir mudanças graduais, onde o planejamento pode ser feito em períodos menores. É possível também combinar múltiplos períodos com solução estocástica, com comportamentos probabilísticos ao longo do tempo.

Apesar do conceito de cadeia de suprimento ser relativamente recente, o desenvolvimento de modelos estratégicos de definição de redes de produção-distribuição tem recebido uma considerável atenção nas últimas décadas. Uma das primeiras contribuições foi o modelo proposto por Geoffrion e Graves (1974), para um sistema de distribuição onde diferentes

produtos fabricados em várias instalações são concentrados em centros de distribuição para serem transportados para o consumidor final, agrupados em zonas.

Lababidi *et al.* (2006) propõe modelos (determinístico e estocástico) para otimização da cadeia de suprimento de uma indústria petroquímica, com incertezas relacionadas à demanda, preço, custo e rendimento da produção, mostrando que as incertezas tem um importante efeito no planejamento da cadeia.

Tais desafios levam à necessidade de desenvolvimento de novas ferramentas e métodos, que permitam projetar, com a minimização de riscos e custos, o melhor cenário no processamento dos recursos críticos.

O trabalho teve por objetivo desenvolver um Modelo de Programação Linear Inteira Mista – PLIM para apoiar a decisão da aquisição e distribuição de dutos flexíveis e umbilicais, considerando as incertezas relacionadas à demanda. De forma a se obter o melhor custo logístico, o modelo determina a carteira de aquisições dos fornecedores, a escolha da base de carregamento e a otimização do transporte das bases até os poços de óleo e gás.

Para a formulação estocástica foi utilizado o método em dois estágios, no qual o primeiro estágio está relacionado às aquisições de dutos e umbilicais. Os contratos de aquisição são considerados estratégicos e devem ser determinadas com grande antecedência. O segundo estágio representa as decisões de recurso, ou seja, que são tomadas após a revelação das incerteza. A principal fonte de incerteza do problema é a demanda de dutos e umbilicais, pois esta é função da quantidade descoberta hidrocarbonetos dos poços produtores, algo muito difícil de determinar com precisão.

A projeção de demanda utilizada neste trabalho foi feita com base na correlação linear entre o histórico de aquisições no período de 2006 a 2011 e a produção de petróleo no mesmo período. Os cenários do modelo estocástico foram definidos em função do “Intervalo de confiança” para a citada projeção.

Além disto, o modelo também permitirá analisar outras questões, tais como: (i) qual é o impacto no custo logístico, considerando alteração na capacidade fabril nacional; (ii) em que momento as capacidades de estocagem de cada base de carregamento contratadas são atingidas e para qual demanda e nível de incerteza isto ocorre e (iii) qual a melhor forma de garantir um pagamento justo na contratação das bases de carregamento e ao mesmo tempo reduzir o custo total para a PETROBRAS.

2. Construção do arranjo submarino

Os dutos flexíveis são estruturas cuja função é permitir o fluxo do petróleo entre as diversas instalações submarinas e as Unidades Estacionárias de Produção (UEP), enquanto umbilicais, estruturas também flexíveis, composta de cabos elétricos e acionamentos hidráulicos, têm a finalidade de permitir o controle hidráulico de equipamentos submarinos, transmissão de sinais elétricos e servir de meio de alimentação desde a UEP até o poço.

Labanca (2005) define arranjo submarino como o meio que viabiliza o escoamento do fluído produzido até a Unidade Estacionária de Produção (UEP). Geralmente os projetos dos equipamentos e da arquitetura do arranjo são exclusivos para cada UEP, em função das características de cada campo, tais como: vazão, pressão, temperatura, composição do fluído, localização e vida útil.

A construção do arranjo submarino tem início na fase de desenvolvimento da produção. De acordo com Souza (2008), o projeto de instalação de dutos é bastante complexo em função da quantidade de disciplinas e variáveis a serem analisadas, como cálculo estrutural, mecânica dos fluídos, corrosão, pressão do poço, temperatura do petróleo, entre outros.

Para Underwood *et al.* (2008), a visão integrada do planejamento do desenvolvimento de um campo é fundamental para garantir uma interação entre a perfuração dos poços e a instalação do sistema submarino. A interface entre estas duas atividades é um desafio durante todas as fases de um projeto.

Um desenho esquemático do arranjo submarino é ilustrado através da Figura 1, onde é possível observar a interligação de dutos submarinos entre poços, UEPs e equipamentos submarinos.

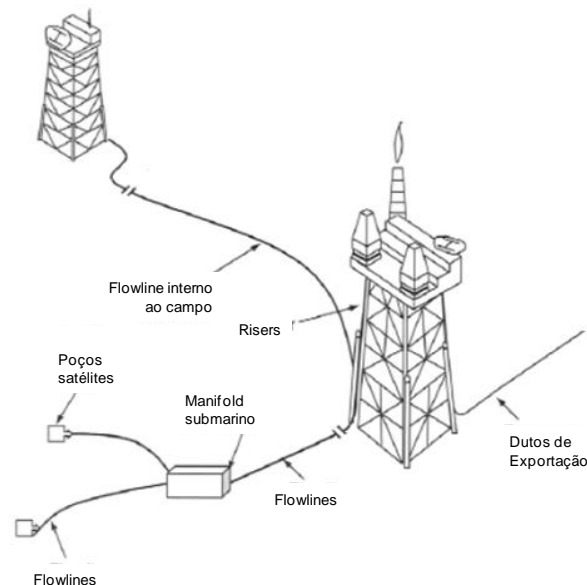


Figura 1 - Desenho esquemático de um arranjo submarino
 Fonte: Adaptado de Guo *et al.* (2005)

Para que esta construção seja possível, além das aquisições de todos os equipamentos que compõem o arranjo, é necessário também dispor de embarcações especiais que permitam o lançamento e conexões dos diversos equipamentos aos dutos e umbilicais em alto mar (Souza, 2008). A instalação ocorre em águas consideradas rasas, profundas ou ultraprofundas, sujeitas a condições meteorológicas e marinhas. Os equipamentos submarinos são instalados no fundo do mar através de embarcações dotadas de Remote Operated Vehicles – ROV, robôs que auxiliam no posicionamento e integridade destes equipamentos.

A instalação de dutos e umbilicais é feita por embarcações do tipo Pipe Laying Support Vessel – PLSV. Estas embarcações transportam os dutos e umbilicais em bobinas ou cestos de forma a viabilizar o lançamento em alto mar e facilitar o carregamento nas bases portuárias.

A instalação de dutos flexíveis e umbilicais consiste no lançamento dos dutos na locação com apoio de tracionadores das embarcações de lançamento que suportam o peso. À medida que a embarcação avança, os dutos e umbilicais são depositados no leito marinho no caminho projetado no arranjo submarino. Após isso, a operação chamada *Pull in* faz a transferência de linha flexível do navio de lançamento para uma UEP (Lima, 2007).

3. Caracterização da operação

Os serviços de construção de arranjo submarino podem ser contratados e gerenciados de duas formas: (i) contrato *lump-sum*, utilizado por grande parte das companhias petrolíferas, no qual o serviço é contratado para um projeto específico, em que a empresa contratada fornece o equipamento e material necessário para a construção do projeto e (ii) diversos contratos, entre eles, o de bases de apoio operacional e de afretamento das embarcações PLSV e aquisição os materiais diretamente com os fabricantes de dutos e umbilicais.

Em função da demanda e características operacionais, a PETROBRAS, no segmento de Exploração e Produção (E&P) executa, preferencialmente, os serviços através da contratação de diversos contratos, sendo responsável pelo gerenciamento de todo o processo.

3.1. Criticidade do item X Complexidade do mercado

Em uma análise baseada na Matriz de Portfólio de Krajlic (1983), a PETROBRAS agrupou os itens de acordo com a complexidade do mercado e a criticidade do item. Para

Complexidade de Mercado foram levados em consideração, entre outros aspectos, o número de fabricantes, demanda mundial, capacidade fabril e possibilidade de fornecimento no mercado nacional. Para a Criticidade do Item foram considerados aspectos como o impacto da falta e a existência de produtos substitutos (Almeida Neto *et al.*, 2009). A Figura 2 mostra o resultado desta análise para alguns bens do segmento E&P, destacando-se a participação de dutos e umbilicais. A partir da Matriz de Portfólio pode-se depreender a importância estratégica dos umbilicais e sobretudo dos dutos nos projetos de exploração e produção submarina de óleo e gás.

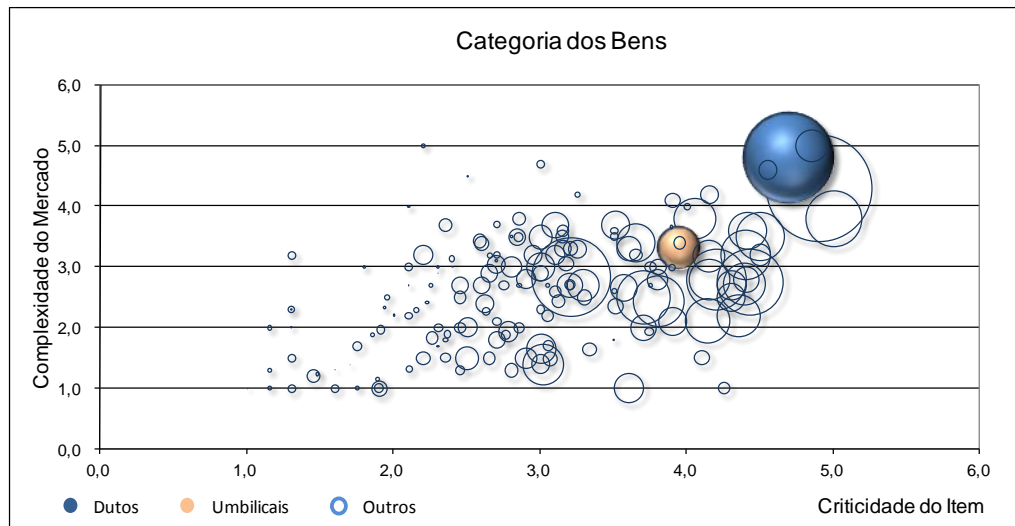


Figura 2 - Matriz de categorização de itens - Bens
Fonte: Almeida Neto *et al.* (2009) – adaptado.

O mercado mundial e nacional de dutos flexíveis e umbilicais é bastante restrito. Atualmente estão em operação seis fábricas de dutos flexíveis, sendo duas localizadas no Brasil, três na Europa e uma na Ásia, com previsão de instalação de mais duas fábricas no Brasil a partir de 2013. As três fábricas de umbilicais que fornecem para a PETROBRAS estão instaladas no Brasil.

Na PETROBRAS, a contratação de dutos e umbilicais é feito através de contratos de longo prazo (*Frame Agreements*) e, para cada projeto, é definido o fornecedor e fábrica, de acordo com as especificações técnicas do produto requerido (principalmente pressão, temperatura e contaminantes), prazo de entrega, preço e disponibilidade da fábrica. A compra se dá através do modelo puxado, onde a produção ocorre de acordo com a demanda.

É importante ressaltar que dutos flexíveis e umbilicais são bens fabricados de acordo com as especificações técnicas requeridas pelos projetos. Em muitos casos não é possível aproveitar estes bens entre os diversos projetos da PETROBRAS.

3.2. Bases de carregamentos

Base de Carregamento de dutos e umbilicais é uma área que atua como um depósito de armazenagem e que possui berço de atracação que possibilite o carregamento dos materiais nas embarcações.

Com o aumento da demanda de instalação de dutos, foi necessário contratar bases de carregamento exclusivas para as operações com embarcações PLSV – Pipe Laying Support Vessel. Até então, os carregamentos eram feitos em portos contratados pela PETROBRAS para as diversas operações com embarcações. As bases de carregamento atuam como centros de distribuição em uma cadeia de suprimentos.

4. Descrição do problema

A partir de 2012, com o início da operação de uma segunda base de carregamento, localizada em Niterói-RJ, será necessário definir previamente, para cada projeto de instalação, para qual base os materiais deverão ser transportados e armazenados antes de serem carregados nas embarcações. A Figura 3 apresenta de forma esquemática o fluxo dos dutos flexíveis e umbilicais, desde a origem nas fábricas até o destino final nos projetos.

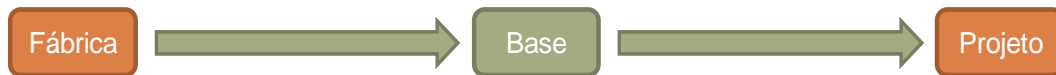


Figura 3 - Fluxo dos dutos e umbilicais
Fonte: Autores

5. Modelo matemático

Para resolver o problema exposto, é proposto um modelo de Programação Estocástica Linear Inteiro Mista. O objetivo do modelo é obter o menor custo total logístico, onde são considerados o custo fixo da base, o custo de transporte das fábricas às bases, o custo do estoque na base, o custo de movimentação das bobinas na base, o custo de transporte das bases até os projetos, a penalidade se houver troca dos dutos flexíveis e umbilicais entre projetos e penalidade por não atendimento da demanda.

O modelo não considera o preço de compra dos dutos flexíveis e umbilicais, apesar de ser relevante na tomada de decisão. Esta informação é conhecida a partir da colocação do pedido no mercado, seja por utilização dos contratos *frame agreement*, ou por contratação spot, que só é feita após definida a especificação técnica dos equipamentos, requerida cada projeto. De fato, o modelo poderá subsidiar negociações com fornecedores para obtenção dos menores custos logísticos.

Apesar do custo fixo da base não interferir no resultado final da minimização, este dado foi incluído na função objetivo para que seja possível avaliar a contratação de novas bases e ainda, apoiar na estruturação dos contratos das bases.

5.1. Índices

O modelo trata dois **Equipamentos** (e): dutos flexíveis e umbilicais, estruturas cilíndricas que são fabricados em vários **Diametros** (d). Estes equipamentos são fabricados em **Fábricas** (f) e enrolados em bobinas de diversos tamanhos, que no modelo são tratados como **TipoBobinas** (r), para serem transportados até as **Bases** de carregamento (b) e dali para os **Projetos** (j, k). Cada projeto está localizado em uma **Bacia** sedimentar (c), com uma distância média até as bases de carregamento. **Mes** (m) e **Ano** (a) são índices para identificação do período analisado e **Cenário** (s) é o índice para identificação do cenário de demanda.

5.2. Parâmetros

O modelo proposto possui 18 parâmetros, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição dos parâmetros do modelo

| Parâmetro | Descrição | Unidade |
|-------------------|---|---------|
| $Dem_{m,e,d,j,s}$ | A demanda é definida em quilômetros para determinado mês, equipamento / diâmetro e projeto. Parâmetro sujeito a incerteza, representada pelos cenários. | Km |
| $CP_{a,f,e}$ | Define a capacidade anual de fabricação de cada equipamento em cada fábrica. | Km |
| $KPB_{d,r}$ | Permite transformar a demanda, originalmente em km, para quantidade de bobinas. | Km/UN |
| $CB_{b,r}$ | Capacidade de estocagem de bobinas em cada base. | UN |
| $EI_{b,e,d,r,j}$ | Estoque inicial de bobinas em cada base. | UN |
| $RMB_{b,r}$ | Limita a quantidade de bobinas transportadas para as bases por tipo | UN |

| Parâmetro | Descrição | Unidade |
|-------------------------|---|---------|
| | de bobina. | |
| CtFB _{f,b} | Custo de transporte da bobina de cada fábrica até cada base. | \$/UN |
| CtBB _{b,c} | Custo médio de navegação da base para a bacia. | \$/UN |
| CtBP _{b,j} | Parâmetro derivado do parâmetro CtBB _{b,c} e calculado no modelo através da equação: $\sum_c CtBB_{b,c} * LP_{j,c}$ | \$/UN |
| CtFxB _b | Custo fixo mensal de operação para cada base. | \$/UN |
| CtVarB _{b,r} | Custo da bobina movimentada por base. | \$/UN |
| CtEst _{b,r} | Custo mensal do estoque da bobina na base. | \$/UN |
| CtTr _{e,d,j,k} | Custo da possível troca de equipamentos entre projetos. | \$ |
| CtP _j | Custo mensal da não instalação dos equipamentos. | \$ |
| LP _{j,c} | Parâmetro binário. Relaciona a bacia em que cada projeto está localizado. | - |
| MA _{m,a} | Parâmetro binário. Relaciona o Ano com o Mês, permitindo agrupamento por ano dos períodos analisados. | - |
| Pr _{e,d} | Parâmetro binário. Relaciona os equipamentos com os diâmetros. | - |
| Prob _s | Define a probabilidade de ocorrência de cada cenário. | % |

5.3. Variáveis

Foi adotada a premissa básica que dutos e umbilicais são fabricados de acordo com as especificações técnicas de cada projeto, não podendo, em muitos casos, serem utilizados em projetos diferentes para os quais foram adquiridos. Caso isto seja possível será associado um custo (penalidade) a esta troca de projetos. A variável de primeiro estágio (**XFBP**_{m,f,b,e,d,j}) representa os contratos de fornecimento de longo prazo. A Tabela 2 apresenta a relação de variáveis do modelo.

Tabela 2 – Descrição das variáveis do modelo

| Variável | Descrição | Unidade | Domínio |
|--------------------------------|---|---------|----------------|
| XFBP _{m,f,b,e,d,j} | Quantidade de equipamento comprado da fábrica, transportado para a base, para atendimento a cada projeto. | Km | R ₊ |
| XTFB _{m,f,b,e,d,r,j} | Variável auxiliar que retorna a quantidade de equipamento comprado por tipo e número de bobinas. É calculada através da expressão: $\sum_r XTFB_{m,f,b,e,d,r,j} * KPB_{d,r} = XFBP_{m,f,b,e,d,j}$ | UN | R ₊ |
| XEst _{m,b,e,d,r,j,s} | Quantidade de bobina, por equipamento e tipo de bobina, mantida em estoque em cada base. | UN | R ₊ |
| XTBP _{m,b,e,d,r,j,s} | Quantidade de bobina transportada da base até o projeto. | UN | R ₊ |
| XMB _{m,b,r,s} | Variável auxiliar que retorna a quantidade de bobina, por tipo, movimentada em cada base. É calculada através da expressão: $\sum_f \sum_e \sum_d \sum_j XTFB_{m,f,b,e,d,r,j} + \sum_e \sum_d \sum_j XTBP_{m,b,e,d,r,j,s}$ | UN | R ₊ |
| XTr _{m,b,e,d,r,j,k,s} | Quantidade de bobinas de equipamentos trocados entre projetos. | UN | R ₊ |

5.4. Função Objetivo

min **WCustoTotal** =

$$\sum_m \sum_b \sum_f \sum_e \sum_d \sum_r \sum_j XTFB_{m,f,b,e,d,r,j} * CtFB_{f,b} + \quad (1a)$$

$$\sum_m \sum_b \sum_e \sum_d \sum_r \sum_j \sum_s XEst_{m,b,e,d,r,j,s} * CtEst_{b,r} * Prob_s + \quad (1b)$$

$$\sum_b \sum_s (CtFx B_b * \sum_m \sum_a MA_{m,a} + \sum_m \sum_r CtVar B_{b,r} * XMB_{b,m,r,s}) * Prob_s + \quad (1c)$$

$$\sum_m \sum_b \sum_j \sum_s \sum_e \sum_d \sum_r XTBP_{m,b,e,d,r,j,s} * CtBP_{b,j} * Prob_s + \quad (1d)$$

$$\sum_m \sum_j \sum_k \sum_s \sum_b \sum_e \sum_d \sum_r XTr_{m,b,e,d,r,j,k,s} * CtTr_{e,d,j,k} * Prob_s + \quad (1e)$$

$$\sum_m \sum_j \sum_s \left(\sum_e \sum_d Dem_{m,e,d,j,s} - \left(\sum_b \sum_e \sum_d \sum_r XTBP_{m,b,e,d,r,j,s} * KPB_{d,r} \right) \right) * CtP_j * Prob_s \quad (1f)$$

Onde:

- (1a) Custo do transporte das fábricas até a base;
- (1b) Custo das bobinas mantidas em estoque
- (1c) Custo de operação em cada base. Inclui as parcelas do custo fixo e do custo variável da base
- (1d) Custo transporte das bases até cada projeto
- (1e) Custo resultante da troca de dutos flexíveis e umbilicais
- (1f) Custo mensal pela não instalação de equipamentos

É importante ressaltar que a expressão (1f) é diretamente impactada pela incerteza da demanda, já que a compra é realizada para a demanda total e os dutos ou umbilicais não são instalados de acordo com o planejamento inicial, permanecendo parte deles em estoque.

5.5. Restrições

$$\sum_d \sum_m \sum_b \sum_j XFBP_{m,f,b,e,d,j} * MA_{m,a} \leq CP_{a,f,e}, \quad \forall a, f, e \quad (2)$$

$$\sum_m \sum_f \sum_b XFBP_{m,f,b,e,d,j} \geq \sum_m Dem_{m,e,d,j,s}, \quad \forall e, d, j, s \quad (3)$$

$$\sum_b \sum_r XTBP_{m,b,e,d,r,j,s} * KPB_{d,r} = Dem_{m,e,d,j,s}, \quad \forall m, e, d, j, s \quad (4)$$

Se primeiro mês então (5)

$$EI_{b,e,d,r,j} + \sum_f XTFB_{m,f,b,e,d,r,j} + \sum_k XTr_{m,b,e,d,r,k,j,s} = XEst_{m,b,e,d,r,j,s} + XTBP_{m,b,e,d,r,j,s} + \sum_k XTr_{m,b,e,d,r,j,k,s}, \quad \forall m, b, e, d, r, j, s$$

senão

$$XEst_{m-1,b,e,d,r,j,s} + \sum_f XTFB_{m,f,b,e,d,r,j} + \sum_k XTr_{m,b,e,d,r,k,j,s} =$$

$$XEst_{m,b,e,d,r,j,s} + XTBP_{m,b,e,d,r,j,s} + \sum_k XTr_{m,b,e,d,r,j,k,s}, \quad \forall m, b, e, d, r, j, s$$

fimse

$$\sum_e \sum_d \sum_j XEst_{m,b,e,d,r,j,s} \leq CB_{b,r}, \quad \forall m, b, r, s \quad (6)$$

$$\sum_f \sum_e \sum_d \sum_j XTFB_{m,f,b,e,d,r,j} \leq CB_{b,r} * RMB_{b,r}, \quad \forall m, b, r \quad (7)$$

Onde,

| | |
|-----|--|
| (2) | Limita a compra à capacidade fabril anual de cada fábrica. |
| (3) | A compra é realizada de forma que toda a demanda seja atendida. |
| (4) | O transporte das bases até os projetos é realizado na quantidade exata da demanda. |
| (5) | Balço nas bases. |
| (6) | Limita o estoque nas bases à capacidade de cada base e para cada tipo e bobina. |
| (7) | Limita a quantidade de bobinas por tipo, garantindo que não sejam tratadas apenas bobinas de maior diâmetro. |

6. Resultados

O modelo foi implementado no software AIMMS versão 3.10, utilizando o otimizador CPLEX 12.2, gerou 396.933 variáveis e 308.572 restrições, com tempo de processamento de 279,52 segundos em processador Intel Pentium Dual 2,00 GHz, memória RAM de 3GB.

Os resultados apresentados neste artigo foram gerados a partir dos seguintes parâmetros: (i) duas bases de carregamento, (ii) dois equipamentos, (iii) três diâmetros para dutos flexíveis e um diâmetro para umbilical, (iv) seis tipos de bobinas, (v) três bacias, (vi) 954 demandas distintas e (vii) três cenários (cenários base, - 2,5% do Intervalo de confiança e - 5% do Intervalo de confiança, calculado com base na correlação linear entre histórico de compras e produção de petróleo).

Ao se analisar o modelo estocástico é importante calcular alguns indicadores, que permitem avaliar os ganhos pelo tratamento das incertezas. Birne (1982) apresenta um estudo no qual demonstra os benefícios da utilização do modelo estocástico em relação à solução do mesmo problema de forma determinística.

- Wait and See – WS – Solução ótima considerando o resultado de cada cenário analisado, de forma independente, ou seja, há certeza sobre a realização de cada cenário. O valor é calculado através da média ponderada entre o resultado final obtido no modelo para cada cenário e a probabilidade do cenário ocorrer.

$$WS = 246.478$$

- Expected Value of Perfect Information – EVPI – Quantifica o valor da incerteza. É calculado subtraindo-se o resultado do Wait and See, calculado acima, do valor da solução estocástica.

$$EVPI = 19.100$$

- Value of Stochastic Solution – VSS – Mede o ganho na utilização do modelo estocástico. É calculado pela diferença entre o valor da solução estocástica e da média ponderada das soluções de cada cenário estocástico.

$$VSS = 17.135$$

Com base nos resultados acima, é possível afirmar que a utilização do modelo estocástico compensa. O ganho (VSS) calculado, representa 7% do valor relativo ao processo Wait and See e é muito representativo em termos absolutos.

É importante destacar que, apesar de toda a demanda ser atendida, em todos os cenários, o modelo indica a permanência de estoque nas bases ao final do período analisado. Isto se deve ao fato de que a variável de primeiro estágio é referente ao processo de compra, o que é feito com base em uma demanda que atenda a qualquer cenário. Com isto, para os cenários de demanda mais baixa, a quantidade comprada é maior que a demanda, mantendo dutos flexíveis e umbilicais em estoque. A Figura 4 apresenta o estoque baseado na demanda média.

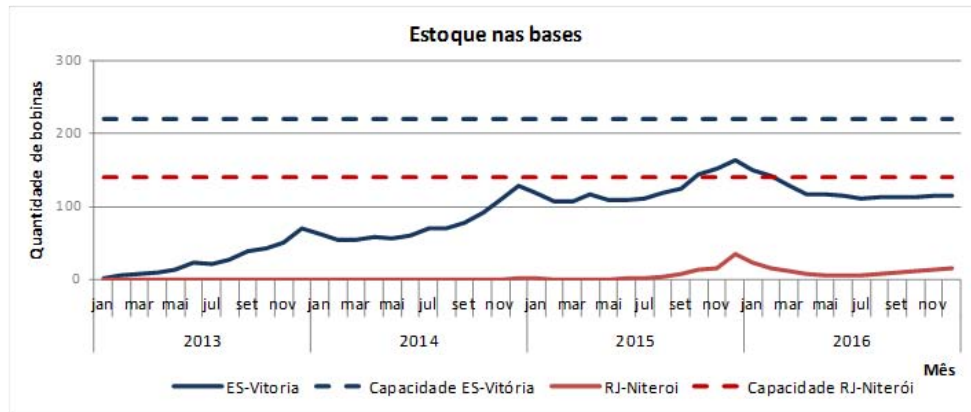


Figura 4 - Estoque nas bases - modelo estocástico

A demanda de 2013 gerou necessidade de adquirir 39,5% dos dutos flexíveis de fábricas localizadas na Europa. A Tabela 1 mostra os percentuais adquiridos em cada região. Como durante o período analisado há aumento da capacidade fabril brasileira, o percentual de importação se reduz nos dois primeiros anos, voltando a aumentar após a estabilização da capacidade e aumento da demanda.

Tabela 1 - Aquisição de dutos por região

| Local | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | Total geral |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| Brasil | 60,50% | 71,01% | 73,92% | 69,18% | 69,05% |
| Europa | 39,50% | 28,99% | 26,08% | 30,82% | 30,95% |

A capacidade fabril tem um alto impacto no resultado final. Outras empresas de petróleo também estão realizando investimentos no Brasil, o que pode levar a percentuais menores, destinados à PETROBRAS, da capacidade de produção. A Figura 5 mostra a relação entre o percentual da capacidade de produção de dutos no Brasil, disponível para a PETROBRAS, e o custo logístico total.

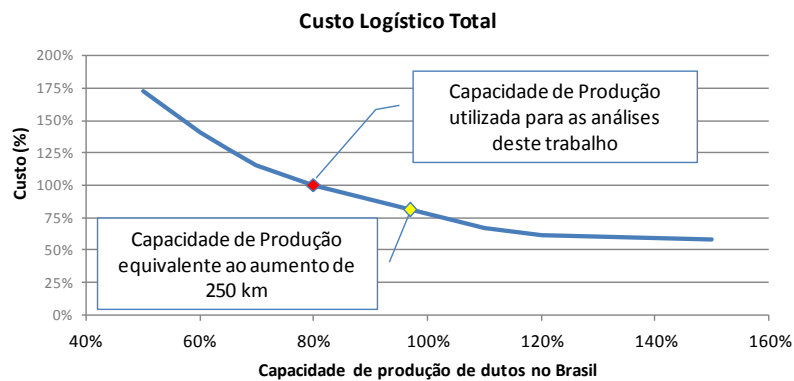


Figura 5 - Capacidade de produção no Brasil e custo logístico

Ainda em relação à capacidade de produção, feita uma análise em relação à compra no mercado nacional. Este é um aspecto importante, não só pelo desenvolvimento da indústria

brasileira, como também para garantir o atendimento aos contratos de concessão assinados com a Agência Nacional do Petróleo – ANP, que incluem cláusulas de conteúdo local, com percentuais mínimos a serem atendidos. A Figura 6 mostra o impacto positivo que o aumento da capacidade fabril traz à possibilidade de adquirir os dutos flexíveis no Brasil. O eixo das abscissas apresenta a produção disponível para a PETROBRAS em relação à capacidade de produção de dutos no Brasil. Atualmente, apenas 80% da capacidade de produção é destinada ao atendimento da demanda da PETROBRAS.

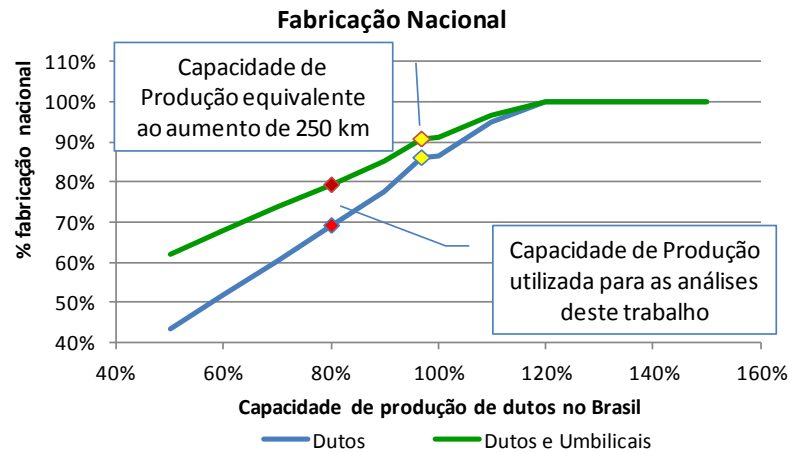


Figura 6 - Capacidade de produção e compra de dutos no Brasil

A utilização do modelo permitiu também analisar as capacidades das bases. Este é um ponto importante de análise, haja vista que a decisão para contratação de uma nova base de carregamento, ou expansão das bases atualmente contratadas, deve ser feita com antecedência suficiente para assegurar a continuidade operacional.

Para realização desta análise, foram feitos alguns ajustes nos parâmetros inicialmente adotados. Primeiro, foram tratados os cenários de demanda projetada, demanda projetada menos intervalo de confiança de 5% e demanda projetada menos intervalo de confiança de 10%, calculados com base na correlação linear entre histórico de compras e produção de petróleo. Com isto foi possível garantir uma diferença maior entre cada nível de demanda. Segundo, as capacidades das bases foram definidas como ilimitadas, de forma que o modelo não restringisse a utilização. O resultado deste experimento pode ser observado na Figura 7, onde ao final de 2014 e início de 2015, as capacidades das bases são atingidas. Neste caso há uma indicação para expansão das bases atuais ou construção de novas bases a partir deste período. O estoque gerado nas bases foram calculados a partir da demanda média do período.

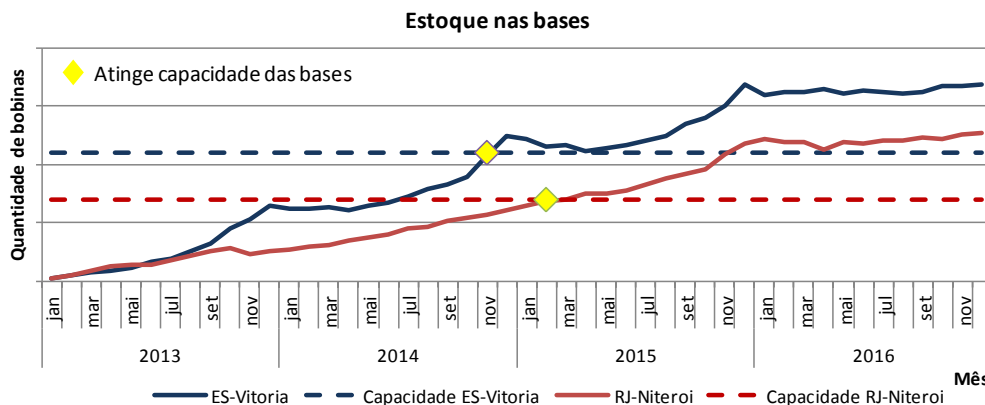


Figura 7 - Estoque x capacidade das bases

7. Conclusões

A utilização do modelo permitiu identificar a melhor opção de aquisição e distribuição da demanda, indicando a origem (fábrica) e a base de carregamento a ser utilizada em cada projeto. Foi observado que em torno de 60% da demanda deverá ser atendida pela base de carregamento localizada no estado do Rio de Janeiro e que as capacidades das bases atuais seriam atingidas em pouco mais de dois anos, para a demanda projetada com uma incerteza média de 20%.

É possível também utilizar o modelo para estudar a estruturação de novos contratos de bases de carregamento, permitindo simulações com diferentes demandas, incertezas e prazos contratuais.

O estudo mostrou ainda uma grande oportunidade para os fabricantes de dutos flexíveis em investir no Brasil. Apesar de haver previsão de aumento na capacidade fabril nacional para os próximos dois anos, ainda há uma parcela significativa na importação de dutos.

Referências

- Almeida Neto, E.; Alonso, P.S.R.; Rossetto Filho, I.J.; Serpa, F.G.** (2009) Pre-Salt Cluster Long Term Supply Strategy. *Offshore Technology Conference*. OTC 20100.
- Beamon, B.M.** (1998), Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods *International Journal of Production Economics*, Vol. 55, No. 3, 281-294.
- Bender, T., Hennes, H., Kalcsics, J., Melo, M. T., Nickel, S.** (2001) Location Software and Interface with GIS and Supply Chain Management, *Berichte des Fraunhofer ITWM*, Nr. 23.
- Birne, J.R.**, (1982) The value of the Stochastic Solution in Stochastic Linear Programs with Fixed Recourse, *Mathematical Programming*, 24, 314-325.
- Geoffrion, A.M. e Graves, G.W.**, (1974), Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition, *Management Science*, Vol. 20, no. 5, Theory Series, Mathematical Programming. 822-844.
- Guo, B.; Song, S; Chacko, J; Ghalambor, A.** Offshore Pipelines. Elsevier, Estados Unidos, 2005.
- Kraljic, P.** (1983), Purchasing Must Become Supply Management. *Harvard Business Review*. p.109-117.
- Klose, A., Drexl, A.** (2005), Facility location models for distribution system design, *European Journal of Operational Research* 162 4–29
- Lababidi, H. M. S., Ahmed, M. A., Alatiqi, I.M. e Al-Enzi, A.F.** (2004), Optimizing the Supply Chain of a Petrochemical Company under Uncertain Operating and Economic Conditions, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 63-73.
- Labanca, E.L.** (2005), Metodologia para a Seleção de Arranjos Submarinos baseada na Eficiência Operacional. *Dissertação de Mestrado*, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Lima, H.F.** (2007), Metodologia para a Tomada de Decisão no Projeto de Sistemas Submarinos de Produção de Óleo e Gás. *Dissertação de Mestrado*, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Melo M.T., Nickel, S. e Saldanha-da-Gama, F.** (2009) Facility location and supply chain management – A review, *European Journal of Operational Research* 196 401–412
- Mula, J., Peidro, D., Diaz-Madroneiro, M., Vicens,E.** (2010), Mathematical programming models for supply chain production and transport planning, *European Journal of Operational Research* 204 377–390
- PETROBRAS.** Plano de Negócios 2011-2015. – Disponível em <http://www.PETROBRAS.com.br/pt/quem-somos/estrategia-corporativa/downloads/pdf/plano-negocios.pdf>. Acesso em 03.01.2012, 2011.
- Souza, A.R.** (2008), Resistência Estrutural de Dutos Sanduíche sob Pressão Externa, Flexão Longitudinal e Carregamento Térmico. *Dissertação de Mestrado*, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Underwood, N.; Odina, L.; Hansen, K.; Lassila, H.** (2008) Integrated Subsea Design – An Informed and Practical Approach. *Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. OMAE 2008, Estoril, Portugal.