# DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS CRÍTICOS DA CADEIA DE SUPRIMENTO DA PERFURAÇÃO E COMPLETAÇÃO DE POÇOS

Filipe Ferreira Mazzini
PETROBRAS
Av. Nilo Peçanha 151, Centro, Rio de Janeiro - RJ. CEP 20020-100
filipemazzini@petrobra.com.br

Ricardo de Melo e Silva Accioly
PETROBRAS
Av. Republica do Chile 65, Centro Rio de Janeiro – RJ. CEP 20031-912
raccioly@petrobras.com.br

Ricardo Vitor J. C. Vasconcelos
PETROBRAS
Av. Nilo Peçanha 151, Centro, Rio de Janeiro - RJ. CEP 20020-100
ricardovitor@petrobra.com.br

## RESUMO

As atividades de desenvolvimento de um campo de petróleo apresentam um complexo mix de recursos e serviços cujas interdependências tornam a gestão deste processo extremamente importante. No âmbito da construção dos poços um dos elementos fundamentais são as sondas de perfuração, entretanto, para que elas possam cumprir efetivamente sua função é necessário um amplo espectro de equipamentos, matérias e serviços, que devem ser enviados para elas. Este trabalho trata do dimensionamento dos equipamentos que suportam as atividades com sonda. O problema é formulado como um problema de programação matemática que é resolvido com a utilização de um solver comercial. Os resultados obtidos sugerem uma quebra de paradigma para a empresa e uma redução significativa de custos.

**PALAVRAS CHAVE.** Exploração e Produção de Petróleo. Dimensionamento Recursos. Sequenciamento de Projetos.

## ABSTRACT

Field development activities comprise a complex mix of resources and services that are interconnected in a way that their management is extremely important. In well construction program one of the key elements are the rigs, but these rigs can only effectively perform their jobs with a huge amount of equipments, materials and services that need to be sent to them. This paper show a methodology developed to calculate the optimum number of these supporting elements. The problem is formulated as a mathematical programming problem which is solved using a commercial pack. The results lead to a change of mind about this problem and to a considerable cost reduction for the company.

**KEYWORDS.** Exploration and Production. Resource Planning. Project Scheduling.

## Introdução

As atividades de desenvolvimento de um campo de petróleo apresentam um complexo mix de recursos e serviços cujas interdependências tornam a gestão deste processo extremamente importante. No âmbito da construção dos poços um dos recursos fundamentais são as sondas de perfuração, entretanto, para que elas possam cumprir efetivamente sua função é necessário um amplo espectro de equipamentos, materiais e serviços, que vamos denominar daqui em diante de recursos críticos.

Este problema é ampliado pela existência de dezenas de projetos de desenvolvimento simultâneos, que disputam os recursos entre si e com os projetos exploratórios. Além da simultaneidade, os projetos ocorrem em diferentes áreas da costa marítima do Brasil, sendo que, mesmo considerando a proximidade das Bacias Petrolíferas de Santos, Campos e do Espírito Santo, vide figura 1, os deslocamentos destes recursos críticos consomem um tempo precioso nos cronogramas de atendimento.

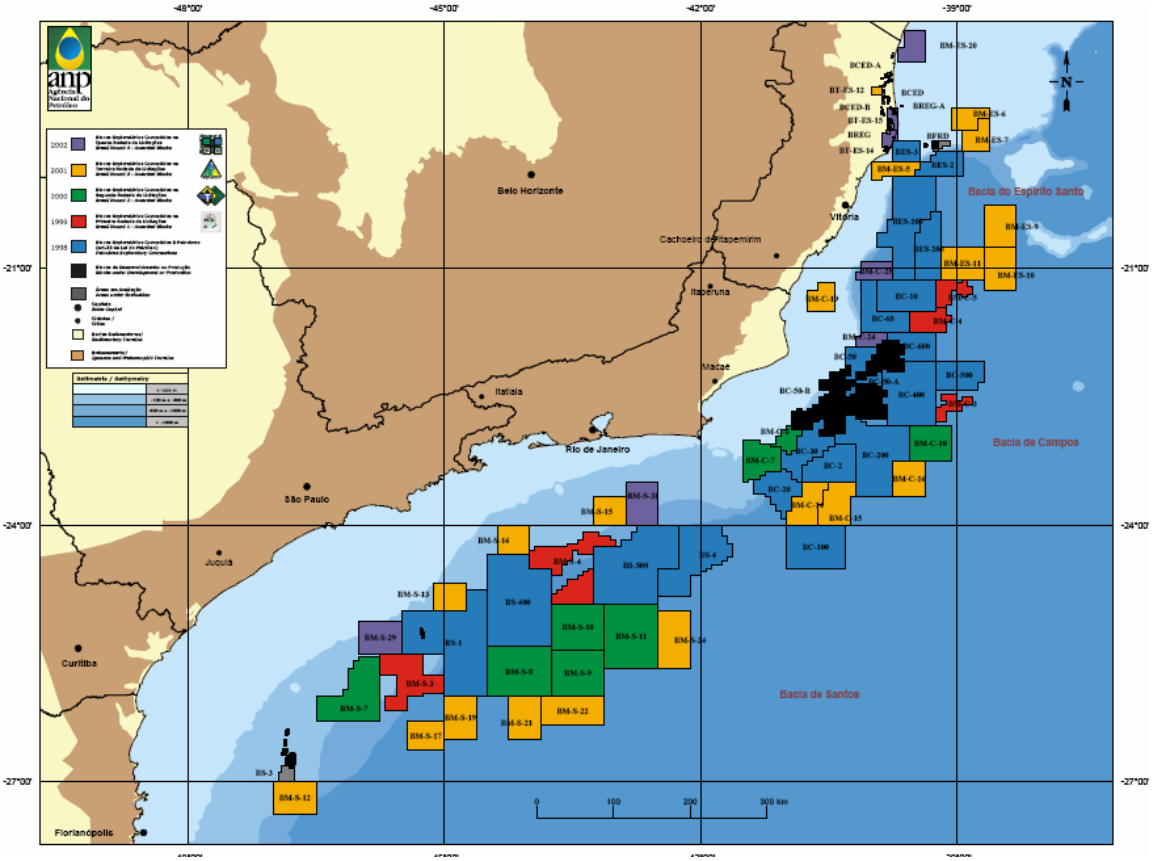

Figura 1: Bacias de Santos, Campos e Espírito Santo (Fonte ANP).

Na indústria do petróleo, especialmente na *offshore*, os custos dos recursos críticos representam somas vultosas que requerem muita análise e justificativa na sua compra ou contratação. As sondas de perfuração estão no topo da cadeia de importância e conseqüentemente dos custos. Algumas destas sondas, de última geração tecnológica, adequadas a trabalhar em águas profundas e com capacidade de perfurar grandes trechos de rocha, podem chegar a custar cerca de 600 mil US$/dia, com um tempo mínimo de contratação de 1 ano.

Apesar deste custo elevado a sonda depende de um conjunto de recursos críticos para executar suas atividades. Individualmente estes recursos não têm o mesmo vulto do custo de uma sonda, mas quando pensamos num pool de recursos as somas podem ultrapassar facilmente o custo de uma única sonda. Por outro lado a ausência destes recursos pode estar deixando parada

não apenas uma sonda, mas várias, além de impactar todas as atividades subseqüentes, representando um verdadeiro efeito dominó, cujas conseqüências podem causar perdas significativas na rentabilidade de um projeto.

Isto torna extremante importante um dimensionamento adequado dos recursos críticos de forma a minimizar o custo total das operações em poços. Este trabalho vai tratar de uma solução desenvolvida para este fim e que está sendo utilizada pela Petrobras para definir o nível de atendimento destes recursos críticos.

O texto é organizado da seguinte maneira. A seção 2 apresenta uma revisão dos problemas de logística relacionados às atividades de exploração, perfuração e completação de poços. Na seqüência apresenta a descrição do problema de dimensionamento de recursos críticos. A seção 3 traz a modelagem matemática proposta para o problema tratado. A seção 4 apresenta os resultados computacionais obtidos para um estudo de caso proposto a partir de dados reais da Petrobras. E por fim, a seção 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

## 2. Descrição do Problema

As sondas são consideradas pela empresa o principal recurso crítico nas operações de exploração e de desenvolvimento de campos. Desta maneira, adota-se como premissa que o seu dimensionamento e a sua alocação devem ser realizados independentemente dos demais recursos críticos.

O dimensionamento de sondas e o seqüenciamento de projetos de perfuração e exploração com alocação de sondas são dois problemas de pesquisa operacional. O dimensionamento de sondas geralmente é abordado como um problema de simulação (Shyshou 2010). O seqüenciamento de projetos com restrição de recursos é usualmente encontrado na literatura como um problema de programação matemática. Blazewicz (1991) e Mazzini (2007) apresentam formulações de programação inteira para este problema. Importante ressaltar que nestes trabalhos são considerados múltiplos projetos e o objetivo é obter a melhor sequência de projetos que minimize o tempo total da carteira. Como se trata de um problema de complexidade não polinomial e de difícil resolução por pacotes como CPLEX, as abordagens mais encontradas consistem na utilização de algoritmos não exatos, heurísticas e meta heurísticas como algoritmo genético e pesquisa tabu. Vasconcellos (2006) e Wall (1996) propõe a utilização de algoritmo genético para este problema.

A Petrobras desenvolveu um trabalho utilizando programação por restrições para tratar o problema de seqüenciamento de projetos de perfuração e exploração de campos de petróleo com a alocação de sondas. Ver Lazzarine (2008). Os resultados deste modelo servem como orientação para as reuniões gerenciais onde as sondas são compartilhadas entre as unidades de negócio da empresa.

Uma vez definido o quantitativo de sondas e o seqüenciamento de projetos resta o problema de dimensionamento de recursos críticos necessários nas sondas para a realização das atividades de exploração, perfuração, completação e restauração de poços. O foco deste trabalho são os equipamentos. Estes podem ser contratados por períodos maiores ou iguais a um ano. A maioria dos contratos apresenta um custo de disponibilidade e podem também apresentar um custo por operação. O planejamento da contratação destes equipamentos deve ser feito com uma antecedência mínima que pode chegar para alguns equipamentos a um ano. A lista de equipamentos críticos tem aproximadamente 50 itens incluindo equipamentos como *drill pipe*, coluna de assentamento, motor de alto torque, chave hidráulica, unidade de perfilagem, medidor de inclinação, entre outros. Os materiais de consumo não são considerados justamente porque são utilizados uma única vez e não são objetos de contratação e sim de aquisição. Outro ponto é a facilidade de aquisição dos mesmos.

O dimensionamento dos equipamentos críticos tem como objetivo o atendimento das atividades previstas no cronograma de sondas da empresa. Este cronograma reúne todos os projetos de exploração e desenvolvimento de poços da região sul e sudeste da Petrobras. Cada

atividade de poço requer um grupo específico de equipamentos que deve estar disponível na sonda na data prevista de início da atividade. A não disponibilidade de um único equipamento previsto para a atividade ocasiona o atraso da mesma com repercussão em atividades do mesmo projeto e atividades de outros projetos que também estão programados naquela sonda.

O foco deste trabalho é econômico, buscando minimizar os custos de contratação de equipamentos. Entretanto, o sub dimensionamento dos equipamentos causado pela redução dos custos de contratação pode gerar muitos dias de atraso no cronograma. Um dia de atraso em uma atividade de poço significa um dia de sonda parada, cujo valor da diária é muito alto. Portando, o dimensionamento de equipamentos críticos deve buscar minimizar o custo de contratação de equipamentos somado ao custo referente às diárias de sondas paradas.

Neste trabalho, a seqüência de projetos do cronograma não é alterada de maneira a respeitar o seqüenciamento realizado na etapa anterior. O que é permitido é atrasar as atividades de forma a acomodar a indisponibilidade de algum equipamento. Vários trabalhos na literatura abordam o problema de nivelamento de atividades como os trabalhos apresentados por Yamshita (2007), Demeulemeester (1992), Christofides (1987) e Patterson (1984). A descrição mais usual é dada por seqüenciamento de projeto com restrições de recursos. Importante ressaltar que nestes trabalhos apenas um projeto é considerado e o objetivo é encontrar novas datas para as atividades que respeitem as restrições de recursos e minimizem o tempo total do projeto.

Um indicador de nível de serviço é definido de forma a avaliar o percentual de projetos realizados na data prevista em relação a todos os projetos planejados. A expectativa é que os resultados apontem para um dimensionamento que forneça um nível de serviço próximo a 95%.

## 3. Modelagem Matemática

O Problema de dimensionamento de equipamentos críticos pode ser formulado como um modelo de programação combinatória. Seja *A* o conjunto de atividades, *D* o conjunto de dias, *E* o conjunto de equipamentos e *S* o conjunto de Sondas. $A^s$ é o subconjunto de *A* que inclui as atividades da sonda $s$. $A_a^{ti}$, $A_a^{ii}$, $A_a^{tt}$ e $A_a^{it}$ são subconjuntos de A e contêm os sucessores de $a$ para as relações dos tipos término-início, início-início, término-término e início-término respectivamente. $D^a$ é o subconjunto de *D* formado pelos dias em que a atividade $a$ pode ser iniciada.

A duração da atividade $a$ é dada por $\delta_a$, seu início previsto é dado por $\lambda_a$ e o retardo em relação ao seu predecessor $a_2$ é dado por $\varepsilon_{a_2,a}$. A demanda da atividade $a$ pelo equipamento $e$ no dia $d$ é dada por $\rho_{a,e,d}$. O custo diário de disponibilidade do equipamento $e$ é dado por $\alpha_e$. O custo diário de disponibilidade da sonda $s$ é dado por $\eta_s$. O valor máximo de atraso permitido por sonda é dado por $\nu$. O número de dias do horizonte de planejamento é dado por $\Delta$.

O parâmetro auxiliar $\beta_{d_3,d_2,a,d}$ é um binário utilizado com o objetivo de transladar o valor da demanda no tempo conforme o atraso da atividade. Considere por exemplo a atividade $a$ prevista para ser iniciada no dia $d=1$. Caso ela atrase 2 dias e seja iniciada no dia $d=3$, em $d_2=10$, por exemplo, $\beta_{8,10,e,3}=1$ e $\beta_{d_3,10,a,3}=0$ para todos os demais valores de $d_3$. Isto significa que o valor de demanda utilizado no dia $d_2=10$ será o valor previsto para 2 dias antes, ou seja, $d_3=8$. Para cada dia $d_2$ do horizonte, apenas uma tupla $(d,d_3)$ terá $\beta_{d_3,d_2,a,d}=1$. Para as demais tuplas $\beta_{d_3,d_2,a,d}=0$.

As variáveis binárias $x_{a,d}$ definem o dia $d$ em que a atividade $a$ tem início. Elas estão definidas para $a \in A$ e $d \in D^a$. O subconjunto $D^a$ é formado pelo intervalo $[\lambda_a, \lambda_a + \nu]$. As variáveis inteiras $y_e$ e $z_s$ representam a quantidade de cada equipamento $e$ a contratar e o atraso de cada sonda $s$ respectivamente.

O modelo é formulado como se segue:

$$Min \sum_{e \in E} y_e \times \alpha_e \times \Delta + \sum_{s \in S} z_s \times \eta_s \tag{1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{d \in D^a} x_{ad} = 1, \forall a \in A \tag{2}$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{d \in D} \sum_{d_3 \in D} x_{ad} \times \rho_{aed_3} \times \beta_{d_3 d_2 ad} \leq y_e, \forall e \in E, d_2 \in D \tag{3}$$

$$z_s \geq \sum_{d \in D} x_{ad} \times d - \lambda_a, \forall s \in S, a \in A^s \tag{4}$$

$$\sum_{d \in D} x_{a_2 d} \times d \geq \sum_{d \in D} x_{ad} \times d + \delta_a + \varepsilon_{aa_2}, \forall a \in A, a_2 \in A_a^{ti} \tag{5}$$

$$\sum_{d \in D} x_{a_2 d} \times d \geq \sum_{d \in D} x_{ad} \times d + \varepsilon_{aa_2}, \forall a \in A, a_2 \in A_a^{ii} \tag{6}$$

$$\sum_{d \in D} x_{a_2 d} \times d + \delta_{a_2} \geq \sum_{d \in D} x_{a,d} \times d + \delta_a + \varepsilon_{aa_2}, \forall a \in A, a_2 \in A_a^{tt} \tag{7}$$

$$\sum_{d \in D} x_{a_2 d} \times d + \delta_{a_2} \geq \sum_{d \in D} x_{ad} \times d + \varepsilon_{aa_2}, \forall a \in A, a_2 \in A_a^{it} \tag{8}$$

A função objetivo (1) é composta por duas parcelas. A primeira é formada pelos custos de contratação de equipamentos e a segunda pelos custos correspondentes ao atraso das sondas. O conjunto de restrições (2) garante que toda atividade é iniciada. O conjunto de restrições (3) garante que a alocação de equipamentos em cada dia do horizonte de planejamento não pode ultrapassar a quantidade de equipamentos contratados. O conjunto (4) define o atraso de cada sonda em função do atraso para cada atividade da sonda. Os conjuntos de restrições (5), (6), (7) e (8) estabelecem as relações de precedência dos tipos término-início, início-início, término-término e início-término respectivamente.

## 4. Resultados Computacionais

Para avaliar o modelo proposto foi criado um caso de teste a partir do cronograma de sondas para o ano de 2010. O cronograma de sondas da Petrobras foi elaborado utilizando a ferramenta de gerenciamento de projetos Primavera. A extração dos dados foi realizada a partir do módulo Enterprise Report Database do Primavera. Este módulo extrai os dados do cronograma para tabelas Oracle.

Para o ano de 2010 foram extraídos do cronograma 245 projetos com 2166 atividades. Para executar estas atividades estão planejadas 58 sondas e 43 tipos de equipamentos. Na elaboração do cronograma são criadas atividades de logística como embarque e desembarque para tornar indisponíveis os equipamentos em trânsito. Considerando estas atividades o cronograma teria aproximadamente 10.000 atividades. Para reduzir o tamanho do modelo, estas atividades foram excluídas e os equipamentos associados a elas foram associados às atividades de poço que demandavam estes equipamentos. Desta maneira preservou-se a ocupação dos equipamentos nos períodos previstos.

O modelo apresentado foi desenvolvido em AIMMS 3.10 e o solver utilizado foi o CPLEX 12.1. Foram geradas 8.509 restrições e 26.343 variáveis. As corridas foram realizadas em uma estação de trabalho Dell Precision T7400 com processador Intel Xeon X5492 de quatro núcleos a 3.4 GHz e 16GB de RAM. O tempo médio para obtenção de uma solução com gap máximo de 1% foi de aproximadamente 1h. O CPLEX foi configurado para processamento paralelo com 4 núcleos.

O valor utilizado para o atraso máximo de sonda foi $\nu = 10$. Um atraso para cada sonda maior do que este não é desejável, sendo na realidade inaceitável. Testes com valores de atraso para $\nu = 15$ e $\nu = 20$ mostraram que a diferença de resultados é inferior a 1%, o que prova a otimalidade para a premissa de $\nu = 10$. Para os testes com $\nu = 20$ o tempo médio para obtenção do resultado a um gap de 1% foi de 3 dias.

Os resultados para este caso de teste sugerem um conjunto de equipamentos disponibilizados por um período de um ano a um custo de US$ 640,4 milhões gerando um nível de serviço de 95,4%. Os projetos atendidos fora do prazo contabilizam um atraso de 79 dias distribuídos em 14 das 49 sondas planejadas. O custo deste atraso é de US$ 22,5 milhões o que leva a um custo total de US$ 662,9 milhões.

O paradigma existente na empresa é de que os custos de sonda são muito superiores aos custos de equipamentos e que por isso todos acreditam que o dimensionamento de equipamentos deve ser tal que garanta 100% de nível de serviço. Para o caso em questão, o atendimento a 100% dos projetos no prazo previsto representa um custo de US$ 704,1 milhões. Isto significa um custo adicional ao sugerido pelo modelo de US$ 41,2 milhões.

O gráfico da Figura (2) foi construído a partir do modelo proposto adicionando-se a ele uma restrição que limita o custo de equipamentos. Para pontos à esquerda do ponto de mínimo a restrição (9) impõe um custo de equipamentos superior ao ótimo. Para pontos à direita do ponto de mínimo a restrição (10) impõe um custo de equipamento inferior ao ótimo. Analisando o gráfico e seus dados dispostos na Tabela (1) é possível mostrar ao tomador de decisão que o ótimo deste problema não é contratar os equipamentos para 100% de nível de serviço. Observando os pontos á direita do ótimo é possível perceber que o custo adicional com equipamentos ao incrementar o nível de serviço não é compensado pela redução do custo de atraso. Quando se olha para o ponto à esquerda se percebe que o custo de atraso cresce numa taxa muito superior à redução do custo de equipamentos que se consegue ao reduzir o nível de serviço.

$$\sum_{e \in E} y_e \times \alpha_e \times \Delta \geq \sum_{e \in E} y_e^* \times \alpha_e \times \Delta \qquad (9)$$

$$\sum_{e \in E} y_e \times \alpha_e \times \Delta \leq \sum_{e \in E} y_e^* \times \alpha_e \times \Delta \qquad (10)$$

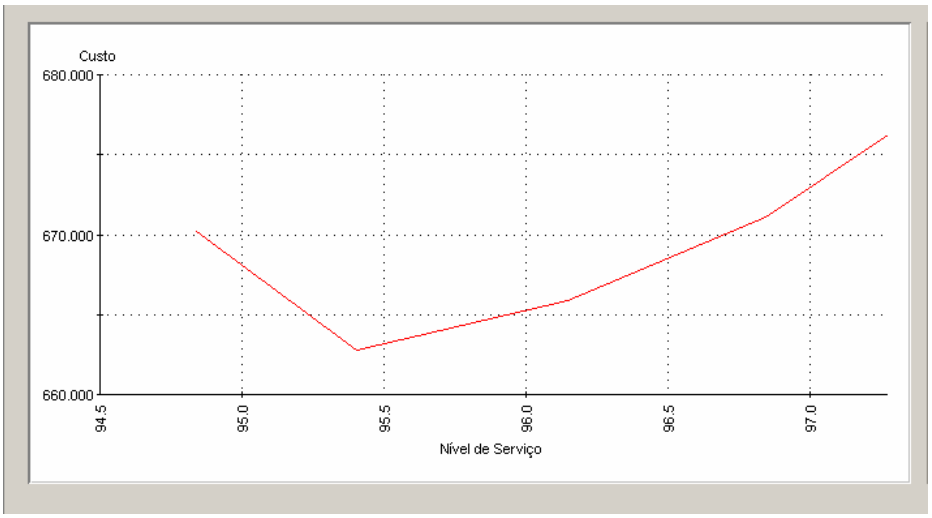


Figura 2 – Valor da FO x Nível de Serviço

| Nível Serviço | Custo Recursos | Custo Sonda Parada | Custo Total |
|---|---|---|---|
| 94.84 | 630.422 | 39.765 | 670.188 |
| **95.41** | **640.280** | **22.489** | **662.769** |
| 96.15 | 650.012 | 15.857 | 665.869 |
| 96.84 | 659.489 | 11.575 | 671.064 |
| 97.28 | 669.093 | 7.184 | 676.277 |

Tabela 1 - Valor da FO x Nível de Serviço

Os ganhos financeiros de US$ 41,2 milhões sugeridos se referem aos ganhos que podem ser obtidos ao se adotar a solução ótima em detrimento da adoção da solução que viabiliza um nível de serviço de 100%. Outra forma de avaliar a possibilidade de ganhos financeiros consiste na comparação do conjunto ótimo de equipamentos críticos proposto com o conjunto de equipamentos disponíveis hoje na empresa. Ao contrário das expectativas, a análise de cada equipamento mostra que alguns equipamentos estão superdimensionados embora outros estejam subdimensionados. Esta situação leva a um custo superior ao ótimo e ao mesmo tempo a um nível de serviço inferior ao ótimo. Análises preliminares dos dados indicam que o ganho possível com a readequação dos quantitativos é ainda maior que aquele sugerido na comparação da solução ótima com a solução de 100% de nível de serviço.

## 5. Conclusão

Existem três problemas de grande impacto financeiro na área de logística aplicada ao desenvolvimento de campos de petróleo. Estes problemas consistem no dimensionamento de sondas, no seqüenciamento dos projetos de exploração, perfuração e completação com restrição de sondas e no dimensionamento de equipamentos críticos que são embarcados nas sondas para suas atividades de poço. Para estes três problemas existem abordagens de pesquisa operacional. Este trabalho abordou o último destes três problemas.

Como na maioria dos problemas de dimensionamento, há um *tradeoff* na avaliação de custos quando se busca dimensionar equipamentos críticos. Quanto menores os gastos com a contratação de equipamentos, maiores são os gastos com diárias de sonda parada. Existe um ponto de equilíbrio onde estes custos levam a um mínimo. Para obtenção deste ponto foi proposto

um modelo de programação matemática com variáveis binárias e inteiras. Para validar o modelo foram realizados testes a partir de um estudo de caso com dados reais obtidos do cronograma de projetos de campos das regiões sul e sudeste.

Os resultados computacionais indicam que a solução ótima equivale a um nível de serviço em torno de 95%. Este resultado contrapõe a expectativa de que a estratégia de custo ótimo para empresa é ter 100% de equipamentos contratados. Os ganhos sugeridos pela solução apontam para um valor de US$ 41,2 milhões/ano. Ao comparar a solução ótima com os equipamentos disponíveis hoje na empresa é possível obter uma redução de custo ainda maior ao se ajustar as quantidades dos equipamentos ao sugerido pela solução ótima.

Os próximos passos deste trabalho incluem uma análise de robustez da solução proposta. Para isso pretende-se gerar cronogramas alternativos a partir da perturbação do cronograma original. Esta perturbação será realizada nas durações das atividades simulando atrasos que normalmente acontecem. Para perturbar as atividades serão usadas curvas de distribuição adequadas a cada tipo de atividade, de acordo com dados históricos de atrasos.

Com um modelo de programação matemática mais simples é possível definir o nível de serviço máximo alcançado para cada um dos cronogramas com o conjunto de equipamentos sugeridos pela solução. A partir disto tem-se um histograma para o nível de serviço de onde podem ser tirados vários indicadores estatísticos tais como o desvio padrão, o *value at risck* (VAR) e o *conditional value at risck* (CVAR).

Outra possibilidade na mesma linha é a elaboração de um modelo de programação estocástica usando como indicador o CVAR. Para referências nesta área veja Marzano (2004). Neste caso uma modelagem mais simplificada do problema é necessária para tornar o modelo estocástico viável.

## 6. Referências.

**Blazewicz, J., Dror M. e Weglarz J**.(1991), Mathematical programming formulations for machine scheduling: A survey, *European Journal of Operations Research* 51, 283-300.

**Christofides, N., Alvarez-Valdes, R. e Tamarit J.M**. (1987), Project scheduling with resource constraints: A branch and bound approach, *European Journal of Operations Research* 29, 262-273

**Demeulemeester E. e Herroelen W.** (1992)A Branch-and-Bound Procedure for the Multiple Resource-Constrained Project Scheduling Problem, Management Science, Vol. 38, No. 12, pp. 1803-1818

**Lazzarine, A.L., Oliveira, J.C., Marcellino, F.J.M. e Accioly, R.M.S.**(2008), Sistema de Nivelamento de Recursos Críticos, IV Seminário SPCAD.

**Marzano, L.G.B**.(2004), Otimização de Portfólio de Contratos de Energia em Sistemas Hidrotérmicos com Despacho Centralizado, Tese de Doutorado, PUC-RIO.

**Mazzini, F.F.**(2007), Problema de Scheduling de Projetos com Restrição de Recursos, Relatório Técnico, TIC/TIC-SERV/SPO, Petrobras.

**Patterson J.H.** (1984) A Comparison of Exact Approaches for Solving the Multiple Constrained Resource, Project Scheduling Problem, Management Science, Vol. 30, No. 7, pp. 854-867

**Shyshou, A.**(2010), A simulation study of the fleet sizing problem arising in offshore anchor handling operations, European Journal of Operations Research.

**Vasconcellos R.V.J.C. e Ferreira, VJM** (2006), Algoritmo genético para o problema de scheduling de projetos com restrição de recursos: Uma aplicação em operações em poços de petróleo, Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional

**Wall, M.B**. (1996), A genetic algorithm for resource constrained scheduling, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology

**Yamashita D.S. e Morabito R.** (2007), Um algoritmo branch-and-bound para o problema de programação de projetos com custo de disponibilidade de recursos e múltiplos modos, Gest. Prod., São Carlos, v. 14, n. 3, p. 545-555