

**PLANEJAMENTO DA FROTA DE SONDAS PARA  
ATENDIMENTO DE UMA CAMPANHA DE PERFURAÇÃO DE  
UM CAMPO**

**André Falex**

**PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DO PETRÓLEO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DO PETRÓLEO.**

**Aprovado por:**

---

Virgílio José Martins Ferreira Filho  
(Orientador)

---

Shiniti Ohara  
(Co-orientador)

---

Ismael da Silva Soares

---

Clovis Antonio Lopes

**RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
JANEIRO, 2009**

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho minha mãe, Maria José, e ao meu pai, Israel, que sempre acreditaram no meu potencial e que, por muitas vezes, abdicaram das próprias vontades para que me dar condições de alcançar meus sonhos.

# **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a meus familiares: meus pais, minha irmã, minhas tias, meu avô e minha avó, onde quer que ela esteja, por todo o apoio durante toda minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Virgílio José Martins Ferreira Filho, por toda dedicação, conhecimento e tempo a mim destinados e que sem os quais seria impossível realizar este trabalho.

Ao professor Shiniti Ohara, por sempre responder prontamente a todas as dúvidas sobre o lado prático da indústria de petróleo que tive ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega de curso Felipe Lima, por toda paciência e dedicação para a realização das várias e várias simulações de cenários requisitadas nem sempre nos melhores horários.

# Sumário

<b>Dedicatória .....</b>	<b>ii</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>iii</b>
<b>Nomenclatura.....</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>viii</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>x</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Descrição .....	1
1.2 Relevância .....	2
1.3 Estrutura do Trabalho .....	2
<b>2 Revisão da Literatura.....</b>	<b>4</b>
2.1 O Algoritmo Genético .....	8
<b>3 O Problema de Otimização de Itinerário de Sondas de Perfuração.....</b>	<b>13</b>
3.1 Descrição do Problema.....	13
3.2 Formulação Matemática .....	14
3.3 A atividade.....	15
3.4 O Campo de Marlim Sul.....	18
3.5 Sondas.....	22
<b>4 A Solução do Problema .....</b>	<b>25</b>
4.1 O <i>Software</i> .....	25
4.2 Os parâmetros .....	26
4.3 Cenários.....	27
4.3.1 O cenário-base – As cinco sondas perfurando o campo inteiro.....	28
4.3.2 Cenário 2 – Uma sonda para o campo inteiro .....	29
4.3.3 Cenário 3 – Divisão por módulos.....	30
4.3.3.1 Módulo 1 .....	30
4.3.3.2 Módulo 2 .....	31
4.3.3.3 Módulo 3 e Módulo 4.....	31
4.3.3.4 Composição por módulos simultâneos.....	32

4.3.3.5	Composição por módulos não simultâneos .....	34
4.3.4	Cenário 4 – Quatro sondas para todo o campo .....	34
4.3.5	Cenário 5 – O efeito do número de sondas.....	36
4.4	Recapitulação dos resultados – o melhor cenário.....	38
4.5	Experimentações.....	38
<b>5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>43</b>
<b>Anexo I</b>	<b>.....</b>	<b>48</b>

# Nomenclatura

$m$	Média .....	[bpd]
$P$	Perda de Produção .....	[bpd]
$T$	Taxa Diária de Aluguel .....	[US\$/dia]
$t$	Tempo .....	[dia]

## Símbolos Gregos:

$\Delta t$	Tempo de Serviço .....	[dia]
------------	------------------------	-------

## Subscritos:

$( )_i$	Sondas
$( )_j$	Poços

## Siglas:

AG	Algoritmo Genético
FO	Função-Objetivo
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
FSO	<i>Floating Storage and Offloading</i>
HSD	<i>High-Specification Drillship</i> – Navio-sonda de Alta Especificação
HSS	<i>High-Specification Semisubmersible</i> – Semi-Submersível de Alta Especificação
ROP	<i>Rate of Penetration</i> – Taxa de Penetração
SPT	Sondas de Perfuração Terrestre

## Lista de Figuras

Figura 1: Pseudo-Algoritmo do VNS, retirada de (BOAVENTURA-NETTO, 2004). ...	6
Figura 2: Exemplo de Cruzamento Uniforme, retirada de (VASCONCELLOS 2007).	10
Figura 3: Exemplo de Cruzamento 1-partição, retirada de (VASCONCELLOS 2007).	10
Figura 4: Exemplo de Cruzamento 2-partição, retirada de (VASCONCELLOS 2007).	11
Figura 5: Exemplo de uma mutação, retirada de (PROJETO ISIS).....	11
Figura 6: Passos de um Algoritmo Genético, retirada de (DALBONI, 2003). .....	12
Figura 7: Plataforma Semi-Submersível Henry Goodrich, retirada de (TOOLPUSHER, 2008) <a href="http://www.toolpusher.co.uk/images/Henry%20Goodrich%20storm%20.JPG">http://www.toolpusher.co.uk/images/Henry%20Goodrich%20storm%20.JPG</a> .	17
Figura 8: Navio-Sonda Deepwater Millenium, retirada de (RIGZONE DATA CENTER, 2008) <a href="http://www.rigzone.com/data/rig_detail.asp?rig_id=154">http://www.rigzone.com/data/rig_detail.asp?rig_id=154</a> .....	17
Figura 9: Esquema do Campo de Marlim Sul, retirada de (PETROBRAS, 2008). .....	20
Figura 10: Tempo de Perfuração por 5 sondas em poços de 16 mil pés, retirado de (MATCHING RIGS AND DEEPWATER PROGRAMS, 2005).....	23
Figura 11: Imagem do software resolvendo um caso qualquer.....	25
Figura 12: Exemplo de Diagrama de Gantt para 5 sondas. ....	26
Figura 13: Tempo gasto na perfuração considerando o número de sondas.....	37
Figura 14: Custo total do projeto considerando o número de sondas.....	37

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Nomenclatura dos principais elementos do Algoritmo Genético .....	9
Tabela 2: Poços Produtores e Injetores de Marlim Sul, retirada de (PETROBRAS, 2007).....	19
Tabela 3: Produção de óleo por módulo, retirada de (PETROBRAS, 2007) .....	20
Tabela 4: Limites inferior e superior da LDA de cada um dos módulos.....	21
Tabela 5: Medidas Estatísticas da Produção Média. ....	22
Tabela 6: Velocidade Média Calculada para cada uma das sondas. ....	23
Tabela 7: Limites de LDA, Profundidade e a taxa diária para cada uma das sondas.....	24
Tabela 8: Parâmetros definidos para o Algoritmo Genético. ....	27
Tabela 9: Número de identificação das sondas. ....	28
Tabela 10: As cinco sondas perfurando o campo inteiro.....	28
Tabela 11: Cada sonda perfurando o campo inteiro.....	29
Tabela 12: Cada sonda perfurando o módulo 1.....	30
Tabela 13: Cada sonda perfurando o módulo 2.....	31
Tabela 14: Cada sonda perfurando o módulo 3.....	32
Tabela 15: Cada sonda perfurando o módulo 4.....	32
Tabela 16: Sonda 2 no módulo 3 e sonda 3 no módulo 4.....	33
Tabela 17: Sonda 3 no módulo 3 e sonda 2 no módulo 4.....	33
Tabela 18: Melhor composição encontrada de sonda por módulo considerando perfuração simultânea.....	33
Tabela 19: Melhor composição encontrada de sonda por módulo considerando perfuração não simultânea. ....	34
Tabela 20: Combinações de quatro sondas para o campo inteiro. ....	35
Tabela 21: Cenários considerando o efeito do número de sondas diferentes.....	36
Tabela 22: Experimentações envolvendo a duplicação da sonda Enterprise. ....	39
Tabela 23: Resumo das características geradas para cada um dos poços.....	48



## Resumo

A taxa diária paga pelo aluguel de sondas de perfuração offshore tem impacto cada vez maior no custo total do projeto de desenvolvimento de um campo. As sondas mais modernas, capazes de perfurar em profundidades de água superiores a 2000 metros são alugadas por mais de US\$ 500.000 por dia. Este trabalho adota a meta-heurística chamada de Algoritmo Genético para a criação de programa que minimize estes custos de aluguel de sonda. Definidas as variáveis de interesse para as sondas e para os poços, foram simulados diversos cenários. Como são utilizados diferentes tipos de sonda, é possível fazer comparações entre o custo-benefício delas. As sondas mais modernas, embora mais caras, são mais vantajosas que as mais antigas, pois realizam o trabalho mais rapidamente e são capazes de trabalhar em lâminas d'água maiores. O custo total do projeto, embora seja importante, não demonstrou ser o mais essencial. O tempo de desenvolvimento é mais sensível ao número e tipos de sondas, por isso merece mais cuidado durante a programação

*Palavras-chave:* Taxa de Aluguel de Sondas de Perfuração, Algoritmo Genético, Perda de Produção.

## **Abstract**

The day rate paid by the rental of offshore drilling rigs has increasing impact on the total cost of the project of developing a field. The most modern rigs, capable of drilling in water depths greater than 2,000 meters are charted for more than \$ 500,000 per day. This paper uses a meta-heuristic named Genetic Algorithm for creating a program that minimizes the cost of renting these equipments. After defining the variables of interest to the rigs and to the wells, various scenarios were simulated. As different types of rigs are used, it is possible to make comparisons between the cost-benefit of them. The most modern rigs, although more expensive, are more favorable than earlier ones, because they do the work faster and are capable of working in greater water depths. The total cost of the project, although important, not shown to be the most essential. The development time is more sensitive to the number and the types of vehicles used, so it deserves more careful watch during the planning.

*Keywords:* Drilling Rigs Rental Rate, Genetic Algorithm, Loss of Flow.

# 1 Introdução

## 1.1 Descrição

Perfuração de poço é o nome dado ao processo de se fazer um poço no solo para a retirada de recursos naturais, tais como a água, o petróleo ou o gás natural. Na indústria de petróleo, esta atividade pode ter por destino, além da extração do óleo ou do gás natural (poços produtores), a construção de um poço injetor, o qual servirá para a injeção de algum fluido que auxilie na recuperação do hidrocarboneto. Os poços podem ser *onshore* (em terra) ou *offshore* (no mar); verticais ou direcionais.

A perfuração é realizada por um equipamento chamado de sonda de perfuração. O princípio básico de funcionamento de uma sonda é a rotação da broca sobre a qual se aplica peso. Os primeiros poços foram perfurados em terra, mas com o passar dos anos, a atividade de extração de petróleo caminhou para dentro do mar, trabalhando em lâminas d'água cada vez maiores. Assim, as sondas tiveram que se modernizar para atender tais condições e, com isso, se tornaram mais caras.

As sondas de perfuração, equipamento central do processo, são alugadas a taxas diárias elevadas – da ordem de centenas de milhares de dólares Norte-Americanos – representando grande parte do dispêndio no custo do poço. Os valores de aluguel seguem regras de mercado como qualquer outro equipamento. Assim, dependem de uma relação entre tamanho da frota mundial de sondas – oferta – e da quantidade de sondas em uso – demanda (ROSENBLATT, 2006). Dados da RIGZONE (2008) reportam uma utilização de mais de 87% nos últimos meses.

Dado o grande impacto do valor da tarifa diária de sondas *offshore* nos investimentos em exploração de petróleo, é de grande relevância alocar da melhor maneira este recurso. A ordem em que estas sondas atendem aos poços é crucial para o projeto, por isso buscar a melhor seqüência de atendimentos é tão importante em cenários em que as heterogeneidades entre poços e entre sondas são grandes. Em cenários mais homogêneos, a diferença entre as possíveis rotas é pequena, devido à similaridade entre os tempos de serviço.

A Pesquisa Operacional é uma ciência que tem por objetivo fornecer ferramentas quantitativas para a tomada de decisões. Segundo CODERNONSI *et al.* (2005), a otimização tem como objetivo a resolução da alocação de recursos, tipicamente limitados, com o intuito de alcançar determinados objetivos. Considerando que existe um conjunto discreto de soluções possíveis, a resolução de um problema de otimização combinatória inclui o processo de geração, avaliação e comparação de soluções, num determinado limite de tempo.

O modo de resolução para a otimização do itinerário de sondas será através do uso de uma meta-heurística chamada de Algoritmo Genético. Uma heurística pode ser definida com um algoritmo que encontra uma solução factível, não necessariamente a melhor solução, para um determinado problema com uma determinada função objetivo, num tempo computacional razoável (DIAZ, 1996). Uma meta-heurística nada mais é do que um algoritmo capaz de guiar uma ou mais heurísticas a uma solução melhor.

## **1.2 Relevância**

Esse trabalho pretende otimizar, através do uso da meta-heurística conhecida por Algoritmo Genético, o itinerário de sondas de perfuração de poços de petróleo *offshore*, tendo como objetivo encontrar um programa que minimize o custo de aluguel, para um conjunto pré-determinado de poços e sondas.

O planejamento adequado de qual sonda e em qual ordem deve perfurar os poços será útil para reduzir o tempo em que a sonda fica alugada para a empresa operadora do campo. Este planejamento levará em consideração também o tempo que demorará para que o campo seja colocado em produção, já que pode não ser interessante reduzir a quantia gasta com aluguel, mas tendo que postergar demasiadamente o início da produção. Outro fator importante é o quanto a empresa deixará de produzir ao optar por determinada configuração.

## **1.3 Estrutura do Trabalho**

Após a descrição dos objetivos e estrutura do trabalho no Capítulo 1, o Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o assunto. Os trabalhos mais relevantes a

esta monografia são brevemente explicados. Além disso, o assunto Algoritmo Genético é devidamente explicado.

O terceiro capítulo descreve com mais detalhes o problema tratado na dissertação. São explicitadas as variáveis selecionadas como de interesse, tanto para as sondas quanto para os poços e de que modo elas foram encontradas na literatura e/ou modeladas.

No Capítulo 4 encontra-se a solução do Problema de Otimização de Itinerário de Sondas. Primeiramente é dada uma atenção para o software usado, mostrando-se alguns detalhes e os seus parâmetros internos. É proposto o cenário-base, dado inicialmente como melhor solução. São feitas diversas comparações com outros cenários candidatos a melhor resposta. Algumas experimentações são feitas, com a duplicação de sondas.

As conclusões aparecem no decorrer do Capítulo 4 e são sintetizadas no Capítulo 5, que também faz sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Revisão da Literatura

O Problema de Otimização do Itinerário de Sondas (POIS) pode ser entendido como um problema de gerenciamento de veículos com várias demandas conhecidas nos pontos da rede que os veículos devem percorrer (COSTA, 2005). O Problema de Roteamento de Veículos (PVR) trata da configuração espacial da frota disponível para atender a pedidos de entrega, geralmente localizados nos vértices da rede. Para isto, devem ser consideradas restrições de diversas naturezas, como capacidade dos veículos, tamanho da frota, número de viagens, tempo de entrega, etc.

Na literatura, há inúmeros trabalhos publicados, os quais abordam os mais diversos temas, desde modelos simples (com frota homogênea, commodities de único tipo e sem janela de tempo) a modelos bem mais complexos (com frota não-homogênea, commodities de diferentes tipos, janela de tempo para a entrega da encomenda, com roteamento dinâmico, etc) (PIMENTA, 2001).

O problema de *scheduling* de máquinas pode ser entendido como a definição de qual atividade deve ser executada em dado instante de tempo. Na prática, é bastante comum que os problemas de roteamento e os de scheduling se tornem um só, denominado Problema de Roteamento e *Scheduling* (PRS). OS PRS's formam uma das áreas de maior sucesso nas áreas de Otimização Combinatória, Pesquisa Operacional e Computação Aplicada. Este sucesso em parte se deve a eficiência das técnicas existentes na literatura afim, que quando implementadas em situações reais, tem fornecido excelentes soluções do ponto de vista operacional (TORTELLY *et al.*, 2005).

BARNES *et al.* (1977) escreveram sobre a necessidade de adotar-se um critério para a escolha da ordem de atendimento das sondas aos poços em operações de manutenção. Neste trabalho, foram assumidas sondas homogêneas, tempos de viagem entre os poços nulos. Não foram consideradas restrições de datas para o atendimento dos poços.

Este pode ser considerado um trabalho pioneiro no assunto e que serviu de base para muitos outros. Muito tem sido feito desde então, seja para definir o problema, seja

para apresentar diferentes formulações, seja para buscar diferentes métodos para resolvê-lo.

Grandes contribuições foram dadas pelos trabalhos de ALOISE *et al.* (2002) e ALOISE. *et al.* (2004). O primeiro utilizou conceitos de uma heurística conhecida como colônia de formigas (*Ants Colony System*) e o segundo foi baseado no método chamado de VNS (*Variable Neighborhood Search*). A solução do problema dizia respeito a sondas de produção terrestres e foram utilizadas características do sistema de produção brasileiro.

Otimização com colônia de formigas (*Ant Colony Optimization - ACO*) é uma meta-heurística inspirada em formigas reais. A principal forma de comunicação entre as formigas ocorre através de substâncias químicas denominadas feromônios. As formigas percebem com as antenas o vapor criado pela difusão do feromônio no ar. Segundo DORIGO *et al.* (2005), as formigas inicialmente exploram a área ao redor do ninho de forma aleatória. Quando uma formiga encontra alimento, ela o avalia e leva certa quantidade deste ao ninho. Durante a viagem de retorno, a formiga deposita uma trilha de feromônio no chão. A quantidade de feromônio depositada depende da quantidade e qualidade do alimento e irá guiar outras formigas até a fonte de alimento. Estas características de uma colônia de formigas reais são exploradas para resolver problemas de otimização combinatória (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

No trabalho de ALOISE *et al.* (2002), duas heurísticas baseadas nas colônias de formigas foram propostas. Na primeira, mais simples, constituída por um algoritmo construtivo no qual vai se passando de sonda a sonda e cada uma faz a escolha de um poço para ser colocado em sua lista de atendimento, baseada em critérios de prioridade, no caso perda de produção por unidade de tempo, até que todos os poços sejam atendidos. No segundo algoritmo, o poço ao ser escolhido por uma das sondas não é retirado da lista de poços disponíveis. Isto só ocorre quando não há sonda que atenda ao poço em tempo menor do que a sonda a qual ele já está alocado. Em ambos os casos é feito um mecanismo de busca local com o objetivo de refinar a solução: trocas entre poços de uma mesma sonda são realizadas e quando a solução é melhorada, esta passa a ser a solução. As trocas seguem até não que haja mais soluções melhores.

VNS é um método de busca local, proposto por Nenad Mladenovic e Pierre Hansen em 1997, que explora o espaço de soluções através de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhanças. Este método foca a busca em torno de uma nova solução somente se um movimento de melhora é realizado. Definem-se então um conjunto de vizinhanças  $N = \{N_k, k = 1, \dots, k_{\max}\}$  e uma solução inicial  $x$ . O algoritmo básico é o seguinte:

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>k \leftarrow 1</math>;</li> <li>2. enquanto <math>k \leq k_{\max}</math> fazer             <ol style="list-style-type: none"> <li>a) gerar aleatoriamente um ponto <math>x'</math> na vizinhança <math>k</math> de <math>x</math>;</li> <li>b) aplicar uma busca local a partir de <math>x'</math>; seja <math>x''</math> o ótimo local obtido;</li> <li>c) se houve melhora de valor, fazer <math>x \leftarrow x''</math> e continuar a busca; senão, fazer <math>k \leftarrow k + 1</math>;</li> </ol> </li> </ol>
--

Figura 1: Pseudo-Algoritmo do VNS, retirada de (BOAVENTURA-NETTO, 2004).

O trabalho de ALOISE *et al.* (2004) propõe uma heurística VNS na qual um algoritmo gera uma solução inicial em que cada poço é alocado para a sonda que lhe resulta a menor perda de produção possível. São feitas iterações em que dois procedimentos básicos são realizados: perturbação na vizinhança atual e busca local. O VNS busca, a cada iteração, novas vizinhanças para obter melhores soluções.

COSTA (2005) tratou o Problema de Roteamento e Seqüenciamento de Sondas de Produção Terrestre através de duas heurísticas e uma meta-heurística GRASP. A formulação matemática foi desenvolvida de modo a permitir a inclusão de poços com prioridade mais alta em relação a outros, devido a restrições de Janela de Tempo. Estas Janelas dão a possibilidade de um poço ser atendido antes de outros simplesmente por haver uma data limite para que ele esteja pronto. De maneira análoga, permite que um poço só receba atendimento após certa data em que ele esteja liberado. Além disso, foi feita uma remodelagem na formulação matemática inicial, de modo a torná-la para simples para o uso de *solvers* para se encontrar a solução exata.

A primeira heurística proposta foi a Heurística de Máxima Prioridade Tricritério (HMPT), em que três possíveis critérios são usados para se compor o conjunto de soluções, sujeito às restrições de janelas de tempo. Os três critérios propostos foram os seguintes:

1. Ordem decrescente de perda de produção ( $P_i$ );



2. Ordem decrescente de perda de produção sobre o tempo de serviço ( $P_i/\Delta t$ );
3. Ordem decrescente de perda de produção vezes o tempo de serviço de ( $P_i \cdot \Delta t$ ).

A segunda heurística foi a Heurística da Montagem Dinâmica (HMD). A HMPT aloca serviços sequencialmente, um após o outro no tempo à medida que aparecem nichos vazios. No entanto, a HMD admite que o serviço atual a ser alocado (primeiro da lista) possa tomar o lugar de algum serviço já alocado, re-arrumando dinamicamente os serviços nas máquinas, com o intuito de melhorar a solução (COSTA, 2005). Assim, esta heurística permite que ótimos locais sejam encontrados.

As meta-heurísticas são estruturas algorítmicas de busca, dentro de um espaço de soluções, capazes de explorá-lo de forma racional, sabendo fugir de ótimos locais para ir em busca de um ótimo global, e têm por objetivo encontrar soluções de qualidade para problemas de otimização combinatória das mais diversas naturezas (COSTA, 2005). Uma meta-heurística construtiva estabelece estratégias para a construção de uma solução através da definição, de forma meticulosa, do valor de cada uma de suas componentes. Dentre essas meta-heurísticas, a mais clássica é a estratégia gulosa, formada por um processo iterativo que, em cada passo, adiciona um elemento à solução parcial, de forma a obter os melhores resultados imediatos possíveis. Na meta-heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*), a fase construtiva é um processo iterativo que parte de uma solução parcial vazia e, em cada passo: identifica todos os elementos que podem ser incorporados à solução parcial sem torná-la inviável; cria um subconjunto desses elementos, contendo apenas aqueles que causam aumento mínimo de custo (este é o aspecto guloso da meta-heurística); seleciona aleatoriamente um elemento desse subconjunto, acrescentando-o à solução parcial (SUCUPIRA, 2004).

A meta-heurística GRASP proposta por COSTA (2005), diferente das heurísticas HMPT e HMD, não obteve bons resultados. Crê-se que seja por conta da heurística construtiva usada, que não foi tão eficiente.

Em ALVES *et al.* (2006), o Algoritmo Genético foi usado com o objetivo de se comparar os resultados obtidos por COSTA (2005). No entanto, os resultados obtidos não foram conclusivos em relação às vantagens ou desvantagens da utilização deste método frente aos propostos por COSTA (2005).

Já VASCONCELLOS (2007) usou o Algoritmo Genético para resolução do Problema de Scheduling de Projetos com Restrições de Recursos. Além disso, foi incorporado o aspecto de Gerenciamento de Incertezas dos Projetos.

## **2.1 O Algoritmo Genético**

O Algoritmo Genético é um algoritmo de busca baseado em mecanismos de seleção natural e genética. Inspirado na teoria da evolução natural de Darwin, onde os organismos mais fortes e mais adaptados sobrevivem. Baseia-se na forma como os seres vivos sexuados evoluem. Ou seja, definem-se indivíduos, que são soluções potenciais do problema, e faz-se que estes se reproduzam, gerando indivíduos-filhos, que são teoricamente superiores aos pais. Foi criado por John Holland em seu livro "*Adaption in Natural and Artificial Systems*", publicado em 1975.

Este tipo de algoritmo considera várias soluções ao mesmo tempo, ao invés de apenas uma. Também são adaptativos, pois a informação atual influencia a busca futura. Segundo PACHECO (2005), os algoritmos genéticos são particularmente adequados para problemas complexos de otimização, de difícil modelagem matemática como aqueles que apresentam com diversos parâmetros ou características que precisam ser combinadas em busca da melhor solução; problemas com muitas restrições ou condições que não podem ser representadas matematicamente; e problemas com grandes espaços de busca.

A nomenclatura usada também deriva da biologia. Um cromossomo é o mesmo que um indivíduo, e é formado por genes que possuem posição determinada dentro do cromossomo, o lócus. Cada gene pode assumir um determinado conjunto de valores, os chamados alelos. Resumidamente temos:

Tabela 1: Nomenclatura dos principais elementos do Algoritmo Genético

<b>NOME</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
Cromossomo	Cadeia de bits que representa uma solução possível para o problema.
Gene	Bit. Localizado em cada posição do cromossomo
Alelo	Valores que o gene pode assumir
Lócus	Posição do gene dentro do cromossomo
Genótipo	Indivíduo candidato à solução (x)
Fenótipo	Valor da função para um dado indivíduo.

O Algoritmo Genético funciona a partir de um conjunto de indivíduos, candidatos potenciais a solução do problema, que são mantidos a cada geração. Cada solução é testada para medir sua adaptação através de uma função chamada função aptidão ou função de avaliação. Então, alguns indivíduos sofrem transformações que geram novos indivíduos, formando uma nova geração. Esta nova geração é, na média, mais adaptada que a anterior, e assim, o programa converge sob a hipótese de que a melhor solução indivíduo represente uma solução próxima do ótimo global. Não é desejável que a nova geração substitua completamente a geração anterior, já que indivíduos de boa qualidade seriam perdidos. Assim, parte de uma geração pode ser mantida, copiando-se diretamente para a geração posterior. Esta prática é chamada de elitismo.

São basicamente dois os operadores genéticos responsáveis pelas transformações dos indivíduos: cruzamento e mutação. No cruzamento ou *crossover*, pares de cromossomos são selecionados aleatoriamente e cada um doa um certo número de genes, formando assim, um novo indivíduo. Segundo VASCONCELLOS (2007), o cruzamento ocorre basicamente de acordo com os seguintes modelos:

Cruzamento Uniforme - Consiste no emparelhamento dos cromossomos pais e a troca de genes de determinados lócus que possuem alguma possibilidade de troca.

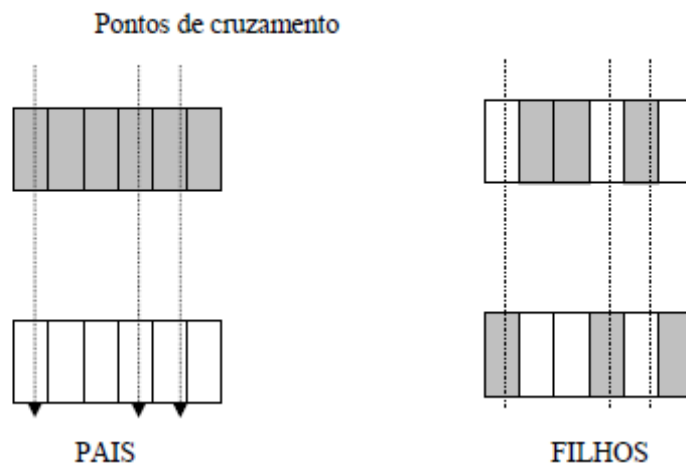


Figura 2: Exemplo de Cruzamento Uniforme, retirada de (VASCONCELLOS 2007).

Cruzamento 1-partição - Escolha aleatória de somente 1 ponto de corte. Todo material genético dos pais, a direita deste ponto será intercambiada.

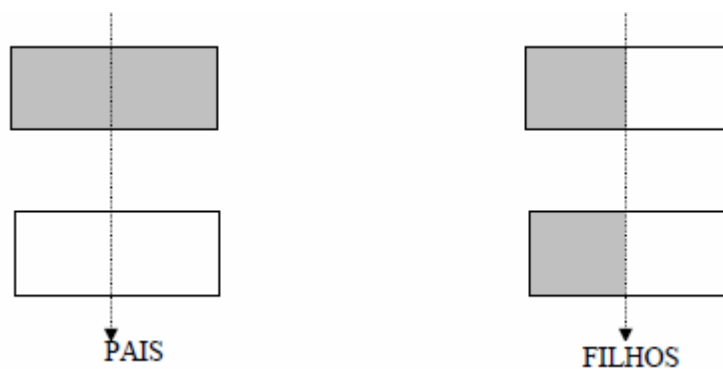


Figura 3: Exemplo de Cruzamento 1-partição, retirada de (VASCONCELLOS 2007).

Cruzamento 2-partição - Escolha aleatória de 2 pontos. O material entre esses pontos é intercambiado e o restante permanece inalterado.

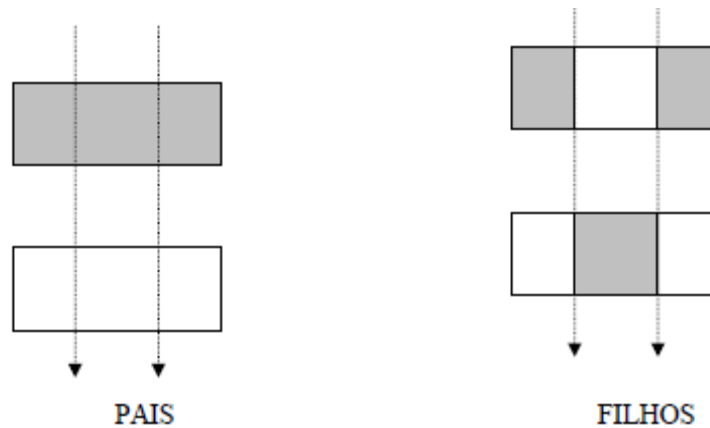


Figura 4: Exemplo de Cruzamento 2-partição, retirada de (VASCONCELLOS 2007).

A mutação é efetuada alterando-se o valor de um gene de um indivíduo sorteado aleatoriamente com uma determinada probabilidade, denominada probabilidade de mutação. A mutação tem como objetivo impedir que a resposta convirja muito rapidamente, porém ela destrói parte da informação contida no cromossomo.

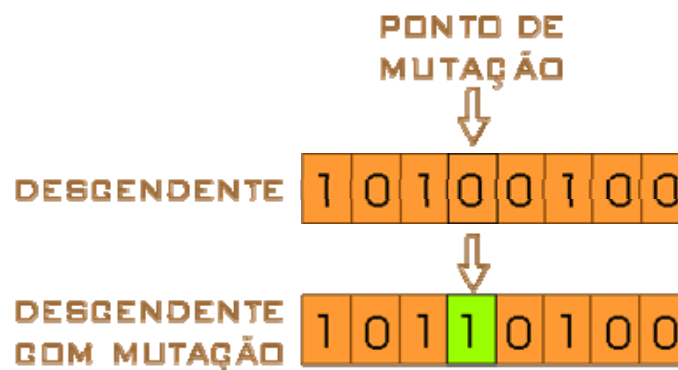


Figura 5: Exemplo de uma mutação, retirada de (PROJETO ISIS).

O alvo do Algoritmo Genético é a maximização ou a minimização de uma função, denominada função-objetivo. Desta maneira, o indivíduo escolhido como resposta deverá se aproximar ao máximo do ótimo global, ou seja, da melhor resposta, desta função. Como em muitos casos encontrar este ponto de ótimo é extremamente complicado, uma solução próxima já é bastante satisfatória.

Os principais parâmetros a serem ajustados para o melhor desempenho do Algoritmo Genético estão listados a seguir. Os valores escolhidos, para a resolução específica do problema, serão explicitados no capítulo 4.

1. Tamanho da população;
2. Grau de elitismo;
3. Taxa de *crossover*;
4. Taxa de mutação;
5. Critério de Parada.

```
1: t = 0;  
2: Gerar população inicial P(0);  
3: Para cada indivíduo i da população atual P(t) faça  
4:   avaliar aptidão do indivíduo i  
5: Fim para;  
6: Armazenar melhor solução encontrada até o momento;  
7: Enquanto critério de parada não for satisfeito faça  
8:   t = t+1;  
9:   selecionar população P(t) a partir de P(t-1);  
10:  aplicar operadores de reprodução sobre P(t);  
11:  avaliar P(t);  
12:  Armazenar melhor solução encontrada até o momento;  
13: Fim enquanto;  
14: Apresentar melhor indivíduo gerado pelo AG;
```

Figura 6: Passos de um Algoritmo Genético, retirada de (DALBONI, 2003).

### 3 O Problema de Otimização de Itinerário de Sondas de Perfuração

#### 3.1 Descrição do Problema

O Problema de Otimização de Itinerário de Sonda é basicamente a tarefa de se determinar o roteamento e o *scheduling* de um conjunto de Sondas de Perfuração Marítimas para a perfuração de um determinado número de poços. Estes poços podem ser interpretados como clientes ou tarefas, enquanto as sondas podem ser vistas como veículos ou máquinas.

Sejam os conjuntos:

$N = \{1..n\}$  : O conjunto dos  $n$  poços clientes, ou seja, poços a serem perfurados e;

$M = \{1..m\}$  : O conjunto das  $m$  sondas disponíveis.

Os valores de  $n$  e  $m$  são dados conforme a realidade do campo em questão e da empresa operadora, enquanto  $hp$  é definido pelo usuário. Em alguns momentos é feita uma subdivisão de  $N$ , onde  $N_p$  são os poços produtores e  $N_i$  os injetores. Neste trabalho, as sondas não são homogêneas. Isto implica que o tempo de serviço depende não apenas do comprimento do poço a ser perfurando, mas também da sonda escolhida para perfurá-lo. Desta maneira define-se, onde  $i \in N$  e  $j \in M$  :

$T_j$  : A taxa de aluguel, dada em US\$/dia;

$P_i$  : A perda de produção, dada em barril/dia;

$\Delta t_{ij}$  : O tempo de serviço;

$d_i$  : A data de liberação para início dos serviços;

$D_i$  : A data para término dos serviços;

A função-objetivo principal do problema é calculada somando os produtos do tempo de cada perfuração ( $\Delta t_{ij}$ ) pela taxa diária de aluguel da sonda que realizou o serviço ( $T_j$ ). Assim, encontramos o custo total gasto com  $M$  sondas para perfurar os  $N$  poços, que é o que desejamos minimizar.

A função-objetivo secundária do problema é avaliada adicionando os produtos dos tempos de espera pelas perdas de produção ( $P_i$ ), assim, encontrando um valor de volume de óleo não produzido, que deverá ser o menor possível, de acordo com a programação estabelecida pela função objetivo principal. O tempo de espera nada mais é que a soma do dia em que o poço recebeu atendimento com o tempo de serviço, menos a data de liberação deste poço. Perda de produção significa o quanto o poço está deixando de produzir por não ter sido perfurado.

Em outras palavras, a função principal definirá quais poços serão perfurados por cada sonda, segundo o critério de menor custo de aluguel para se realizar o projeto inteiro. Com isto definido, a ordem que cada poço será atendido é indiferente para a sonda. Sendo assim, poderemos adotar a função secundária, trocando a ordem de atendimentos dentro de cada sonda, para que a perda de produção seja minimizada.

As variáveis de decisão  $X_{ijt}$  são binárias, ou seja, assumem o valor 1 quando o poço  $i$  começa a ser atendido pelo sonda  $j$  no instante  $t$ . Caso contrário, valem 0.

### 3.2 Formulação Matemática

A função-objetivo principal, mostrada em (1), deseja minimizar o custo total do projeto, calculando os produtos das taxas de aluguel  $T_j$  pelos tempos de serviço  $t_{ij}$ . Já a função-objetivo secundária (2), procura minimizar as perdas de vazão calculando os produtos das perdas unitárias de vazão  $P_i$  pelos tempos de espera até a liberação do local  $(t + \Delta t_{ij} - d_i)$ .

$$\text{Min} \sum_t \sum_j \sum_i \Delta t_{ij} \cdot T_j \cdot X_{ijt} \quad (1)$$

$$\text{Min} \sum_t \sum_i \sum_j (t + \Delta t_{ij} - d_i) \cdot P_i \cdot X_{ijt} \quad (2)$$

**Sujeito à:**

$$\sum_t \sum_j X_{ijt} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$



$$\sum_i \sum_j \sum_{t=0}^{d_i-1} X_{ijt} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_{t=D_i-\Delta t_i+1}^{hp} X_{ijt} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{t'=t-\Delta t_k+1}^{t'-\Delta t_i-1} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall j \in M; \forall i \in N; \forall t \in T \quad (6)$$

$$X_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N; \forall j \in M; \forall t \in T \quad (7)$$

A igualdade (3) diz respeito à restrição de atendimento. Ela diz que cada poço será atendido uma única vez por uma máquina. As igualdades (4) e (5) são as restrições de janela de tempo, e garantem que cada poço será atendido dentro do intervalo  $[d_i, D_i - \Delta t_i]$ . Já a desigualdade (6) serve para garantir que uma vez iniciado um determinado atendimento, este não será interrompido e que uma sonda só iniciará um único serviço em certo instante de tempo.

### 3.3 A atividade

Os locais onde os poços serão perfurados são definidos por simulação computacional de reservatório e tem uma produção estimada, dada em unidade de volume por unidade de tempo, que será considerada constante. Assim sendo, a fila de atendimentos é formada por todos os poços que estão planejados serem construídos e, a cada um deles, há um valor de produção associado. A cada poço está também associada à lâmina d'água sob a qual ele será perfurado, dada em metros. Outra informação conhecida é a espessura da camada de sedimentos que deverá ser ultrapassada para que se atinja o ponto de interesse dentro do reservatório. No modelo adotado, todos os poços são considerados verticais.

Uma vez que os poços são locais reais de trabalho dispostos geograficamente no espaço, é possível se obter uma matriz que guarde a distância ou os custos de transporte, mobilização e desmobilização, entre cada par de poços (COSTA, 2005). Porém, como o tempo destas atividades é pequeno em relação ao tempo de perfuração e como considerá-los complicaria demasiadamente o modelo, desprezaremos este valor, e, em consequência, o custo associado. Adotaremos que

imediatamente após concluir o serviço em um poço, a sonda iniciará o atendimento ao poço seguinte.

Segundo THOMAS (2001), as sondas de perfuração perfuram as rochas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração, a qual consiste basicamente de comandos (tubos de paredes espessas) e tubos de perfuração, que são de paredes mais finas. Todos os equipamentos de uma sonda rotativa responsáveis por determinada função na perfuração de poço são agrupados nos “sistemas” de uma sonda. Os principais sistemas são:

- a) Sistema de sustentação de cargas;
- b) Sistema de geração e transmissão de energia;
- c) Sistema de movimentação de cargas;
- d) Sistema de rotação;
- e) Sistema de circulação;
- f) Sistema de Segurança do poço;
- g) Sistema de monitoração;
- h) Sistema de subsuperfície.

Cada sonda tem uma diversidade enorme de características que devem ser levadas em consideração na hora de se escolher a mais adequada para o desenvolvimento de certo campo. Estas características podem ser fatores limitantes ou de performance. Os fatores limitantes são aqueles que não se forem satisfeitos pela sonda, então esta não estará apta para realização da operação. Já os fatores de performance são os que não precisam ser satisfeitos, porém, caso sejam, implicarão em melhor eficiência da sonda.

Existem vários tipos de Unidades de Perfuração Marítima, porém, para operações em lâminas d'água maiores, como é o caso estudado, as plataformas flutuantes são as mais indicadas. Este tipo de plataforma pode ser de dois grupos: as sondas semi-submersíveis e os navios-sonda. As primeiras são compostas, basicamente, de uma estrutura com um ou mais conveses, apoiada por colunas em

flutuadores submersos (THOMAS, 2001). Os navios-sonda são navios projetados para a perfuração de poços de petróleo.



Figura 7: Plataforma Semi-Submersível Henry Goodrich, retirada de (TOOLPUSHER, 2008) <http://www.toolpusher.co.uk/images/Henry%20Goodrich%20storm%20.JPG>



Figura 8: Navio-Sonda Deepwater Millennium, retirada de (RIGZONE DATA CENTER, 2008) [http://www.rigzone.com/data/rig\\_detail.asp?rig\\_id=154](http://www.rigzone.com/data/rig_detail.asp?rig_id=154)

As plataformas flutuantes são classificadas por gerações. Embora esta divisão não seja tão óbvia, cada geração tem características próprias que permitem

que cada sonda seja enquadrada em determinado grupo. Para cada nova geração, especificações como a lâmina d'água e a taxa de penetração (ROP) são aumentadas. Atualmente, plataformas qualificadas como 6ª geração já estão em construção, no entanto as que se encontram em operação para águas mais profundas variam entre a 3ª e a 5ª geração.

Para cada sonda foram considerados dois fatores limitantes e dois de performance. Os fatores limitantes são a lâminas d'água sobre a qual elas podem operar e a profundidade vertical total que elas conseguem perfurar. Já os de performance são a velocidade média de perfuração de cada geração e a taxa diária que a empresa operadora tem que pagar pelo aluguel da sonda.

No caso específico do modelo usado neste trabalho, considerar que todos os poços são verticais fez com que a profundidade vertical total não fosse fator limitante para nenhum poço. Isto porque mesmo sondas da 3ª geração estão aptas para perfurarem camadas muito mais profundas do que as adotadas no nosso caso. No entanto, este parâmetro ainda sim é importante, pois em posse dele e da velocidade média de perfuração, calcularemos o tempo de perfuração de cada poço.

A taxa diária de aluguel não é especificamente um fator de performance da sonda, mas por ser profundamente impactante no custo final do projeto, podemos considerar um fator de desempenho do campo.

### **3.4 O Campo de Marlim Sul**

A utilização de dados reais de um campo em problemas que envolvem simulações é sempre desejável. No entanto, a aquisição destes dados nem sempre é possível. Assim sendo, buscou-se a maior proximidade possível de um campo real. O campo escolhido foi o de Marlim Sul pelo fato, principalmente, de abranger uma grande faixa de lâmina d'água e por seu grande número de poços.

O campo de Marlim Sul foi descoberto em 1987 e tem uma área de cerca de 600 km<sup>2</sup>. Seu reservatório, tipicamente como outros da Bacia de Campos, é um arenito não-

consolidado do Terciário, particularmente das idades Oligoceno e Eoceno. Possui óleo pesado, grau API entre 17 e 24, porosidade de 32% e permeabilidade de 2000 mD. A operadora deste campo, Petrobras, decidiu desenvolver Marlim Sul com uma série de poços produtores e injetores horizontais. O campo foi dividido em quatro módulos e seus poços estão sob um lâmina d'água que varia entre 800 e 2600 metros. (ACOSTA *et al.*, 2005).

Tabela 2: Poços Produtores e Injetores de Marlim Sul, retirada de (PETROBRAS, 2007).

<b>Módulo</b>	<b>Número de Poços Produtores – N<sub>P</sub></b>	<b>Número de Poços Injetores N<sub>I</sub></b>
Módulo 1	22	15
Módulo 2	10	9
Módulo 3	10	9
Módulo 4	11	9
Total	53	42

O módulo 1 encontra-se em produção desde 1994, quando o poço 3-MRL-4-RJS começou a ser produzido, interligado a plataforma PETROBRAS-20, situada no campo de Marlim. Este módulo compreende a produção dos poços diretamente para a P-40, que, depois de tratar o óleo, transfere-o para o FSO P-38. Devido à alta produtividade e injetividade dos poços da P-40, foi concebido e viabilizado um Projeto de Desenvolvimento Complementar do Módulo 1. Este projeto contemplou a plataforma FPSO-Marlim Sul (FPSO-MLS), afretada, que foi ancorada próxima à P-40, em lamina d'água de 1180 metros (PETROBRAS.com.br)

Espera-se que o módulo 2 produza seu primeiro óleo em Janeiro de 2009, com a chegada da P-51 à Bacia de Campos. Já o módulo 3 encontra-se em fase de desenvolvimento e tem previsão do início da produção em Outubro de 2010. Será produzido pela P-56, clone da P-51. Já o módulo 4 está em fase de estudos de reservatórios e tem previsão para o início da produção apenas em 2015. Este módulo possui um óleo mais pesado e depende de novas tecnologias.

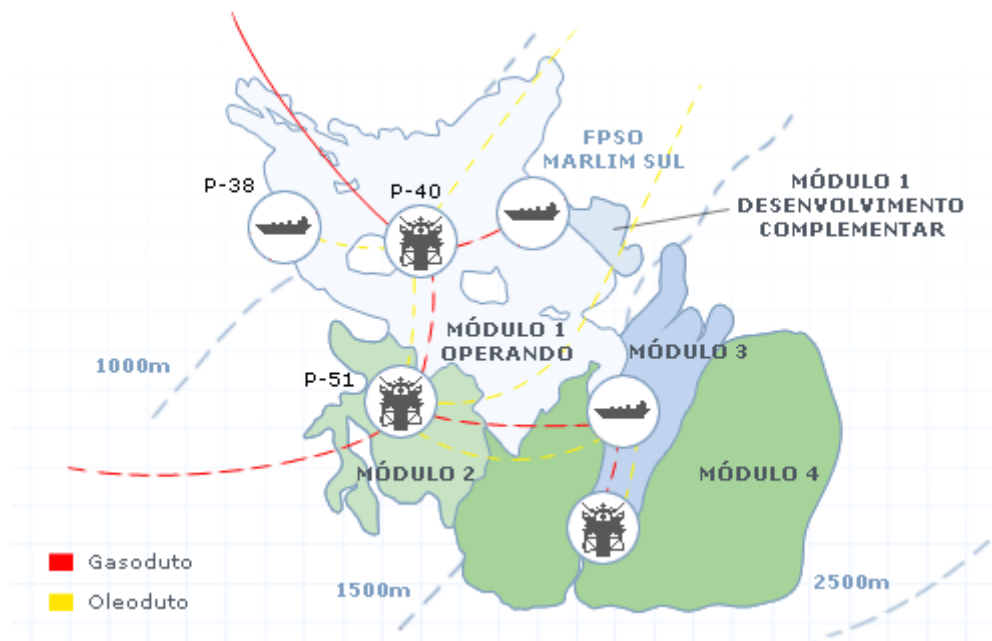


Figura 9: Esquema do Campo de Marlim Sul, retirada de (PETROBRAS, 2008).

Tabela 3: Produção de óleo por módulo, retirada de (PETROBRAS, 2007)

Módulo	Produção Diária Estimada de Óleo (bpd) – P(z)
Módulo 1	190.000
Módulo 2	180.000
Módulo 3	100.000
Módulo 4	60.000
Total	530.000

Dados específicos de cada poço são, em geral, privados e confidenciais. Para modelá-los, foi necessário fazer a combinação de informações achadas na literatura com dados artificiais. Por exemplo, sobre as lâminas d'água, SILVA *et al.* (2004) e ACOSTA *et al.* (2005) dizem que Marlim Sul está entre 800 e 2600 metros. (P-56) afirma que o módulo 3 tem entre 1450 e 1900, e (PETROBRAS) cita que o módulo 4 está acima de 1500 metros. A partir destes dados e da figura 11, chegamos a seguinte configuração:

Tabela 4: Limites inferior e superior da LDA de cada um dos módulos.

<b>Módulo</b>	<b>Lâmina d'água Mínima (metros) – LDA<sub>min</sub></b>	<b>Lâmina d'água Máxima (metros) - LDA<sub>Max</sub></b>
Módulo 1	800	1500
Módulo 2	1100	1500
Módulo 3	1450	1900
Módulo 4	1500	2600

Em posse das lâminas d'água de cada módulo, podemos fazer uma estimativa mais próxima da real para cada poço. Assim sendo, para cada módulo, foram gerados aleatoriamente  $N_p$  poços produtores e  $N_i$  poços injetores, dentro dos respectivos limites LDA<sub>min</sub> e LDA<sub>max</sub> de cada módulo.

A produção de cada poço foi ajustada a partir de uma distribuição normal. Os parâmetros desta distribuição foram escolhidos da seguinte forma: a média para cada módulo é simplesmente o total produzido em cada módulo dividido pelo número de poços produtores neste módulo, onde  $z$  se refere ao módulo em questão:

$$m(z) = \frac{P(z)}{N_p(z)} \quad (8)$$

O desvio padrão ( $\sigma$ ) foi estipulado a partir da produção e do número de poços produtores de cada módulo. Para o módulo 1, é esperado que haja uma variância maior, devido principalmente ao grande número de poços produtores. Já para o módulo 4, espera-se menor desvio padrão, uma vez que a sua produção média diária é baixa em comparação aos outros módulos.

A geração de números desta maneira traz consigo um erro. Este erro pode ser calculado através da fórmula abaixo, onde  $n$  é o número de amostras.

$$EP(\bar{X}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Tabela 5: Medidas Estatísticas da Produção Média.

<b>Módulo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Erro Padrão</b>
Módulo 1	7968,8	1351,6	288,2
Módulo 2	18297,2	2078,9	657,4
Módulo 3	9098,6	1493,9	472,4
Módulo 4	5549,9	821,9	247,8

A espessura da camada a ser perfurada, isso é a profundidade em que o reservatório se encontra é outra informação importante que não pode ser verificada. No entanto, alguns indícios puderam ser encontrados em FIGUEIREDO JUNIOR *et al.*, (2007). Assim, foi adotado em que o intervalo de profundidades varia entre 2500 e 3500 metros. Para cada poço, da mesma maneira que para a lâmina d'água, foi gerado um número aleatório dentro deste intervalo. As tabelas com os valores gerados para cada poço produtor e injetor se encontram em anexo.

### 3.5 Sondas

Como já foi dito no começo deste capítulo, as variáveis escolhidas para cada sonda são:

- a) Lâmina d'água sobre a qual elas podem operar;
- b) Espessura da camada de sedimentos que eles conseguem perfurar;
- c) Velocidade Média de Perfuração e;
- d) Taxa diária de aluguel.

Destas características, as duas primeiras são facilmente encontradas em *websites* especializados em sondas ou das empresas fabricantes. A taxa de aluguel que está sendo paga por cada sonda também pode ser encontrada através de pesquisa na internet.

Já a velocidade média de perfuração é uma variável que não é encontrada na literatura, pois não é simplesmente dependente da sonda. Está associada à potência que é transmitida a broca, mas também depende do tipo de rocha que está sendo perfurada. O tempo em que o poço ficará pronto depende também do número de revestimentos descidos, de quantas brocas tiveram que ser utilizadas, etc. Então, para se obter esse



parâmetro, utilizou-se o trabalho “*Matching Rigs with Deepwater Programs*”. Neste trabalho, foi apresentada uma comparação do tempo de se perfurar um poço de 16000 pés entre 5 sondas selecionadas.

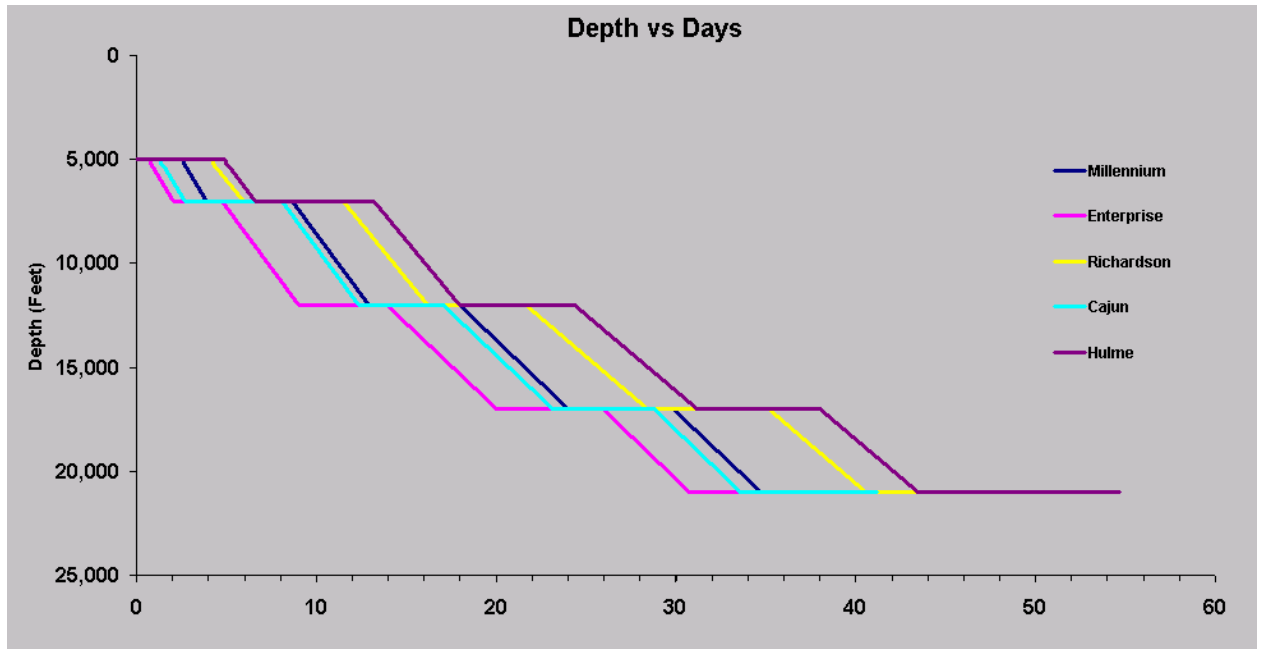


Figura 10: Tempo de Perfuração por 5 sondas em poços de 16 mil pés, retirado de (MATCHING RIGS AND DEEPWATER PROGRAMS, 2005)

De posse no tempo total que cada sonda gastou para perfurar este poço, podemos calcular a velocidade total. A velocidade média de perfuração foi considerada igual a esta velocidade total. Obviamente esta aproximação é bastante grosseira, no entanto, é suficiente para os objetivos deste trabalho. Desta maneira, temos um leque de sondas diferentes para comparação.

Tabela 6: Velocidade Média Calculada para cada uma das sondas.

Sonda	Tempo (dias)	Velocidade Média (ft/d)	Velocidade Média (m/d)
Enterprise	37,7	424,4	128,1
Cajun	41,2	388,3	117,2
Millennium	41,9	381,9	115,2
Richardson	49,2	325,2	98,1
M.G. Hulme, Jr.	54,6	293,0	88,4

Todas as cinco sondas fazem parte do *portfolio* da Transocean Inc. No relatório anual da empresa, é possível encontrar mais informações sobre elas. As taxas de aluguel dizem respeito a dados reais de contrato, as fontes se encontram na referência deste trabalho. O valor do aluguel para a *Enterprise* é uma média entre os valores que para o contrato de três e o de sete anos.

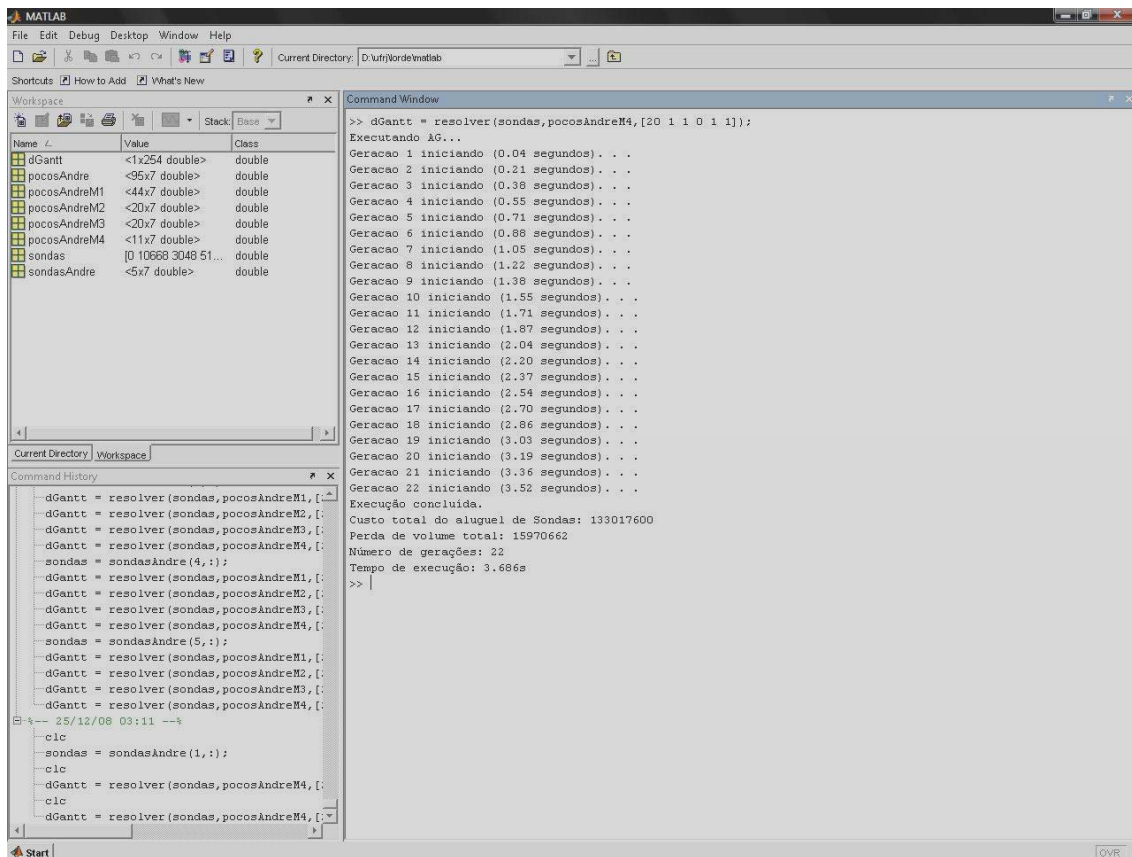
Tabela 7: Limites de LDA, Profundidade e a taxa diária para cada uma das sondas.

<b>Sonda</b>	<b>Tipo</b>	<b>Geração</b>	<b>Lâmina d'água Máxima (metros)</b>	<b>Profundidade Máxima (metros)</b>	<b>Taxa Diária (US\$)</b>
Enterprise	HSD	Quinta	3048	10668	541.000
Cajun	HSS	Quinta	2590,8	10668	520.000
Millenium	HSD	Quinta	3048	9144	535.000
Richardson	HSS	Quarta	1524	7620	450.000
M.G. Hulme, Jr.	HSS	Terceira	1524	7620	430.000

## 4 A Solução do Problema

### 4.1 O Software

Para chegarmos à solução do problema descrito neste trabalho, foi feito o uso de uma ferramenta criada a partir da implementação do Algoritmo Genético no MatLab 7.5. Este software foi desenvolvido por dois alunos de graduação da UFRJ, Felipe Lima e Thales Kropf, para tratar justamente de programas de alocação de sonda em poços. Esta ferramenta está apta a trabalhar não são com poços que demandam perfuração, mas também com poços que necessitam de intervenção.



The screenshot shows the MATLAB 7.5 interface. The workspace window on the left lists variables: dGantt (1x254 double), pocosAndre (95x7 double), pocosAndreM1 (44x7 double), pocosAndreM2 (20x7 double), pocosAndreM3 (20x7 double), pocosAndreM4 (11x7 double), sondas (10668 3048 51... double), and sondasAndre (5x7 double). The Command Window on the right shows the execution of the 'dGantt' function, displaying a list of 22 generations with their start times. The execution concludes with the following summary:

```
Execução concluída.  
Custo total do aluguel de Sondas: 133017600  
Perda de volume total: 15970662  
Número de gerações: 22  
Tempo de execução: 3.686s  
>>
```

Figura 11: Imagem do software resolvendo um caso qualquer.

A resposta pode ser dada basicamente de duas maneiras: a primeira, mais simples, mostra os valores do custo total, da perda de volume total, do número de gerações para resposta e o tempo de execução do programa. A segunda maneira é o diagrama de Gantt, que é um tipo de gráfico utilizado para mostrar o avanço das diversas etapas de um projeto. Neste caso, é possível saber a ordem de atendimento dos

poços por cada sonda. É também apresentado um gráfico sobre a resposta para a função-objetivo em função da geração do Algoritmo Genético, dando detalhes sobre a convergência da resposta.

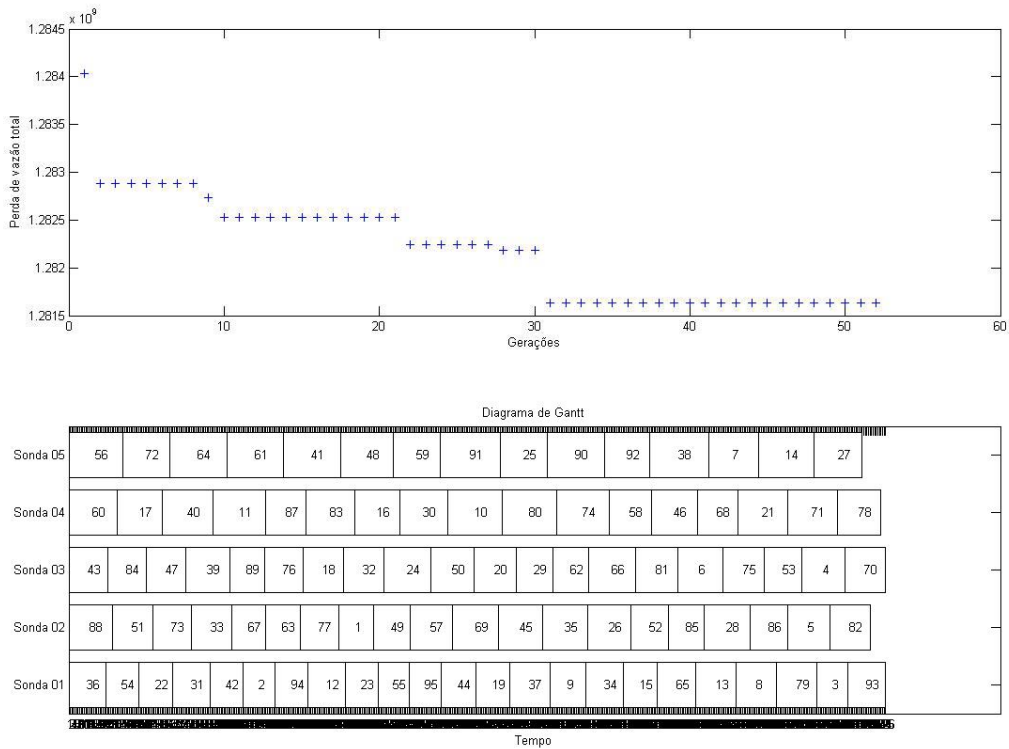


Figura 12: Exemplo de Diagrama de Gantt para 5 sondas.

## 4.2 Os parâmetros

Como já foi dito anteriormente, existem alguns parâmetros que devem ser ajustados para que o Algoritmo Genético tenha bom funcionamento. Estes critérios são definidos pelos autores por experimentação ou podem ser encontrados na literatura, como valores recomendados.

Três parâmetros foram ajustados por experimentação. São eles: critério de parada, tamanho da população e número de indivíduos da elite. A tabela com os resultados se encontra a seguir.

Tabela 8: Parâmetros definidos para o Algoritmo Genético.

<b>Parâmetro</b>	
Critério de Parada	Gerações consecutivas sem mudança na função- objetivo = 20
Tamanho da População	População inicial de 20 indivíduos
Número de Indivíduos da Elite	Membros da elite = 1

Além disso, foram adotados os seguintes parâmetros: taxa de *crossover* (90% - 70%) e a taxa de mutação (5% - 35%), variando linearmente até a 50ª geração, onde estes valores se tornam constantes. No começo do processo evolutivo, a taxa de *crossover* é alta enquanto que a taxa de mutação é baixa, então o algoritmo pode tirar vantagem das características individuais. No fim da evolução, que é a fase em que os indivíduos tendem a ficar parecidos, a taxa de *crossover* cai enquanto a de mutação aumenta, então o algoritmo pode explorar novas regiões no espaço de busca e aumentar a diversidade da população (ALVES *et al.*, 2006).

### 4.3 Cenários

Como já foi dito anteriormente, o objetivo deste trabalho é determinar uma ordem de atendimento aos  $n$  poços pelas  $m$  sondas disponíveis, de modo a minimizar o custo do aluguel das sondas e, em um segundo plano, a perda de produção de produção. No entanto, de posse de uma ferramenta como a que possuímos, esta tarefa é simples e diz pouco sobre o problema em geral. Desta forma, alguns cenários serão criados, com o objetivo de se estudar o efeito do número e do tipo de sondas usadas, do desenvolvimento do campo em módulos e de outras experimentações.

O custo total do aluguel foi trazido para Valor Presente. Foram considerados que pagamentos no final de cada mês e juros compostos. A taxa de juros utilizada foi de 12% ao ano, ou seja, 0,95% ao mês.

Utilizaremos uma variável definida como perda de volume total, dada em barris. A perda de volume é a soma das diferenças entre o quanto estaria sendo produzido se todos os poços estivessem em produção e o que está sendo de fato produzido, a cada dia. Esta medida não tem valor real, pois consideraria o poço entrando em produção logo após o final da perfuração, ignorando, por exemplo, o tempo de completação.

A perda de volume é dada em dois estágios: primeiramente ele será calculada a partir da configuração dada pelo Algoritmo Genético como resposta à minimização do custo total de aluguel. Como já foi dito, mudar a ordem dos poços, dentro desta configuração, não causará alteração no custo total. Sendo assim, o segundo estágio consistirá no câmbio desta ordem, para que se reduza ao máximo a perda de volume. A primeira perda de volume não tem grande valor, porém a segunda serve como critério secundário de comparação entre os cenários.

Daqui em diante, por motivos de simplificação, muitas vezes as sondas serão identificadas por um número. Isto poupará trabalho na descrição dos diversos cenários que serão apresentados. Consideraremos, a princípio, que existe uma sonda de cada tipo. Os módulos já possuem esse tipo de identificação.

Tabela 9: Número de identificação das sondas.

Número	Nome da Sonda
1	Enterprise
2	Cajun
3	Millenium
4	Richardson
5	M.G Hulme Jr.

#### 4.3.1 O cenário-base – As cinco sondas perfurando o campo inteiro

O primeiro cenário trata-se das cinco sondas disponíveis sendo usadas para perfurar todos os poços, sem nenhum tipo de restrição. Esta opção certamente minimizará o tempo final, e por isso, será um parâmetro para comparação. Minimizará também a perda de volume, já que quanto antes os poços estiverem perfurados, mais cedo eles poderão estar produzindo. Então, este cenário, em uma primeira análise, é a melhor opção. Então, o trabalho será comprovar ou desmentir este fato.

Tabela 10: As cinco sondas perfurando o campo inteiro.

Sondas Utilizadas	Poços Perfurados	Dias	Custo Total (US\$)	Perda de Volume (bbl)
1+2+3+4+5	Todos	585	1.278.326.822,08	111.471.192

Desta forma, o tempo mínimo para se perfurar os 95 poços do campo é de 585 dias e a perda mínima de volume é de 111.471.192 barris. Podem existir custos menores, porém, para cada caso, deve ser analisado se a economia financeira compensa o tempo gasto a mais. Se em outro cenário o custo total for maior que o US\$ 1.278.326.822,08, ele pode ser descartado, pois o tempo, necessariamente, é maior.

### 4.3.2 Cenário 2 – Uma sonda para o campo inteiro

Este cenário é composto por cada uma das cinco sondas perfurando a totalidade dos poços. Tem por objetivo comparar a relação custo-benefício de cada sonda. Porém, nem a M.G. Hulme Jr., nem a Richardson tem capacidade para perfurar todos os poços. Então, serve como comparação entre as três sondas da 5ª geração.

Tabela 11: Cada sonda perfurando o campo inteiro.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
1	Todos	2439	882.290.638,92	468.846.871
2	Todos	2667	938.125.038,37	551.204.180
3	Todos	2717	975.299.980,26	584.192.238
4	Todos	Não perfura todos os poços		
5	Todos	Não perfura todos os poços		

Podemos observar o melhor custo-benefício da sonda Enterprise em relação às outras duas. O tempo gasto para que ela perfure todos os poços é 8,5% e 10,2% menor do que os das sondas Cajun e Millenium, respectivamente. Já o total gasto com o aluguel é 6,0% e 9,5% abaixo de suas concorrentes.

Outro dado importante que podemos tirar deste cenário é que o tempo de perfuração é da ordem de quatro vezes maior ao se escolher perfurar o campo inteiro com apenas uma das sondas, ao invés de utilizar as cinco. Apesar disso, o total gasto com o aluguel de sondas não cai na mesma proporção. A economia é respectivamente de 31,0%, 26,6% e 23,7%. Aliado ao fato da perda de volume ser por volta de 5 vezes maior, dificilmente a economia conseguida compensaria o maior tempo.

### 4.3.3 Cenário 3 – Divisão por módulos

Como o campo de Marlim Sul foi dividido e desenvolvido em módulos diferentes, é importante que essa divisão seja levada em consideração. Utilizaremos essa divisão primeiramente como continuação da tarefa de classificar as sondas por ordem de custo-benefício. Para isto, cada um dos quatro módulos será perfurado por cada uma das sondas, sempre que possível. Desta maneira, as sondas M.G. Hulme Jr e Richardson só poderão ser comparadas com as demais em duas situações, os módulos 1 e 2.

#### 4.3.3.1 Módulo 1

Tabela 12: Cada sonda perfurando o módulo 1.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
1	Módulo 1	1032	457.378.646,47	59.908.209
2	Módulo 1	1130	494.455.110,80	81.210.597
3	Módulo 1	1145	513.173.629,17	88.237.505
4	Módulo 1	1340	491.812.709,87	96.095.330
5	Módulo 1	1487	510.143.283,29	92.120.032

A supremacia da sonda Enterprise é verificada nesse cenário, já que o tempo, o custo total e a perda de volumes são menores do que todas as outras. No entanto, a comparação entre as outras é mais difícil e merece atenção especial.

A M.G. Hulme Jr. é a que gasta mais tempo entre todas. Além disso, seu custo total e a perda de volume são bastante próximos dos piores casos. Por estes motivos, esta sonda pode ser considerada a menos atrativa.

De maneira semelhante, pode-se constatar que a sonda Cajun é a que precisa de menos tempo para realizar todo o serviço e a que tem menor perda de volume entre as três sondas restantes. Como o seu custo total é bastante próximo do melhor caso, esta fica com o posto de segundo melhor custo-benefício para o módulo 1.

Para as sondas Millenium e Richardson, a comparação deve ser mais detalhada. O custo total da Richardson é 4,2% menor do que a Millenium. No entanto, o tempo gasto por esta sonda é 17% maior do que o gasto por sua concorrente. É importante



lembrar também que a sonda Richardson não está apta para perfurar todos os poços do campo em questão, enquanto a sua concorrente está. Desta maneira, concluímos que a sonda 3 tem melhor relação custo-benefício que a sonda 4 dentro deste cenário.

#### 4.3.3.2 Módulo 2

Tabela 13: Cada sonda perfurando o módulo 2.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
1	Módulo 2	470	227.593.885,49	14.173.679
2	Módulo 2	511	245.285.507,98	17.993.455
3	Módulo 2	525	259.248.109,39	16.649.627
4	Módulo 2	615	254.351.906,71	20.431.851
5	Módulo 2	679	266.148.303,45	21.783.445

A simulação deste cenário serve para corroborar as conclusões tiradas a partir do módulo 1. Mais uma vez o custo total do aluguel da sonda Richardson é menor que o da Millenium. Porém, esta diferença é muito pequena para compensar o tempo a mais que seria gasto utilizando a primeira. As demais sondas também mantêm suas posições. Concluímos que a classificação por custo-benefício fica assim:

1. Entreprise
2. Cajun
3. Millenium
4. Richardson
5. M.G Hulme Jr.

#### 4.3.3.3 Módulo 3 e Módulo 4

A simulação dos módulos 3 e 4 é útil para confirmar tendência de custo-benefício acima explicitada, já que as posições relativas entre as três sondas da quinta geração se mantêm. Servirá também para o próximo passo na pesquisa: determinar a melhor composição por módulos.

Tabela 14: Cada sonda perfurando o módulo 3.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
1	Módulo 3	475	230.004.837,67	14.180.591
2	Módulo 3	522	250.545.047,97	15.976.497
3	Módulo 3	532	262.691.630,82	17.077.681
4	Módulo 3	Não perfura todos os poços		
5	Módulo 3	Não perfura todos os poços		

Tabela 15: Cada sonda perfurando o módulo 4.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
1	Módulo 4	459	222.289.790,70	17.219.798
2	Módulo 4	501	241.612.857,40	17.016.993
3	Módulo 4	512	252.852.989,22	16.258.236
4	Módulo 4	Não perfura todos os poços		
5	Módulo 4	Não perfura todos os poços		

#### 4.3.3.4 Composição por módulos simultâneos

A composição por módulos pode ser explicada da seguinte maneira: caso a empresa operadora do campo fosse desenvolver todo o campo de uma só vez, seguindo a divisão por módulos, e escolhendo uma sonda para cada módulo, qual seria a melhor escolha?

A resposta poderia ser obtida fazendo a combinação de todos os casos possíveis e comparando os resultados. Isto seria extremamente trabalhoso e demorado, já que teríamos 120 casos. Porém, restringiremos o problema a dois únicos casos, observando algumas características mostradas a partir das simulações isoladas dos módulos:

1. Sendo a pior sonda entre as cinco disponíveis, a M.G Hulme Jr. pode ser eliminada desta situação, já que qualquer sonda alocada no lugar desta obterá melhor resultado.
2. Devido as restrições de lâmina d'água, a Richardson e a M.G Hulme Jr. poderão ser mandadas apenas para o módulo 1 ou 2.
3. Devemos observar que o módulo 1, por ser muito maior e por necessitar de muito mais tempo que os outros três, precisa sofrer a maior

otimização. Por esta razão, na melhor solução, a sonda Enterprise deverá, obrigatoriamente, atender este módulo.

Juntando estas três restrições, temos que o módulo 1 será atendido pela sonda 1, o módulo 2 pela sonda 4, restando definir qual sonda atenderá os módulos 3 e 4. O resultado será dado por comparação:

Tabela 16: Sonda 2 no módulo 3 e sonda 3 no módulo 4.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
2	Módulo 3	522	250.545.047,97	15.976.497
3	Módulo 4	512	252.852.989,22	16.258.236
<b>TOTAL</b>			<b>503.398.037,18</b>	<b>32.234.733</b>

Tabela 17: Sonda 3 no módulo 3 e sonda 2 no módulo 4.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
3	Módulo 3	532	262.691.630,82	17.077.681
2	Módulo 4	501	241.612.857,40	17.016.993
<b>TOTAL</b>			<b>504.304.488,22</b>	<b>34.094.674</b>

A soma dos dias não é importante, pois, neste caso, os trabalhos são independentes. Observando que o custo total nos dois casos é praticamente igual, a escolha entre um dos dois casos é praticamente indiferente. No entanto, podemos considerar que para a empresa é mais interessante que ambos os módulos estejam prontos e que a perda de volume seja minimizada. Por este motivo, optaremos pelo primeiro caso. Desta forma, a composição ficaria a seguinte:

Tabela 18: Melhor composição encontrada de sonda por módulo considerando perfuração simultânea.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
1	Módulo 1	1032	457.378.646,47	59.908.209
4	Módulo 2	615	254.351.906,71	20.431.851
2	Módulo 3	522	250.545.047,97	15.976.497
3	Módulo 4	512	252.852.989,22	16.258.236
<b>TOTAL</b>			<b>1.215.128.590,36</b>	<b>112.574.793,00</b>

#### 4.3.3.5 Composição por módulos não simultâneos

No entanto, a empresa poderia optar também por desenvolver os quatro módulos, um após o outro. Esta opção pode ter sentido caso a empresa não tenha dinheiro suficiente para investir no desenvolvimento do campo inteiro de uma vez só. Desta maneira, enquanto o segundo módulo estivesse sendo desenvolvido, o primeiro já estaria em produção, trazendo retorno financeiro. Como foi anteriormente mostrado, a sonda Enterprise é a mais atraente para todos os módulos, sendo a escolhida sempre.

Tabela 19: Melhor composição encontrada de sonda por módulo considerando perfuração não simultânea.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
1	Módulo 1	1032	457.378.646,47	59.908.209
1	Módulo 2	470	227.593.885,49	14.173.679
1	Módulo 3	475	230.004.837,67	14.180.591
1	Módulo 4	459	222.289.790,70	17.219.798
<b>TOTAL</b>		<b>2436</b>	<b>1.137.267.160,34</b>	<b>105.482.277,00</b>

Neste caso, o gasto com o aluguel de sondas seria 6,4% menor do que o desenvolvimento por módulos simultâneos, enquanto a perda de volume diminuiria 6,3%. No entanto, o tempo para que o todo o campo esteja perfurado é 136% maior.

Sobre a taxa diária de aluguel é importante frisar que muitas vezes contratos mais longos são recompensados com desconto, ou seja, quanto maior o tempo de contrato, menor o valor pago por dia. A própria taxa diária adotada neste trabalho, de US\$ 541.000, é uma média do valor do contrato por 3 anos – US\$ 553.400 - e por 7 anos – US\$ 528.000. Assim sendo, caso adotasse este sistema para o desenvolvimento, a empresa poderia conseguir uma economia ainda maior.

#### 4.3.4 Cenário 4 – Quatro sondas para todo o campo

A divisão por módulos tem basicamente dois sentidos: dentro de um módulo os poços estão relativamente próximos e dentro de uma faixa de lâmina d'água. A consideração de que o tempo de deslocamento entre os poços é nulo faz com que esta divisão seja, em parte, sem sentido. Então, voltaremos a desconsiderar a divisão por

módulos, com dois propósitos principais: observar os efeitos da divisão por módulos sobre as respostas e tentar correlacionar a melhor solução para este caso com a solução dada para o caso da composição por módulo.

Tabela 20: Combinações de quatro sondas para o campo inteiro.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
1+2+3+4	Todos	686	1.239.501.632,66	152.977.534
1+2+3+5	Todos	704	1.248.450.605,99	149.816.737
1+2+4+5	Todos	732	1.236.100.261,32	149.517.714
2+3+4+5	Todos	759	1.280.263.656,50	149.652.787

De acordo com o que já tinha sido dito, o melhor caso é o que exclui a sonda M. G. Hulme Jr., por esta ser a pior dentro do nosso caso. Conforme o que era de se esperar, o caso que elimina a sonda Enterprise é o menos atraente.

Também de acordo com o previamente observado, a escolha entre a Millenium e Richardson não é tão óbvia. O caso em que a sonda 3 é a escolhida, o tempo é menor, enquanto quando a sonda 4 é a preferida, o custo total é menor. Porém, como ocorreu anteriormente, a economia em 1,0% nos custos não chega a ser interessante frente ao acréscimo de 3,8% do tempo.

É interessante notar que o caso em que houve a maior perda de volume foi justamente o caso em que o desenvolvimento ocorreu em menos tempo, enquanto os outros 3 obtiveram resultados praticamente iguais. A explicação para essa perda de volume mais alta é que como primeiramente o critério é de minimização dos custos, a programação obtida pode ser ruim para a minimização da perda de volume. Assim, mesmo depois da otimização deste critério, é possível que o resultado não seja tão bom quanto para os casos considerados piores. Outra opção é de que a o Algoritmo Genético ficou mais distante do ótimo global para esse caso do que para os outros.

Comparemos também este caso com o da composição por módulos simultâneos. Embora o tempo para que todos os poços estejam prontos seja muito menor, o custo todo o campo sendo atendido por quatro sondas é próximo que ao do dividido por módulos. A explicação para isso é que no primeiro caso as quatro sondas ficarão

alugadas por 686 dias, enquanto no segundo, três das quatro sondas já terão sido devolvidas antes desta data.

É importante também observar que no caso de não haver divisão por módulos o tempo total é bem menor (686 dias), o que pode parecer ser mais interessante. Mas é isso não é necessariamente verdade, principalmente pensando que os módulos são independentes e que no segundo caso, três módulos estariam completamente perfurados até o dia 615. Comprovamos isso ao comparar os valores de perda de volume: no caso da divisão por módulos, a perda é 26,4% menor do que o no caso sem divisão. Este valor é bastante notável e deve ser considerado.

#### 4.3.5 Cenário 5 – O efeito do número de sondas

Ao se escolher desenvolver o campo sem a divisão por módulos, o número de sondas pode variar conforme a vontade da empresa e a disponibilidade de sondas no mercado. Considerando conhecida a classificação de custo-benefício a qual explicitamos neste trabalho, a empresa escolherá as sondas seguindo esta classificação. Por exemplo, se quiser trabalhar com uma sonda, a escolhido será a Enterprise, se optar por duas, além da Enterprise, escolherá a Cajun, e assim por diante. Foi deste modo que este cenário foi desenvolvido.

Tabela 21: Cenários considerando o efeito do número de sondas diferentes.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
1	Todos	2439	882.290.638,92	468.846.871
1+2	Todos	1279	1.088.163.840,77	250.343.044
1+2+3	Todos	871	1.189.987.134,29	191.592.877
1+2+3+4	Todos	686	1.239.501.632,66	152.977.534
1+2+3+4+5	Todos	585	1.278.326.822,08	111.471.192

O impacto do aumento do número de sondas nos primeiros estágios no tempo de perfuração e na perda de volume é enorme, enquanto no custo total esse impacto não é tão grande. Porém, podemos notar que esse retorno diminui com o aumento de sondas. Isto é de se esperar, pois estão sendo adicionadas sondas cada vez piores. No entanto, até o caso com cinco sondas, foi proveitoso o aumento número de sondas, pois ainda

houve uma melhoria boa no tempo e na perda de volume para um aumento incremental do custo relativamente baixo. Uma sexta sonda, com um custo-benefício pior que a sonda 5, talvez ainda fosse vantajosa.

Figura 13: Tempo gasto na perfuração considerando o número de sondas.

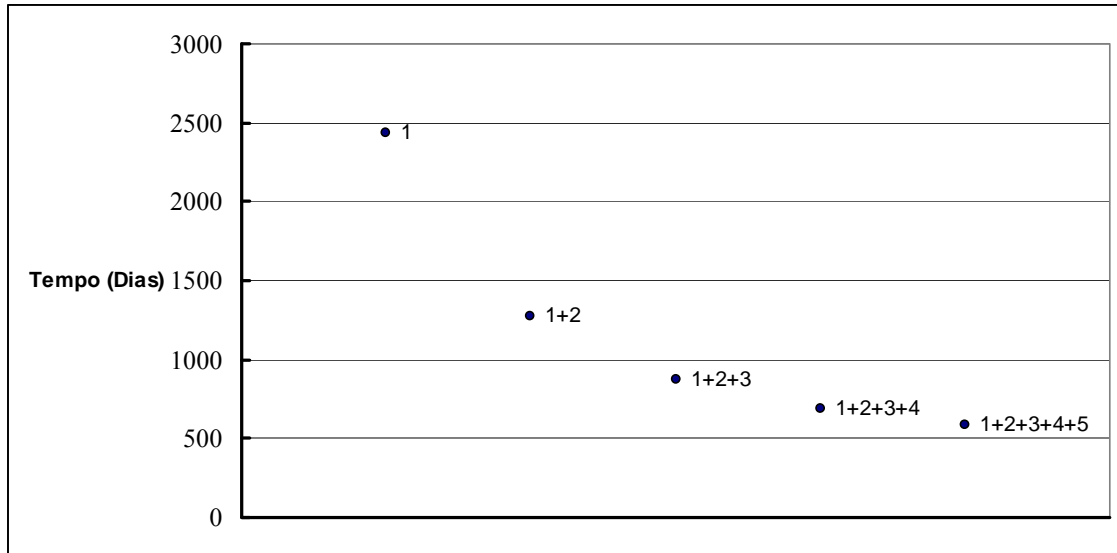
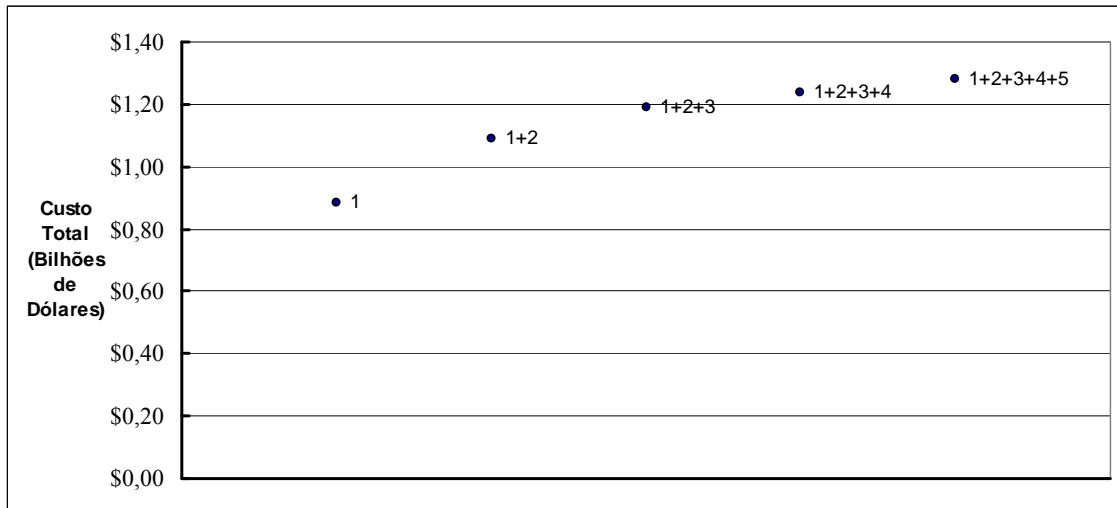


Figura 14: Custo total do projeto considerando o número de sondas.



Mesmo que pudéssemos escolher por adicionarmos apenas sonda do tipo 1, também haveria um ponto de ótimo para o número de sondas. Por ser tratar de um modelo usando sondas heterogêneas, esse efeito não foi testado. Porém, COSTA (2005) observou que há uma curva de melhora da FO à medida que aumentamos o número de máquinas, mas, é de se esperar que haja um certo valor de  $m$  no qual pode não ser mais interessante se alocar mais uma máquina.

#### **4.4 Recapitulação dos resultados – o melhor cenário**

Agora, com todas as opções mais viáveis para o desenvolvimento do campo simuladas, é possível concluir sobre as melhores configurações. De fato, o cenário-base, com cinco sondas cobrindo todos os poços, é a melhor opção. O custo total de nenhum outro cenário foi baixo o suficiente para compensar o maior tempo de execução das perfurações e a maior perda de volume.

Como já foi dito, o desenvolvimento utilizando quatro sondas (Enterprise, Cajun, Millenium e Richardson) por todo o campo é mais vantajoso que o por composição por módulos simultâneos em certos casos, mas o segundo também tem suas aplicações. Pensando nisso, poderia haver alguma composição por módulo, derivada da estudada anteriormente, que se aproximasse da resposta obtida no caso base. Uma resposta “híbrida” poderia ser a solução mais próxima da realidade, já que dificilmente um campo das proporções do aqui retratado seria desenvolvido todo de uma vez.

Por exemplo, a sonda 5 sendo alocada para perfurar poços no módulo 1, juntamente a sonda 1 e as demais sondas alocadas como na composição por módulos simultâneos. Outra opção poderia ser que, quando uma das sondas terminasse as suas perfurações, ela fosse re-allocada para ajudar a sonda 1 no módulo 1. Porém existem uma infinidade de combinações possíveis, algumas não podendo ser diretamente implementadas na nossa ferramenta sem que fossem feitas adaptações. Por esse motivo, esses casos não foram estudados.

#### **4.5 Experimentações**

Até agora trabalhamos com uma sonda de cada tipo. Porém, como vimos, a sonda Enterprise é a mais vantajosa e seria interessante que existisse mais de uma dela. Então duas experimentações serão feitas, com o objetivo de mostrar o efeito que uma sonda, com características iguais a da Enterprise, nomeada de 1', causaria.



Tabela 22: Experimentações envolvendo a duplicação da sonda Enterprise.

<b>Sondas Utilizadas</b>	<b>Poços Perfurados</b>	<b>Dias</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>	<b>Perda de Volume (bbl)</b>
1+1'+2+3+4	Todos	538	1.247.846.951,67	117.661.130
1+1'+2+3+4+5	Todos	477	1.278.172.142,97	107.839.629

Por semelhança, é interessante que esses resultados sejam comparados com o cenário-base, ou seja, as cinco sondas para o campo inteiro. A primeira experimentação pode ser interpretada a sonda 1' substituindo a sonda 5. Neste caso, os ganhos de tempo e financeiro são 8,0 e 2,4%, respectivamente. No entanto, a perda de volume aumentou em 5,6%, o que não condiz com o esperado. As razões para isso podem ser as mesmas explicadas durante o cenário 4.

A segunda experimentação trata-se do cenário-base acrescido da sonda 1' ou da experimentação 1 acrescida da sonda 5. Como foi comentado anteriormente, dependendo de suas características, a adição de uma sexta sonda, inferior a sonda 5, seria vantajosa em relação ao cenário-base. Considerando que a sonda 1' é bem melhor que a sonda 5, então certamente essa adição também será vantajosa. Em termos de tempo, a economia é de 18,5%, enquanto a perda de volume diminuiu em 3,3%. Não houve praticamente mudança no custo final

Tomando como base a experimentação 1, os ganhos foram os seguintes: 11,3% em relação ao tempo e 8,3% em relação a perda de volume. Em compensação, houve um acréscimo no custo de 2,4%.

Diversas outras experimentações poderiam ser testadas, buscando a melhor configuração teórica possível. Porém, este resultado cairia no caso de sondas homogêneas, ou seja, a melhor sonda seria repetida até um número  $m$  de sondas iguais, que otimizaria a função-objetivo. Como o problema aqui tratado baseia-se em sondas heterogêneas, as experimentações feitas são suficientes.

## 5 Conclusões

O problema de otimização de itinerário de sondas é bastante comum na indústria de petróleo. Enquadra-se bem em cenários nos quais há grandes diferenças de características dos poços e das sondas. Estas heterogeneidades fazem com que o tempo de serviço varie bastante a cada poço e, assim, a ordem de atendimento passa a ser importante.

O engenheiro que planeja as perfurações deve possuir uma maneira fácil e eficaz para tomada de decisão. Desta forma, é essencial que haja uma ferramenta poderosa o suficiente para admitir a influência das diversas variáveis nesse contexto e, que mesmo assim, seja rápida o bastante para conseguir acompanhar possíveis mudanças de cenários.

A modelagem como programação inteira binária permite a utilização de métodos de soluções exatas, presentes em pacotes de otimização e *solvers*. Porém, conforme o número de variáveis e de restrições aumenta, a resposta dada por este tipo de *software* passa a ser mais demorada, tomando tempos de computador cada vez maiores e inviabilizando a tomada de decisão desta maneira.

O uso de meta-heurísticas, como é o caso do Algoritmo Genético, permite que o tratamento de problemas deste tipo se torne mais fácil, pois estas meta-heurísticas são capazes de obter boas soluções em tempos razoáveis.

Neste trabalho foi proposto o uso de uma ferramenta baseada no Algoritmo Genético como alternativa para o planejamento da frota de sondas, diferentes entre si, a ser usada no atendimento de uma série de poços a serem perfurados. Mesmo não fazendo o uso de dados reais, tentou-se aproximar o problema o máximo possível da realidade.

Dentro dos cenários criados, foi possível perceber que mesmo com taxas diárias de aluguel bem mais caras, as sondas mais modernas têm melhor custo-benefício do que as de gerações mais antigas, além de estarem aptas a trabalharem em ambientes mais

desfavoráveis. São capazes de perfurar sob lâmina d'água mais profundas e com velocidades maiores.

O custo com aluguel de sondas, apesar de ser bastante impactante na viabilidade de um projeto de desenvolvimento de um campo, não varia tanto com os diferentes programas de itinerários como era de se imaginar. No entanto, o tempo gasto com o desenvolvimento se mostrou mais sensível às decisões de número e tipo de sondas utilizadas. Isto faz com que, em muitos casos, o melhor programa seja aquele que minimize o tempo total.

A perda total de volume, mesmo não sendo uma variável real, tem o seu valor como comparação entre os cenários. Dentro da modelagem do trabalho, ela poderia ser uma maneira de substituir as decisões estratégicas que as empresas adotam e que seriam impossíveis de serem reproduzidas. Estas decisões envolvem a perfuração de certos poços em determinadas partes do campo em detrimento de outros.

Nem sempre é interessante para a empresa que o campo seja desenvolvido no menor tempo possível. Claro que quanto antes ela puder obter o retorno trazido pela venda do petróleo produzido, melhor para ela. Mas nem sempre há disponibilidade de capital para que o campo seja desenvolvido todo de uma vez. Por isso, nem mesmo o caso concluído como o melhor, é o mais atraente para a empresa. Porém, essa decisão dificilmente será tomada pelo engenheiro responsável pelo planejamento, mas sim pela alta cúpula da empresa.

Algumas simplificações foram feitas ao longo do trabalho. Considerar nula a distância entre os poços, ignorando o tempo de deslocamentos é, de certa maneira, grosseiro. Porém, dentro do nosso modelo, considerar tais tempos traria mais complicações do que melhorias. Trazer a perda de volume para Valor Presente, considerando diferentes preços para o barril de petróleo seria uma alternativa interessante.

Neste trabalho, não foi possível se fazer uso de dados reais. Seria bastante interessante que nos próximos trabalhos fosse usado um cenário real, já executado. Neste caso, seria possível ter idéia de qual seria o ganho se a programação por

Algoritmo Genético tivesse sido usada no caso. Considerar o tempo de deslocamento entre os poços teria muito mais sentido em um cenário real, em que a distância entre poços é conhecida.

Estudos sobre o efeito de restrições de janela de tempo sobre tempo total do projeto também seriam de grande valia. No entanto, não foi possível conciliar essas restrições com os dois critérios de otimização utilizados no trabalho. Esta é outra sugestão para trabalhos futuros.

## 6 Referências Bibliográficas

- ACOSTA, M., FARIAS, R., VILELA, Á., PINEDA, F., MONTANHA, R., GARCIA, E., CALDERON, A., MAGNO, C.,GERMINO, M., *Deepwater Horizontal Openhole Gravel Packing in Marlim Sul Field, Campos Basin, Brazil—Completion Project Learning Curve and Optimization*. In: 2005 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, Texas, E.U.A., 2005.
- ALOISE, D. J., ALOISE, D., ROCHA, C. T. M., RIBEIRO FILHO, J.C., MOURA, L.S.S., RIBEIRO, C.C. ,*Scheduling Workover Rigs for Onshore Oil Production*. Preprint submitted to Elsevier Science. 2004. Disponível em <<http://www-di.inf.puc-rio.br/~celso/artigos/rigs.pdf>>. Acessado em 21 dez 2008.
- ALOISE, D. ; NORONHA, T.F., MAIA, R. S. ; BITTENCOURT, V. G. ; ALOISE, D. J., *Heurísticas de Colônia de Formigas com Path-Relinking para o Problema de Otimização da Alocação de Sondas de Produção Terrestre - SPT*. In: XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2002, Rio de Janeiro. Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2002.
- ALVES, V.R.F.M., FERREIRA FILHO, V.J.M., *Algoritmo Genético para a Solução para o Problema de Roteamento e Sequenciamento de Sondas de Manutenção*. T & N Petróleo, v. 49, pp 148-154, 2006.
- BARBASSA, A.G. Crescimento: Desafios e Oportunidades. In: IBEF, Rio de Janeiro, Brasil, 2008. Disponível em <<http://www2.petrobras.com.br/ri/pdf/Diretor-Almir-IBEF-final.pdf>>. Acessado em 21 dez. 2008.
- BARNES, J. W., BRENNAN, J. J., KNAP, R. M., 1977, *Scheduling a Backlog of Oilwell Workovers*. Journal of Petroleum, pp 1651-1653, 1977.
- BNET BUSINESS NETWORK. Acessado em Dezembro de 2008. <[http://findarticles.com/p/articles/mi\\_qa5367/is\\_/ai\\_n25420570](http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5367/is_/ai_n25420570)>.

- BOAVENTURA-NETTO, P.O.. Um estudo sobre a construção de um algoritmo VNS para o Problema Quadrático de Alocação. Anais XII CLAIO, pp. 37 (resumo) / CD-ROM, Havana, Cuba, outubro 2004. Disponível em [http://www.cigraf.pep.ufrj.br/~boaventura/home\\_fichiers/home\\_artigos/artigos\\_5.pdf](http://www.cigraf.pep.ufrj.br/~boaventura/home_fichiers/home_artigos/artigos_5.pdf)>. Acessado em 21 dez. 2008.
- BOURGOYNE JR., A.T., MILLHEIM, K.K., CHENEVERT, M.E., YOUNG JR., F.S., *Applied Drilling Engineering*. SPE Textbook Series, Vol. 2.
- BUSSAB, W.O., MORETTIN, P.A., *Estatística Básica*, 5. ed., Editora Saraiva, p. 309-310, 2003.
- CORDENONSI, A.Z., MULLER, F.M., BASTOS, F.P., *O Ensino de Heurísticas e Metaheurísticas na Área de Pesquisa Operacional sob a Ótica de Educação Dialógica Problematizadora*. CINTED-UFRGS, v.3, maio, 2005.
- COSTA, L.R., *Soluções para o Problema de Otimização de Itinerário de Sondas*. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- DALBONI, F.L., *Algoritmos Evolutivos Eficientes para um Problema de Roteamento de Veículo*. Dissertação de Mestrado, UFF, Niterói, Brasil, 2003.
- DEPARTMENT OF PETROLEUM RESOURCES. Acessado em Dezembro de 2008. [http://www.dprnigeria.com/news\\_archive/in\\_the\\_news\\_oil\\_rigs\\_hit\\_19\\_in\\_west\\_africa.html](http://www.dprnigeria.com/news_archive/in_the_news_oil_rigs_hit_19_in_west_africa.html)>.
- DIAZ, A. *Optimización Heurística Y Redes Neuronales*. Editorial Paraninfo, Madrid, 1996.
- DORIGO, M., BLUM, C., *Ant colony optimization: Introduction and recent trends*. *Physics of Life Reviews*, 2(4):353-373, 2005.

FIGUEIREDO JR., F.P., BRANCO, C.C.M., PRAIS, F., SALOMÃO, M.C., MEZOMMO, C.C., *The Challenges of Developing a Deep Offshore Heavy-Oil Field in Campos Basin*. In: 2007 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference held in Buenos Aires, Argentina, 15–18 April 2007.

FINANCIAL SENSE. Acessado em Dezembro de 2008. <<http://www.financialsense.com/Market/cpuplava/2008/0409.html>>.

GERMINO, M., CALDERON, A., MOTTA, E.P., *The Keys to Successfully Acidizing Horizontal Injection Wells in the Marlim Sul Field*. In: 2004 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, E.U.A., setembro, 2004.

INTERNACIONAL BUSINESS TIMES. Acessado em Dezembro de 2008. <<http://www.ibtimes.com/articles/20081009/transocean-shares-rally-after-fleet-update.htm>>.

OLIVEIRA, F. L., KROPF, T.C.L., *Aplicação de um Algoritmo Genético na Resolução de Problema de Alocação de Sondas de Perfuração a Poços*. 2008.

OLIVEIRA, R., DROGUETT, E., *Otimização Multiobjetivo da Confiabilidade via Sistemas Multiagentes Baseado em Colônia de Formigas*. In: XIV CLAIO. Colômbia, 2008. Disponível em <[http://www.socio.org.co/CLAIO2008/submissions/CLAIO\\_2008\\_submission\\_295.pdf](http://www.socio.org.co/CLAIO2008/submissions/CLAIO_2008_submission_295.pdf)>. Acessado em 21 dez. 2008.

PACHECO, M.A.C., *Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações*. 2005. Disponível em <<http://www.inf.unioeste.br/~claudia/CE-Apostila-Comp-Evol.pdf>>. Acessado em 21 dez. 2008.

PETROBRAS, *Módulo 3 do Campo de Marlim Sul - P-56*. In Onip e Abemi, maio de 2007.

PETROBRAS – Relações com os Investidores. Acessado em Dezembro de 2008.  
<[http://www2.petrobras.com.br/portal/frame\\_ri.asp?pagina=/ri/port/index.asp&lang=pt&area=ri](http://www2.petrobras.com.br/portal/frame_ri.asp?pagina=/ri/port/index.asp&lang=pt&area=ri)>.

PIMENTA, D.J., *Algoritmo de Otimização para o Problema de Roteamento de Veículos no Transporte Conjunto de Cargas e Passageiros*. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2001.

PINTO, A.C.C., GUEDES, S.S., BRHUN, C.H.L., GOMES, J.A.T., SÁ, A.N. de, FAGUNDES NETTO, J.R., *Marlim Complex Development: A Reservoir Engineering Overview*. In: 2001 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, 2001

PROJETO ISIS. Acessado em Dezembro de 2008.  
<<http://www.geocities.com/igoryepes/index.htm>>

REUTERS. Acessado em Dezembro de 2008  
<<http://www.reuters.com/article/pressRelease/idUS151104+06-May-2008+PNW20080506>>.

RIGZONE DATA CENTER. Acessado em Dezembro 2008. <  
<http://www.rigzone.com/data/>>

ROSENBLATT, L., *Aplicação de Dinâmica de Sistemas ao Estudo do Comportamento das Taxas Diárias de Aluguel de Sondas de Perfuração Off-Shore*. Projeto Final de Graduação, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

SUCUPIRA, I.R., *Métodos Heurísticos Genéricos: Meta-Heurísticas e Hiper-Heurísticas*. Projeto Final de Graduação, USP, São Paulo, 2004. Disponível em <  
<http://www.ime.usp.br/~igorrs/monografias/metahiper.pdf>>. Acessado em 21 dez 2008.

THOMAS, J. E., *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, 2.ed., Editora Interciência, p. 55-118, 2001.



TOOLPUSHER OFFSHORE WORKERS HOMEPAGE. Acessado em Dezembro 2008. <<http://www.toolpusher.co.uk/>>

TORTELLY, A., OCHI, L.S., *Um GRASP eficiente para Problemas de Roteamento de uma Frota de Veículos* p. 149-158, 2005. Disponível em <<http://www.sbmac.org.br/tema/seletas/docs/v7/16-To-Oc.pdf>>. Acessado em 21 dez. 2008.

TRANSOCEAN, *Matching Rigs with Deepwater Programs*. In: IADC-GOM, Houston, Texas, outubro 2005.

TRANSOCEAN, *Transocean 2007 Annual Report*. Dezembro 2007

VASCONCELLOS, R.V.J.C., *Um Algoritmo Genético para o Problema de Scheduling de Projetos com Restrições de Recursos – Uma solução com Gerenciamento de Risco*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

## Anexo I

Este anexo apresenta os valores das lâminas d'água, da perda de produção e da profundidade para os todos os poços produtores e injetores.

Tabela 23: Resumo das características geradas para cada um dos poços.

<b>Módulo</b>	<b>Poço</b>	<b>Numeração</b>	<b>LDA (m)</b>	<b>Perda de produção (bpd)</b>	<b>Profundidade (m)</b>
<b>Módulo 1</b>	<b>Produtor 1</b>	<b>1</b>	1461	8626,3	2657
	<b>Produtor 2</b>	<b>2</b>	1216	10424,6	3355
	<b>Produtor 3</b>	<b>3</b>	806	8724,1	3130
	<b>Produtor 4</b>	<b>4</b>	1492	8710,6	3155
	<b>Produtor 5</b>	<b>5</b>	893	7839,9	2671
	<b>Produtor 6</b>	<b>6</b>	1473	9033,7	2799
	<b>Produtor 7</b>	<b>7</b>	1115	7976,7	3149
	<b>Produtor 8</b>	<b>8</b>	1092	7037	3280
	<b>Produtor 9</b>	<b>9</b>	1320	8031,4	2552
	<b>Produtor 10</b>	<b>10</b>	1017	7443,2	2833
	<b>Produtor 11</b>	<b>11</b>	966	8695,8	3162
	<b>Produtor 12</b>	<b>12</b>	1398	9561,9	2856
	<b>Produtor 13</b>	<b>13</b>	887	7282,7	3047
	<b>Produtor 14</b>	<b>14</b>	1008	7675,7	3126
	<b>Produtor 15</b>	<b>15</b>	1116	9915,3	3340
	<b>Produtor 16</b>	<b>16</b>	1134	9184,5	3110
	<b>Produtor 17</b>	<b>17</b>	1081	6873,7	3309
	<b>Produtor 18</b>	<b>18</b>	1238	8170	3195
	<b>Produtor 19</b>	<b>19</b>	1308	7820,9	3142
	<b>Produtor 20</b>	<b>20</b>	1029	6088,1	2960
	<b>Produtor 21</b>	<b>21</b>	895	4827	3272
	<b>Produtor 22</b>	<b>22</b>	1342	5370,8	2991
<b>Módulo 2</b>	<b>Produtor 23</b>	<b>23</b>	1257	19715,2	2942
	<b>Produtor 24</b>	<b>24</b>	1264	15197,4	3062
	<b>Produtor 25</b>	<b>25</b>	1226	20306,1	3345
	<b>Produtor 26</b>	<b>26</b>	1143	18361,8	3234
	<b>Produtor 27</b>	<b>27</b>	1376	15696,3	3391
	<b>Produtor 28</b>	<b>28</b>	1222	20858,1	3269
	<b>Produtor 29</b>	<b>29</b>	1371	18025	3426
	<b>Produtor 30</b>	<b>30</b>	1419	15923,8	3081
	<b>Produtor 31</b>	<b>31</b>	1126	21161,8	3240

	<b>Produtor 32</b>	<b>32</b>	1140	17727	3473
<b>Módulo 3</b>	<b>Produtor 33</b>	<b>33</b>	1712	7582,3	2604
	<b>Produtor 34</b>	<b>34</b>	1786	10161,5	3238
	<b>Produtor 35</b>	<b>35</b>	1819	6683,1	3007
	<b>Produtor 36</b>	<b>36</b>	1453	9916,8	3123
	<b>Produtor 37</b>	<b>37</b>	1466	8679,5	3157
	<b>Produtor 38</b>	<b>38</b>	1800	9737,9	3399
	<b>Produtor 39</b>	<b>39</b>	1715	9753,5	2694
	<b>Produtor 40</b>	<b>40</b>	1564	11308,9	3466
	<b>Produtor 41</b>	<b>41</b>	1693	10306,3	2888
	<b>Produtor 42</b>	<b>42</b>	1647	6856,2	2813
<b>Módulo 4</b>	<b>Produtor 43</b>	<b>43</b>	2465	4985,7	2973
	<b>Produtor 44</b>	<b>44</b>	1528	6480,2	2560
	<b>Produtor 45</b>	<b>45</b>	1642	5651,2	3289
	<b>Produtor 46</b>	<b>46</b>	2215	5675,3	3232
	<b>Produtor 47</b>	<b>47</b>	2578	6406,8	2605
	<b>Produtor 48</b>	<b>48</b>	2097	5760,5	3418
	<b>Produtor 49</b>	<b>49</b>	1728	3430,2	2559
	<b>Produtor 50</b>	<b>50</b>	1706	5283,4	3493
	<b>Produtor 51</b>	<b>51</b>	2127	6426,6	3336
	<b>Produtor 52</b>	<b>52</b>	2438	5696,8	2570
	<b>Produtor 53</b>	<b>53</b>	1701	5252,3	2661
<b>Módulo 1</b>	<b>Injetor 1</b>	<b>54</b>	1325	0	2544
	<b>Injetor 2</b>	<b>55</b>	917	0	3067
	<b>Injetor 3</b>	<b>56</b>	1074	0	2636
	<b>Injetor 4</b>	<b>57</b>	932	0	2887
	<b>Injetor 5</b>	<b>58</b>	1192	0	3148
	<b>Injetor 6</b>	<b>59</b>	1273	0	3155
	<b>Injetor 7</b>	<b>60</b>	1408	0	3434
	<b>Injetor 8</b>	<b>61</b>	808	0	2890
	<b>Injetor 9</b>	<b>62</b>	1231	0	3219
	<b>Injetor 10</b>	<b>63</b>	1192	0	3351
	<b>Injetor 11</b>	<b>64</b>	1339	0	2855
	<b>Injetor 12</b>	<b>65</b>	1208	0	2512
	<b>Injetor 13</b>	<b>66</b>	1169	0	3359
	<b>Injetor 14</b>	<b>67</b>	1388	0	2846
	<b>Injetor 15</b>	<b>68</b>	809	0	3391
<b>Módulo 2</b>	<b>Injetor 16</b>	<b>69</b>	1111	0	3346
	<b>Injetor 17</b>	<b>70</b>	1486	0	2878
	<b>Injetor 18</b>	<b>71</b>	1186	0	3297

	<b>Injetor 19</b>	<b>72</b>	1438	0	3419
	<b>Injetor 20</b>	<b>73</b>	1240	0	2511
	<b>Injetor 21</b>	<b>74</b>	1186	0	2615
	<b>Injetor 22</b>	<b>75</b>	1382	0	3495
	<b>Injetor 23</b>	<b>76</b>	1304	0	2950
	<b>Injetor 24</b>	<b>77</b>	1332	0	3066
<b>Módulo 3</b>	<b>Injetor 25</b>	<b>78</b>	1664	0	2864
	<b>Injetor 26</b>	<b>79</b>	1646	0	2539
	<b>Injetor 27</b>	<b>80</b>	1606	0	2535
	<b>Injetor 28</b>	<b>81</b>	1803	0	2880
	<b>Injetor 29</b>	<b>82</b>	1588	0	2759
	<b>Injetor 30</b>	<b>83</b>	1809	0	3212
	<b>Injetor 31</b>	<b>84</b>	1811	0	2754
	<b>Injetor 32</b>	<b>85</b>	1693	0	3154
	<b>Injetor 33</b>	<b>86</b>	1452	0	2725
<b>Módulo 4</b>	<b>Injetor 34</b>	<b>87</b>	2221	0	3416
	<b>Injetor 35</b>	<b>88</b>	1515	0	2576
	<b>Injetor 36</b>	<b>89</b>	1593	0	2715
	<b>Injetor 37</b>	<b>90</b>	1862	0	2580
	<b>Injetor 38</b>	<b>91</b>	2018	0	2797
	<b>Injetor 39</b>	<b>92</b>	1999	0	3070
	<b>Injetor 40</b>	<b>93</b>	2500	0	3275
	<b>Injetor 41</b>	<b>94</b>	2589	0	3008
	<b>Injetor 42</b>	<b>95</b>	2477	0	2626