



**COPPE/UFRJ**

**SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO E RECONEXÃO POR CAMINHOS APLICADAS AO  
GERENCIAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO**

Hugo Vinícius Bassi

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira

Filho

Laura Silvia Bahiense da

Silva Leite

Rio de Janeiro

Outubro de 2010

SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO E RECONEXÃO POR CAMINHOS APLICADAS AO  
GERENCIAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO

Hugo Vinícius Bassi

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Examinada por:

---

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

---

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

---

Prof. Luiz Satoru Ochi, D.Sc.

---

Prof. Ricardo de Melo e Silva Accioly, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2010

Bassi, Hugo Vinícius

Simulação-otimização e reconexão por caminhos aplicadas ao gerenciamento de sondas de intervenção / Hugo Vinícius Bassi. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XI, 114 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Produção, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 108-114.

1. Problema de programação de sondas de intervenção. 2. Simulação-Otimização. 3. Reconexão por caminhos. I. Ferreira filho, Virgílio José Martins *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por ter me dado saúde, força e esperança para lutar durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, pelo amor que sempre dedicaram a mim. À minha irmã Flávia e meu cunhado Léo, pelo apoio na cidade do Rio de Janeiro.

Aos professores da COPPE/UFRJ. Principalmente aos meus orientadores Virgílio e Laura, pelo direcionamento metodológico e constantes revisões realizadas.

À equipe do LORDE, pelas várias idéias e sugestões levantadas durante os seminários, que permearam o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores que fizeram parte da banca examinadora, pelas valiosas contribuições a essa dissertação.

Ao CNPq, em decurso do fomento às minhas atividades de pesquisa. À ANP, pela disponibilização pública do Banco de Dados de Exploração e Produção. Finalmente, ao prof. Marcone, pelo incentivo inicial que me direcionou ao mestrado em Pesquisa Operacional.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO E RECONEXÃO POR CAMINHOS APLICADAS AO GERENCIAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO

Hugo Vinícius Bassi

Outubro/2010

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Programa: Engenharia de Produção

Intervenções em poços *offshore* são atividades realizadas por sondas e necessárias para restabelecer as condições normais de operação do poço, devido à ocorrência de falhas em alguns de seus componentes essenciais. Entretanto, além da existência de restrições operacionais, poucas sondas se encontram usualmente disponíveis em relação ao número de poços. Isso leva à necessidade de um planejamento da seqüência de intervenções para cada sonda, com vistas a minimizar a perda total de óleo, decorrente da indisponibilidade produtiva de cada poço a espera de uma sonda. Neste problema, o tempo relativo às intervenções é estocástico. Assim, a Simulação-Otimização (SO) gera “soluções esperadas”, bem como medidas de desempenho e estatísticas acerca das alocações de poços a sondas. Neste método, duas abordagens são propostas para a Otimização: um algoritmo guloso (AG) e a metaheurística GRASP. A partir das soluções da SO, a Reconexão por Caminhos (RC) é utilizada para tentativa de gerar uma única solução final, que possui atributos de suas programações. Os resultados mostram que a RC aprimora a qualidade das soluções geradas por SO (AG), principalmente ao serem utilizadas técnicas de Busca Local na RC, e que o desempenho da SO (GRASP) + RC é superior a SO (AG) + RC.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SIMULATION-OPTIMIZATION AND PATH-RELINKING APPLIED TO THE  
WORKOVER RIGS MANAGEMENT

Hugo Vinícius Bassi

October/2010

Advisors: Virgílio José Martins Ferreira Filho  
Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Department: Production Engineering

Workover operations are performed by rigs in order to do maintenance services on oil wells, due to some failures that may occur on its key components. However, there are operations constraints when assigning a well to a workover rig and few workover rigs are usually available compared to the number of wells. This leads to the importance of planning the sequence of interventions for each rig. The goal is to minimize the total loss of oil production, once each well remains unproductive until it be attended by a rig. In this problem, the interventions time are stochastic. Thus, a Simulation-Optimization (SO) method is used to generate “expected solutions” and performance measures, as well as statistics about allocation of wells to workover rigs. In this method, two approaches are proposed for the Optimization: a greedy algorithm (GA) and GRASP. The solutions from SO are input to the Path-Relinking (PR) method, which tries to reach a final solution that has some attributes of the “expected solutions”. The experimental results show that PR enhances the quality of solutions generated by SO (GA), even more when Local Search techniques are used in RC, and the solutions of SO (GRASP) + PR are better than SO (GA) + PR.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Justificativa .....	3
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do trabalho.....	4
CAPÍTULO 2: O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO 6	
2.1 Intervenções em poços.....	6
2.2 Descrição do problema .....	12
2.3 Problemas de Seqüenciamento e Roteamento .....	19
2.3.1 O Problema de Seqüenciamento de Tarefas .....	19
2.3.2 O Problema de Roteamento de Veículos.....	21
2.3.3 Análise das abordagens .....	23
CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE RESOLUÇÃO .....	26
3.1 Revisão de métodos da literatura .....	26
3.2 Metodologia proposta .....	34
CAPÍTULO 4: SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO APLICADA AO PPSI .....	38
4.1 Introdução .....	38
4.2 Simulação de dados .....	40
4.3 Heurística Construtiva .....	41
4.4 GRASP.....	49
4.4.1 Interface entre Simulação e GRASP .....	51
4.4.2 Construção.....	53
4.4.3 Busca Local .....	56
CAPÍTULO 5: RECONEXÃO POR CAMINHOS APLICADA AO PPSI.....	58
5.1 Introdução .....	58
5.2 Construção do Conjunto Elite.....	61
5.3 Estrutura de vizinhança da RC.....	63
5.4 Busca Local.....	65
5.5.1 Estruturas de vizinhança.....	65
5.5.2 Método de Descida.....	67
5.5.3 Método Randômico de Descida .....	71

CAPÍTULO 6: EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	73
6.1 Dados de entrada.....	73
6.2 Ferramentas computacionais.....	80
6.3 Resultados e análises .....	81
6.3.1 Dimensionamento da frota de sondas.....	82
6.3.2 Simulação-Otimização .....	87
6.3.3 Reconexão por Caminhos.....	95
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	106
REFERÊNCIAS .....	108



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relação entre esforço e resistência .....	8
Figura 2. Tipos de plataformas <i>offshore</i> .....	11
Figura 3. Situação hipotética ideal <i>versus</i> distribuição real de sondas.....	12
Figura 4. Exemplo de vazões de um poço, com e sem interrupção.....	14
Figura 5. Decisões no sequenciamento de tarefas .....	19
Figura 6. O PPSI e as dimensões temporal e espacial .....	23
Figura 7. Metodologia empregada para resolução do PPSI .....	37
Figura 8. Método de Simulação-Otimização para o PPSI.....	39
Figura 9. Principais módulos utilizados no modelo de Simulação-Otimização .....	40
Figura 10. Simulação de dados para o tempo de intervenção .....	41
Figura 11. SO (HC) aplicada ao PPSI .....	41
Figura 12. Heurística Construtiva: fase de ordenação .....	44
Figura 13. Exemplo de utilização do Critério de Priorização.....	45
Figura 14. Heurística Construtiva: fase de sequenciamento .....	47
Figura 15. Roteamentos das soluções da Tabela 7 .....	48
Figura 16. Pseudocódigo da Heurística Construtiva .....	49
Figura 17. SO (GRASP) aplicada ao PPSI.....	50
Figura 18. Pseudocódigo do procedimento GRASP .....	50
Figura 19. Representação de uma solução manipulada pelo GRASP .....	51
Figura 20. Acesso a tempos de intervenção, parâmetros e atributos.....	52
Figura 21. Formação da <i>LCR</i> a partir da <i>LC</i> .....	54
Figura 22. Procedimento de Construção do GRASP aplicado ao PPSI .....	55
Figura 23. Pseudocódigo do método de Busca Local.....	56
Figura 24. Reconexão por Caminhos para um problema de minimização.....	58
Figura 25. Trajetórias exploradas pela Reconexão por Caminhos (RC).....	60
Figura 26. Reconexão por Caminhos associada a uma Busca Local (RC + BL) .....	60
Figura 27. Pseudocódigo para Construção do Conjunto Elite.....	61
Figura 28. Exemplificação do cálculo de $MDif_1$ .....	62
Figura 29. Estrutura de vizinhança da Reconexão por Caminhos.....	64
Figura 30. Aplicação do movimento $m_1$ após $m_3$ ter sido realizado .....	65
Figura 31. Estruturas de vizinhança da Busca Local.....	66

Figura 32. Pseudocódigo do Método de Descida .....	67
Figura 33. Pseudocódigo para exploração do melhor vizinho.....	68
Figura 34. Pseudocódigo das condições de contorno para um movimento.....	69
Figura 35. Sistemática de exploração de todos os movimentos de troca .....	70
Figura 36. Sistemática de exploração de todos os movimentos de realocação .....	71
Figura 37. Pseudocódigo do Método Randômico de Descida.....	72
Figura 38 Sistema de ferramentas computacionais para SO (HC) + RC.....	81
Figura 39. <i>Trade-off</i> de custos à medida que se incrementa a quantidade de sondas ....	86
Figura 40. Gráfico de dispersão para perda total de óleo em TB .....	88
Figura 41. Gráfico de dispersão para perda total de óleo em BC.....	88
Figura 42. Gráfico de dispersão para perda total de óleo em BS .....	88
Figura 43. Gráfico de dispersão para perda total de óleo em BES.....	89
Figura 44. Gráfico da matriz Poço-Ordem para os 20 primeiros poços da sonda 1 .....	95
Figura 45. Evolução da FO em relação ao tempo para RC .....	99
Figura 46. Evolução da FO em relação ao tempo para RC+MD <sup>(T)</sup> .....	100
Figura 47. Evolução da FO em relação ao tempo para RC+MD <sup>(R)</sup> .....	100
Figura 48. Evolução da FO em relação ao tempo para RC+MRD <sup>(T)</sup> .....	100
Figura 49. Evolução da FO em relação ao tempo para RC+MRD <sup>(R)</sup> .....	101
Figura 50. Frequência de movimentos que produzem melhores soluções (RC) .....	102
Figura 51. Frequência de movimentos que produzem melhores soluções (RC+MD <sup>(T)</sup> )....	102
Figura 52. Frequência de movimentos que produzem melhores soluções (RC+MD <sup>(R)</sup> ) ...	102
Figura 53. Frequência de movimentos que produzem melhores soluções (RC+MRD <sup>(T)</sup> ) ....	103
Figura 54. Frequência de movimentos que produzem melhores soluções (RC+MRD <sup>(R)</sup> )...	103
Figura 55. Gráfico de Gantt para replicação 58 da SO (HC) .....	104
Figura 56. Gráfico de Gantt para a solução final da RC .....	104
Figura 57. Gráfico de Gantt para a solução final da RC+MD <sup>(T)</sup> .....	104
Figura 58. Gráfico de Gantt para a solução final da RC+MD <sup>(R)</sup> .....	105
Figura 59. Gráfico de Gantt para a solução final da RC+MRD <sup>(T)</sup> .....	105
Figura 60. Gráfico de Gantt para a solução final da RC+MRD <sup>(R)</sup> .....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos considerados para os poços.....	13
Tabela 2. Parâmetros considerados para as sondas .....	15
Tabela 3. Relação entre o PPSI e suas abordagens.....	23
Tabela 4. Semelhanças e diferenças do PPSI em relação às suas abordagens .....	25
Tabela 5. Classificação dos principais trabalhos para resolução do PPSI.....	27
Tabela 6. Cálculo de inviabilidades para cada requisito .....	43
Tabela 7. Exemplo de uma tabela de três soluções geradas pela SO (HC) .....	48
Tabela 8. Cálculo de $MDif$ entre $s'$ e uma dada solução elite $s_C$ .....	63
Tabela 9. Versões de RC + BL para Reconexão por Caminhos.....	66
Tabela 10. Relação entre poços e bacias para cada instância.....	73
Tabela 11. Coordenadas geográficas utilizadas para os poços de TB .....	74
Tabela 12. Coordenadas geográficas utilizadas para os poços de BC.....	75
Tabela 13. Coordenadas geográficas utilizadas para os poços de BS .....	75
Tabela 14. Coordenadas geográficas utilizadas para os poços de BES.....	76
Tabela 15. Medidas de dispersão dos conjuntos de poços de cada instância .....	76
Tabela 16. Dados utilizados para os atributos dos poços .....	79
Tabela 17. Custo de locação de cada tipo de sonda.....	79
Tabela 18. Dados utilizados para os parâmetros das sondas .....	80
Tabela 19. Valores utilizados para cada parâmetro dos métodos.....	81
Tabela 20. Análise de cenários para obtenção de medidas de desempenho para as sondas... 83	83
Tabela 21. Análise de cenários para obtenção de medidas de desempenho para os poços .... 84	84
Tabela 22. Análise de cenários para obtenção das perdas totais de óleo.....	85
Tabela 23. Análise de cenários para obtenção de custos.....	86
Tabela 24. Perdas totais de óleo obtidas em cada instância .....	87
Tabela 25. Medidas médias de desempenho para cada sonda.....	90
Tabela 26. Matriz Poço-Sonda .....	93
Tabela 27. Mariz Poço-Ordem da sonda 1 .....	94
Tabela 28. Exemplo de um conjunto inicial de soluções elite, gerado por SO (HC).....	96
Tabela 29. Soluções finais obtidas por SO (HC) + RC .....	96
Tabela 30. Soluções finais obtidas por SO (HC) + RC + BL.....	97
Tabela 31. Soluções finais obtidas por SO (GRASP) + RC + BL .....	99

## CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a elevada concorrência empresarial vem fazendo com que as empresas busquem meios para se manter competitivas no mercado. Entretanto, não obstante um planejamento estratégico adequado, os esforços organizacionais devem também se concentrar na busca de uma maior eficiência operacional. Isso pode ser alcançado por meio de duas formas: realizando investimentos tecnológicos que minimizem os custos de produção ou por meio de soluções eficientes que maximizem a utilização dos recursos disponíveis (LINS e CALÔBA, 2006).

No caso das companhias de petróleo, são elevados montantes de capital que precisam ser investidos nas fases iniciais de exploração de um campo de petróleo, até a obtenção de retorno financeiro (NATAL, 2003). Além disso, programas de redução de custos têm sido adotados devido a incertezas quanto ao preço de venda do óleo produzido e aos volumes existentes nos reservatórios (LORDE, 2009). É neste cenário que as companhias petrolíferas têm direcionado seus esforços para a otimização do uso de seus próprios recursos, principalmente os utilizados nas fases de exploração e produção. Assim, pequenas economias conseguidas ao longo do processo podem diminuir significativamente o impacto financeiro.

Durante a fase de produção de um poço de petróleo, que corresponde à maior parte do seu ciclo de vida, as atividades mais dispendiosas são aquelas que tratam das intervenções para sua manutenção, designadas genericamente de *workover* (FROTA, 2003). Segundo Thomas (2001), estas atividades são necessárias para manter a produção ou eventualmente melhorar a produtividade. De acordo com Paiva (1997), as intervenções se devem às falhas que normalmente ocorrem com os equipamentos de fundo dos poços de petróleo, o que impossibilita ou reduz a produção ou injeção de fluidos.

As atividades de *workover* exigem, para sua realização, a alocação de uma sonda de intervenção (FROTA, 2003). Entretanto, as companhias de petróleo dispõem de poucas sondas em relação ao número de poços que demandam manutenção, devido ao elevado custo operacional e de aquisição destas sondas (NORONHA e ALOISE, 2001). Assim, a operação de cada sonda disponível deve ser bem planejada, de maneira a minimizar a perda total de óleo ocasionada pela espera de cada poço pelo atendimento. Ao problema de se realizar tal planejamento, determinando a seqüência de poços a ser atendida por cada sonda, denomina-se PPSI – Problema de Planejamento de Sondas de Intervenção.

É possível encontrar na literatura diversos trabalhos focados na solução deste problema, baseados em diferentes técnicas heurísticas de resolução. Dentre essas, destacam-se: Algoritmo Genético (DOURO e LORENZONI (2009), ALVES e FERREIRA (2006), BORCHARDT (2002) e MAIA *et al* (2002)); Busca Tabu (MAIA *et al* (2002)); Colônia de Formigas (ALOISE *et al* (2002)); GRASP (NEVES e OCHI (2007), COSTA (2005), TRINDADE (2005), MAIA *et al* (2002) e NORONHA e ALOISE (2001)); *Multi-Start* (NORONHA e ALOISE (2001)); Reconexão por Caminhos ou *Path Relinking* (NEVES e OCHI (2007) e TRINDADE (2005)); *Scatter Search* (OLIVEIRA *et al* (2007)); *Simulated Annealing* (PAIVA (1997)); VNS (ALOISE *et al* (2006) e MAIA *et al* (2002)).

Este trabalho parte dos pressupostos de que são conhecidos os poços que demandam intervenção, bem como seus atributos, à exceção de seus tempos de intervenção (ACCIOLY e CHIYOSHI, 1998). Desta forma, a geração imediata de uma única solução não é possível, mas pode-se gerar um conjunto inicial de soluções, a partir de uma distribuição de probabilidades para o tempo de intervenção em cada poço. Diante dessas diversas soluções iniciais, a primeira pergunta que vem natural à mente é: qual seria o dimensionamento ideal da frota de sondas, considerando os custos de sua utilização e os ganhos auferidos com o óleo produzido? E, solucionado este dimensionamento, seguem-se vários outros questionamentos:

- Qual a probabilidade de um poço ser alocado a uma dada sonda?
- Qual a probabilidade de uma dada sonda atender um poço em uma certa ordem de atendimento?
- Qual o tempo médio que um poço permanece em espera pelo atendimento de uma sonda?
- Qual o máximo tamanho que uma fila de poços de uma sonda pode atingir?
- Qual a perda de óleo esperada e qual a sua distribuição?

Essas perguntas fornecem a motivação para o desenvolvimento de uma metodologia baseada em Simulação-Otimização, responsável por gerar as denominadas “soluções esperadas” para o problema proposto. Finalmente, a grande pergunta que emerge é: como se obter uma única solução que apresente atributos dessas soluções e que seja, se possível, a de melhor qualidade? Uma das alternativas existentes na literatura que vem demonstrando ser bastante eficaz na busca intensiva entre soluções é a técnica de Reconexão por Caminhos (NEVES e OCHI (2007) e TRINDADE (2005)).

## 1.1 Justificativa

Este trabalho busca apresentar, de forma prática, uma modelagem aderente à realidade das operações *offshore* para o problema em questão. A relevância da metodologia proposta reside em dois aspectos: econômico e científico.

No plano econômico, a importância se deve à minimização dos custos de oportunidade de se produzir o óleo em cada poço à espera de intervenção. Paiva (1997) explica que uma parada na operação de um poço da ordem de dezenas de dias normalmente afeta pouco o valor das reservas de um campo, mas todas as paradas de todos os poços podem afetar substancialmente o valor monetário deste campo. Ressaltam-se, ainda, os elevados custos decorrentes das taxas diárias de aluguel de uma sonda (ROSENBLATT, 2006).

Sob a ótica científica, o emprego integrado de Simulação e Otimização para a resolução do PPSI torna-se necessário, uma vez que as operações de manutenção *offshore* são tipicamente imprevisíveis (ACCIOLY e CHIYOSHI, 1998). Assim, não somente é difícil de prever quando ocorrerá uma falha em um poço, mas também quanto tempo é necessário para colocá-lo em produção novamente. Apesar da padronização das atividades em intervenções em grandes profundidades, sempre há o risco de ocorrer problemas que podem prolongar o tempo de intervenção previamente estimado.

O PPSI é de um problema de otimização combinatória de difícil resolução, classificado na literatura como NP-completo (GAREY e JOHNSON, 1979). Dessa forma, não se espera que algoritmos exatos sejam capazes, no caso geral, de alcançar soluções ótimas em tempos computacionais aceitáveis. Principalmente para problemas de grandes dimensões, pois o consumo de tempo e memória necessários para geração das soluções cresce exponencialmente com o tamanho do problema. Assim, destaca-se a relevância do uso de métodos heurísticos, que são, em geral, capazes de obter soluções de boa qualidade em tempos computacionais razoáveis.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral consiste na resolução do Problema de Planejamento de Sondas de Intervenção (PPSI) por Simulação-Otimização e Reconexão por Caminhos, considerando-se um ambiente de incertezas para o tempo de intervenção em poços *offshore*.

Os objetivos específicos são:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica relacionada ao problema, ao contexto em que ele se insere, bem como sobre suas abordagens de resolução e métodos envolvidos;
- Levantar as principais características inerentes à operação de sondas de intervenção *offshore*, que formam as restrições para o problema;
- Desenvolver um modelo lógico-matemático para a resolução do PPSI via Simulação-Otimização;
- Analisar o comportamento das soluções obtidas por Simulação-Otimização, bem como as estatísticas produzidas acerca das filas de poços;
- Utilizar a técnica de Reconexão por Caminhos a partir de determinadas soluções da Simulação-Otimização, para a tentativa de obtenção de uma única solução de melhor qualidade que preserve alguns de seus atributos;
- Investigar a influência de métodos de Busca Local e estruturas de vizinhança no desempenho da Reconexão por Caminhos, constituindo diferentes versões;
- Investigar a influência de métodos de Otimização na Simulação-Otimização no desempenho da Reconexão por Caminhos;
- Analisar as soluções finais obtidas quanto à evolução dos valores da Função Objetivo, ao percentual de melhora em relação à Simulação-Otimização, ao tempo de processamento, à frequência de movimentos que produzem melhores soluções e às programações geradas.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho está dividido em sete capítulos, incluindo esta introdução.

No capítulo 2, introduz-se o Problema de Planejamento de Sondas de Intervenção (PPSI). Além disso, é realizada uma descrição geral de duas classes de problemas correlatos: seqüenciamento e roteamento. Um paralelo é então construído entre esses problemas e o PPSI.

No capítulo 3, apresenta-se uma revisão bibliográfica acerca dos métodos de resolução empregados nos principais trabalhos para a resolução do PPSI. Em seguida, apresenta-se, em linhas gerais, a metodologia proposta, baseada em Simulação-Otimização e Reconexão por Caminhos.

No capítulo 4, descreve-se detalhadamente a aplicação da Simulação-Otimização ao PPSI. A modelagem lógica por processos é apresentada, assim como seus desdobramentos nas etapas que compõem o método de resolução proposto.

No capítulo 5, descreve-se detalhadamente a aplicação da técnica de Reconexão por Caminhos para o refinamento das soluções encontradas anteriormente.

No capítulo 6, são conduzidos os experimentos computacionais para teste da metodologia proposta, bem como apresentados os resultados atingidos e as análises estatísticas realizadas. São explicitados, também, a forma como os dados de entrada foram gerados e o sistema de ferramentas computacionais empregado.

Finalmente, no capítulo 7, são tecidas as conclusões e indicadas as sugestões para os trabalhos futuros, e, então, relacionadas às referências bibliográficas.



## **CAPÍTULO 2: O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO**

Neste capítulo, é abordado o Problema de Planejamento de Sondas de Intervenção (PPSI) por meio das principais características inerentes à operação em poços *offshore*. Antes, porém, analisa-se em que contexto se inserem as atividades de intervenção na indústria do petróleo. Em um último momento, duas classes de problemas correlatos são descritas de forma geral e comparadas com o PPSI: seqüenciamento e roteamento.

### **2.1 Intervenções em poços**

A indústria do petróleo é formada pelas seguintes atividades econômicas: exploração, desenvolvimento, produção, refino, processamento, transporte, importação e exportação de petróleo, gás natural e outros hidrocarbonetos fluidos, além de seus derivados (DOU, 2005).

A exploração tem por objetivo a descoberta e a identificação de jazidas de petróleo ou gás natural (DOU, 2005). Ainda, de acordo com Rosenblatt (2006), uma vez identificada a existência de petróleo em um poço exploratório, este é avaliado, ou seja, testado quanto aos aspectos técnicos e econômicos para uma possível declaração de comercialidade. Assim, novos poços são então perfurados, com vistas a delimitar a jazida e adquirir mais informações quanto ao volume de petróleo presente na rocha reservatório e demais características.

Caso seja determinada a atratividade econômica, dá-se início ao desenvolvimento da produção, onde é executado um projeto de lavra, que requer investimentos adicionais na perfuração e completação de poços. Para Frota (2003), a completação corresponde ao conjunto de operações realizadas em um determinado poço, logo após a perfuração, para prepará-lo para a produção de óleo ou injeção de fluidos (água, gás, vapor, entre outros), de forma segura e econômica. Thomas (2001) ressalta que, considerando que a completação tem reflexos ao longo de toda a vida produtiva do poço e envolve altos custos, faz-se necessário um planejamento criterioso das operações e uma análise econômica cuidadosa. Também nesta fase são instaladas as plataformas de produção e os sistemas de exportação de óleo e gás.

Ao longo da terceira atividade econômica – a produção – geralmente são necessárias intervenções posteriores à completação, designadas genericamente de

*workover* (THOMAS, 2001), para manutenção da produção ou da injeção dos poços. O presente trabalho adota o mesmo conceito de Frota (2003, p.15) para as intervenções:

[...] o termo genérico “intervenção” é utilizado para designar toda e qualquer operação realizada, com sonda, em um poço, após o início de sua vida, para restabelecer as condições normais de produção ou injeção para o qual foi projetado originalmente, considerando-se algum tipo de falha em componentes vitais ou essenciais.

Uma falha, segundo a Norma NBR 5462-1994 *apud* Xenos (2004, p. 67), pode ser definida como:

[...] o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. É a diminuição total ou parcial da capacidade de uma peça, componente ou máquina de desempenhar a sua função durante um período de tempo, quando o item deverá ser reparado ou substituído. A falha leva o ítem a um estado de indisponibilidade.

Em geral, as causas possíveis para as falhas nos equipamentos residem em três grandes categorias, conforme mostrado por Xenos (2004) na Figura 1: falta de resistência, uso inadequado ou manutenção deficiente. Esta figura fornece uma consideração bastante realista sobre o que é encontrado na prática ao tomar o esforço (E) e a resistência (R) como variáveis, representadas por distribuições estatísticas em torno de um valor médio. Nem sempre a resistência tem um valor médio constante. Normalmente, a resistência tende a diminuir devido à deteriorização do equipamento por fadiga, corrosão ou outros fatores e a distribuição estatística da resistência varia ao longo do tempo. Da mesma forma, o esforço tende a aumentar como resultado de condições operacionais e ambientes desfavoráveis. Isso resulta na aproximação das duas distribuições (E) e (R) e no aumento da probabilidade de ocorrência de falhas. Em geral, uma falha ocorre sempre que a resistência cair abaixo dos esforços a que o equipamento estiver submetido (XENOS, 2004).

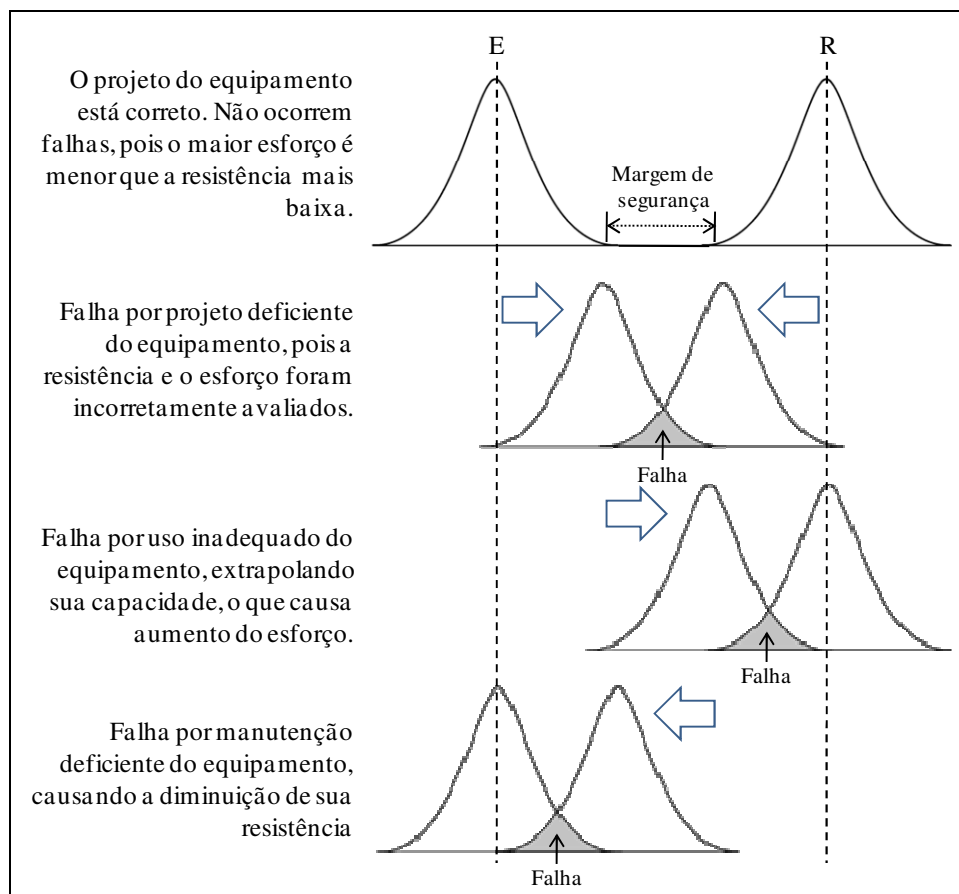


Figura 1. Relação entre esforço e resistência  
 Fonte: adaptado de Xenos (2004, p. 69)

Especificamente, as causas (imediatas) que levam às intervenções em poços, são (FROTA, 2003):

- a) Baixa produtividade;
- b) Produção excessiva de gás;
- c) Produção excessiva de água;
- d) Produção de areia;
- e) Falhas mecânicas em quaisquer componentes integrantes do poço;
- f) Formação de hidratos na árvore de natal ou na linha de surgência. Grosso modo, a árvore de natal é um conjunto de válvulas, que controla o fluxo de óleo e gás, e é instalada na cabeça do poço. É interligada a uma plataforma de produção ou a um *manifold* por uma linha de surgência;
- g) Deposição de parafinas na linha de surgência;
- h) Remanejamento de poços (decisão gerencial);
- i) Abandono provisório ou definitivo.

Thomas (2001) acrescenta que as atividades de *workover* visam, eventualmente, a melhorar a produtividade do poço. Uma vez que seu tempo de duração é incerto e difícil de ser estimado (COSTA, 2005), um eficiente planejamento das intervenções certamente maximizaria a rentabilidade do projeto envolvido. Em nível de classificação, Thomas (2001) divide as intervenções em atividades de:

- a) Avaliação: é uma atividade que tem como objetivo avaliar a produtividade, ou a extensão do reservatório. Numa situação de intervenção esta atividade está frequentemente relacionada a diagnosticar as causas da baixa produtividade (ou baixa injetividade, o que desfavorece a manutenção da pressão da rocha reservatório), ou mesmo avaliar outras zonas que não se encontram em produção.
- b) Recompletação: busca substituir a(s) zona(s) que estava(m) em produção ou colocar nova(s) zona(s) em produção. Quando cessa o interesse em se produzir ou injetar em determinada zona, esta é abandonada e o poço é recompletado para que desempenhe suas atividades em outro intervalo. É também realizada a recompletação quando se deseja converter um poço produtor em injetor, ou vice-versa.
- c) Restauração: é um conjunto de atividades que visam restabelecer as condições normais de fluxo do reservatório para o poço, eliminar ou corrigir falhas mecânicas existentes e reduzir a produção excessiva de gás ou água.
- d) Limpeza: trata-se de um conjunto de atividades realizadas no interior do revestimento de produção que visam limpar o fundo do poço ou substituir os equipamentos de subsuperfície.
- e) Estimulação: refere-se a atividades cujo objetivo é aumentar o índice de produtividade ou injetividade do poço. Neste caso, os métodos mais utilizados são o fraturamento hidráulico e a acidificação.
- f) Mudança do método de elevação: é a substituição do sistema de elevação artificial inadequado ou com defeito para que a vazão não seja restringida. Em geral, os poços são surgentes durante o período inicial da sua vida produtiva e passam a requerer um sistema de elevação artificial após algum tempo de produção.
- g) Abandono: é realizado através de tampões de cimento ou mediante o assentamento de tampões mecânicos, de forma temporária ou definitiva, quando um poço é retirado de operação. Visa a minimizar riscos de acidentes e danos ao meio ambiente.

A manutenção da produção ou injeção de um poço está diretamente relacionada à alocação de uma sonda de intervenção (FROTA, 2003). Em terra, Noronha e Aloise (2001) relatam que são utilizadas sondas do tipo SPT (Sondas de Produção Terrestres). Segundo Nabors (2010), as SPT's se destacam em relação às sondas terrestres de perfuração pela sua maior facilidade de locomoção entre poços de petróleo, abrangendo diferentes áreas geográficas. Normalmente, elas apresentam propulsão própria e possuem menos equipamentos auxiliares para se locomoverem. Mas, em geral, elas são muito semelhantes, de acordo com Rosenblatt (2006). Um dos fatores que as diferenciam é justamente a forma como são transportadas, seja por estradas ou helicópteros.

No mar, são empregadas sondas *offshore* instaladas em plataformas, que são equipamentos necessários à extração, tratamento e estocagem do óleo produzido (KIMURA, 2005). As plataformas são empregadas conforme a lâmina d'água, condições de mar, relevo do fundo do mar, finalidade do poço, disponibilidade de apoio logístico e, principalmente, a relação custo/benefício (THOMAS, 2001). Os tipos mais utilizados são:

- a) Plataformas fixas: também denominadas “plataformas do tipo jaquetas” por Silva (2008), possuem a vantagem de ser estáveis, segundo Schaffel (2002). São projetadas para lâminas d'água rasas, de até 300 metros de profundidade em campos já conhecidos, onde vários poços são perfurados. A Figura 2 (a) mostra uma plataforma fixa.
- b) Plataformas auto-eleváveis: ao contrário das plataformas fixas, as auto-eleváveis são móveis e não possuem capacidade de armazenamento, fazendo-se necessário o uso de navios ou de *pipelines* para o escoamento da produção (SILVA, 2008). Schaffel (2002) afirma que este tipo de plataforma também é projetado para operar em águas rasas. Elas consistem basicamente de uma balsa com pernas de aço que são acionadas até atingirem o leito marinho e posteriormente elevadas acima do nível da água, a uma altura segura fora do alcance das ondas. Uma plataforma auto-elevável é mostrada na Figura 2 (b).
- c) Plataformas semi-submersíveis: são compostas de um ou mais conveses, apoiados por colunas em flutuadores submersos. De acordo com Silva (2008), pelo fato de ser uma unidade flutuante que se encontra sujeita às intempéries do tempo, esta deve ser ancorada ou possuir um sistema de posicionamento dinâmico. Schaffel (2002) ressalta que essas plataformas podem operar a maiores lâminas d'água. Um exemplo de plataforma semi-submersível é exibido na Figura 2 (c).

- d) Navios-sonda: segundo Schaffel (2002), os navios-sonda possuem as seguintes vantagens: propulsão própria, elevada mobilidade e operação em quase qualquer lâmina d'água. Rosenblatt (2006) acrescenta que os navios mais modernos são equipados com sistemas de posicionamento dinâmico e apresentam grande capacidade de estocagem. Observa-se na Figura 2 (d) um navio-sonda.
- e) Plataformas Tension Leg: são semelhantes à semi-submersível, porém suas pernas principais são ancoradas no fundo do mar por meio de cabos tubulares, segundo Schaffel (2002). Silva (2008) acrescenta que este tipo de plataforma tem sido utilizado em lâminas d'água de até 1500 m. A Figura 2 (e) mostra uma plataforma Tension Leg.

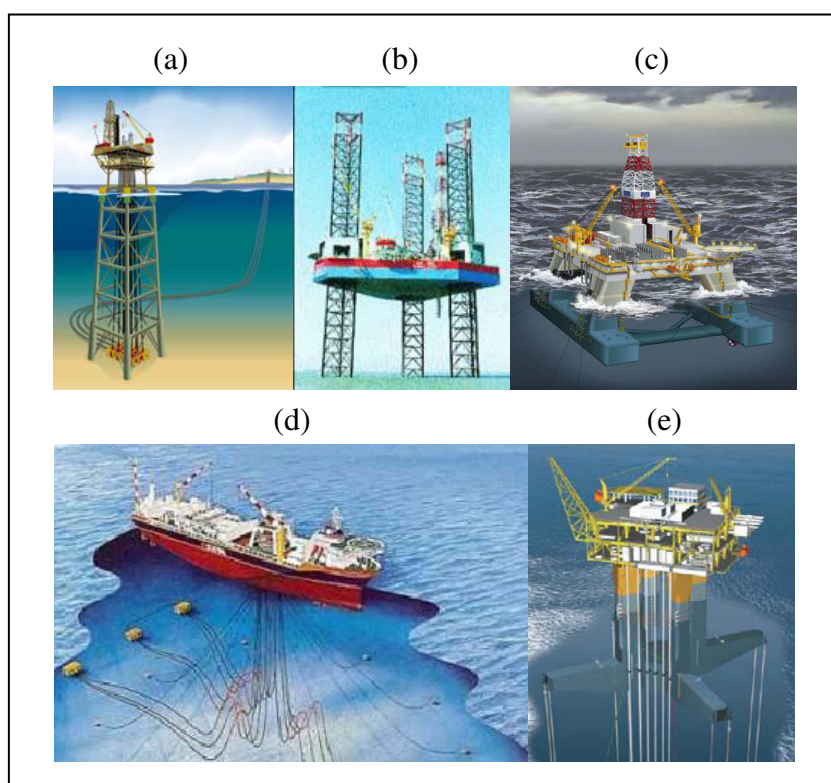


Figura 2. Tipos de plataformas *offshore*  
 Fonte: Adaptado de Silva (2008, pp. 9 a 12)

Para desempenhar suas atividades de manutenção nos poços, as sondas de intervenção operam conforme um plano, que consiste na programação de poços cada sonda disponível, em um dado período de tempo pré estabelecido. Ao problema de se construir tal planejamento, denomina-se PPSI – Problema de Planejamento de Sondagens de Intervenção, descrito na seção a seguir.

## 2.2 Descrição do problema

Em uma situação hipotética ideal, em que a quantidade de sondas disponíveis é igual ao número de poços que demandam intervenções, Noronha e Aloise (2001) mostram que a solução para o problema seria trivial: uma sonda alocada para cada poço. Dessa forma, ao ocorrer alguma solicitação de intervenção para um poço, uma sonda já estaria disponível no local necessário. Na prática, entretanto, a oferta de sondas que uma companhia de petróleo dispõe é consideravelmente inferior à demanda de poços para intervenção, devido ao elevado custo operacional e de aquisição das sondas. Com isso, a manutenção imediata nem sempre é possível, o que provoca a ocorrência de uma fila de poços a espera pelo atendimento de cada sonda. Como evidenciado no exemplo da Figura 3, ao serem empregadas apenas três sondas para realizar manutenção em 10 poços, três filas de poços se formam, cada uma organizada conforme um dado roteamento.

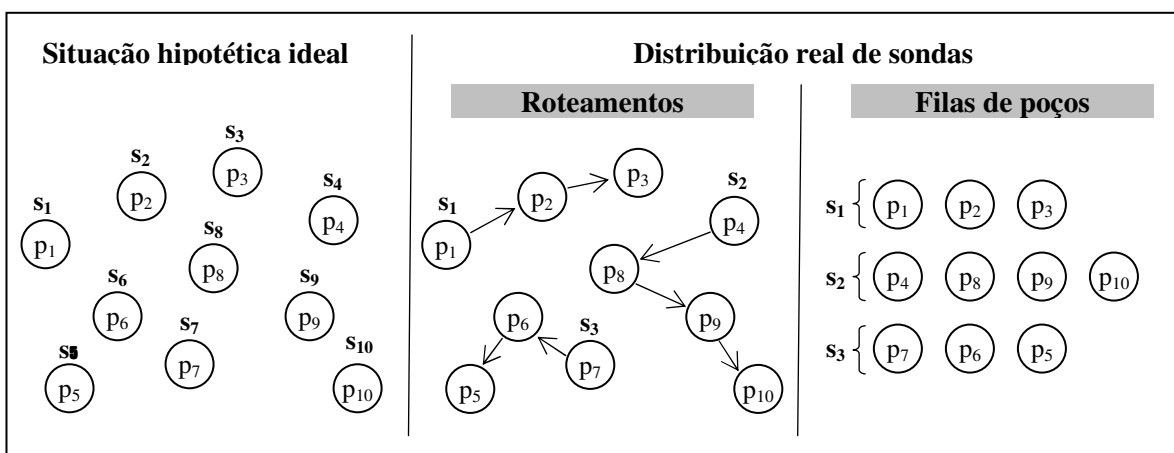


Figura 3. Situação hipotética ideal *versus* distribuição real de sondas  
 Fonte: Adaptado de Noronha e Aloise (2001, p. 5)

Assim, o problema consiste em programar o atendimento da frota de sondas a poços de petróleo, ou seja, determinar quais os itinerários que elas devem percorrer. Trata-se, portanto, de um problema de Otimização Combinatória (GOLDBARG e LUNA, 2005), pois busca encontrar a melhor solução – de acordo com uma Função Objetivo a ser definida posteriormente – dentre as muitas soluções possíveis. Dentre os problemas de Otimização Combinatória, o PPSI pertence à classe dos problemas de seqüenciamento e roteamento, conforme abordado na seção seguinte.

A ocorrência de falhas para o problema em questão encontra-se *offline*, isto é, todas as demandas dos poços são conhecidas dentro de um intervalo de tempo, assim como tratado por Borchardt (2002). Obviamente, um estudo acerca de confiabilidade de sistemas,

de maneira a prever a ocorrência de falhas, seria perfeitamente cabível, porém isso foge do escopo desta dissertação. Também, é desconsiderado o fator ambiental, bem como os possíveis riscos envolvidos na atividade de sondagem – encontrados no trabalho de Borchardt (2002) – apesar de sua absoluta relevância para as atividades de qualquer empresa.

Para a caracterização dos poços e sondas, são utilizados determinados atributos e parâmetros, respectivamente. Ressalta-se que os mesmos não refletem necessariamente a caracterização adotada pela indústria. Os poços considerados são *offshore*, e, nesta dissertação, são caracterizados pelos seguintes atributos da Tabela 1:

Tempo de intervenção	Coordenadas geográficas
Perda de óleo	Profundidade
Lâmina d'água	Presença (ou não) de H <sub>2</sub> S
Janela de tempo para atendimento	

Tabela 1. Atributos considerados para os poços

Fonte: próprio autor (2010)

Dentre os atributos, apenas o tempo de intervenção não é determinístico. Segundo Costa (2005), os técnicos que trabalham com intervenções em poços alertam que as durações das intervenções são bem difíceis de serem estimadas e apresentam uma grande carga de incertezas. Por isso, tal como Accioly e Chiyoshi (1998), admite-se que o tempo de intervenção é de natureza estocástica, e representado por uma distribuição de probabilidades.

Para calcular a perda de óleo, Paiva (1997) analisa a influência monetária do fechamento dos poços nas curvas de produção dos reservatórios, por meio de um simulador numérico de reservatórios. É calculada a diferença do valor presente das reservas simulado sem a interrupção e com a interrupção, dessa forma obtendo-se a quantificação das perdas reais de produção. Assim, a perda é representada por um fator de perda, a qual depende do nível de produção antes do fechamento, do tempo que o poço permanece fechado, da configuração do reservatório e outras condições.

Neste trabalho, a perda de óleo refere-se à perda aparente, conforme denominado por Paiva (1997). É dada pela diferença entre as vazões após a correção (ou potencial de produção) e a vazão antes da intervenção. Trata-se de uma medida aproximada da perda real, indicando o quanto um dado poço deixa de produzir, em unidades de volume por unidade de tempo. Segundo Paiva (1997), a diferença entre perdas reais e aparentes se deve



à produção suplementar após a interrupção, causada pela elevação da pressão no interior do reservatório com o fechamento do poço. Como se pode ver pela Figura 4, após a reabertura do poço no instante 210, esta produção deve continuar maior durante toda a vida do poço, e isso torna as perdas reais menores que as aparentes.

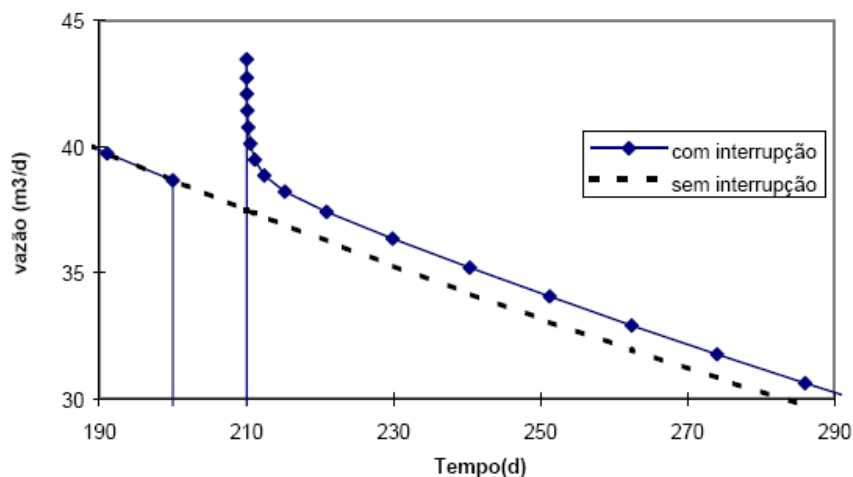


Figura 4. Exemplo de vazões de um poço, com e sem interrupção  
 Fonte: Paiva (1997, p. 13)

As coordenadas geográficas conferem atributos de distância entre poços. Entretanto, alguns autores como Costa (2005) e Borchardt (2002) desconsideraram estes atributos devido ao menor tamanho dos campos envolvidos e à menor escala dos valores de custos considerados. Neste trabalho, as distâncias entre poços se tornam significativas, a partir da qual se pode estimar o tempo de deslocamento entre poços, de acordo com a velocidade da sonda.

Os demais atributos (janela de tempo, profundidade, lâmina d'água e presença de H<sub>2</sub>S) impõem restrições quanto ao atendimento das sondas. Segundo Costa (2005), a janela de tempo corresponde ao intervalo de tempo durante o qual o poço pode ser trabalhado. Isso reflete a necessidade de intervenções em um dado período por ordem de força maior, independente da prioridade de atendimento do poço. Alguns autores, como Trindade (2005), simplesmente adotam um prazo, como tempo limite máximo para uma intervenção, comum a todos os poços. Neste trabalho, entretanto, a janela de tempo delimita o instante em que o potencial de produção do poço é restabelecido, ou seja, trata-se de uma restrição para o término da intervenção.

Em poços *offshore*, a profundidade total do poço é determinada por duas medidas. Uma que representa a profundidade percorrida na água e outra que representa a profundidade perfurada em rocha. A primeira destas medidas é usualmente denominada de

lâmina d'água, e corresponde à medida entre a superfície de água e o fundo do mar. A segunda é denominada de profundidade do poço, e corresponde à distância entre o fundo do mar (cabeça do poço) e o ponto onde o mesmo alcança o reservatório de petróleo (fundo do poço). Para que uma sonda seja capaz de realizar uma intervenção em um poço, ela deve ser capaz de tanto operar a uma lâmina d'água pelo menos igual à que o poço apresenta, quanto de perfurar a profundidades iguais ou maiores a do poço em intervenção.

Alguns tipos de petróleo podem apresentar gás sulfídrico ( $H_2S$ ) em sua composição. Este produto é, além de altamente corrosivo, extremamente letal. Isso exige equipamentos e pessoal adequado presentes nas sondas que fazem intervenções em poços onde há este composto. Assim, a capacidade (ou não) de uma sonda intervir em ambiente com presença de  $H_2S$  torna-se também condição que deve ser verificada ao planejar uma intervenção em um poço.

Quanto à frota de sondas, esta é heterogênea, o que leva a diferentes níveis de atendimento de cada sonda, conforme a limitação técnica de cada uma. Assim, cada uma é identificada por um parâmetro, “Tipo sonda”, associado a um conjunto de parâmetros considerados nesta dissertação, dados pela Tabela 2.

Índice de produtividade	Velocidade média de deslocamento
Coordenadas iniciais	Máxima profundidade
Máxima lâmina d'água	Intervenção em presença de $H_2S$

Tabela 2. Parâmetros considerados para as sondas  
 Fonte: próprio autor (2010)

Tanto o índice de produtividade quanto a velocidade média de deslocamento se referem à eficiência com que uma sonda executa todo o serviço de intervenção. O índice de produtividade afeta diretamente o tempo de intervenção e a velocidade média incide sobre o tempo de deslocamento entre poços. As coordenadas iniciais são inerentes aos poços em que as sondas se encontram antes de serem alocadas aos poços considerados pelo problema. Já a intervenção em presença de  $H_2S$  (que pode ser permitida ou não), a máxima profundidade e a máxima lâmina d'água de atuação definem a capacidade operacional das sondas.

Uma vez descritos todos os atributos dos poços e parâmetros das sondas, sejam  $p \in POCOS$  um poço e  $s \in SONDAS$  uma sonda qualquer. Assim, pode-se definir como  $\Delta t_{ps}$  o tempo de atendimento da sonda  $s$  ao poço  $p$ , dado pela soma das seguintes parcelas:

$$\Delta t_{ps} = \Delta t_{ps}^M + \Delta t_{ps}^D + \Delta t_{ps}^I$$

onde,  $\Delta t_{ps}^M$  – tempo de desmobilização/mobilização da sonda  $s$  no poço  $p$ ;

$\Delta t_{ps}^D$  – tempo de deslocamento da sonda  $s$  para o poço  $p$ ;

$\Delta t_{ps}^I$  – tempo de intervenção efetivo da sonda  $s$  no poço  $p$ .

Como se pode constatar, todos os tempos são dependentes da sonda e do poço considerado. O tempo de desmobilização/mobilização, que pode ser visto como um tempo de *setup* ou preparação, assume um dentre dois valores possíveis:  $K^{\min}$  e  $K^{\max}$ , pois depende da seqüência de poços percorrida pela sonda. Caso o poço em questão  $p$  e seu poço precedente na fila de  $s$  apresentar propriedades iguais quanto à presença de  $H_2S$  (ambos simultaneamente providos ou desprovidos de  $H_2S$ ),  $\Delta t_{ps}^M$  assume um valor mínimo, dado por  $K^{\min}$ . Caso contrário,  $\Delta t_{ps}^M$  assume um valor máximo, dado por  $K^{\max}$ . Formalmente:

$$\Delta t_{ps}^M = \begin{cases} K^{\min}, & \text{se } h_p = h'_{ps} \\ K^{\max}, & \text{se } h_p \neq h'_{ps} \end{cases}$$

onde,

$$h_p = \begin{cases} 1, & \text{se } p \text{ possui } H_2S \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \text{e} \quad h'_{ps} = \begin{cases} 1, & \text{se o poço precedente a } p \text{ em } s \text{ possui } H_2S \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Obviamente, essa regra é válida somente para sondas capazes de intervir em poços em presença de  $H_2S$ . Caso contrário,  $\Delta t_{ps}^M$  torna-se invariável e igual a  $K^{\min}$ .

Quanto ao tempo de deslocamento, Trindade (2005) considera tempos estimados para transportar uma sonda entre dois poços quaisquer. Neste trabalho, ele é dependente da distância percorrida e da velocidade média de  $s$ :

$$\Delta t_{ps}^D = \frac{d_{ps}}{V_s}$$

onde,  $d_{ps}$  – distância entre  $p$  e seu poço precedente em  $s$ ;

$V_s$  – velocidade média de deslocamento da sonda  $s$ .

Para o cálculo da distância entre poços, é utilizada da Lei Esférica dos Cossenos, cuja demonstração pode ser encontrada em Junkins e Shuster (1993):

$$d_{ps} = \arccos(\sin(lat_p) \times \sin(lat_{ps}') + \cos(lat_p) \times \cos(lat_{ps}') \times \cos(long_{ps}' - long_p)) \times R$$

onde  $lat$  e  $long$  referem-se às coordenadas de latitude e longitude e  $R$  representa o raio terrestre ( $R \approx 6371$  km). Vale ressaltar que esta fórmula aproxima o formato da Terra a uma esfera, ignorando seus efeitos elipsoidais, o que é razoável para distâncias superiores a 1 metro, como no caso abordado. Além disso, para o cálculo dos cossenos e senos, todos os ângulos devem estar em radianos.

Finalmente, a última parcela do tempo de atendimento da sonda  $s$  ao poço  $p$  – e a mais significativa – é o tempo de intervenção efetivo  $\Delta t_{ps}^I$ , dado pela seguinte razão:

$$\Delta t_{ps}^I = \frac{\Delta t_p^{I'}}{\eta_s}$$

onde,  $\Delta t_p^{I'}$  – tempo de intervenção em  $p$ ;

$\eta_s$  – índice de produtividade da sonda  $s$ .

Dessa forma, o tempo de intervenção efetivo torna-se dependente da sonda que a realiza, de maneira inversamente proporcional ao seu índice de produtividade: quanto maior o índice de produtividade de  $s$ , menor o valor de  $\Delta t_{ps}^I$ , e vice-versa. Como  $\eta_s$  é um número adimensional e varia entre 0 e 1, então  $\Delta t_{ps}^I \in [\Delta t_p^{I'}, \infty)$ .

Uma vez caracterizados todos os atributos dos poços e parâmetros das sondas, e ainda relacionadas as grandezas que formam o tempo de atendimento de um poço por uma dada sonda, podem ser definidas a Função Objetivo e restrições para o PPSI. Sua Função Objetivo (FO) consiste em minimizar a perda total de óleo de cada poço em sua fila de espera pelo atendimento, dada pela seguinte expressão:

$$\sum_{p \in \text{POÇOS}} \sum_{s \in \text{SONDAS}} [v_p \times (\Delta t_{ps} + m_{ps})]$$

onde,  $v_p$  – vazão de um poço  $p$  (ou perda de óleo aparente);

$m_{ps}$  – *makespan* (ou tempo de operação) da sonda  $s$  até o início do atendimento ao poço  $p$ .

Na literatura, verifica-se que a maioria dos autores emprega uma Função Objetivo baseada apenas nestes mesmos elementos. Duas exceções são os trabalhos de Paiva (1997) e Borchardt (2002), que acrescentam os custos de utilização da sonda envolvida na intervenção.

Ao se estabelecer uma programação de poços para cada sonda, seis restrições são consideradas para o atendimento de uma sonda  $s$  a um poço  $p$ :

- a) Cada poço somente deve ser atendido por uma única sonda durante todo o período de planejamento;
- b) Em cada instante de tempo, cada sonda atende no máximo a um único poço e, durante esse período, ela se encontra indisponível para o atendimento aos demais poços;
- c) A máxima profundidade atingida pela sonda  $s$  deve ser maior ou igual à profundidade do poço  $p$ ;
- d) A máxima lâmina d' água atingida pela sonda  $s$  deve ser maior ou igual à lâmina d' água do poço  $p$ ;
- e) Caso o poço  $p$  apresente  $H_2S$ , a sonda  $s$  deve ser capaz de operar em presença de  $H_2S$ ;
- f) O instante em que o potencial de produção do poço  $p$  é restabelecido pela sonda  $s$  deve estar contido na janela de tempo do poço  $p$ .

Na literatura, as formulações encontradas para o PPSI dividem-se em duas abordagens: como um problema de seqüenciamento e como um problema de roteamento de veículos. Na seção seguinte, ambos são descritos e correlacionados ao PPSI.

## 2.3 Problemas de Seqüenciamento e Roteamento

Segundo Bodin *et al* (1983), um dado problema é classificado como de roteamento quando se almeja otimizar a determinação de uma ou mais rotas para veículos, os quais devem visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, em locais pré-determinados. Já segundo Baker (1974), um problema de seqüenciamento consiste em otimizar a alocação de tarefas a recursos, ao longo do tempo, a fim de que um conjunto de processos seja executado.

A seguir, a seção 2.3.1 apresenta o Problema de Seqüenciamento de Tarefas, a seção 2.3.2, o Problema de Roteamento de Veículos e a seção 2.3.3 finaliza o capítulo ao relacionar as principais semelhanças e diferenças de ambos os problemas com o PPSI.

### 2.3.1 O Problema de Seqüenciamento de Tarefas

Em sistemas produtivos, o seqüenciamento de tarefas é uma das atividades que compõem o planejamento da produção, onde tarefas a serem executadas disputam recursos, que possuem capacidade limitada, por um período de tempo (CURY, 1999). Para analisar este problema, dois aspectos são fundamentais, conforme mostrado na Figura 5: a escolha da tarefa a ser executada (decisão 1) e a escolha do recurso a ser usado dentre uma lista de recursos disponíveis (decisão 2).

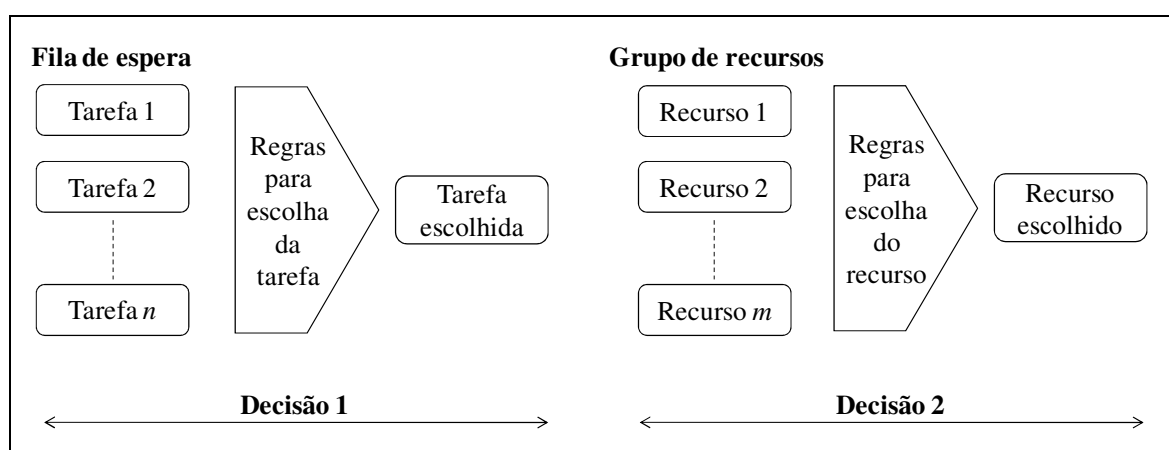


Figura 5. Decisões no seqüenciamento de tarefas  
 Fonte: Adaptado de Tubino (2000, p. 153)

Na prática, a escolha do recurso a ser utilizado fica restrita às situações onde existem variações significativas no desempenho dos equipamentos, seja nos tempos de

processamento, ou de *setup*. Quanto à escolha da tarefa, conforme os objetivos que se pretendam atingir, podem-se utilizar regras de prioridades diferentes – ou *pdrs* (*priority dispatch rules*). Três tipos de classificações podem ser utilizadas para as *pdrs*:

- 1) Quanto à complexidade: as regras de prioridade podem ser simples, combinação de regras de prioridades simples, regras com índices ponderados e regras heurísticas sofisticadas. As regras simples baseiam-se em uma característica específica da tarefa a ser executada. Entre elas, Rinnooy Kan (1976) destaca as seguintes:
  - a. FCFS (*First Come First Served*): é selecionada a tarefa que mais cedo chegou à fila de espera. Esta regra garante que nenhuma tarefa fique eternamente na fila de espera.
  - b. SPT (*Shortest Processing Time*): é selecionada a tarefa com menor tempo de processamento nessa máquina. Em problemas com uma máquina, esta regra garante o menor *lead time* médio (tempo que o produto espera entre a sua chegada e saída do sistema).
  - c. EDD (*Earliest Due Date*): é selecionada a tarefa com data de entrega mais cedo. Esta regra tende a minimizar o atraso máximo entre as tarefas da fila de entrega. Em uma única máquina, é encontrado o menor atraso máximo.
  - d. RANDOM (*Random*): as tarefas são selecionadas segundo um processo aleatório. Não há objetivo nenhum em otimizar qualquer medida de desempenho.

Além disso, duas ou mais regras simples podem ser combinadas ou ainda apresentarem pesos distintos, constituindo índices ponderados. Já as regras heurísticas constituem algoritmos específicos para um dado problema. São métodos aproximativos para busca de soluções, que podem eventualmente encontrar o ótimo global para o problema, ou apenas um ótimo local (GOLDBARG e LUNA, 2005).

- 2) Estáticas ou dinâmicas: as regras são estáticas quando o valor da prioridade é independente do instante de tempo atual e são dinâmicas caso contrário.
- 3) Locais ou globais: as regras são locais quando são consideradas informações apenas da fila de um recurso e são globais quando todo o sistema é considerado.

De maneira geral, o seqüenciamento de tarefas é uma das mais complexas tarefas no gerenciamento da produção (SLACK *et al*, 2008). Trata-se de um problema de otimização combinatória de difícil solução, classificado na literatura como NP-completo (GAREY e JOHNSON, 1979). Segundo Jain e Meeran *apud* Borchardt (2002), a complexidade torna-se ainda maior quando mais de um recurso é envolvido: o número de

soluções possíveis é da ordem de  $(n!)^m$ , onde  $n$  é o número de tarefas e  $m$  a quantidade de recursos. Assim, destaca-se a relevância do uso das *pdrs*, pois são capazes de obter boas soluções em tempos computacionais razoáveis.

Um dos instrumentos mais comumente utilizados para a visualização de um programa definido por um seqüenciamento de tarefas é o gráfico de Gantt, proposto por H. L. Gantt em 1917 (SLACK *et al*, 2008). Ele auxilia na análise de diferentes alternativas de seqüenciamento ao indicar os momentos de início e fim das tarefas e, algumas vezes, o progresso da execução das atividades. Dessa forma, torna-se possível comparar a programação real com a planejada. De acordo com Slack *et al* (2008), a forma mais comum para um gráfico de Gantt consiste em listar as tarefas programadas no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal.

### 2.3.2 O Problema de Roteamento de Veículos

Matematicamente, Laporte *et al* (2000) define o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) sobre um grafo  $G = (V, E)$  não direcionado, onde  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  é o conjunto de vértices e  $E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i < j\}$  é o conjunto de arestas. O vértice  $v_0$  representa o depósito, sendo este a base de uma frota de veículos idênticos de capacidade  $Q$ , enquanto os vértices remanescentes correspondem às cidades ou consumidores. Associada a cada consumidor existe uma demanda e para cada aresta há uma distância, ambas não negativas. O PRV consiste em definir uma rota, ou seqüência de visitas, para cada veículo, de tal maneira a minimizar os custos de transporte, dados pelas distâncias, desde que as seguintes condições sejam respeitadas:

- Cada rota começa e termina no depósito;
- Toda cidade de  $V \setminus \{v_0\}$  é visitada somente uma vez, por somente um veículo;
- Em cada rota, a demanda total não deve superar a capacidade  $Q$  de um veículo, e a distância total não deve ultrapassar a distância máxima pré-estabelecida.

Diversas variações do problema podem ser encontradas na literatura, dentre estas destacam-se duas: uma que parte de múltiplos depósitos (PRVMD) e outra que considera frota heterogênea (PRVFH), conforme descrito a seguir.



- a) PRVMD: considera a existência de  $k > 1$  depósitos, e cada veículo deve iniciar e finalizar sua rota no mesmo depósito. Uma referência é o trabalho de Ribeiro e Soumis *apud* Trindade (2005).
- b) PRVFH: considera diferentes capacidades para os veículos. Há duas classes distintas de acordo com a limitação para a quantidade de cada tipo de veículo. A classe mais comum abrange problemas cujo objetivo é otimizar as rotas e encontrar a melhor frota dentre uma quantidade ilimitada de cada tipo de veículos. A segunda classe, mais próxima da realidade, lida com quantidades fixas de veículos de cada tipo. Uma referência é o trabalho de Gendreau *et al apud* Neves (2004).

Segundo Bodin *et al* (1983), o PRV está entre os problemas mais complexos da otimização combinatória, e pertence também à categoria NP-completo (GAREY e JOHNSON, 1979). Principalmente em logística, esta complexidade coloca o PRV entre os principais problemas, além de estar relacionado ao elo mais caro da cadeia de distribuição. Portanto, estratégias heurísticas customizadas têm sido desenvolvidas, conforme o problema real considerado. Porém, isso torna as heurísticas específicas e pouco robustas, uma vez que os dados e a resolução do PRV para um determinado tipo de problema podem não ser adequados para outro problema similar (CUNHA, 1997).

Entre as inúmeras aplicações práticas, estão: distribuição de bens, transporte escolar, roteamento de linhas aéreas e de meios de transporte coletivos, roteamento de pacotes em redes de computadores e de comunicações, patrulhamento policial, recolhimento de lixo e resíduos, cortes de chapas, limpeza de ruas e roteamento entre células de manufatura flexíveis. Apesar de tradicionalmente aplicado a questões operacionais, o PRV é também utilizado como apoio para modelar decisões táticas e estratégicas. Entre as decisões táticas, estão: definição de número de rotas e de veículos, regime de trabalho e nível de estoque. Entre as decisões estratégicas: localização de fábricas ou depósitos, definição de tipos de veículos e mercados de atuação (CUNHA, 1997).

### 2.3.3 Análise das abordagens

A partir da caracterização dos problemas de sequenciamento e roteamento, é possível relacioná-los ao PPSI ao identificar, em ambas as abordagens, os poços e as sondas, conforme mostrado na Tabela 3.

PPSI	Abordagens	
	Problemas de Sequenciamento	Problemas de Roteamento
Poços	Tarefas	Cidades
Sondas	Recursos	Veículos

Tabela 3. Relação entre o PPSI e suas abordagens  
 Fonte: próprio autor (2010)

Verifica-se que o PPSI situa-se entre os extremos das duas abordagens. Como se pode observar pela

Figura 6, o problema contempla a dimensão espacial de um problema de roteamento de veículos, ao considerar o impacto do deslocamento entre poços na FO. Também, a dimensão temporal de um problema de sequenciamento é contemplada, ao considerar o impacto temporal na perda de produção, decorrente do sequenciamento, na maior parte. Problemas como esse são classificados por Cunha (1997) como de Roteirização e Programação de Veículos.

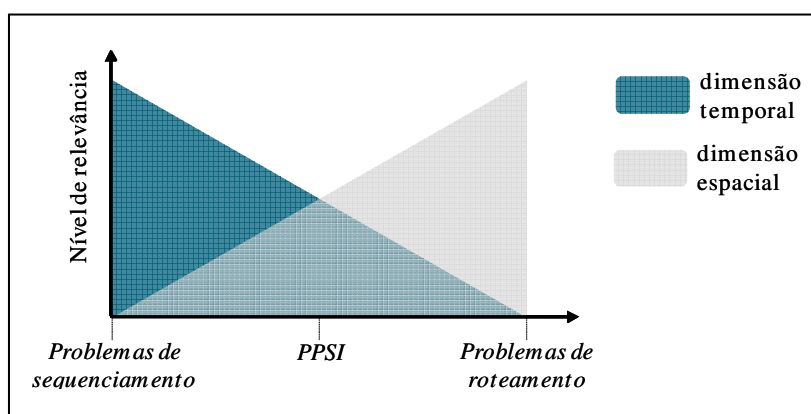


Figura 6. O PPSI e as dimensões temporal e espacial  
 Fonte: próprio autor (2010)

Além disso, é possível analisar as principais semelhanças e diferenças das abordagens em relação ao PPSI. A Tabela 4 a seguir apresenta esta análise no que tange a: solução, Função Objetivo e restrições:

		PPSI	
		Semelhanças	Diferenças
Problemas de Seqüenciamento	Solução	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Um gráfico de Gantt pode ser utilizado para visualização de uma solução.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Em um problema clássico de seqüenciamento, as tarefas se deslocam até os recursos. No PPSI, os recursos (sondas) se deslocam até as tarefas (poços).</li> </ul>
	Função Objetivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>– A Função Objetivo pode considerar regras de prioridade para escolha da tarefa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Diversas são as medidas de eficiência de um problema de seqüenciamento. As mais comuns são: <i>lead time</i> médio, atraso médio e estoque em processo médio. Para o PPSI, apenas a perda total de óleo é o mais relevante.</li> </ul>
	Restrições	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Há restrições temporais para execução de tarefas, sob a forma de janelas de tempo.</li> <li>– A oferta de recursos é consideravelmente inferior à demanda por tarefas.</li> <li>– Os recursos apresentam capacidade limitada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– As restrições do PPSI consideram uma localização geográfica para as tarefas (poços), inexistente em um problema clássico de seqüenciamento.</li> </ul>
Roteamento de Veículos	Solução	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tal como o PRVMD, o PPSI possui múltiplas origens para os veículos (sondas).</li> <li>– Uma solução é dada por um conjunto de rotas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– No PPSI, as rotas são abertas e são definidos todos os instantes relativos às intervenções. No PRVMD, as rotas são fechadas (à exceção do Open VRP, em que as rotas são abertas) e não informam os instantes iniciais e finais em que os veículos visitam as cidades.</li> </ul>

<b>Função Objetivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Trata-se de uma função de minimização que considera os custos de transporte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– A Função Objetivo do PRV busca minimizar apenas os custos de transporte. O PPSI busca minimizar a perda total de óleo.</li> </ul>
	<b>Restrições</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cada cidade (poço) é visitada somente uma vez, por somente um veículo (sonda).</li> <li>– As restrições consideram uma localização geográfica para as cidades (poços).</li> </ul>

Tabela 4. Semelhanças e diferenças do PPSI em relação às suas abordagens

Fonte: próprio autor (2010)

## CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE RESOLUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada a metodologia proposta, baseada em Simulação-Otimização e Reconexão por Caminhos, a ser detalhada nos capítulos seguintes. Para tanto, inicialmente é apresentado o referencial teórico em que ela se baseia, que contém o estado da arte dos métodos já utilizados para resolução do PPSI.

### 3.1 Revisão de métodos da literatura

Usualmente, as companhias de petróleo definem a programação do atendimento de sondas em reuniões de técnicos. Nestas reuniões, o planejamento é dividido em duas etapas: primeiro é resolvido um problema de atribuição para definir qual sonda irá trabalhar em quais poços e depois é feito o roteamento propriamente dito de cada sonda separadamente (PAIVA, 1997).

Entretanto, a tomada de decisão é, em muitas vezes, baseada em opiniões e cálculos superficiais. Esse fato tem direcionado esforços na literatura na busca por métodos comprovadamente eficientes, inclusive porque o PPSI é um problema de difícil resolução, classificado como NP-completo (GAREY e JOHNSON, 1979). Dessa forma, algoritmos exatos não são capazes, no caso geral, de alcançar soluções ótimas em tempos computacionais aceitáveis, quando se tratam problemas de grandes dimensões.

A Tabela 5, a seguir, relaciona os principais trabalhos relativos ao PPSI em ordem decrescente de ano de publicação e os classifica conforme o método, o tipo de formulação e os tipos de sondas consideradas. Como se pode observar, a maioria dos trabalhos utiliza métodos heurísticos aplicados a problemas formulados como de seqüenciamento, envolvendo sondas *onshore*. Isso mostra a relevância dessa classe de métodos, pois foram capazes de obter boas soluções em tempos computacionais razoáveis para problemas do tipo NP-completo, como o PPSI.

Autor	Ano	Método											Formulação		Sondas		
		Metaheurísticas								Heurísticas	Simulação	Exato	Online	Sequenciamento	Roteamento	Onshore	Offshore
		Algoritmo Genético	Busca Tabu	Colônia de Formigas	GRASP	Multi-Start	Reconexão por Caminhos	Scatter Search	Simulated Annealing								
Douro e Lorenzoni	2009	X												X		X	
Neves e Ochi	2007				X		X								X	X	
Oliveira <i>et al</i>	2007							X						X		X	
Aloise <i>et al</i>	2006								X					-		X	
Alves e Ferreira F.	2006	X												X		X	
Costa	2005				X					X		X		X		X	
Trindade	2005				X		X								X	X	
Júnior <i>et al</i>	2004											X		-		X	
Aloise <i>et al</i>	2002			X										-		X	
Borchardt	2002	X												X		X	
Maia <i>et al</i>	2002	X	X	X	X				X					-		X	
Noronha e Aloise	2001				X	X				X				-		X	
Accioly e Chiyoshi	1998										X			-			X
Paiva	1997							X							X	X	

Tabela 5. Classificação dos principais trabalhos para resolução do PPSI  
 Fonte: próprio autor (2010)

O trabalho mais recente da literatura é o de Douro e Lorenzoni (2009), envolvendo sondas *onshore*. Os autores apresentam uma estratégia de resolução para o PPSI baseada em Algoritmo Genético (AG), combinada com a técnica de melhoria 2-opt. É adotada a mesma modelagem matemática proposta por Costa (2005), onde é desconsiderado o tempo de deslocamento entre poços e assume-se que as sondas são homogêneas. Os resultados são comparados com os melhores encontrados por Costa (2005) e com o AG de Alves e Ferreira (2006). É constatado o desempenho superior, tanto em qualidade quanto em tempo de execução, para todas as instâncias testadas, exceto para uma instância de 25 poços e 8 sondas. O *gap* máximo em relação às soluções ótimas para o AG-2opt não ultrapassa a 0,4%. Para o AG, ele chega em 0,6 %, e para as melhores heurísticas de Costa (2005) ele atinge 1,79 %. Uma ressalva nestas comparações é que os resultados de Douro e Lorenzoni (2009) provêm de uma máquina superior em termos de processamento e memória RAM.

Neves e Ochi (2007) apresentam três propostas, envolvendo sondas *onshore* e baseadas em Memória Adaptativa (MA), para melhorar o desempenho da metaheurística GRASP:

- Auto configuração do parâmetro  $\alpha$ : por meio de um modelo de GRASP Reativo, o parâmetro  $\alpha$  (coeficiente de aleatoriedade do algoritmo construtivo GRASP) é

configurado automaticamente, para que boas soluções sejam produzidas, sem que o algoritmo fique preso a ótimos locais.

- Conjunto Elite e Reconexão por Caminhos (*Path-Relinking*): busca encontrar uma solução intermediária de qualidade superior a duas soluções extremas de boa qualidade. Para isso, uma trajetória entre ambas é estabelecida, onde, passo a passo, uma se aproxima da outra e um Conjunto Elite é utilizado como repositório de soluções. É aplicada a todas as soluções produzidas pelas iterações GRASP durante 10% final do tempo de execução total.
- Diversificação Reativo + Conjunto Elite: trata-se de uma estratégia simples de diversificação, na qual o parâmetro  $\alpha$  varia de forma associada com a atualização do Conjunto Elite.

Os resultados computacionais de Neves e Ochi (2007) são obtidos a partir de instâncias aleatórias com base na distribuição Normal de probabilidade. O GRASP+MA obtém melhores resultados em todas as instâncias testadas, exceto em duas. Segundo conclusões dos autores, isso mostra a superioridade da Reconexão por Caminhos, como a principal responsável pela qualidade das soluções encontradas.

Oliveira *et al* (2007) aplicam a metaheurística *Scatter Search* às mesmas instâncias utilizadas por Costa (2005) e comparam os resultados obtidos, em termos de perda total de óleo, com os algoritmos de Costa (2005). O algoritmo proposto em Oliveira *et al* (2007) opera sobre um Conjunto de Soluções de Referência (RS) para gerar novas soluções a partir de combinações lineares ponderadas das soluções pertencentes a subconjuntos estruturados do RS. O RS é composto pelas melhores soluções encontradas e também leva em consideração a diversificação entre elas, como estratégia para escapar de ótimos locais. A versão implementada que apresenta os melhores resultados é a que utiliza o método aleatório para a geração das soluções iniciais e limita o tamanho do RS em 10 soluções. O número máximo de iterações é estabelecido em 10500 – o mesmo do GRASP de Costa (2005) – e o tamanho da população inicial fixado em 34 indivíduos. É constatado o desempenho sempre superior do *Scatter Search* em relação ao GRASP. Já o desempenho da heurística HMD somente é superado em instâncias menores, com 25 poços.

Aloise *et al* (2006) propõem VNS para a resolução do PPSI, envolvendo sondas *onshore*. Esta metaheurística parte de uma solução inicial, cuja construção seleciona iterativamente o poço que apresentar maior perda de óleo. O cálculo desta perda utiliza como dados a vazão e os tempos de intervenção e deslocamento entre poços. Em seguida,

o algoritmo explora nove vizinhanças, até que o tempo limite de processamento seja atingido:

- V1: troca de rotas realizadas por duas sondas;
- V2: troca de poços operados pela mesma sonda;
- V3: troca de poços envolvendo sondas distintas;
- V4: realocação de um poço para qualquer posição de qualquer sonda;
- V5: aplicação de dois movimentos consecutivos de V2;
- V6: aplicação de dois movimentos consecutivos de V3;
- V7: aplicação de três movimentos consecutivos de V3;
- V8: aplicação de dois movimentos consecutivos de V4 e
- V9: aplicação de três movimentos consecutivos de V4.

Os experimentos de Aloise *et al* (2006) são conduzidos em instâncias artificiais e reais, estas últimas formadas por 130 poços e 9 sondas da bacia Potiguar terrestre, situada no Rio Grande do Norte e parte do Ceará. Os resultados para as instâncias artificiais são comparados com os obtidos por trabalhos anteriores do mesmo autor, envolvendo GRASP e Colônia de Formigas. Todos eles indicam dominância do VNS: encontra-se o melhor resultado médio em 85,19% dos problemas testes e a melhor solução para todos os casos. Para as instâncias reais, a perda total de óleo referente à solução de uma empresa de petróleo considerada é 2,27% maior em relação à do VNS.

Alves e Ferreira Filho (2006) utilizam a mesma modelagem matemática de Costa (2005) e aplicam Algoritmo Genético ao PPSI, envolvendo sondas *onshore*. A estrutura usada para o cromossomo é a de um vetor de números inteiros, onde cada elemento representa um poço que necessita intervenção. As permutações que formam a população inicial são escolhidas de forma totalmente aleatória e é adotado o operador *Uniform order based crossover*. Os resultados se mostram satisfatórios para instâncias pequenas (25 poços). Porém, esse desempenho cai ao serem considerados mais poços. Assim, pelos estudos realizados, não é possível constatar uma vantagem significativa no uso do AG em relação às heurísticas de Costa (2005).

Costa (2005) apresenta uma formulação matemática, duas heurísticas (HMPT e HMD, descritas a seguir) e uma metaheurística GRASP aplicadas a instâncias geradas artificialmente. Também, são realizadas comparações com algumas instâncias reais, relativas à operação *onshore*. As duas heurísticas geram soluções bem próximas às soluções ótimas obtidas pelo solver CPLEX 9, para as instâncias onde é possível garantir a



otimalidade. Já a aplicação da meta-heurística GRASP não obtém resultados tão bons quanto aos das heurísticas. A seguir mais detalhes sobre estas heurísticas:

- Heurística de Máxima Prioridade Tri-critério (HMPT): cria uma lista de ordens de atendimento e, de acordo com ela, aloca as tarefas às máquinas à medida que elas se encontram disponíveis. É baseada em três critérios de ordenação para priorização de atendimentos: (1) maior vazão, (2) maior razão entre vazão e tempo de intervenção e (3) maior produto entre vazão e tempo de intervenção. Experimentos mostram que o critério 2 possui melhor desempenho.
- Heurística de Montagem Dinâmica (HMD): em vez de alocar os poços sequencialmente como a HMPT, esta heurística admite que o poço a ser alocado (primeiro da lista) possa ser inserido na posição de qualquer outro já alocado. Assim, os poços são rearrumados dinamicamente na solução, com o intuito de melhorá-la.
- GRASP: é composta de duas fases: construção de soluções e melhoramento. Ambas são executadas sucessivas vezes, com o objetivo de encontrar a melhor solução possível, até que seja atingido um número máximo de iterações, estipulado em 10.500, conforme descrito a seguir:
  - a. A fase de Construção possui um parâmetro alfa (ajustado em 0,06), que controla o nível de aleatoriedade/gulosidade de alocação dos poços. É baseada em uma função gulosa, para a qual duas possibilidades são analisadas. A primeira trata-se de uma função baseada no impacto que a inserção do candidato causa na FO. Já a segunda trata-se de uma função que prioriza os poços com maior perda de vazão, com menor tempo de serviços e com menores tempos de início dos serviços. Ao serem comparadas, a primeira função produz melhores resultados.
  - b. A fase de melhoramento trata-se de uma Busca Local, cuja vizinhança é formada por todas as soluções obtidas a partir da solução construída ao se alterar os instantes em que as tarefas se iniciam, sem modificar a ordem na qual são executadas.

Ao contrário de Costa (2005), Trindade (2005) aborda o PPSI como um problema de roteamento. O trabalho é voltado para sondas *onshore* e um modelo de Programação Linear Inteira é desenvolvido. São apresentadas diferentes versões da metaheurística GRASP com o intuito de analisar a importância dos algoritmos de Construção e Busca

Local, incluindo Reconexão por Caminhos, filtro e versões adaptativas no desempenho do GRASP.

A partir de conjuntos de problemas teste gerados aleatoriamente, Trindade (2005) testa suas versões para 3 sondas e 50 a 1.000 poços. A versão GRASP pura, que apresenta os melhores resultados, testa todas as possibilidades de realocação de um poço em qualquer sonda, na fase de Busca Local. Em 88% dos casos, esta versão atinge a solução ótima para instâncias pequenas (5 a 7 poços e 2 e 3 sondas), mas com o tempo de execução muito inferior ao tempo utilizado do método exato, ao contrário da pior versão, em que as realocações são limitadas a poços pertencentes ao itinerário de mesma sonda. Segundo as conclusões da autora, as versões adaptativas aumentam a confiabilidade, robustez e qualidade das soluções GRASP. Segundo a autora, a técnica de Reconexão por Caminhos foi uma das melhores formas de busca intensiva entre duas soluções de boa qualidade, apesar do acréscimo significativo nos tempos computacionais.

Um algoritmo original é desenvolvido por Lima *et al* (2004) para sondas *onshore*. Neste caso, o problema em questão é tratado como uma aplicação *online* do Problema dos  $k$  Servos Homogêneos – PKS, onde cada servo é dado por uma sonda, todas idênticas. Por ser *online*, o problema é visto como um processo de decisão em múltiplas etapas, onde só são conhecidas as solicitações de intervenção do instante considerado. O modelo é então construído segundo as características da Aprendizagem por Reforço (SUTTON e BARTO, 1998) e utiliza o algoritmo *Q-Learning* (WATKINS e DAYAN, 1992) como método de solução. Com essa metodologia, objetiva-se encontrar uma política que indique os movimentos das sondas de maneira a minimizar somente o custo total de deslocamento. Os resultados obtidos são comparados com um método de solução do PKS consagrado pela literatura e comprovam a eficiência do algoritmo sugerido.

Aloise *et al* (2002) propõem heurísticas de colônia de formigas para a resolução do PPSI, envolvendo sondas *onshore*. O método simula o comportamento de um conjunto de agentes (formigas) que se cooperam para resolver um problema de otimização. A cooperação entre as formigas se dá por meio do feromônio depositado por cada formiga ao se deslocar no espaço de busca, permitindo que esse rastro possa ser usado como informação por outras formigas. Dois algoritmos de construção são elaborados por Aloise *et al* (2002). No primeiro, é selecionado um poço da lista de poços disponíveis para ser alocado à lista de atendimento de uma sonda, de acordo com um fator de prioridade, até que todos sejam alocados. O segundo algoritmo difere do primeiro pelo fato de que, quando ocorre a alocação de algum poço, este não é imediatamente retirado da lista de

poços disponíveis. Os poços podem, inclusive, ser alocados à lista de atendimento de mais de uma sonda, mas permanecem apenas onde for atendidos em menor tempo. Assim, um poço somente é retirado da lista de poços disponíveis quando nenhuma outra sonda puder atendê-lo com um tempo inferior ao da sonda para a qual ele está alocado. Ambas as heurísticas empregam uma Busca Local para refinar as soluções. Para tanto, são realizados movimentos de troca para cada par de poços de uma mesma sonda, até que não haja mais melhora na solução corrente.

Borchardt (2002) desenvolve uma formulação matemática, baseada em Programação Linear Inteira Mista, envolvendo sondas *onshore*. Apesar de seu modelo não considerar o PPSI como um problema de roteamento tal como Paiva (1997), são feitas as mesmas considerações deste autor quanto a apurações de perda de óleo e custo de sondas. São utilizados os fundamentos do algoritmo transgenético Proto-Gene – ProtoG (GOUVÊA, 2001) – da metaheurística Transgenética Computacional (GOUVÊA, 2001). Em paralelo, é implementado um Algoritmo Genético híbrido (AGh) – memético (RADCLIFFE e SURRY, 1994) – que objetiva fornecer elementos para comparação de desempenho entre as abordagens de solução. Para obtenção de resultados, 34 instâncias são geradas aleatoriamente, divididas em grupos de 100, 200 e 400 poços, para 7 a 12 sondas disponíveis e 1 a 8 sondas alugadas. De acordo com as conclusões da autora, o ProtoG com Busca Local, apesar de não empregar operadores de cruzamento e mutação, fornece melhores resultados qualitativos do que o AGh e o ProtoG sem Busca Local.

Maia *et al* (2002) propõem um sistema computacional georreferenciado e interativo para o gerenciamento das sondas terrestres também aplicado à bacia Potiguar, assim como Aloise *et al* (2006). O *software* basicamente possui um conversor de dados que recebe requisições do usuário por meio de um Sistema de Informações Geográficas e que se comunica com um módulo de algoritmos heurísticos. Entre as metaheurísticas implementadas estão: Algoritmos Genéticos, Busca Tabu, Colônia de Formigas, GRASP e VNS. Com este sistema, os autores acreditam ser possível realizar simulações sob o ponto de vista Econômico/Operacional e adotar o cenário de maior rentabilidade para as operações de intervenção de uma dada empresa de petróleo.

Noronha e Aloise (2001) apresentam algoritmos e estratégias heurísticas e metaheurísticas para a resolução do PPSI em poços petrolíferos na bacia Potiguar. São implementados e comparados um algoritmo heurístico guloso e as metaheurísticas *Multi-Start* e GRASP. Dentre todos, o GRASP se mostra a melhor estratégia, por equilibrar

métodos de diversificação (como o *Multi-Start*) e intensificação (como algoritmo heurístico guloso):

- Algoritmo heurístico guloso: emprega uma lista ordenada de solicitações de intervenções, baseada em critérios de prioridade como a vazão do poço e o risco ambiental associado ao serviço solicitado. Ao partir dessa lista, a heurística aloca cada solicitação à sonda capaz de atendê-la o mais rápido possível. Esta heurística se destaca por encontrar boas soluções com um esforço computacional reduzido, porém a solução ótima dificilmente é encontrada. A complexidade é assintótica de ordem  $O(m \times n)$ .
- Multi-Start: A metaheurística *Multi-Start* é similar ao GRASP implementado por Costa (2005). Contudo, a fase de construção é completamente aleatória. Já a fase de melhoramento emprega uma estrutura de vizinhança formada pela troca entre duas tarefas. A função de custo também avalia a perda total de óleo. Segundo os autores, esta estratégia é capaz de alcançar o ótimo global, mas gera muitas soluções de péssima qualidade. A complexidade é assintótica de ordem  $O(NI \times n^2)$ , onde  $n$  é o número de solicitações de intervenções e  $NI$  é o número de iterações executadas.

Ao passo que a maioria dos trabalhos são voltados para sondas terrestres, o artigo de Accioly e Chiyoshi (1998) abrange sondas *offshore*. Este trabalho utiliza um modelo de simulação para obter a relação entre o nível de produção e o número de sondas utilizadas para troca de bombas centrífugas submersas em poços de petróleo. Para tanto, a regra de maior vazão estabelece a prioridade de alocação das sondas. O modelo de simulação é desenvolvido em Promodel e aplicado a um conjunto de plataformas fixas na área nordeste da bacia de Campos. Os resultados obtidos apresentam uma análise econômica dos cenários testados no que tange a: taxa de utilização da sonda, perdas de petróleo devido à indisponibilidade de sonda, tempo médio de espera por recurso e tempo médio de poço bloqueado.

Finalmente, um dos trabalhos mais antigos a respeito do tema em questão é o de Paiva (1997), aplicado a sondas *onshore*. Para determinar o itinerário de apenas uma sonda, os seguintes algoritmos são implementados:

- Pesquisa Completa: analisa todas as soluções possíveis e fornece, certamente, a melhor delas;
- Seguinte Mais Próximo: objetiva reduzir o gasto de transporte de sonda sem considerar a produção dos poços;

- Seguinte Mais Vantajoso: trata-se da mesma regra anterior, porém incorpora a prioridade aos poços de maior produção;
- Busca em Profundidade: analisa vários poços vantajosos, e não apenas o mais vantajoso e
- Têmpera Simulada: testa alterações possíveis na configuração do sistema, buscando reduzir a Função Objetivo. Eventualmente, permite que a configuração seja alterada para aumentar a Função Objetivo, a fim de que o sistema possa sair de um mínimo local e tentar encontrar o mínimo global. Para tanto, em analogia com a maneira com a qual os líquidos congelam ou cristalizam, o algoritmo se inicia com uma alta probabilidade de aceitação de aumentos na Função Objetivo (ou alta temperatura). Lentamente, essa taxa é reduzida em busca do mínimo global, assim como a natureza é capaz de encontrar o mínimo estado de energia.

Para analisar uma fila inferior a nove poços, o autor recomenda utilizar a Pesquisa Completa. Para filas entre dez e dezessete poços, a Busca em Profundidade fornece os melhores resultados. Para números acima destes e para mais de uma sonda, o *Simulated Annealing* fornece os melhores resultados em tempo hábil. Os resultados obtidos apontam uma economia potencial de 15% nas perdas de produção, equivalente a 4.000m<sup>3</sup>/ano de petróleo em uma região petrolífera brasileira.

### 3.2 Metodologia proposta

Como se pôde constatar, grande parte dos métodos para resolução do PPSI assumem que os dados para o problema são puramente determinísticos. Contudo, Granger *et al apud* Ceciliano (2007) afirmam que isso não é verdade para muitos problemas, na prática. Por exemplo, caso uma aeronave tenha que parar sua rota para reabastecimento ou manutenção, então, a sua duração de tempo no solo pode variar consideravelmente. Isso se deve a imprevistos decorrentes de ineficiência de equipamentos, que podem ainda requerer manutenção corretiva adicional antes da aeronave prosseguir. Para Granger *et al apud* Ceciliano (2007), a diferença entre um sistema determinístico e um sistema estocástico é muito importante, principalmente ao se tratar de métodos que tentam aperfeiçoar o desempenho do sistema.

Tal como o exemplo da aeronave, as sondas em atividades de *workover* podem estar sujeitas a incertezas no seu desempenho operacional. Logo, para o desenvolvimento

de um método para resolução do PPSI, a duração das atividades de *workover* deve ser tomada como uma variável aleatória contínua, cujo comportamento é dado por alguma distribuição de probabilidades. Seja  $T$  uma variável aleatória que denote o tempo de intervenção nos poços. Segundo Montgomery e Runger (2003), a distribuição de probabilidades de  $T$  é uma descrição das probabilidades associadas com os valores possíveis de  $T$ .

Para uma variável aleatória discreta, a distribuição é especificada por uma fórmula ou por uma lista de valores possíveis, juntamente com a probabilidade de cada um. Para uma variável aleatória contínua, como no caso de  $T$ , uma função densidade de probabilidade  $p(t)$  pode ser usada para descrever sua distribuição de probabilidades.

Desde que  $p(t)$  seja não negativa e  $\int_{-\infty}^{\infty} p(t)dt = 1$ , então, para quaisquer valores  $t_1$  e  $t_2$ , a

probabilidade de  $T$  pertencer ao intervalo  $[t_1, t_2]$  é dada por  $P(t_1 < T < t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt$ , o

que corresponde à área da curva sob  $p(t)$  de  $t_1$  a  $t_2$  (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

A partir de uma distribuição de probabilidades para as intervenções, a dinâmica das atividades das sondas pode ser prevista mediante o uso de simulação. A simulação computacional é definida por Prado (2004) como uma técnica de solução de problemas pela análise de um modelo, o qual descreve o comportamento de um sistema ao serem utilizados computadores. Já Freitas (2001) afirma que a simulação consiste na utilização de técnicas matemáticas com o intuito de se estimar computacionalmente o cálculo de parâmetros em uma dada população. Enfim, entre diversas definições, destaca-se a de Shannon *apud* De Oliveira e Assumpção (2001, p. 11), em que:

Simulação é o processo de elaborar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com esse modelo, com o propósito de compreender o comportamento do sistema ou de avaliar as diversas alternativas para a sua operação.

Uma grande vantagem da simulação é avaliar a operação de um sistema novo, sem precisar construí-lo, ou de um sistema já existente sem precisar perturbá-lo. Porém, a simulação não otimiza o comportamento do sistema, mas apenas testa alternativas sugeridas e programadas (DE OLIVEIRA e ASSUMPCÃO, 2001). Devido a isso, quando

decisões estão envolvidas em meio a simulações, muitos autores adotam regras simples para solucioná-las, o que compromete a obtenção de uma configuração de melhor qualidade para o sistema.

Assim, faz-se necessário um método de Simulação-Otimização para resolução do PPSI: por meio dessa estratégia, é possível realizar análises de cenários em um ambiente de incertezas ao mesmo tempo em que se busca otimizar a configuração para o sistema simulado. Neste trabalho, a simulação se encarrega de gerar dados para os tempos de intervenção nos poços e a otimização objetiva programar as atividades de intervenção das sondas, ao longo dos poços. Ambos os procedimentos são acionados alternadamente ao longo de  $R$  replicações (execuções independentes do modelo), onde uma solução é gerada para cada replicação. Ao término das execuções, são extraídas estatísticas relacionadas às alocações de poços às sondas e medidas de desempenho operacionais para cada sonda. Além disso, obtém-se um conjunto de “soluções esperadas”, cujos valores para a Função Objetivo (perda total de óleo) são os mais próximos em relação à média geral.

Duas abordagens são propostas para a Simulação-Otimização, no que tange ao método de Otimização empregado, para comparação de resultados:

- SO (HC): emprega um algoritmo guloso, dado por uma Heurística Construtiva, de rápida execução;
- SO (GRASP): emprega um método de Otimização mais sofisticado, dado pela metaheurística GRASP, mas que consome maior tempo de execução.

Uma vez que se aplica a Simulação-Otimização (SO), a Reconexão por Caminhos (RC) é acionada para obter uma única solução de melhor qualidade que herde alguns atributos das “soluções esperadas”. A Figura 7 mostra como os métodos mencionados são aplicados para geração de uma solução final.

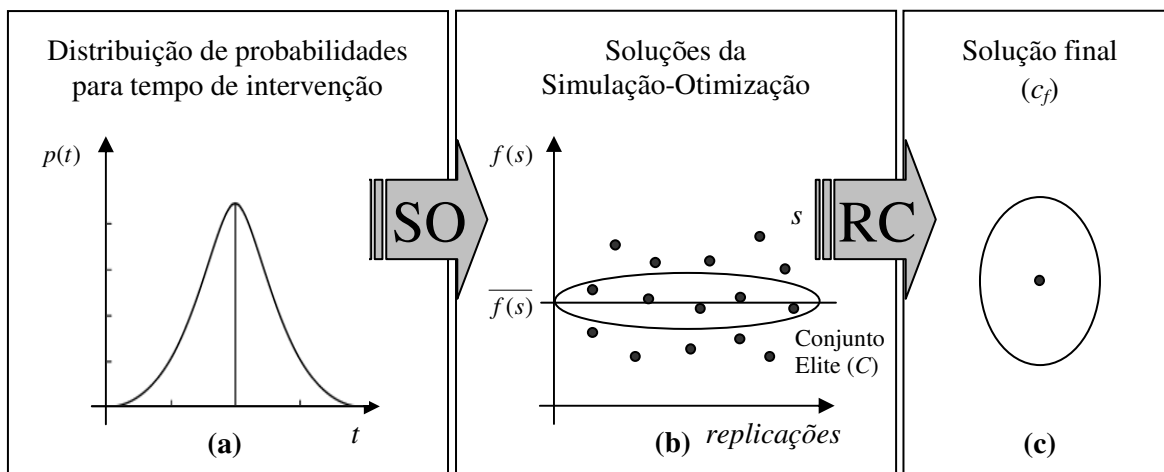


Figura 7. Metodologia empregada para resolução do PPSI

Fonte: próprio autor (2010)

Inicialmente, a partir de amostragens aleatórias para o tempo de intervenção, cuja distribuição de probabilidades encontra-se representada pela Figura 7 (a), diversas soluções são produzidas por Simulação-Otimização, conforme a Figura 7 (b), onde cada solução  $s$  é representada por um ponto. A Reconexão por Caminhos é então aplicada como uma estratégia de pós-otimização (ROSSETI, 2003) entre todos os pares de soluções pertencentes ao conjunto de “soluções esperadas”, agora denominadas Soluções Elite (C). Este conjunto é formado pelas  $|C|$  soluções com menor desvio absoluto para a Função Objetivo  $f(s)$  em relação a  $\overline{f(s)}$ . Assim, são gerados e explorados caminhos no espaço de soluções, partindo de uma ou mais soluções elite e levando a outras soluções elite. Isto é alcançado selecionando-se movimentos que introduzem atributos das soluções guia na solução corrente (ROSSETI, 2003). Finalmente, a melhor solução elite, representada pela Figura 7 (c), é retornada.

Adiante, a aplicação da Simulação-Otimização é apresentada em detalhes no capítulo 4 e a Reconexão por Caminhos, no capítulo 5.



## CAPÍTULO 4: SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO APLICADA AO PPSI

Neste capítulo, é descrita, em detalhes, a primeira etapa da metodologia proposta, que consiste em Simulação-Otimização. Primeiramente, a modelagem para a Simulação é apresentada e, em seguida, a sua integração com duas abordagens propostas para a Otimização: um algoritmo guloso e a metaheurística GRASP.

### 4.1 Introdução

A aplicação do método de Simulação-Otimização é composta de duas fases principais:

1. Simulação de dados para tempo de intervenção: realiza uma amostragem aleatória do tempo de intervenção de todos os poços que demandam manutenção, a partir de uma dada distribuição de probabilidades.
2. Otimização de filas de poços: busca otimizar a alocação de poços a filas de atendimento das sondas de intervenção. Para isso, dois métodos são testados para comparação de resultados:
  - a. Heurística Construtiva: emprega um critério de priorização para seleção de poços a compor as filas de atendimento das sondas e realiza as alocações de forma gulosa.
  - b. GRASP: utiliza o mesmo critério de priorização da Heurística Construtiva, porém apresenta mecanismos mais sofisticados que permitem melhorar uma solução construída e escapar de ótimos locais.

A aplicação sucessiva de ambas as fases resulta em uma solução para o problema. Uma vez gerada uma solução, uma nova amostragem para o tempo de intervenção é realizada para geração de uma nova solução pelo método de otimização. Assim, os procedimentos de simulação e otimização se alternam, preenchendo o espaço de soluções, conforme a Figura 8. Nesta figura, o ciclo completa-se a cada solução gerada, a qual constitui uma replicação, pois se trata de uma execução independente do modelo.

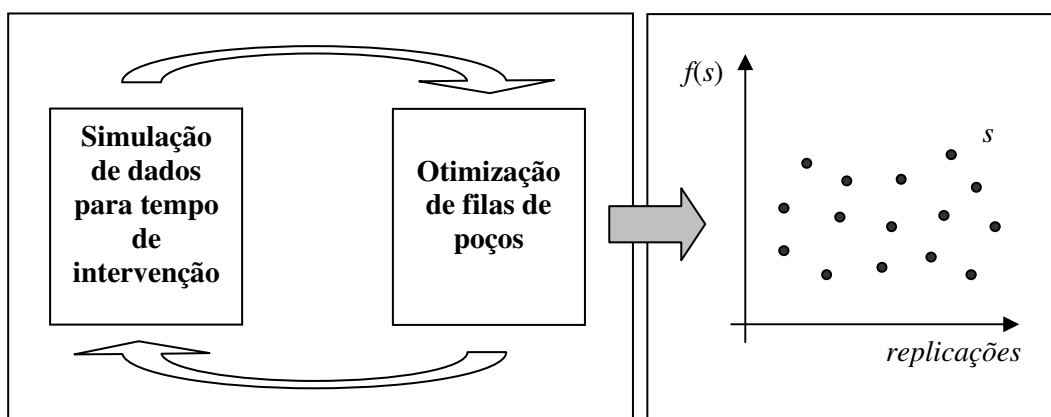


Figura 8. Método de Simulação-Otimização para o PPSI  
 Fonte: próprio autor (2010)

Nesta dissertação, o modelo de Simulação-Otimização baseia-se na modelagem por processos. Essa metodologia, assim como o DCA – Diagrama de Ciclo de Atividades, é capaz de modelar a maioria dos problemas comuns de simulação. Entretanto, dependendo do tipo de problema, há vantagens em se utilizar determinada representação em vez da outra (MIYASHITA, 2002). Para problemas de fluxo de materiais, tal como o PPSI, ou uma linha de montagem na qual as peças são processadas em sequência através de várias máquinas, a abordagem por processos torna-se mais intuitiva.

De acordo com De Oliveira e Assumpção (2001), entidades são os elementos do sistema que está sendo simulado e os recursos são objetos que provêm serviço às entidades. Neste trabalho, as entidades são os poços, que apresentam os atributos relacionados na Tabela 1. Já os recursos são as sondas de intervenção, que possuem os parâmetros conforme a Tabela 2.

A modelagem por processos utiliza símbolos próprios para representar o fluxo existente, desde a criação da entidade no sistema, passando pelos processos que percorre, até a saída do sistema. De acordo com Miyashita (2002), os três módulos principais utilizados são *Create*, *Process* e *Dispose*, mas há vários outros disponíveis nos *softwares* de simulação. Neste trabalho, os principais módulos são encontrados na Figura 9:

- a) Create: ponto de partida para o fluxo de um tipo específico de entidades. Sua criação é baseada em um tempo entre chegadas ou obedece a um *scheduling* específico;
- b) Dispose: ponto final para o fluxo de todas as entidades;

- c) Batch: agrupa lotes de entidades de forma temporária ou permanente. Elas são colocadas em uma fila até que seja atingido um número específico de entidades;
- d) Separate: utilizado para realizar cópias de uma entidade de entrada ou separar um conjunto de entidades agrupadas em um lote temporário;
- e) Station: define uma estação, correspondente a um local físico ou lógico, onde um conjunto específico de transformações acontece;
- f) Process: principal centro de processamento na simulação. Atribui o tempo do processo à entidade envolvida;
- g) Decide: permite a tomada de decisões no sistema. Elas podem ser baseadas em uma ou mais condições (como valores de atributos, variáveis, tipo de entidade ou expressões diversas) ou probabilidades;
- h) Assign: utilizado para atribuir novos valores a variáveis, atributos de entidades, tipos de entidade, ou outras variáveis do sistema;
- i) ReadWrite: módulo para entrada e saída de dados.

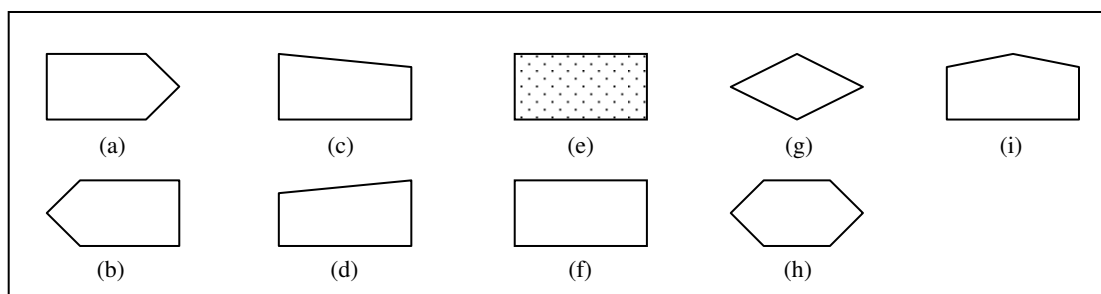


Figura 9. Principais módulos utilizados no modelo de Simulação-Otimização  
 Fonte: próprio autor (2010)

Este capítulo divide-se como segue. Na seção 4.2, é descrito o procedimento de simulação de dados para o tempo de intervenção, na seção 4.3 é abordada a Heurística Construtiva e, na seção 4.4, descreve-se a aplicação de um procedimento GRASP dentro do contexto da Simulação-Otimização.

## 4.2 Simulação de dados

Inicialmente, são criadas tantas entidades quanto a cardinalidade de *POCOS*. Como o PPSI é abordado de modo *offline*, o intervalo entre chegadas é nulo, isto é, todas as entidades são criadas no mesmo instante. Em seguida, é atribuído o tempo de intervenção  $\Delta t_p^i$  a cada entidade, conforme a amostragem aleatória baseada em  $p(t)$ . A Figura 10

mostra o esquema de funcionamento desta fase. Observa-se que apenas as variáveis auxiliares de simulação estão omitidas para melhor clareza do método. Além disso, são empregadas flechas para representação do fluxo da entidade relativa aos poços.

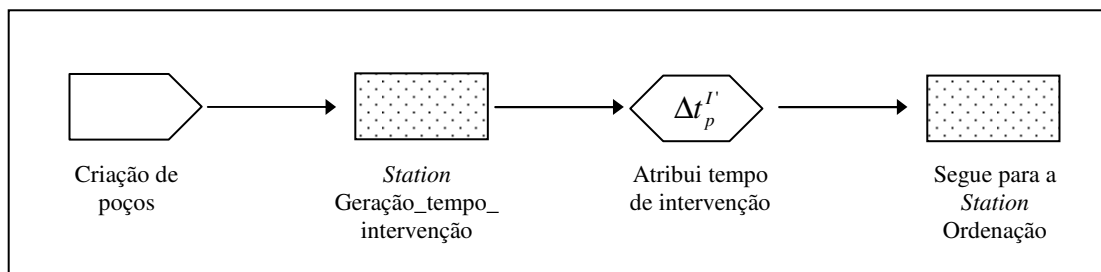


Figura 10. Simulação de dados para o tempo de intervenção

Fonte: próprio autor (2010)

Assim, todas as entidades se destinam à *Station Ordenação*, para serem processadas pela Heurística Construtiva.

### 4.3 Heurística Construtiva

Este método executa alternadamente os procedimentos de ordenação e sequenciamento de poços para as filas de atendimento das sondas de intervenção, até que todos sejam alocados. Com isso, a Simulação-Otimização, mostrada na Figura 8, pode ser representada pela Figura 11 e é denominada de SO (HC). Nesta figura, o ciclo maior completa-se a cada solução gerada e o ciclo menor completa-se a cada alocação de um poço, conforme explicado adiante.

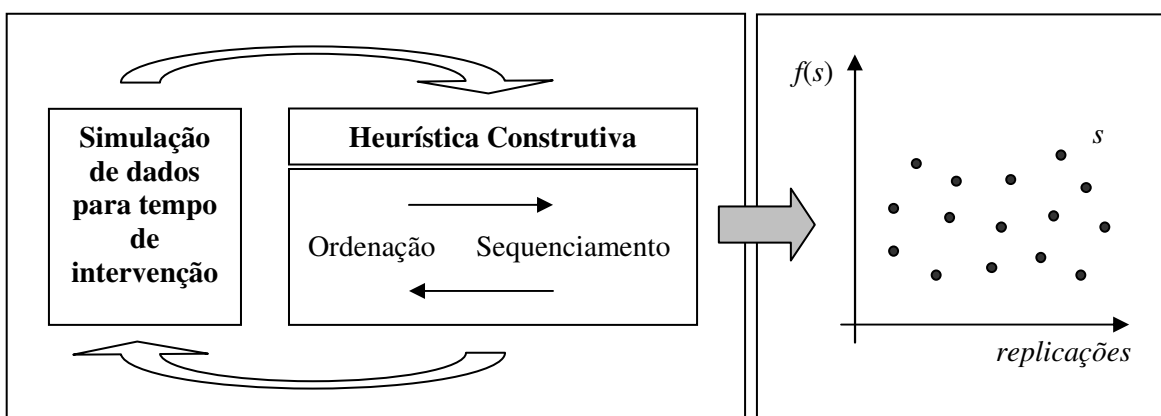


Figura 11. SO (HC) aplicada ao PPSI

Fonte: próprio autor (2010)

Inicialmente, as entidades são ordenadas em uma fila única segundo um Critério de Priorização. Em seguida, ocorre o sequenciamento para filas de poços das sondas: a melhor entidade avaliada segundo o Critério de Priorização é alocada para a fila da melhor sonda avaliada. Os poços não alocados são então reavaliados de acordo com o mesmo critério e reordenados. Assim, todo o ciclo se repete, alternando os procedimentos de ordenação e sequenciamento de poços.

O Critério de Priorização ( $C_p$ ) deve refletir o objetivo almejado com a resolução do PPSI, que é minimizar a perda total de óleo e satisfazer as restrições impostas no capítulo 2. É dado pelas seguintes expressões:

$$C_p = \max\{C'_{ps} \mid s \in \text{SONDAS}\}$$

onde,

$$C'_{ps} = \frac{v_p}{\Delta t_{ps} + m_s + \phi_{ps}}$$

sendo  $m_s$  (*makespan* corrente da sonda  $s$ ) e  $\phi_{ps}$  (penalização dos requisitos não atendidos ao alocar o poço  $p$  à fila de atendimento da sonda  $s$ ). Segundo Hornyak *et al* (2006), define-se *makespan* pelo instante de término do último *job* alocado a um recurso.

O valor de  $C'_{ps}$  incorpora a regra conhecida como “Ordem Natural”, que produz os melhores resultados de Costa (2005) em sua heurística (HMPT), dada pela razão entre a vazão e o tempo de atendimento ( $v_p / \Delta t_{ps}$ ). Além disso,  $C'_{ps}$  incorpora a regra conhecida como *Shortest Processing Time* (RINNOOY KAN, 1976) ao apresentar o *makespan* ( $m_s$ ) em seu denominador, de maneira que um poço que apresente elevado valor para  $v_p / \Delta t_{ps}$  seja designado à sonda com menor  $m_s$ . Já o valor de  $\phi_{ps}$  é calculado da seguinte forma:

$$\phi_{ps} = \beta \times \sum_{i=1}^4 n_i$$

onde  $\beta$  é um peso e  $\sum_{i=1}^4 n_i$  é o somatório de inviabilidades. Cada valor de  $n_i$  é calculado conforme a Tabela 6 a seguir:

Requisito	Inviabilidade
A máxima profundidade da sonda $s$ deve ser maior ou igual à profundidade do poço $p$	$n_1 = \max(0; d_p - D_s)$ onde $d_p$ e $D_s$ indicam, respectivamente, a profundidade do poço $p$ e a máxima profundidade de operação da sonda $s$ .
A máxima lâmina d'água da sonda $s$ deve ser maior ou igual à lâmina d'água do poço $p$	$n_2 = \max(0; l_p - L_s)$ onde $l_p$ e $L_s$ indicam, respectivamente, a lâmina d'água do poço $p$ e a máxima lâmina d'água de operação da sonda $s$ .
Caso o poço $p$ apresente $H_2S$ , a sonda $s$ deve ser capaz de operar em presença de $H_2S$	$n_3 = \max(0; h_p - H_s)$ onde, $h_p = \begin{cases} 1, & \text{se } p \text{ possui } H_2S \\ 0, & \text{se } p \text{ não possui } H_2S \end{cases} \quad H_s = \begin{cases} 1, & \text{se } s \text{ opera em } H_2S \\ 0, & \text{se } s \text{ não opera em } H_2S \end{cases}$
O instante em que o potencial de produção do poço $p$ é restabelecido pela sonda $s$ deve estar contido na janela de tempo do poço $p$	$n_4 = \max(0; j_p^1 - (\Delta t_{ps} + m_s)) + \max(0; (\Delta t_{ps} + m_s) - j_p^2)$ onde $j_p^1$ e $j_p^2$ indicam, respectivamente, os instantes iniciais e finais da janela de tempo do poço $p$ .

Tabela 6. Cálculo de inviabilidades para cada requisito

Fonte: próprio autor (2010)

Seja então o fluxograma dado pela Figura 12, referente à fase de ordenação da Heurística Construtiva. Os valores de  $C'_{ps}$  e  $C_p$  são inicialmente calculados por um módulo *Assign* e tomados como atributos de priorização de cada entidade. A fila única de poços é então formada em um módulo *Batch*, o qual agrupa todas as entidades ainda não alocadas em um lote temporário, para ordenação. Em seguida, ocorre o *split* deste lote, onde as entidades são separadas, para que:

- O melhor poço avaliado  $p^*$  seja sequenciado após o último poço da fila de  $s^*$ , onde  $p^* \in POCOS$  e  $s^* \in SONDAS \mid C'_{p^*s^*} = \max\{C_p\}$ . Para tanto, são atribuídos a  $p$  os tempos de deslocamento e desmobilização/mobilização, respectivamente

$\Delta t_{ps}^D$  e  $\Delta t_{ps}^M$ . Obviamente, estes valores já se encontram calculados pelo mesmo *Assign* inicial que calcula os valores para  $C'_{ps}$ .

- Os demais poços sejam reavaliados, dado que, com o sequenciamento de  $p^*$ , o *scheduling* corrente encontra-se alterado em  $s^*$  para  $\Delta t_{ps^*}$ ,  $m_{s^*}$  e  $\phi_{ps^*}$ .

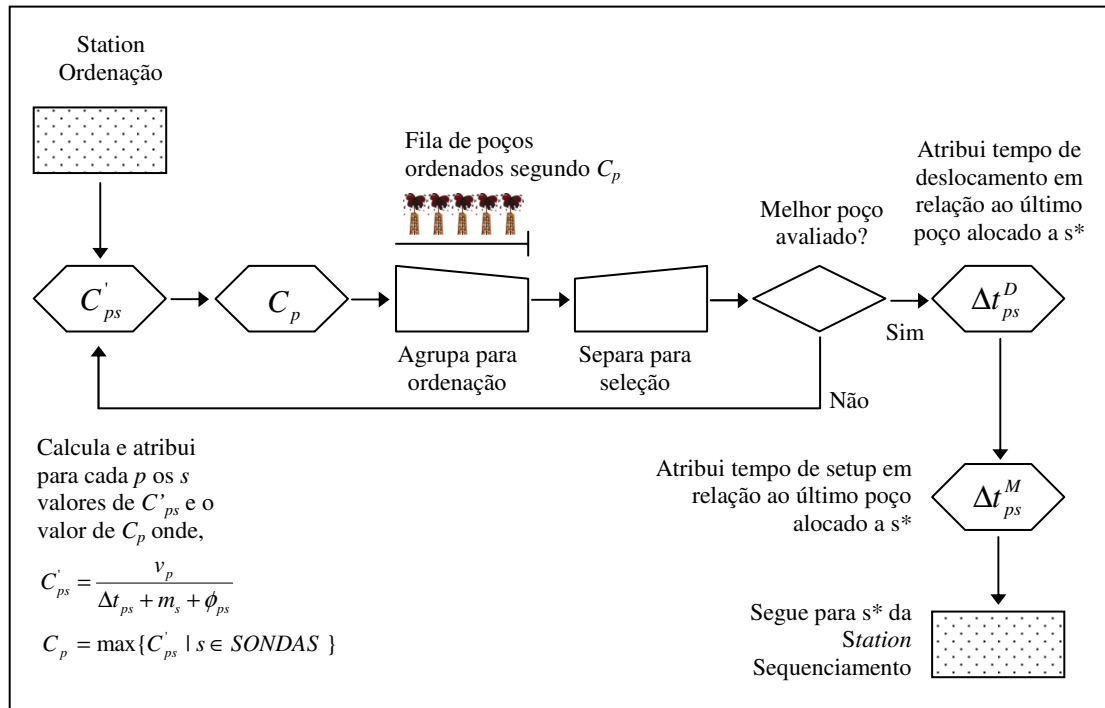


Figura 12. Heurística Construtiva: fase de ordenação  
Fonte: próprio autor (2010)

Logo, o Critério de Priorização trata-se de uma função gulosa, pois estima o benefício da seleção de cada uma das entidades, de modo que a primeira entidade ofereça maior contribuição e, a última, a menor. Além disso, ela é adaptativa, porque o benefício associado com a escolha de cada entidade é atualizado a cada alocação de um poço à fila de uma sonda. A seguir, a Figura 13 mostra um exemplo, envolvendo 11 poços e 3 sondas, de como o Critério de Priorização é utilizado na fase de ordenação da Heurística Construtiva, a fim de que o melhor poço possa ser selecionado para a fase de Sequenciamento.

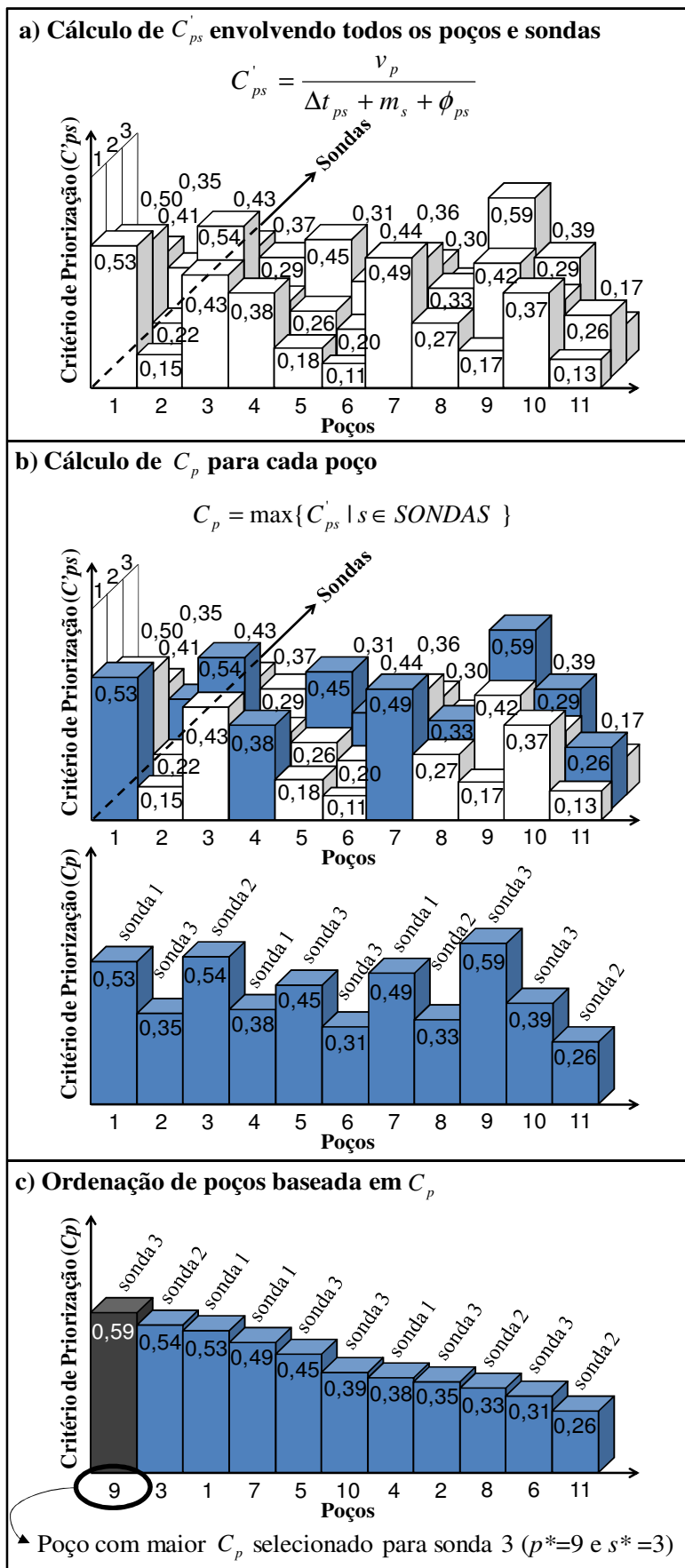


Figura 13. Exemplo de utilização do Critério de Priorização  
 Fonte: próprio autor (2010)



Uma vez que  $p^*$  e  $s^*$  são determinados pela fase de ordenação,  $p^*$  segue para a fila de poços do recurso  $s^*$  e ali permanece em estado de espera até que seja finalmente atendido. Esta etapa trata-se da segunda fase da Heurística Construtiva: a fase de seqüenciamento. Conforme o fluxograma da Figura 14, durante o seqüenciamento, as seguintes estatísticas são atualizadas em um módulo *Assign*:

- Matriz Poço-Sonda: conta quantas vezes que  $p$  é alocado à fila de  $s$ . Assim, a soma de alocações para cada poço deve ser constante e igual ao total de replicações  $R$ . Ao término de todas as replicações, essa matriz permite obter as probabilidades de alocação de cada poço em cada sonda. Uma maior a probabilidade implica maior robustez para alocação poço-sonda, diante das diversas soluções possíveis;
- Matriz Poço-Ordem: conta quantas vezes  $p$  é alocado em uma dada ordem de atendimento de  $s$ . Assim, há uma matriz Poço-Ordem para cada sonda. Ao término de todas as replicações, essa matriz permite obter a distribuição de probabilidades para cada ordem de atendimento de cada sonda. Assim como na matriz anterior, uma maior a probabilidade implica maior robustez para alocação poço-ordem em uma dada sonda, diante das diversas soluções possíveis;
- Makespan: conforme já definido anteriormente, trata-se do instante de término da última intervenção realizada por uma sonda (ou tempo total de operação);
- Tempo total produtivo: trata-se do tempo total de intervenção referente a cada recurso sonda;
- Tempo total improdutivo: trata-se da soma dos tempos totais de deslocamento e desmobilização/mobilização referente a cada recurso sonda;

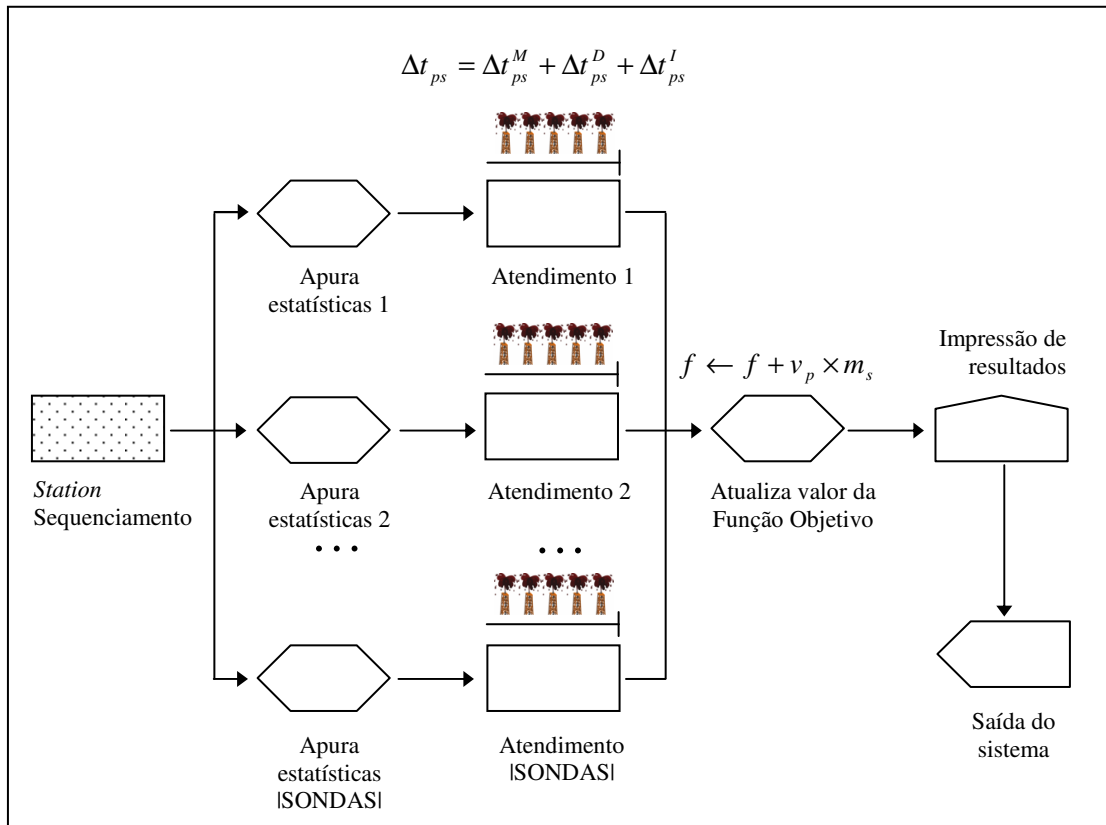


Figura 14. Heurística Construtiva: fase de sequenciamento

Fonte: próprio autor (2010)

Finalmente, após ser atendida, uma entidade  $p$  se destina ao *Assign* onde o valor da Função Objetivo é atualizado pela expressão  $f \leftarrow f + v_p \times m_s$ . Caso haja alguma inviabilidade quanto à alocação de  $p$ , a inviabilidade é impressa. Caso contrário, ocorre a impressão das estatísticas produzidas e de parte do *scheduling*, devido à alocação de  $p$ . Após a saída do sistema de *POCOS* entidades, caso a ordem da replicação corrente seja inferior a  $R$ , uma nova replicação é efetuada com uma nova simulação de dados para o tempo de intervenção. Caso contrário, atinge-se o término da SO (HC).

A Tabela 7 a seguir mostra um exemplo de três soluções geradas pela SO (HC), envolvendo duas sondas e quatro poços. O roteamento de cada uma encontra-se representado na Figura 15.

Replicação	Índice da sonda	Índice do poço	Ordem de atendimento
1	1	23	1
1	2	17	1
1	1	14	2
1	2	35	2
2	1	23	1
2	2	17	1
2	2	14	2
2	2	35	3
3	1	23	1
3	2	17	1
3	1	14	2
3	1	35	3

Tabela 7. Exemplo de uma tabela de três soluções geradas pela SO (HC)  
 Fonte: próprio autor (2010)

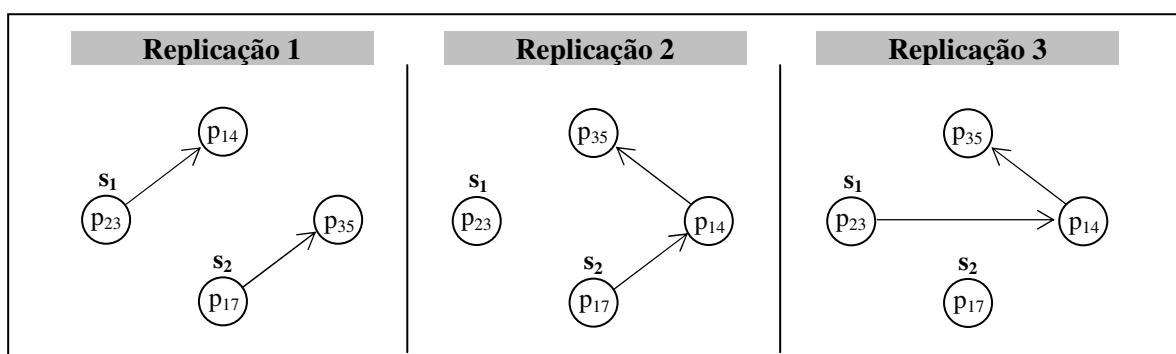


Figura 15. Roteamentos das soluções da Tabela 7  
 Fonte: próprio autor (2010)

A seguir, a lógica empregada na Heurística Construtiva é sintetizada pelo pseudocódigo da Figura 16. No total, são avaliadas  $|SONDAS| \cdot |POCOS|$  alternativas de alocações ao serem calculados os valores de  $C'_{ps}$ .

```

procedimento HEURISTICA_CONSTRUTIVA ( $POCOS, SONDAS, P_p, \Delta t_{ps}$ );
1   $f \leftarrow 0$ ;
2   $POCOS^* \leftarrow \emptyset$ ;
3  Inicialize  $m_s \leftarrow 0 \quad \forall s \in SONDAS$ ;
4  enquanto  $|POCOS^*| < |POCOS|$  faça
5      para cada  $p \in POCOS$  faça
6          para cada  $s \in SONDAS$  faça
7              se  $p \notin POCOS^*$  então
8                   $C'_{ps} \leftarrow \frac{v_p}{\Delta t_{ps} + m_s + \phi_{ps}}$ ;
9              fim - se;
10             fim - para;
11              $C_p \leftarrow \max\{C'_{ps} \mid s \in SONDAS\}$ ;
12             fim - para;
13             Seja  $p^* \in POCOS$  e  $s^* \in SONDAS \mid C'_{p^*s^*} = \max\{C_p\}$ ;
14             Aloque  $p^*$  após o último poço alocado a  $s^*$ ;
15              $m_{s^*} \leftarrow m_{s^*} + \Delta t_{p^*s^*}$ ;
16              $f \leftarrow f + v_{p^*} \times m_{s^*}$ ;
17             Acrescente  $p^*$  a  $POCOS^*$ ;
18 fim - enquanto;
fim HEURISTICA_CONSTRUTIVA;

```

Figura 16. Pseudocódigo da Heurística Construtiva  
 Fonte: próprio autor (2010)

#### 4.4 GRASP

A metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* - procedimento de busca adaptativa gulosa e randômica), proposta por Feo e Resende (1995), trata-se um método *multistart*, onde cada iteração consiste de duas fases:

- **Construção:** busca gerar uma solução, elemento a elemento. Para tanto, são combinados bons aspectos dos algoritmos puramente gulosos com aqueles dos procedimentos aleatórios de construção de soluções, além de procedimentos auto-adaptativos.
- **Busca Local:** objetiva tentar melhorar a solução construída. Para tanto, é pesquisado um ótimo local, baseando-se no conceito de vizinhança da solução construída.

Com isso, a Simulação-Otimização, mostrada na Figura 8, pode ser representada pela Figura 17 e é denominada de SO (GRASP). Nesta figura, o ciclo maior completa-se a

cada solução gerada e o ciclo menor completa-se a cada iteração do GRASP, estipulado em um certo valor máximo, conforme explicado adiante. Ao término de sua execução, a SO (GRASP) gera as mesmas estatísticas finais tal como a SO (HC).

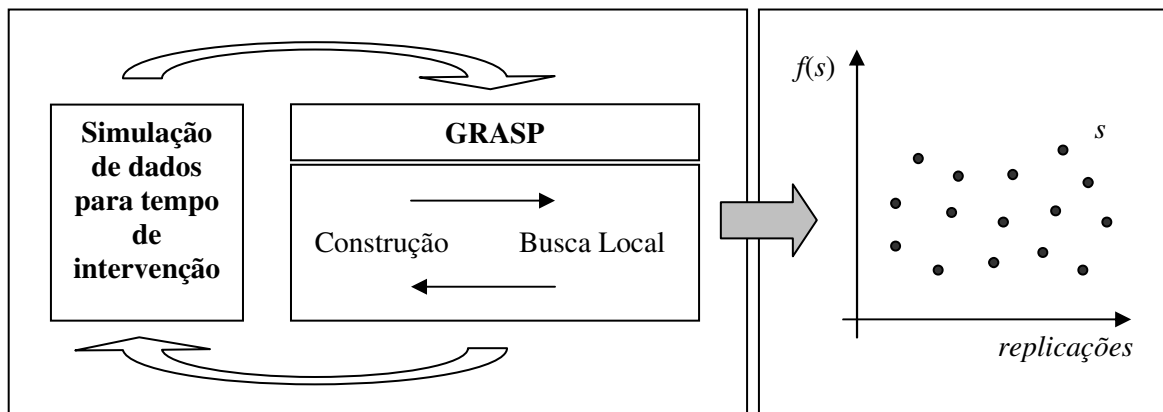


Figura 17. SO (GRASP) aplicada ao PPSI  
 Fonte: próprio autor (2010)

Genericamente, o funcionamento do GRASP é dado pelo pseudocódigo da Figura 18, para o caso de um problema de minimização, como o PPSI. Neste pseudocódigo,  $GRASPmax$  é o número máximo de iterações do GRASP e  $\alpha$  é um parâmetro da Construção que determina o nível de aleatoriedade ou gulosidade da seleção dos elementos. A função  $f(\cdot)$  trata-se da Função Objetivo do problema, e a função  $g(\cdot)$  é utilizada na escolha dos elementos pela Construção. Finalmente,  $N(\cdot)$  é a vizinhança adotada na Busca Local e  $s$  é a melhor solução encontrada ao longo de todas as iterações GRASP, retornada como resultado da aplicação do algoritmo.

```

procedimento GRASP ( $GRASPmax, \alpha, g(\cdot), f(\cdot), N(\cdot), s$ );
1    $f^* \leftarrow \infty$ ;
2   para ( $Iter = 1, 2, \dots, GRASPmax$ ) faça
3     Construção ( $g(\cdot), \alpha, s$ );
4     BuscaLocal ( $f(\cdot), N(\cdot), s$ );
5     se ( $f(s) < f^*$ ) então
6        $s^* \leftarrow s$ ;
7        $f^* \leftarrow f(s)$ ;
8     fim - se;
9   fim - para;
10   $s \leftarrow s^*$ ;
11  retornar  $s$ ;
fim GRASP;
  
```

Figura 18. Pseudocódigo do procedimento GRASP  
 Fonte: adaptado de Feo e Resende (1995)

Para operacionalização do GRASP, é necessário utilizar uma estrutura de dados adequada, onde são armazenadas as soluções a serem manipuladas. A partir dessa estrutura, é possível acessar todos os dados de entrada, inclusive os tempos de intervenção gerados pela Simulação. Assim, a seção seguinte explica como ocorre a comunicação entre Simulação e GRASP, para que, posteriormente, possam ser abordadas as fases de Construção e Busca Local.

#### 4.4.1 Interface entre Simulação e GRASP

As soluções são manipuladas pelo GRASP sob a forma de uma matriz bidimensional de ordem  $|SONDAS| \times |POCOS|$ . Cada elemento refere-se ao índice de um poço, cuja linha representa a sonda designada para atendê-lo e cuja coluna indica sua ordem de atendimento. Esta representação é também adotada por Oliveira *et al* (2007) e encontra-se exemplificada na Figura 19. Nesta solução, composta de 3 sondas que executam a manutenção em 11 poços, verifica-se, por exemplo, que o poço 5 está alocado à sonda 2 e é o 3º a ser atendido por ela.

	Ordem 1	Ordem 2	Ordem 3	Ordem 4
Sonda 1	1	4	7	11
Sonda 2	8	10	5	2
Sonda 3	6	9	3	

Figura 19. Representação de uma solução manipulada pelo GRASP  
 Fonte: próprio autor (2010)

Para o armazenamento dos tempos de intervenção  $\Delta t^i$  gerados pela Simulação, bem como dos parâmetros das sondas e atributos dos poços, são necessárias outras matrizes. Seja  $R$  o total de replicações da SO (GRASP),  $m$  o total de parâmetros e  $n$  o total de atributos. Então, os tempos de intervenção podem ser armazenados em uma matriz de ordem  $|POCOS| \times R$ , os parâmetros das sondas, em uma matriz de ordem  $|SONDAS| \times m$ , e os atributos dos poços, em uma matriz de ordem  $|POCOS| \times n$ .

Assim, para se obter as informações presentes nessas matrizes para cada poço presente em uma solução manipulada pelo GRASP, é utilizada a relação existente na Figura 20. Nesta figura, as matrizes de parâmetros e atributos são compostas de dados determinísticos, ao passo que a matriz de tempos de intervenção é composta de dados estocásticos gerados pela Simulação e apresenta uma coluna preenchida para cada replicação da SO (GRASP). Define-se, portanto, uma interface, fundamental para o cálculo da Função Objetivo.

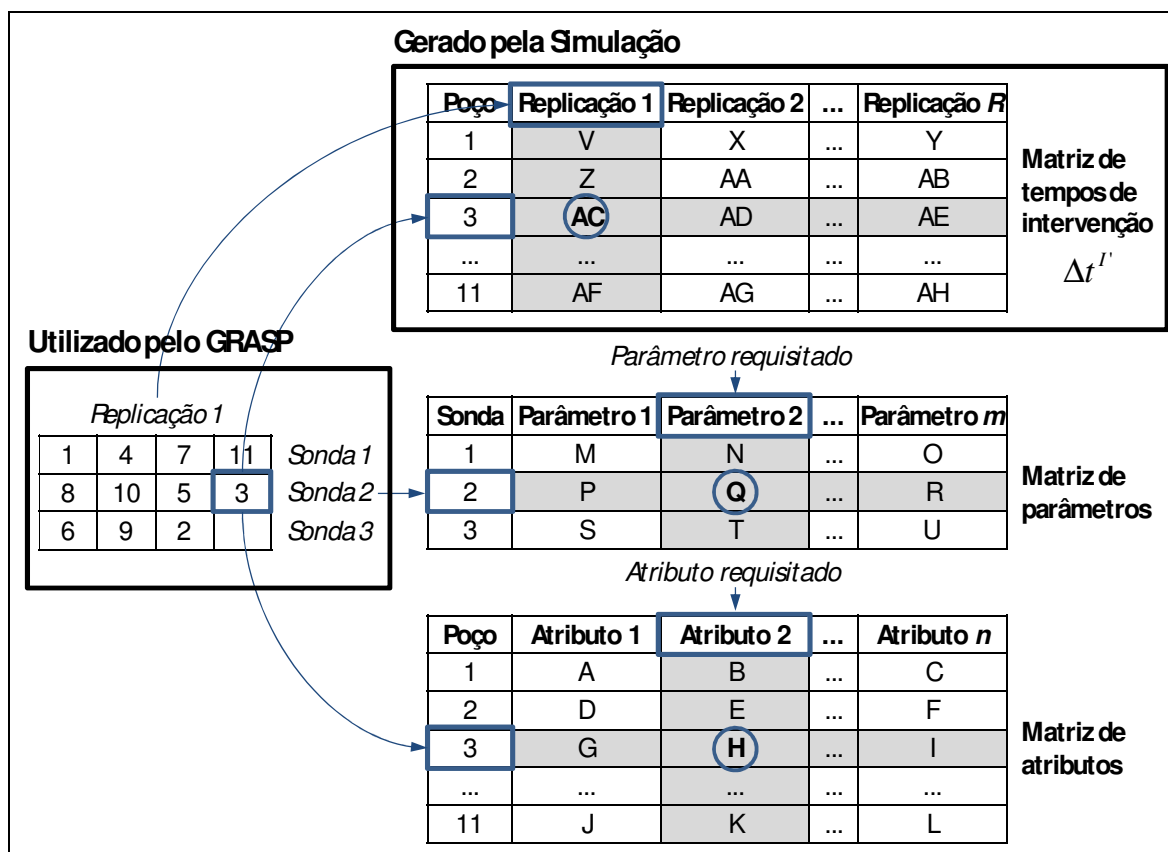


Figura 20. Acesso a tempos de intervenção, parâmetros e atributos  
Fonte: próprio autor (2010)

Para obter o tempo de intervenção do poço 3, basta acessar a correspondente matriz na linha dada pelo próprio índice (número 3) e na coluna da ordem de sua replicação (número 1), obtendo-se o tempo de intervenção AC. Já para o acesso dos parâmetros ou dos atributos, é suficiente utilizar o índice da sonda (número 2) ou do poço (número 3), respectivamente, bem como a coluna do parâmetro ou atributo requerido (coluna 2), dessa forma obtendo-se os valores Q e H.

#### 4.4.2 Construção

Na fase de construção, uma solução é iterativamente construída, elemento por elemento. Para o PPSI, cada elemento trata-se de um par ordenado, envolvendo um poço ainda não alocado e uma sonda disponível. A cada iteração, os elementos candidatos são inicialmente colocados em uma lista  $LC$  de candidatos, seguindo um critério de ordenação pré-determinado. Para tanto, é adotado o mesmo Critério de Priorização utilizado na Heurística Construtiva da SO (HC), que é guloso e adaptativo, conforme explicado anteriormente.

Uma vez constituída a lista  $LC$  de candidatos, a componente probabilística da Construção deve-se à aleatoriedade com que cada elemento é selecionado a partir de um subconjunto restrito, formado pelos melhores elementos que compõem a lista  $LC$  de candidatos, denominado Lista de Candidatos Restrita ( $LCR$ ). Um parâmetro  $\alpha \in [0; 1]$  é utilizado para limitar a  $LCR$  e assim controlar o nível de gulosidade ou aleatoriedade da Construção. Com um valor  $\alpha = 0$ , são geradas soluções puramente gulosas, ao passo que, com  $\alpha = 1$ , são produzidas soluções totalmente aleatórias.

De acordo com Rosseti (2003), o tamanho da lista  $LCR$  pode ser definido em função da quantidade ou qualidade dos elementos da  $LC$ . Para o fator qualidade,  $LCR = \{t \in LC \mid g(t) \leq g(t_{\min}) + \alpha(g(t_{\max}) - g(t_{\min}))\}$ , onde  $g(\cdot)$  é, genericamente, a função gulosa utilizada na Construção. Neste trabalho, o número de elementos da  $LC$  é utilizado para limitar o tamanho da  $LCR$ , conforme mostrado na Figura 21. A seleção de elementos para compor a lista  $LCR$  baseia-se nos  $\lceil \alpha \times |LC| \rceil$  melhores elementos da  $LC$ , avaliados segundo o Critério de Priorização ( $C'_{ps}$ ):



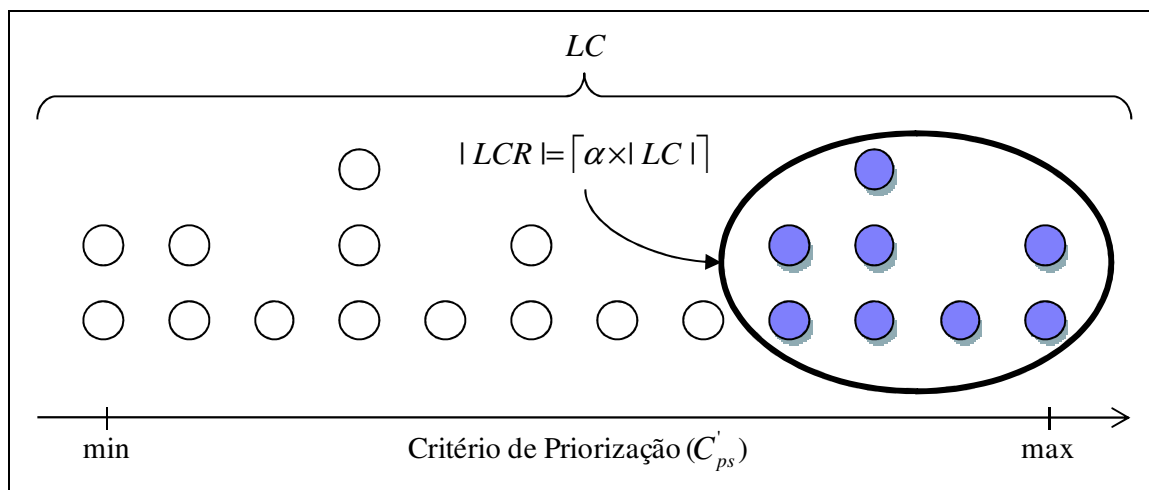


Figura 21. Formação da  $LCR$  a partir da  $LC$   
 Fonte: próprio autor (2010)

A seguir, a Figura 22 mostra um exemplo de como um elemento é inserido em uma solução em construção. Inicialmente, são identificados 5 poços candidatos (poços 3, 5, 7, 10 e 11) e 3 alternativas de alocação para cada poço (sondas 1, 2 e 3), de modo que a lista  $LC$  é formada por  $3 \times 5 = 15$  elementos candidatos. Em seguida, ocorre a seleção de 3 elementos para compor a lista  $LCR$ , para um valor de  $\alpha = 0,2$ , conforme o mesmo procedimento da Figura 21. Dentre esses elementos, é selecionado aleatoriamente aquele que indica a alocação do poço 10 à sonda 2. Esta alocação é então realizada e a lista  $LC$  atualizada com a eliminação dos candidatos relacionados ao poço 10, para que este poço não apareça novamente na solução: (10, 1), (10, 2), (10, 3). Assim, todo o ciclo é reiniciado com uma nova iteração da Construção, até que não haja mais nenhum elemento candidato ( $LC = \emptyset$ ).

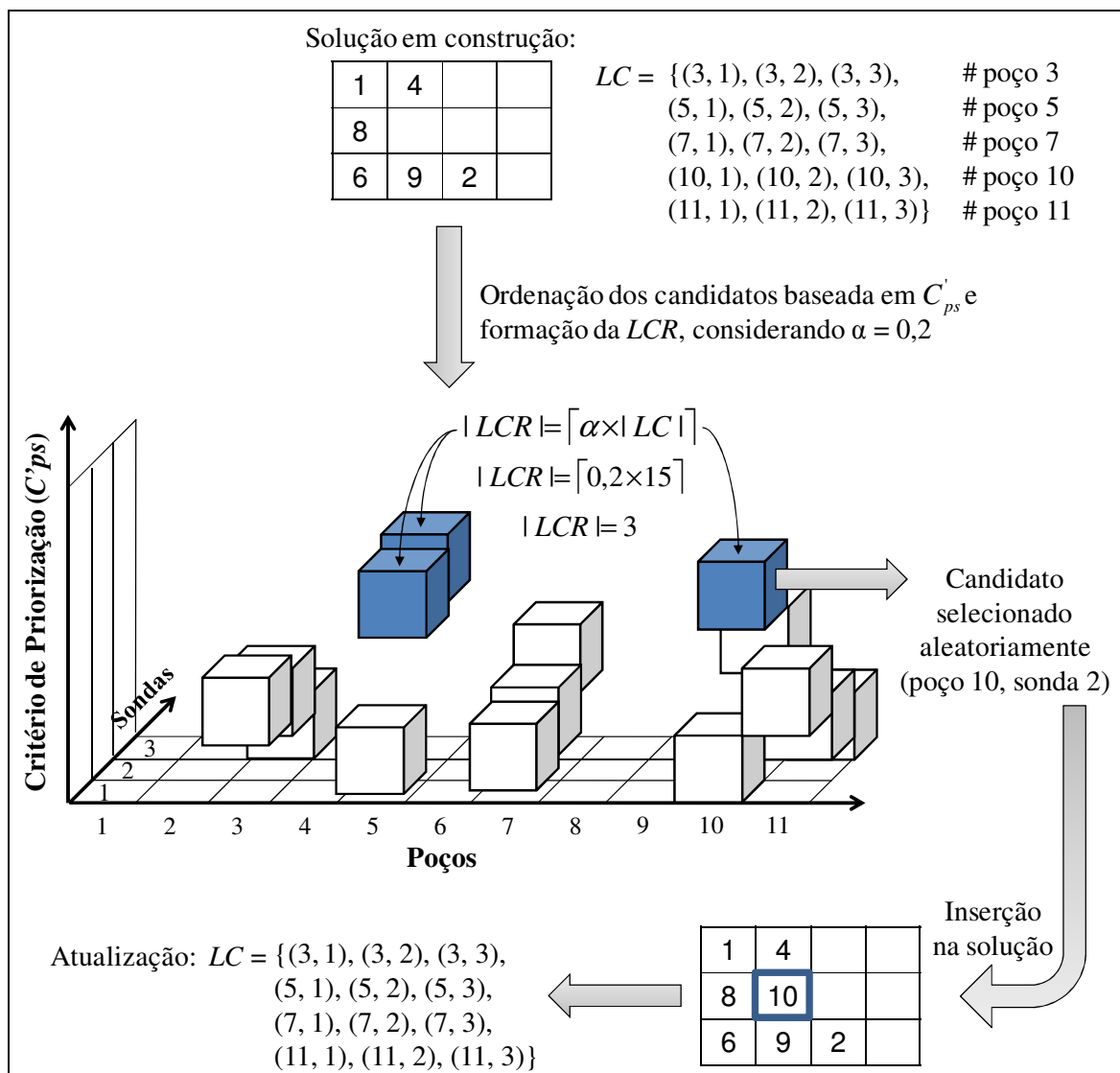


Figura 22. Procedimento de Construção do GRASP aplicado ao PPSI  
 Fonte: próprio autor (2010)

O parâmetro  $\alpha$  é basicamente o único parâmetro a ser ajustado em um procedimento GRASP. De acordo com Feo e Resende (1995), valores de  $\alpha$  próximos da escolha gulosa permitem construir soluções de boa qualidade e, assim, ocasionar uma rápida convergência a um ótimo local pelo método de Busca Local, com baixo esforço computacional. Porém, provocam uma baixa diversidade de soluções construídas, e a Busca Local raramente converge para um ótimo global. Já uma escolha de  $\alpha$  próxima da seleção puramente aleatória leva a uma grande diversidade de soluções construídas. Porém, muitas dessas soluções apresentam baixa qualidade, o que torna mais lento o processo de Busca Local.

### 4.4.3 Busca Local

Em linhas gerais, Souza (2009) explica que a Busca Local parte de uma solução inicial e caminha, a cada iteração, de vizinho para vizinho de acordo com uma estrutura de vizinhança definida. Seja  $S$  o espaço de pesquisa de um problema de otimização e  $f$  a Função Objetivo a minimizar. A função  $N$ , que depende da estrutura do problema tratado, associa cada solução  $s \in S$  a sua vizinhança  $N(s) \subseteq S$ . Cada solução  $s_v \in N(s)$  é denominada vizinho de  $s$ . Assim, chama-se movimento a modificação  $m$  que transforma uma solução  $s$  em outra,  $s_v$ , que esteja em sua vizinhança. Representa-se esta operação por  $s_v \leftarrow s \oplus m$  (SOUZA, 2009). Genericamente, a Figura 23 descreve o pseudocódigo de um procedimento básico de Busca Local para um problema de minimização:

<pre> <b>procedimento</b> BUSCALOCAL (<math>f(\cdot), N(\cdot), s</math>); 1   <math>V = \{s' \in N(s) \mid f(s') &lt; f(s)\}</math>; 2   <b>enquanto</b> (<math> V  &gt; 0</math>) <b>faça</b> 3     Selecione <math>s' \in V</math>; 4     <math>s \leftarrow s'</math>; 5     <math>V = \{s' \in N(s) \mid f(s') &lt; f(s)\}</math>; 6   <b>fim - enquanto</b>; 7   <b>retornar</b> <math>s</math>; <b>fim</b> BUSCALOCAL; </pre>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Figura 23. Pseudocódigo do método de Busca Local  
 Fonte: Souza (2009)

Para a implementação da Busca Local, a Função Objetivo definida no capítulo 2 possui uma componente adicional:  $\phi_{ps}$ , tal qual a existente em  $C'_{ps}$ . Com isso,  $\phi_{ps}$  deve assumir um valor suficientemente elevado caso a alocação de um poço viole alguma restrição existente no PPSI. Isso impede movimentos para soluções inviáveis, favorecendo a compatibilidade de alocações de poços a sondas. A Função Objetivo, utilizada para avaliar a qualidade de uma solução ao minimizar a perda total de óleo, então se torna:

$$\sum_{p \in \text{POÇOS}} \sum_{s \in \text{SONDAS}} [P_p \times (\Delta t_{ps} + m_s) + \phi_{ps}]$$

Tanto para o GRASP quanto para a Reconexão por Caminhos, são implementados dois métodos clássicos de Busca Local e dois tipos de movimentos para definir a

vizinhança  $N(s)$  de uma dada solução  $s$  na Busca Local. Os métodos são: Método de Descida e Método Randômico de Descida. Já as estruturas de vizinhança são formadas por movimentos de realocação e troca. Tanto os métodos de Busca Local quanto as estruturas de vizinhança são definidos no capítulo seguinte.

## CAPÍTULO 5: RECONEXÃO POR CAMINHOS APLICADA AO PPSI

Neste capítulo, é abordada a segunda etapa da metodologia proposta: aplicação da Reconexão por Caminhos entre pares de soluções obtidas por Simulação-Otimização, sejam aqueles gerados por SO (HC) ou os gerados por SO (GRASP). Após a construção e a manipulação do Conjunto Elite, é descrita a estrutura de vizinhança empregada e as versões ao associar a Reconexão por Caminhos com métodos de Busca Local.

### 5.1 Introdução

A Reconexão por Caminhos foi proposta por Glover em 1999, como uma estratégia de intensificação para explorar as possíveis trajetórias (soluções intermediárias) entre soluções de boa qualidade, obtidas por Busca Tabu e *Scatter Search*. Seu princípio baseia-se em, passo a passo, selecionar movimentos que introduzam atributos de uma solução guia  $t$  em uma solução inicial  $s$ . Com isso, o algoritmo espera encontrar uma terceira solução que seja melhor do que ambas (ANDRADE, 2004). A seguir, a Figura 24 mostra o pseudocódigo do método, conforme apresentado por Rosseti (2003).

```

procedimento RC;
1    $\bar{s} \leftarrow s$ ;
2   Atribuir a  $s'$  a melhor solução dentre  $s$  e  $t$ ;
3   Calcular o conjunto de movimentos possíveis  $\Delta(s, t)$ ;
4   enquanto  $|\Delta(s, t)| \neq 0$  faça
5       Atribuir a  $s''$  a melhor solução obtida ao aplicar o
           melhor movimento de  $\Delta(s, t)$  a  $\bar{s}$ ;
6       Excluir de  $\Delta(s, t)$  este movimento;
7        $\bar{s} \leftarrow s''$ ;
8       se  $(f(\bar{s}) < f(s'))$  então  $s' \leftarrow \bar{s}$ ;
9   fim - enquanto;
10  retornar  $s'$ ;
fim RC;

```

Figura 24. Reconexão por Caminhos para um problema de minimização  
 Fonte: Adaptado de Rosseti (2003, p. 37)

Inicialmente, é computada a diferença simétrica  $\Delta(s,t)$  entre  $s$  e  $t$ , resultando no conjunto de movimentos que deve ser aplicado a  $s$  para alcançar  $t$ . Neste caso, Andrade (2004) lembra que a diferença simétrica entre dois conjuntos é a diferença entre união e interseção destes conjuntos. A partir da solução inicial  $s$ , o melhor movimento ainda não executado de  $\Delta(s,t)$  é aplicado à solução intermediária  $\bar{s}$ . Esta ação se repete ao longo de  $|\Delta(s,t)|$  iterações até que a solução guia  $t$  seja atingida. Caso o valor da Função Objetivo de  $\bar{s}$  seja melhor do que o da melhor solução até então encontrada  $s'$ , então  $s'$  é atualizada. Quando  $\bar{s}$  chega a  $t$  e assim  $\Delta(s,t) = \emptyset$ , o algoritmo pára e retorna  $s'$  como a melhor solução encontrada ao longo da reconexão entre  $s$  e  $t$ . Ressalta-se que, na Reconexão por Caminhos, é empregada a mesma Função Objetivo utilizada na fase de Busca Local do GRASP, definida na seção 4.4.3. Esta Função Objetivo, além de minimizar a perda total de óleo, apresenta um mecanismo de penalização que impede movimentos para soluções inviáveis, favorecendo a compatibilidade de alocações de poços a sondas.

A Reconexão por Caminhos é aplicada como uma estratégia de pós-otimização (ROSSETI, 2003) entre todos os pares de soluções pertencentes ao conjunto de “soluções esperadas” da Simulação-Otimização, denominadas Soluções Elite ( $C$ ), seja aquelas geradas por SO (HC) ou por SO (GRASP). Conforme explicado no capítulo 3, este conjunto é formado pelas  $|C|$  soluções com menor desvio absoluto para a Função Objetivo  $f(s)$  em relação a  $\overline{f(s)}$ . Após cada reconexão entre  $s$  e  $t$ ,  $s'$  é candidata a ser inserida em  $C$ , desde que ela seja melhor que a solução de pior qualidade desse conjunto e apresente uma determinada medida mínima de diferença em relação a cada solução de  $C$ . Caso  $s'$  seja inserida, então ela substitui a solução de pior qualidade de  $C$ . Esta estratégia, também adotada por Souza (2009), visa a evitar que o Conjunto Elite contenha soluções muito semelhantes. Ao término de  $C_{|C|}^2$  reconexões, a melhor solução elite é retornada como a solução final de todo o procedimento.

A seguir, a Figura 25 ilustra como a Reconexão por Caminhos é aplicada neste trabalho. Inicialmente, a diferença simétrica entre  $s$  e  $t$  aponta um conjunto de 5 movimentos possíveis. Dentre estes, seleciona-se para exploração aquele que move a solução  $s$  para a primeira solução intermediária:  $\bar{s}_1$ . A partir de  $\bar{s}_1$ , apenas 4 movimentos  $\Delta(s,t)$  são possíveis, uma vez que o movimento inicialmente selecionado, que transformou  $s$  em  $\bar{s}_1$ , é excluído de  $\Delta(s,t)$ . Em seguida, seleciona-se para a exploração a segunda solução intermediária,  $\bar{s}_2$ , até que seja atingida a solução guia  $t$  ( $|\Delta(s,t)|=0$ ), pois cada

solução intermediária incorpora um atributo de  $t$ . Como se pode observar, a Figura 25 segue a seqüência de passos do pseudocódigo da Figura 24.

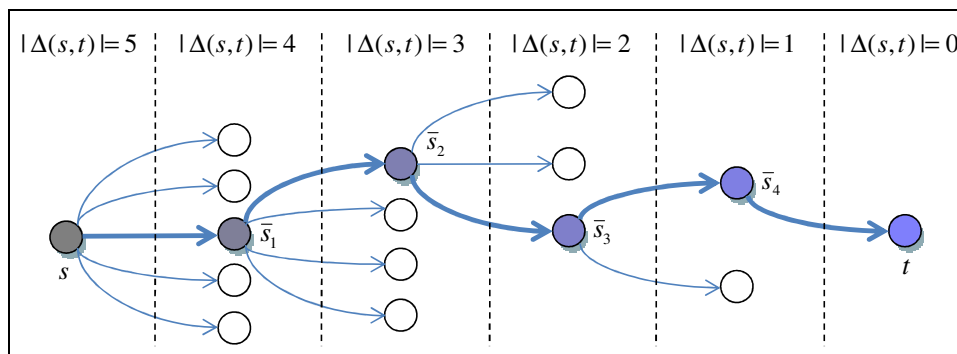


Figura 25. Trajetórias exploradas pela Reconexão por Caminhos (RC)  
 Fonte: próprio autor (2010)

Além do método puro, a Reconexão por Caminhos é também aplicada em versões integradas com métodos de Busca Local (RC + BL). Como se pode observar pela Figura 26, a RC + BL obedece à mesma lógica de explorações de soluções da RC. Entretanto, cada solução intermediária  $\bar{s}$  é submetida a uma Busca Local, gerando para cada uma a solução refinada  $BL(\bar{s})$ . Com isso, a solução retornada ao longo da reconexão entre  $s$  e  $t$  é a melhor solução  $BL(\bar{s})$ , em vez da melhor  $\bar{s}$ , e, portanto, considerada candidata a ser inserida no Conjunto Elite. Tal como no SO (GRASP), dois métodos clássicos de Busca Local são implementados, a saber: Método de Descida e Método Randômico de Descida.

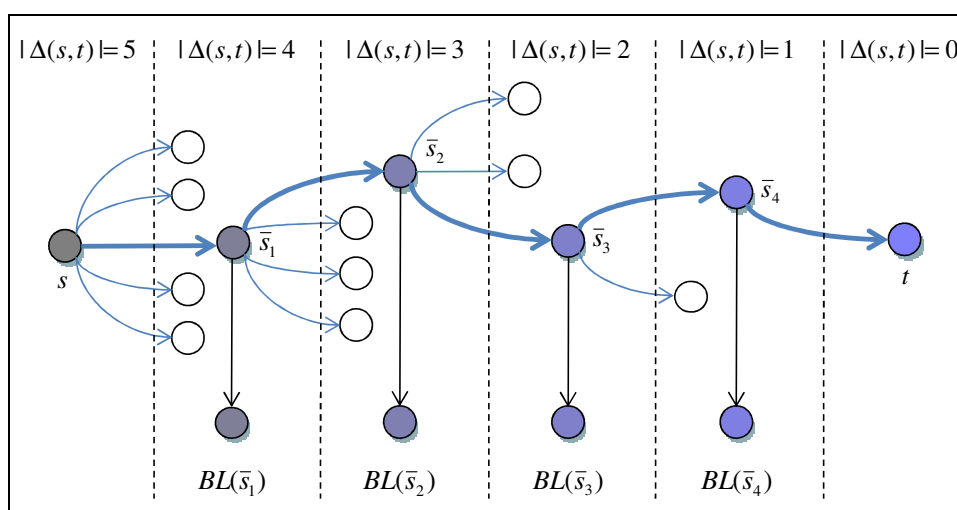


Figura 26. Reconexão por Caminhos associada a uma Busca Local (RC + BL)  
 Fonte: próprio autor (2010)

## 5.2 Construção do Conjunto Elite

Os passos para sua construção do Conjunto Elite  $C$  estão no pseudocódigo da Figura 27. Nele,  $S$  é o conjunto de soluções geradas por Simulação-Otimização e  $f(\cdot)$  são seus correspondentes valores para a Função Objetivo;  $max\_elite$  indica a quantidade de soluções elite que devem ser formadas e  $M$  é um valor suficientemente grande.

```

CONTRUCAO_ELITE (S, f(.), maxElite, M);
1  C ← ∅;
2  desvio_minimo = 0;
3  enquanto |C| < maxElite faça
4      desvio = M;
5      para cada s ∈ S faça
6          se (desvio_minimo < |f(s) -  $\overline{f(s)}$ | < desvio) então
7              desvio = |f(s) -  $\overline{f(s)}$ |;
8              s' ← s;
9          fim - se;
10         fim - para;
11         Insira s' em C;
12         desvio_minimo ← desvio;
13     fim - para;
14     retornar C;
fim CONTRUCAO_ELITE;

```

Figura 27. Pseudocódigo para Construção do Conjunto Elite  
 Fonte: próprio autor (2010)

Para obter cada solução elite, o procedimento calcula o desvio absoluto  $|f(s) - \overline{f(s)}|$  para todo  $f(s)$ . Caso  $C = \emptyset$ , simplesmente é inserida em  $C$  a solução  $s$  que apresentar o menor valor para  $|f(s) - \overline{f(s)}|$ . Caso  $C \neq \emptyset$ , é pesquisada a solução que apresentar menor  $|f(s) - \overline{f(s)}|$ , mas desde que  $|f(s) - \overline{f(s)}|$  seja superior ao desvio absoluto da solução previamente designada a  $C$ . Dessa forma,  $C$  é construído passo a passo com soluções em ordem decrescente de valor para a Função Objetivo, até que esteja completamente formado com  $max\_elite$  soluções.

Uma vez construído o Conjunto Elite, a sua manipulação ao longo do processamento ocorre da seguinte forma, conforme apresentado na seção 5.1: após cada reconexão entre  $s$  e  $t$ ,  $s'$  substitui a solução de pior qualidade de  $C$ , desde que o valor de



$f(s')$  seja maior e apresente uma determinada medida mínima de diferença ( $MDif$ ) em relação a cada solução de  $C$ .

Para o cálculo de  $MDif$ , seja  $s_C$  uma solução elite qualquer. Então a  $MDif$  entre  $s'$  e  $s_C$  é dada pela soma de valores  $MDif_p$ , para todo  $p \in POCOS$ . Cada  $MDif_p$  é dada pela diferença absoluta entre os índices das sondas que atendem  $p$  em  $s'$  e  $s_C$  ( $MDif_p'$ ) somada com a diferença absoluta entre as ordens em que  $p$  é atendido em  $s'$  e  $s_C$  ( $MDif_p''$ ). A seguir, o exemplo contido da Figura 28 traz uma noção de como o cálculo de  $MDif_1$  é uma forma de mensurar o “deslocamento de posições” para um dado poço entre duas soluções. Observa-se também que a representação de uma solução manipulada pela Reconexão por Caminhos é a mesma existente para SO (GRASP), descrita na seção 4.4.1.

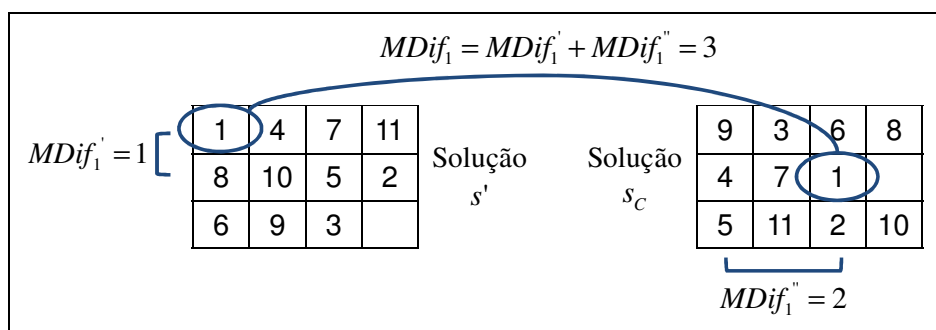


Figura 28. Exemplificação do cálculo de  $MDif_1$   
 Fonte: próprio autor (2010)

Ao se estender o cálculo para todos os poços, a Tabela 8 fornece o valor para a  $MDif$  entre as soluções da Figura 28, igual a 33. Conseqüentemente, ao dividir  $\frac{MDif}{|POCOS|}$ , obtém-se o valor médio para  $MDif_p$ . Como são 11 poços ao todo no exemplo considerado, há um “deslocamento médio de posições” igual a 3 para cada poço.

Poço	Solução $s'$		Solução $s_C$		$MDif_p$
	Sonda	Ordem de atendimento	Sonda	Ordem de atendimento	
<b>1</b>	1	1	2	3	3
<b>2</b>	2	4	3	3	2
<b>3</b>	3	3	1	2	3
<b>4</b>	1	2	2	1	2
<b>5</b>	2	3	3	1	3
<b>6</b>	3	1	1	3	4
<b>7</b>	1	3	2	2	2
<b>8</b>	2	1	1	4	4
<b>9</b>	3	2	1	1	3
<b>10</b>	2	2	3	4	3
<b>11</b>	1	4	3	2	4
<b>Total (<math>MDif</math>)</b>					<b>33</b>

Tabela 8. Cálculo de  $MDif$  entre  $s'$  e uma dada solução elite  $s_C$   
 Fonte: próprio autor (2010)

### 5.3 Estrutura de vizinhança da RC

Neste trabalho, a estrutura de vizinhança da Reconexão por Caminhos é formada por movimentos envolvendo poços que apresentam mesma ordem de atendimento ( $j$ ) da solução guia  $t$ . Estes poços são inseridos na solução intermediária  $\bar{s}$ , constituindo o movimento  $m_j$ . Por exemplo, seja o movimento  $m_1$  da Figura 29: os poços 9, 4 e 5 (referentes à ordem de atendimento 1 da solução  $t$ ) são inseridos em  $\bar{s}$  na ordem de atendimento 1. Já no movimento  $m_2$ , os poços 3, 7 e 11 (referentes à ordem de atendimento 2 da solução  $t$ ) são inseridos em  $\bar{s}$  na ordem de atendimento 2, e assim por diante. Observa-se que, na Figura 29, a diferença simétrica  $\Delta(s, t)$  entre  $\bar{s}$  e  $t$  é composta de quatro movimentos. O valor de  $|\Delta(s, t)|$  é dado pela quantidade de poços da sonda que realiza mais intervenções em  $t$ .

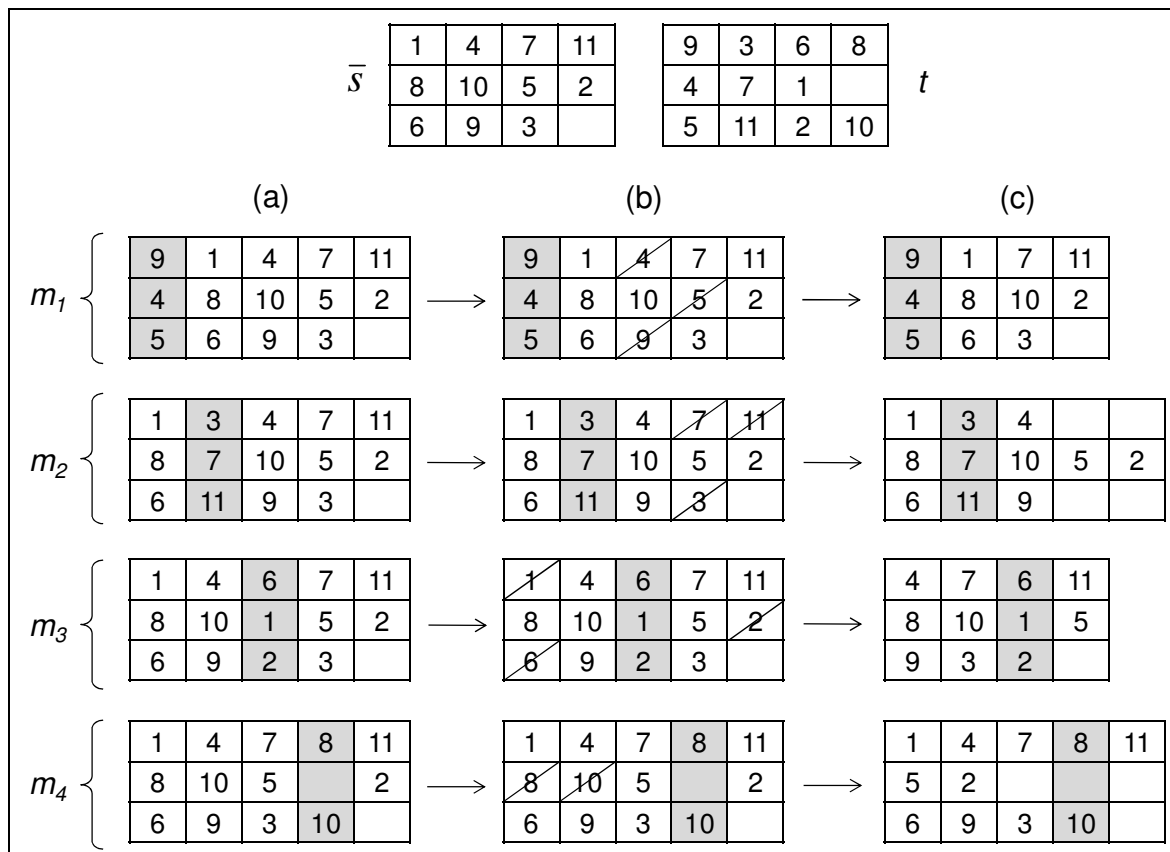


Figura 29. Estrutura de vizinhança da Reconexão por Caminhos  
 Fonte: próprio autor (2010)

Detalhadamente, um movimento qualquer  $m_j$ , realizado em  $\bar{s}$ , é composto de três etapas:

- a) Inserção de poços de mesma ordem de atendimento ( $j$ ), provenientes de  $t$ . Dessa forma, a ordem de atendimento para os demais poços de  $\bar{s}$  é incrementada em uma ou mais unidades, desde que ela:
  - i. Seja igual ou superior a  $j$ ;
  - ii. Não seja referente a um movimento já realizado anteriormente. Por exemplo, seja a aplicação do movimento  $m_1$  sucessivamente a  $m_3$ , conforme a Figura 30. Neste caso, ao serem inseridos os poços de ordem 1, é incrementada em 1 unidade as ordens de atendimento 1 e 4, em 2 unidades a ordem de atendimento 2 e em 0 unidade a ordem de atendimento 3, já que  $m_3$  teria sido realizado previamente.
- b) Eliminação de poços redundantes. Nesta etapa, os poços de  $\bar{s}$  coincidentes aos inseridos na etapa anterior são eliminados;

- c) Aplicação de consistência aos demais poços. Analogamente à etapa 1, é decrementada a ordem de atendimento para os demais poços de  $\bar{s}$  em uma ou mais unidades, desde que ela:
- Seja superior à ordem dos poços eliminados na etapa anterior
  - Não seja referente a um movimento já realizado anteriormente. Ver exemplo da Figura 30 (c).

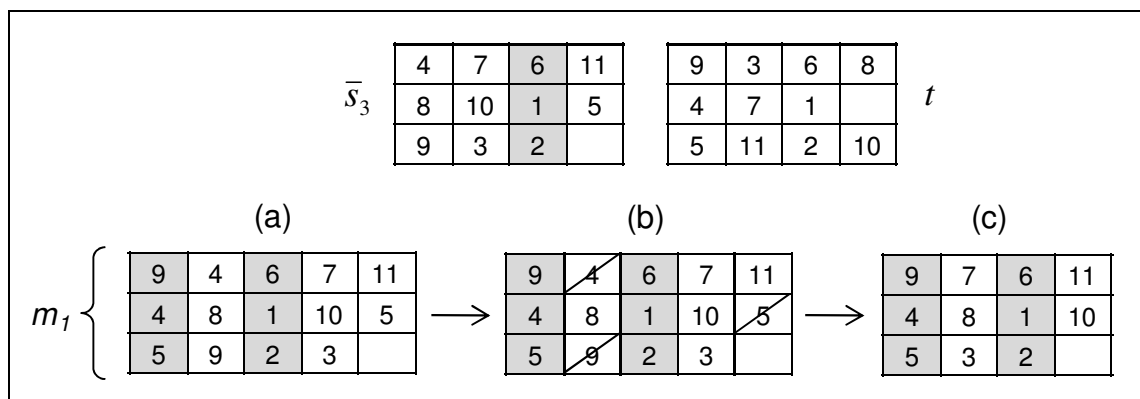


Figura 30. Aplicação do movimento  $m_1$  após  $m_3$  ter sido realizado  
 Fonte: próprio autor (2010)

## 5.4 Busca Local

Conforme introduzido na seção 5.1, a Reconexão por Caminhos é também aplicada em versões integradas a métodos de Busca Local ou heurísticas de refinamento (RC + BL). Assim, a seção 5.5.1 define as estruturas de vizinhança utilizadas na Busca Local e as seções 5.5.2 e 5.5.3 tratam dos métodos de refinamento empregados.

### 5.5.1 Estruturas de vizinhança

São definidos dois tipos de movimentos para definir a vizinhança  $N(s)$  de uma dada solução  $s$  na Busca Local: realocação e troca. O primeiro caracteriza-se pela realocação de um poço para qualquer sonda (inclusive a própria sonda a qual pertence) em qualquer ordem de atendimento (inclusive após os últimos poços de cada sonda), desde que ela seja diferente de qualquer movimento já realizado pela Reconexão por Caminhos. Ressalta-se aqui que, ao ser realocado um poço, as ordens de atendimento para os demais poços são incrementadas ou decrementadas conforme o mesmo esquema da seção 5.3. O

conjunto de todas as soluções  $s_v$  geradas a partir de  $s$  por meio de movimentos de realocação define a vizinhança  $N^{(R)}(s)$ .

O segundo tipo de movimento é caracterizado pela troca de dois poços distintos quaisquer, independentemente das sondas às quais estão alocados, desde que as ordens de atendimento desses poços sejam diferentes de qualquer movimento já realizado pela Reconexão por Caminhos. O conjunto de todas as soluções  $s_v$  geradas a partir de  $s$  por meio de movimentos de troca define a vizinhança  $N^{(T)}(s)$ .

A seguir, a Figura 31 exemplifica um movimento realizado de cada estrutura de vizinhança. Na Figura 31 (a), o poço 1 é realocado para a sonda 3 e ordem 2. Na Figura 31 (b), o poço 1 é trocado com o poço 9.

$s$	(a) Vizinhança $N^{(R)}(s)$	(b) Vizinhança $N^{(T)}(s)$																																				
<table border="1"> <tr><td>1</td><td>4</td><td>7</td><td>11</td></tr> <tr><td>8</td><td>10</td><td>5</td><td>2</td></tr> <tr><td>6</td><td>9</td><td>3</td><td></td></tr> </table>	1	4	7	11	8	10	5	2	6	9	3		<table border="1"> <tr><td>4</td><td>7</td><td>11</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>10</td><td>5</td><td>2</td></tr> <tr><td>6</td><td>1</td><td>9</td><td>3</td></tr> </table>	4	7	11		8	10	5	2	6	1	9	3	<table border="1"> <tr><td>9</td><td>4</td><td>7</td><td>11</td></tr> <tr><td>8</td><td>10</td><td>5</td><td>2</td></tr> <tr><td>6</td><td>1</td><td>3</td><td></td></tr> </table>	9	4	7	11	8	10	5	2	6	1	3	
1	4	7	11																																			
8	10	5	2																																			
6	9	3																																				
4	7	11																																				
8	10	5	2																																			
6	1	9	3																																			
9	4	7	11																																			
8	10	5	2																																			
6	1	3																																				

Figura 31. Estruturas de vizinhança da Busca Local  
Fonte: próprio autor (2010)

Estas vizinhanças são exploradas de maneira distinta por dois métodos clássicos de Busca Local, detalhados nas seções seguintes: Método de Descida (MD) e Método Randômico de Descida (MRD). Dessa forma, conforme a combinação entre método e vizinhança adotada, 4 versões são propostas para a Reconexão por Caminhos, especificadas na Tabela 9:

Versões (RC + BL)	Busca Local	
	Método	Estrutura de Vizinhança
RC + MD <sup>(R)</sup>	Descida	Realocação
RC + MD <sup>(T)</sup>	Descida	Troca
RC + MRD <sup>(R)</sup>	Randômico de Descida	Realocação
RC + MRD <sup>(T)</sup>	Randômico de Descida	Troca

Tabela 9. Versões de RC + BL para Reconexão por Caminhos  
Fonte: próprio autor (2010)

### 5.5.2 Método de Descida

Nesta técnica, todos os possíveis vizinhos são analisados e então o movimento é feito para o melhor vizinho que representar uma melhora em relação à solução atual (SOUZA, 2009). Esta melhora corresponde a uma redução do valor da Função Objetivo, dado que o problema em questão é de minimização, e por isso ocorre a descida. O pseudocódigo da Figura 32 mostra um esquema genérico de funcionamento do método. Sua execução termina quando um ótimo local é encontrado.

```

procedimento DESCIDA ( $f(\cdot), N(\cdot), s$ );
1    $V = \{s' \in N(s) \mid f(s') < f(s)\}$ ;
2   enquanto ( $|V| > 0$ ) faça
3       Selecione  $s' \in V$ , onde  $s' = \arg \min\{f(s') \mid s' \in V\}$ ;
4        $s \leftarrow s'$ ;
5        $V = \{s' \in N(s) \mid f(s') < f(s)\}$ ;
6   fim - enquanto;
7   retornar  $s$ ;
fim DESCIDA;

```

Figura 32. Pseudocódigo do Método de Descida  
 Fonte: Souza (2009)

Para que o melhor vizinho seja encontrado, toda a vizinhança deve ser explorada. A seguir, o pseudocódigo da Figura 33 mostra como essa exploração ocorre, onde: *total\_rigs* é um número inteiro referente ao total de sondas; *total\_wells* é um vetor de inteiros que armazena o total de poços para cada sonda; *tipo\_mov* indica o tipo de movimento ser realizado e *RC\_mov* é o conjunto de movimentos já realizados pela Reconexão por Caminhos. Os procedimentos *Faz\_Movimento* e *Desfaz\_Movimento* são responsáveis por fazer e desfazer um movimento na solução  $s$ , conforme seu tipo definido.

```

procedimento MELHOR_VIZINHO (s, f(.), total_rigs, total_wells, tipo_mov, RC_mov);
1   f* = M;
2   para (r1 = 0 até total_rigs - 1) faça
3       para (r2 = 0 até total_rigs - 1) faça
4           para (w1 = 0 até total_wells[r1] - 1) faça
5               para (w2 = 0 até total_wells[r2]) faça
6                   se (Condicoes_Contorno(tipo_mov, RC_mov, total_wells,
7                       r1, r2, w1, w2) == verdadeiro) então
8                       Faz_Movimento(tipo_mov, s, r1, r2, w1, w2);
9                       se (f(s) < f*) então
10                          f* = f(s);
11                          s* = s;
12                          fim - se;
13                          Desfaz_Movimento(tipo_mov, s, r1, r2, w1, w2);
14                      fim - se;
15                  fim - para;
16              fim - para;
17          fim - para;
18      fim - para;
19      retornar s*;
fim MELHOR_VIZINHO;

```

Figura 33. Pseudocódigo para exploração do melhor vizinho  
 Fonte: próprio autor (2010)

Dado que os *loops* indicados nas linhas 2 a 5 da Figura 33 varrem todas as combinações possíveis, a função *Condicoes\_Contorno* delimita as condições para realização dos movimentos, conforme seu tipo definido, ao proibir movimentos incoerentes ou redundantes. Ela retorna **verdadeiro** caso seja ele seja permitido e **falso** caso contrário, conforme a lógica da Figura 34.

Como se pode observar, as condições para realização de um movimento de troca são mais restritas do que para a realocação, o que repercute em  $|N^{(R)}(s)| \geq |N^{(T)}(s)|$ . Empiricamente, isso é verificado nos exemplos das Figuras 35 e 36, onde a sistemática das Figuras 33 e 34 é aplicada a uma dada solução *s*.

```

procedimento CONDICOES_CONTORNO (tipo_mov, RC_mov, total_wells, r1, r2, w1, w2);
1  condicao = falso;
2  se (( $w1 \notin RC\_mov$ ) E ( $w2 \notin RC\_mov$ )) então
3    se (tipo_mov == "realocacao") então
4      se ( $r1 <> r2$ ) então condicao = verdadeiro;
5      senão se (( $w1 <> w2$ ) E ( $w2 <> w1 - 1$ ) E ( $w2 < total\_wells[r2]$ ))
6        então condicao = verdadeiro;
7    fim - se;
8    se ((tipo_mov == "troca") E ( $w2 < total\_wells[r2]$ )) então
9      se ( $r2 > r1$ ) então condicao = verdadeiro;
10     senão se (( $r1 == r2$ ) E ( $w2 > w1$ ))
11       então condicao = verdadeiro;
12     fim - se;
13   fim - se;
14   retornar condicao;
fim CONDICOES_CONTORNO;

```

Figura 34. Pseudocódigo das condições de contorno para um movimento

Fonte: próprio autor (2010)

Seja uma solução  $s$  conforme mostrada na Figura 35, composta de 6 poços e 2 sondas. Considera-se que nenhum movimento da Reconexão por Caminhos tenha sido realizado. Então, o poço 1 pode ser trocado com quaisquer outros poços, em 5 maneiras distintas (movimentos 1 a 5). Em seguida, o poço 5 pode ser trocado com quaisquer outros poços, exceto o poço 1 (para não haver redundância de movimentos), em 4 maneiras distintas (movimentos 6 a 9). Por sua vez, o poço 3 pode ser trocado com quaisquer outros poços, exceto os poços 1 e 5 (para não haver redundância de movimentos), em 3 maneiras distintas (movimentos 10 a 12), e assim por diante. Ao ser percorrida toda a vizinhança, verificam-se  $5 + 4 + 3 + 2 + 1 = 15$  movimentos possíveis de troca de poços.



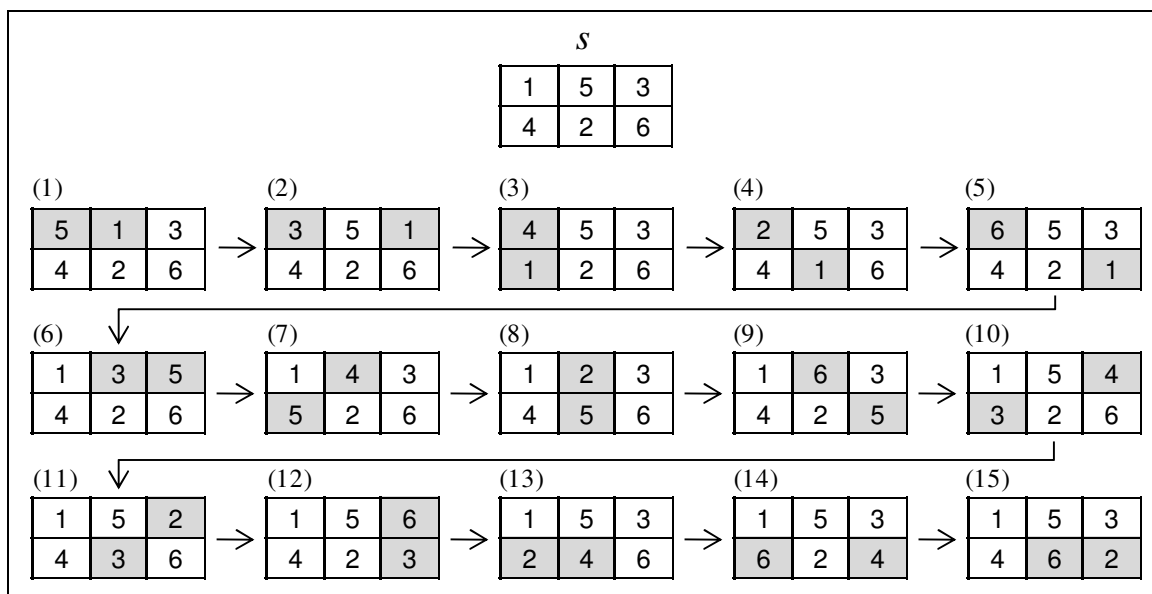


Figura 35. Sistemática de exploração de todos os movimentos de troca

Fonte: próprio autor (2010)

Seja novamente a mesma solução  $s$  da figura anterior, agora mostrada na Figura 36. Considera-se que nenhum movimento da Reconexão por Caminhos tenha sido realizado. Então, o poço 1 pode ser realocado para a posição ocupada por quaisquer outros poços (e inclusive após os últimos poços atendidos por uma sonda diferente da que atende o poço 1). São então 6 realocações distintas (movimentos 1 a 6). Em seguida, qualquer realocação pode ser realizada para o poço 5, exceto para a posição ocupada pelo o poço 1 (para não haver redundância de movimentos, já que o poço 1 é precedente a 5), em 5 maneiras distintas (movimentos 7 a 11). Por sua vez, qualquer realocação pode ser realizada para o poço 3, exceto para a posição ocupada pelo poço 5 (para não haver redundância de movimentos, já que o poço 5 é precedente a 3), em 5 maneiras distintas (movimentos 12 a 16). Observa-se que qualquer realocação pode ser realizada para o poço 4, uma vez que, tal como o poço 1, nenhum poço precede o poço 4. Ao ser percorrida toda a vizinhança, verificam-se  $6 + 5 + 5 + 6 + 5 + 5 = 32$  movimentos possíveis de realocação de poços.

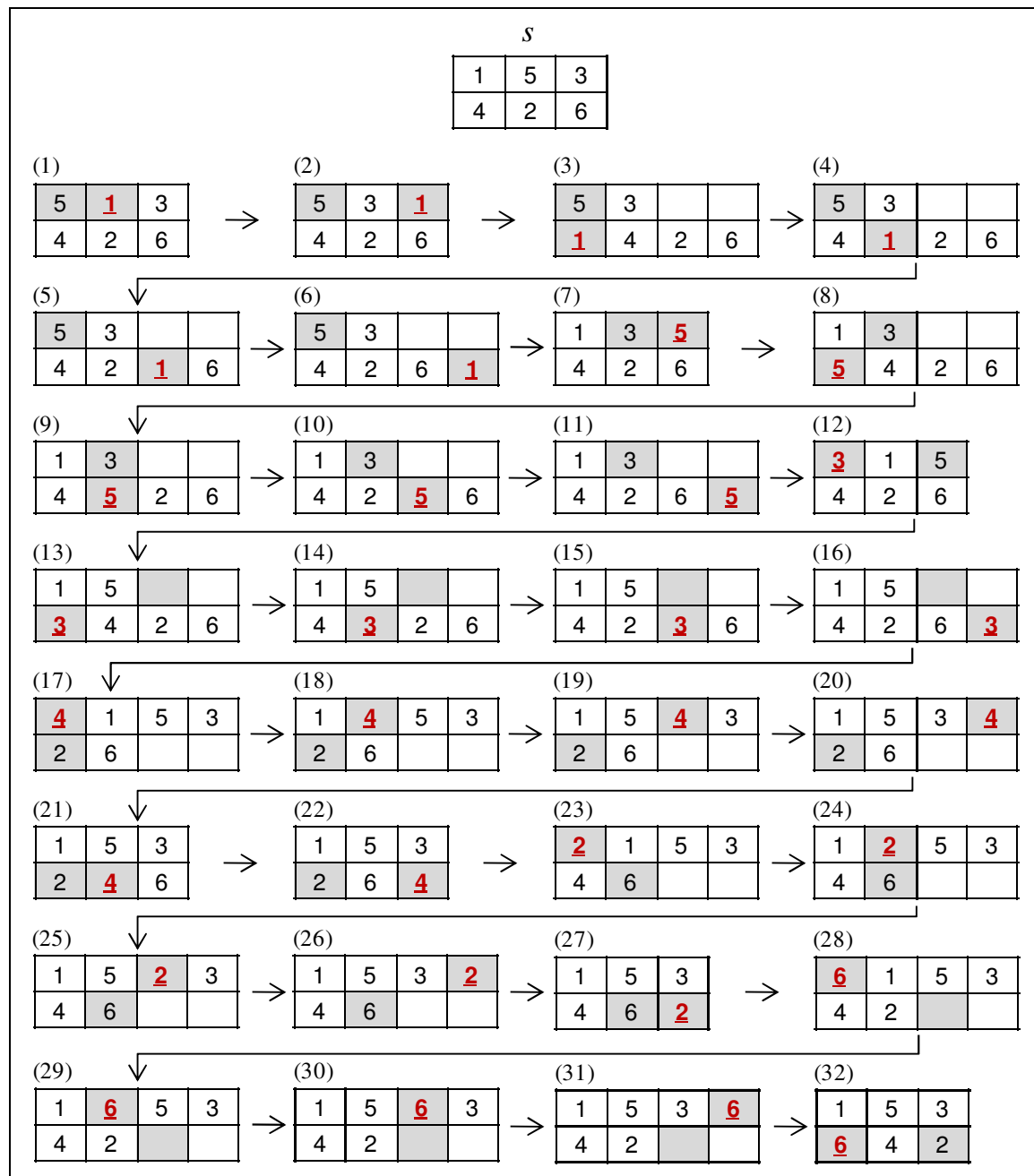


Figura 36. Sistemática de exploração de todos os movimentos de realocação  
 Fonte: próprio autor (2010)

### 5.5.3 Método Randômico de Descida

Ao contrário do Método de Descida da seção anterior, o Método Randômico de Descida evita a pesquisa exaustiva de toda a vizinhança. Ele consiste em analisar um vizinho qualquer, e o aceitar somente se for estritamente melhor que a solução corrente; não o sendo, a solução corrente permanece inalterada e outro vizinho é gerado. O procedimento é interrompido após um número fixo de iterações sem melhora no valor da

melhor solução obtida até então. Como neste método não é feita a exploração de toda a vizinhança da solução corrente, não há garantia de que a solução final seja um ótimo local.

A Figura 37 mostra o pseudocódigo do Método Randômico de Descida, onde *IterMax* representa o número máximo de iterações sem melhora no valor da Função Objetivo.

```
procedimento DESCIDA_RANDOMICA ( $f(\cdot), N(\cdot), IterMax, s$ );  
1    $Iter \leftarrow 0$ ;  
2   enquanto ( $Iter < IterMax$ ) faça  
3      $Iter \leftarrow Iter + 1$ ;  
4     Selecione aleatoriamente  $s' \in N(s)$ ;  
5     se ( $f(s') < f(s)$ ) então  
6        $Iter \leftarrow 0$ ;  
7        $s \leftarrow s'$ ;  
8     fim - se;  
9   fim - enquanto;  
10  retornar  $s$ ;  
fim DESCIDA_RANDOMICA;
```

Figura 37. Pseudocódigo do Método Randômico de Descida  
Fonte: Souza (2009)

## CAPÍTULO 6: EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo, são conduzidos os experimentos computacionais para teste da metodologia proposta. Para tanto, são apresentadas as formas de obtenção e geração dos dados de entrada e, em seguida, o sistema de ferramentas computacionais empregado. Por fim, estão os resultados atingidos e análises acerca do dimensionamento da frota de sondas, da Simulação-Otimização e da Reconexão por Caminhos.

### 6.1 Dados de entrada

Para a obtenção dos dados de entrada, a dificuldade existente é que não se encontra disponível um banco de dados público com as informações necessárias. Por isso, faz-se necessária a geração de valores artificiais para obtenção de alguns dados. Entretanto, a utilização de dados meramente aleatórios gera resultados destoantes da realidade, o que compromete a consistência das análises efetuadas. Devido a isso, alguns dados são obtidos a partir de distribuições de probabilidades e regras de geração de dados aderentes à realidade das bacias consideradas.

Com o objetivo de testar o modelo proposto, é proposta uma instância principal – TB – e outras três instâncias de comparação: BC, BS e BES. Todas são formadas por 100 poços, distribuídos em cada bacia conforme a Tabela 10. Para a instância principal TB, 30 poços pertencem à bacia do Espírito Santo, 55 à bacia de Campos e 15 estão na bacia de Santos. Já as instâncias utilizadas para comparação de resultados – BC, BS e BES – são formadas por poços pertencentes exclusivamente a uma bacia.

INSTÂNCIAS							
TB		BC		BS		BES	
Poços	Bacias	Poços	Bacia	Poços	Bacia	Poços	Bacia
1 a 30	Espírito Santo	1 a 100	Campos	1 a 100	Santos	1 a 100	Espírito Santo
31 a 85	Campos						
86 a 100	Santos						

Tabela 10. Relação entre poços e bacias para cada instância  
 Fonte: próprio autor (2010)

Todas as instâncias apresentam a mesma quantidade e parâmetros de sondas, além de mesma quantidade e atributos dos poços, à exceção das coordenadas geográficas dos poços. Essas coordenadas foram extraídas do BDEP – Banco de Dados de Exploração e Produção da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), obedecendo-se a relação adotada na Tabela 10. As coordenadas utilizadas para TB são referentes a poços atualmente produtores comerciais de óleo e gás, e se encontram relacionadas na Tabela 11:

	Lat.	Long.		Lat.	Long.		Lat.	Long.		Lat.	Long.		Lat.	Long.
1	-19,55	-39,25	21	-21,23	-39,66	41	-22,10	-39,86	61	-22,57	-40,08	81	-23,08	-40,99
2	-19,55	-39,37	22	-21,23	-39,66	42	-22,14	-39,92	62	-22,60	-40,09	82	-23,08	-40,99
3	-19,59	-39,24	23	-21,24	-40,01	43	-22,18	-39,97	63	-22,60	-40,44	83	-23,08	-40,99
4	-19,89	-39,61	24	-21,26	-40,04	44	-22,18	-39,97	64	-22,61	-40,09	84	-23,08	-40,99
5	-19,91	-39,62	25	-21,26	-40,04	45	-22,36	-40,07	65	-22,61	-40,10	85	-23,37	-41,34
6	-19,92	-39,62	26	-21,31	-40,02	46	-22,37	-40,17	66	-22,65	-40,22	86	-24,16	-42,70
7	-19,93	-39,62	27	-21,34	-40,01	47	-22,37	-40,14	67	-22,65	-40,64	87	-24,17	-42,70
8	-20,00	-39,68	28	-21,36	-39,61	48	-22,37	-39,95	68	-22,67	-40,60	88	-24,30	-42,66
9	-20,02	-39,54	29	-21,36	-39,61	49	-22,37	-39,95	69	-22,68	-40,71	89	-24,30	-42,69
10	-20,02	-39,55	30	-21,40	-40,01	50	-22,37	-40,27	70	-22,68	-40,24	90	-24,32	-42,71
11	-20,02	-39,55	31	-21,88	-39,83	51	-22,39	-39,96	71	-22,68	-40,78	91	-24,32	-42,67
12	-20,05	-39,51	32	-21,89	-39,84	52	-22,41	-40,05	72	-22,72	-40,69	92	-24,48	-42,79
13	-20,05	-39,51	33	-21,89	-39,83	53	-22,41	-40,09	73	-22,80	-40,76	93	-24,48	-44,21
14	-20,05	-39,49	34	-21,96	-39,78	54	-22,41	-40,02	74	-22,80	-40,76	94	-24,50	-44,20
15	-20,06	-39,50	35	-21,96	-39,78	55	-22,43	-40,09	75	-23,08	-40,99	95	-25,25	-45,20
16	-20,06	-39,53	36	-21,96	-39,78	56	-22,45	-40,03	76	-23,08	-40,99	96	-25,27	-45,25
17	-20,07	-39,50	37	-21,97	-39,81	57	-22,45	-39,97	77	-23,08	-40,99	97	-25,27	-45,25
18	-20,08	-39,54	38	-21,97	-39,79	58	-22,48	-39,92	78	-23,08	-40,99	98	-25,57	-42,83
19	-20,13	-39,55	39	-22,08	-39,89	59	-22,53	-39,90	79	-23,08	-40,99	99	-25,58	-43,51
20	-21,23	-39,66	40	-22,10	-39,87	60	-22,55	-40,38	80	-23,08	-40,99	100	-26,41	-46,53

Tabela 11. Coordenadas geográficas utilizadas para os poços de TB  
 Fonte: BDEP - Banco de Dados de Exploração e Produção da ANP (2010)

Já para BC, BS e BES, como são instâncias utilizadas apenas para comparação de resultados, nem todas as coordenadas são provenientes de poços atualmente produtores comerciais, podendo referenciar qualquer tipo de poço (produtor, descobridor de campo, abandonado, entre outros). Por isso, estas coordenadas podem apresentar uma dispersão geográfica maior, o que de fato ocorreu para BS, onde os poços selecionados estão mais dispersos do que TB, conforme verificado adiante. As instâncias de comparação foram escolhidas justamente com o intuito de se testar a metodologia proposta em conjuntos de poços com dispersões geográficas distintas, e estão discriminadas nas Tabelas 12, 13 e 14.

	<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>
<b>1</b>	-22,47	-39,85	<b>21</b>	-22,46	-40,21	<b>41</b>	-22,45	-40,42	<b>61</b>	-22,51	-40,47	<b>81</b>	-22,51	-40,52
<b>2</b>	-22,45	-39,93	<b>22</b>	-22,56	-40,22	<b>42</b>	-22,55	-40,42	<b>62</b>	-22,47	-40,47	<b>82</b>	-22,53	-40,52
<b>3</b>	-22,52	-39,94	<b>23</b>	-22,54	-40,25	<b>43</b>	-22,51	-40,42	<b>63</b>	-22,41	-40,47	<b>83</b>	-22,46	-40,52
<b>4</b>	-22,48	-39,97	<b>24</b>	-22,56	-40,27	<b>44</b>	-22,47	-40,43	<b>64</b>	-22,56	-40,47	<b>84</b>	-22,50	-40,54
<b>5</b>	-22,43	-39,97	<b>25</b>	-22,47	-40,31	<b>45</b>	-22,46	-40,43	<b>65</b>	-22,43	-40,47	<b>85</b>	-22,46	-40,55
<b>6</b>	-22,44	-40,01	<b>26</b>	-22,41	-40,32	<b>46</b>	-22,55	-40,43	<b>66</b>	-22,43	-40,47	<b>86</b>	-22,44	-40,56
<b>7</b>	-22,55	-40,03	<b>27</b>	-22,43	-40,33	<b>47</b>	-22,47	-40,43	<b>67</b>	-22,45	-40,47	<b>87</b>	-22,44	-40,56
<b>8</b>	-22,44	-40,06	<b>28</b>	-22,44	-40,34	<b>48</b>	-22,51	-40,44	<b>68</b>	-22,44	-40,48	<b>88</b>	-22,54	-40,56
<b>9</b>	-22,44	-40,07	<b>29</b>	-22,52	-40,35	<b>49</b>	-22,44	-40,44	<b>69</b>	-22,50	-40,48	<b>89</b>	-22,45	-40,57
<b>10</b>	-22,49	-40,08	<b>30</b>	-22,43	-40,37	<b>50</b>	-22,46	-40,44	<b>70</b>	-22,56	-40,48	<b>90</b>	-22,55	-40,57
<b>11</b>	-22,49	-40,08	<b>31</b>	-22,43	-40,37	<b>51</b>	-22,53	-40,44	<b>71</b>	-22,55	-40,48	<b>91</b>	-22,48	-40,58
<b>12</b>	-22,54	-40,08	<b>32</b>	-22,40	-40,37	<b>52</b>	-22,53	-40,44	<b>72</b>	-22,55	-40,48	<b>92</b>	-22,49	-40,59
<b>13</b>	-22,54	-40,08	<b>33</b>	-22,43	-40,37	<b>53</b>	-22,48	-40,44	<b>73</b>	-22,42	-40,48	<b>93</b>	-22,54	-40,60
<b>14</b>	-22,53	-40,12	<b>34</b>	-22,48	-40,38	<b>54</b>	-22,40	-40,45	<b>74</b>	-22,55	-40,48	<b>94</b>	-22,44	-40,61
<b>15</b>	-22,48	-40,13	<b>35</b>	-22,48	-40,38	<b>55</b>	-22,46	-40,45	<b>75</b>	-22,52	-40,49	<b>95</b>	-22,54	-40,63
<b>16</b>	-22,53	-40,15	<b>36</b>	-22,45	-40,38	<b>56</b>	-22,54	-40,46	<b>76</b>	-22,53	-40,50	<b>96</b>	-22,46	-40,64
<b>17</b>	-22,53	-40,15	<b>37</b>	-22,42	-40,39	<b>57</b>	-22,54	-40,46	<b>77</b>	-22,54	-40,50	<b>97</b>	-22,46	-40,64
<b>18</b>	-22,48	-40,17	<b>38</b>	-22,42	-40,39	<b>58</b>	-22,43	-40,46	<b>78</b>	-22,47	-40,50	<b>98</b>	-22,45	-40,74
<b>19</b>	-22,45	-40,18	<b>39</b>	-22,50	-40,41	<b>59</b>	-22,46	-40,47	<b>79</b>	-22,42	-40,50	<b>99</b>	-22,56	-40,86
<b>20</b>	-22,53	-40,18	<b>40</b>	-22,51	-40,41	<b>60</b>	-22,54	-40,47	<b>80</b>	-22,48	-40,51	<b>100</b>	-22,51	-40,99

Tabela 12. Coordenadas geográficas utilizadas para os poços de BC

Fonte: BDEP - Banco de Dados de Exploração e Produção da ANP (2010)

	<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>
<b>1</b>	-23,47	-43,46	<b>21</b>	-25,67	-45,38	<b>41</b>	-22,67	-47,80	<b>61</b>	-21,65	-50,79	<b>81</b>	-24,73	-52,01
<b>2</b>	-25,26	-44,01	<b>22</b>	-25,36	-45,52	<b>42</b>	-22,78	-48,18	<b>62</b>	-24,37	-50,88	<b>82</b>	-24,73	-52,01
<b>3</b>	-25,26	-44,01	<b>23</b>	-24,82	-45,58	<b>43</b>	-23,34	-48,20	<b>63</b>	-24,44	-50,88	<b>83</b>	-22,30	-52,04
<b>4</b>	-24,41	-44,24	<b>24</b>	-25,85	-45,61	<b>44</b>	-23,37	-48,26	<b>64</b>	-24,62	-50,89	<b>84</b>	-22,30	-52,04
<b>5</b>	-24,25	-44,34	<b>25</b>	-25,84	-45,63	<b>45</b>	-23,37	-48,39	<b>65</b>	-24,18	-50,89	<b>85</b>	-22,33	-52,04
<b>6</b>	-24,45	-44,35	<b>26</b>	-25,03	-45,64	<b>46</b>	-23,43	-48,77	<b>66</b>	-26,18	-50,93	<b>86</b>	-22,33	-52,06
<b>7</b>	-24,15	-44,47	<b>27</b>	-25,03	-45,64	<b>47</b>	-20,69	-48,92	<b>67</b>	-22,33	-51,35	<b>87</b>	-22,35	-52,06
<b>8</b>	-24,59	-44,59	<b>28</b>	-25,66	-45,65	<b>48</b>	-22,47	-49,15	<b>68</b>	-24,54	-51,37	<b>88</b>	-21,76	-52,10
<b>9</b>	-24,69	-44,71	<b>29</b>	-24,94	-45,71	<b>49</b>	-22,82	-49,28	<b>69</b>	-24,50	-51,42	<b>89</b>	-24,73	-52,11
<b>10</b>	-25,22	-44,87	<b>30</b>	-25,71	-45,84	<b>50</b>	-23,28	-49,43	<b>70</b>	-23,50	-51,42	<b>90</b>	-24,73	-52,11
<b>11</b>	-24,95	-44,92	<b>31</b>	-25,58	-46,33	<b>51</b>	-21,69	-49,76	<b>71</b>	-25,82	-51,59	<b>91</b>	-25,70	-52,12
<b>12</b>	-24,96	-44,93	<b>32</b>	-25,53	-46,57	<b>52</b>	-23,60	-49,93	<b>72</b>	-22,35	-51,67	<b>92</b>	-22,40	-52,16
<b>13</b>	-25,27	-45,04	<b>33</b>	-26,12	-46,69	<b>53</b>	-23,47	-49,95	<b>73</b>	-24,93	-51,75	<b>93</b>	-24,84	-52,21
<b>14</b>	-25,27	-45,04	<b>34</b>	-26,78	-46,72	<b>54</b>	-23,23	-49,95	<b>74</b>	-24,73	-51,77	<b>94</b>	-24,61	-52,25
<b>15</b>	-25,39	-45,06	<b>35</b>	-26,13	-46,93	<b>55</b>	-22,30	-50,04	<b>75</b>	-25,02	-51,89	<b>95</b>	-25,40	-52,41
<b>16</b>	-24,57	-45,25	<b>36</b>	-25,56	-47,05	<b>56</b>	-21,13	-50,37	<b>76</b>	-24,98	-51,94	<b>96</b>	-24,15	-52,41
<b>17</b>	-25,31	-45,25	<b>37</b>	-25,84	-47,42	<b>57</b>	-22,42	-50,60	<b>77</b>	-24,62	-51,96	<b>97</b>	-23,33	-52,46
<b>18</b>	-25,27	-45,26	<b>38</b>	-22,52	-47,58	<b>58</b>	-23,78	-50,66	<b>78</b>	-24,96	-51,97	<b>98</b>	-24,83	-52,70
<b>19</b>	-25,24	-45,26	<b>39</b>	-22,84	-47,61	<b>59</b>	-26,01	-50,70	<b>79</b>	-24,64	-51,98	<b>99</b>	-24,75	-52,74
<b>20</b>	-25,37	-45,31	<b>40</b>	-22,54	-47,64	<b>60</b>	-25,84	-50,78	<b>80</b>	-24,64	-51,98	<b>100</b>	-24,08	-53,53

Tabela 13. Coordenadas geográficas utilizadas para os poços de BS

Fonte: BDEP - Banco de Dados de Exploração e Produção da ANP (2010)

	<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>		<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>
<b>1</b>	-20,14	-39,28	<b>21</b>	-19,63	-39,78	<b>41</b>	-19,61	-39,83	<b>61</b>	-19,61	-39,83	<b>81</b>	-19,61	-39,84
<b>2</b>	-20,14	-39,28	<b>22</b>	-19,69	-39,78	<b>42</b>	-19,61	-39,83	<b>62</b>	-19,61	-39,84	<b>82</b>	-19,61	-39,84
<b>3</b>	-19,61	-39,37	<b>23</b>	-19,61	-39,80	<b>43</b>	-19,61	-39,83	<b>63</b>	-19,64	-39,84	<b>83</b>	-19,61	-39,85
<b>4</b>	-20,95	-39,45	<b>24</b>	-19,63	-39,81	<b>44</b>	-19,63	-39,83	<b>64</b>	-19,63	-39,84	<b>84</b>	-19,63	-39,85
<b>5</b>	-19,67	-39,47	<b>25</b>	-19,69	-39,82	<b>45</b>	-19,61	-39,83	<b>65</b>	-19,61	-39,84	<b>85</b>	-19,61	-39,85
<b>6</b>	-19,67	-39,47	<b>26</b>	-19,61	-39,82	<b>46</b>	-19,61	-39,83	<b>66</b>	-19,61	-39,84	<b>86</b>	-19,65	-39,86
<b>7</b>	-19,67	-39,47	<b>27</b>	-19,61	-39,82	<b>47</b>	-19,61	-39,83	<b>67</b>	-19,61	-39,84	<b>87</b>	-19,62	-39,86
<b>8</b>	-20,42	-39,49	<b>28</b>	-19,61	-39,82	<b>48</b>	-19,61	-39,83	<b>68</b>	-19,61	-39,84	<b>88</b>	-19,61	-39,86
<b>9</b>	-20,42	-39,49	<b>29</b>	-19,61	-39,82	<b>49</b>	-19,61	-39,83	<b>69</b>	-19,66	-39,84	<b>89</b>	-19,62	-39,86
<b>10</b>	-19,64	-39,55	<b>30</b>	-19,61	-39,82	<b>50</b>	-19,61	-39,83	<b>70</b>	-19,62	-39,84	<b>90</b>	-19,62	-39,86
<b>11</b>	-19,61	-39,61	<b>31</b>	-19,61	-39,82	<b>51</b>	-19,61	-39,83	<b>71</b>	-19,61	-39,84	<b>91</b>	-19,62	-39,86
<b>12</b>	-19,63	-39,61	<b>32</b>	-19,61	-39,82	<b>52</b>	-19,61	-39,83	<b>72</b>	-19,63	-39,84	<b>92</b>	-19,62	-39,86
<b>13</b>	-19,65	-39,62	<b>33</b>	-19,61	-39,82	<b>53</b>	-19,61	-39,83	<b>73</b>	-19,62	-39,84	<b>93</b>	-19,63	-39,86
<b>14</b>	-21,61	-39,68	<b>34</b>	-19,61	-39,83	<b>54</b>	-19,61	-39,83	<b>74</b>	-19,61	-39,84	<b>94</b>	-19,62	-39,87
<b>15</b>	-19,71	-39,69	<b>35</b>	-19,61	-39,83	<b>55</b>	-19,62	-39,83	<b>75</b>	-20,28	-39,84	<b>95</b>	-19,64	-39,89
<b>16</b>	-19,64	-39,74	<b>36</b>	-19,61	-39,83	<b>56</b>	-19,61	-39,83	<b>76</b>	-19,61	-39,84	<b>96</b>	-19,68	-39,90
<b>17</b>	-19,61	-39,76	<b>37</b>	-19,62	-39,83	<b>57</b>	-19,61	-39,83	<b>77</b>	-19,61	-39,84	<b>97</b>	-20,49	-39,91
<b>18</b>	-19,67	-39,77	<b>38</b>	-19,61	-39,83	<b>58</b>	-19,62	-39,83	<b>78</b>	-19,61	-39,84	<b>98</b>	-20,77	-40,04
<b>19</b>	-21,04	-39,77	<b>39</b>	-19,62	-39,83	<b>59</b>	-19,61	-39,83	<b>79</b>	-19,61	-39,84	<b>99</b>	-21,54	-40,12
<b>20</b>	-21,04	-39,77	<b>40</b>	-19,61	-39,83	<b>60</b>	-19,63	-39,83	<b>80</b>	-19,61	-39,84	<b>100</b>	-21,09	-40,29

Tabela 14. Coordenadas geográficas utilizadas para os poços de BES

Fonte: BDEP - Banco de Dados de Exploração e Produção da ANP (2010)

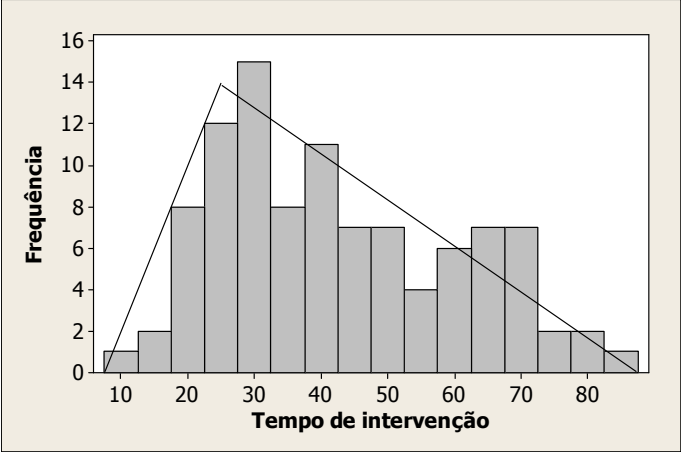
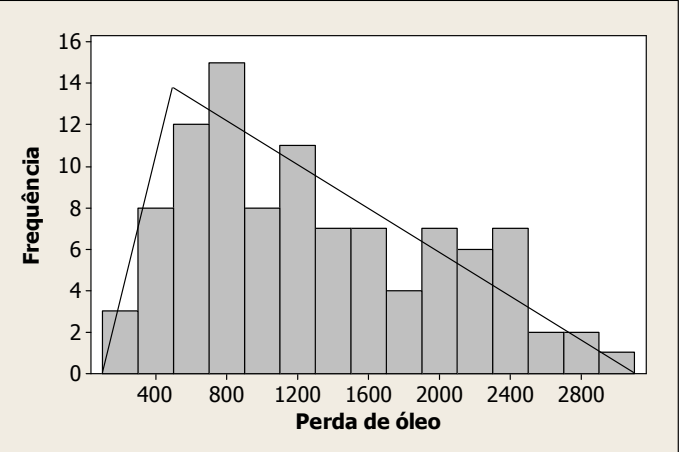
Assim, a Tabela 15 apresenta a dispersão de poços para cada instância, mensurada pelo desvio médio das latitudes e longitudes dos mesmos. Ao considerar apenas uma bacia, a maior concentração encontra-se em BC, seguida por BES e BS. Ao considerar as três bacias conjuntamente em TB, o desvio médio total assume um valor intermediário, em torno de 2,18°.

<b>Instâncias</b>	<b>Desvio médio</b>		
	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Total (latitude + longitude)</b>
<b>TB</b>	1,14°	1,04°	2,18°
<b>BC</b>	0,04°	0,15°	0,19°
<b>BS</b>	1,10°	2,73°	3,83°
<b>BES</b>	0,26°	0,09°	0,35°

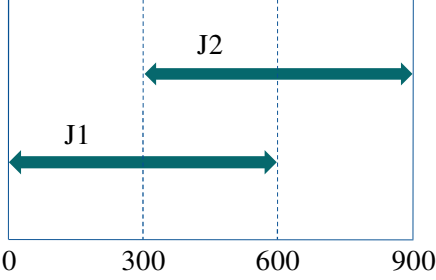
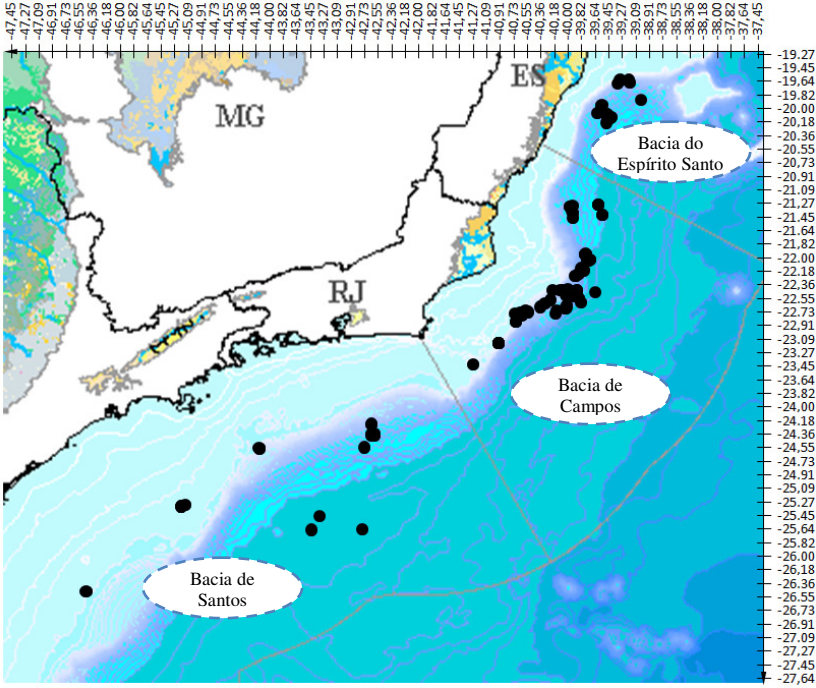
Tabela 15. Medidas de dispersão dos conjuntos de poços de cada instância

Fonte: próprio autor (2010)

A seguir, a Tabela 16 apresenta como são obtidos / gerados os dados de cada atributo dos poços:

Atributo	Obtenção / geração de dados
<p>Tempo de intervenção <i>Unidade: dias</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distribuição: Triangular (mínimo = 10, mais provável = 25, máximo = 85). Histograma para uma amostra, gerado pelo <i>software Minitab</i>:</li> </ul> 
<p>Perda de óleo <i>Unidade: m<sup>3</sup>/dia</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distribuição: Triangular (mínimo = 100, mais provável = 500, máximo = 3000). Histograma gerado pelo <i>software Minitab</i>:</li> </ul> 
<p>Janela de tempo para atendimento <i>Unidade: dias</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dado um horizonte de planejamento de 2 anos e meio (900 dias), são estipuladas 2 janelas (J1 e J2), ambas com a mesma duração: 600 dias. Os intervalos de tempo de cada uma são:</li> </ul>



	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cada janela é referente a um conjunto disjuncto que envolve 50% do total de poços.</li> </ul>
<p>Coordenadas geográficas</p> <p>Unidade: latitude e longitude</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extraídas do BDEP – Banco de Dados de Exploração e Produção da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). O mapa a seguir apresenta a plotagem dos poços referentes à instância principal TB, conforme o sistema de coordenadas geográficas (onde a latitude encontra-se no eixo vertical e a longitude no horizontal):</li> </ul> 
<p>Profundidade</p> <p>Unidade: metros (m)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regra de geração para cada poço <math>p</math>:</li> </ul> $d_p = Kx + D^{\min}$ <p>onde,</p> <p><math>x</math> = número aleatório entre 0 e 1 (variável);</p> <p><math>K</math> = fator de escala (constante). Valor adotado: 1.000 m;</p>

	$D^{\min}$ = profundidade mínima (constante). Valor adotado: 2.500 m.
Lâmina d'água <i>Unidade: metros (m)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regra de geração para cada poço <math>p</math>:  <math display="block">l_p = (L^{\max} - L^{\min})x + L^{\min}</math> </li> </ul> <p>onde,  <math>x</math> = número aleatório entre 0 e 1 (variável);  <math>L^{\max}</math> = máxima lâmina d' água (constante). Valor adotado: 1.500 m;  <math>L^{\min}</math> = mínima lâmina d' água (constante). Valor adotado: 800 m.</p>
Possui ou não H <sub>2</sub> S <i>Unidade: lógico (0 ou 1)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Convenção: 10% dos poços apresentam H<sub>2</sub>S.</li> </ul>

Tabela 16. Dados utilizados para os atributos dos poços  
*Fonte: próprio autor (2010)*

Com relação à frota de sondas, 5 tipos distintos são empregados, todos operantes no litoral brasileiro. A Tabela 17 relaciona cada tipo com seu respectivo nome, geração a qual pertence, e custo diário de locação:

<b>Tipo sonda</b>	<b>Nome</b>	<b>Geração</b>	<b>Custo diário de locação</b>
1	Enterprise	Quinta geração	US\$ 519.600,00
2	Cajun	Quinta geração	US\$ 520.000,00
3	Millenium	Quinta geração	US\$ 535.000,00
4	Richardson	Quarta geração	US\$ 450.000,00
5	M.G. Hulme, Jr.	Terceira geração	US\$ 430.000,00

Tabela 17. Custo de locação de cada tipo de sonda  
*Fonte: Rigzone (2009)*

As sondas de cada tipo apresentam diferentes capacidades e limitações de operação, bem como diferentes coordenadas iniciais para os poços onde são encontradas. As sondas do tipo 1 se encontram inicialmente na bacia de Santos, as sondas do tipo 2 e 3 estão inicialmente na bacia do Espírito Santo e as do tipo 4 e 5, na bacia de Campos. Desse modo, a Tabela 18 mostra os valores utilizados para os parâmetros das sondas. Nesta tabela, LDA corresponde à lâmina d'água e a velocidade trata-se da velocidade média de deslocamento da sonda.

Tipo sonda	Máxima profundidade (m)	Máxima LDA (m)	Intervenção em presença de H <sub>2</sub> S	Índice de produtividade	Velocidade (km/h)	Coordenadas iniciais (graus)	
						Lat.	Long.
1	10.668	3.048,0	1	1,0	50	-25,40	-43,40
2	10.668	2.590,8	0	0,9	45	-19,60	-39,40
3	9.144	3.048,0	1	0,8	40	-19,82	-39,09
4	7.620	1.524,0	0	0,7	35	-22,50	-40,30
5	7.620	1.524,0	1	0,6	30	-22,40	-39,70

Tabela 18. Dados utilizados para os parâmetros das sondas

Fonte: próprio autor (2010)

Conforme mostrado no capítulo 2, o tempo de *setup* é dado pela soma dos tempos de mobilização e desmobilização e assume um valor mínimo  $K^{\min}$  ou um valor máximo  $K^{\max}$ . Os valores estipulados para  $K^{\min}$  e  $K^{\max}$  são:

$$\begin{cases} K^{\min} = 0 \\ K^{\max} = 3 \end{cases}$$

Uma vez conhecidos todos os dados de entrada, a seção seguinte descreve o ferramental utilizado para operacionalizar a metodologia proposta.

## 6.2 Ferramentas computacionais

O sistema formado pelas ferramentas e suas interações para implementação do método SO (HC) + RC encontra-se esquematizado na Figura 38. A SO (HC) é implementada em *Arena v. 12* e a Reconexão por Caminhos (RC) no *Microsoft Visual C++ 2008 Express Edition*. Já na abordagem SO (GRASP) + RC, apenas a fase de Simulação da SO ocorre no *Arena v. 12*. Em virtude de o GRASP ser um método mais sofisticado que a HC, a fase de Otimização da SO ocorre no *Microsoft Visual C++ 2008 Express Edition* para SO (GRASP) + RC, assim como a RC.

Indiferentemente da abordagem empregada, uma interface em *Excel* é utilizada para entrada e saída de dados, além de viabilizar a integração entre SO e RC. São também implementadas ferramentas em *Visual Basic 6.3* para visualização gráfica de instâncias e resultados obtidos e utilizado o *Minitab 15 Statistical Software* para realização de testes estatísticos e obtenção de distribuições de probabilidade.

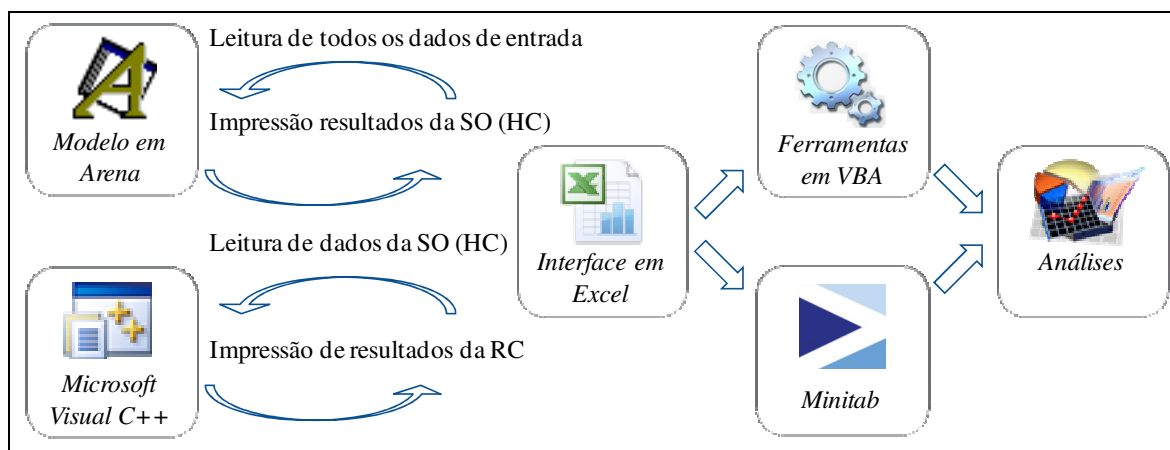


Figura 38 Sistema de ferramentas computacionais para SO (HC) + RC

Fonte: próprio autor (2010)

A partir dos dados de entrada apresentados e por meio desse sistema de ferramentas, os resultados e análises da metodologia proposta são mostrados na seção seguinte.

### 6.3 Resultados e análises

Os experimentos computacionais foram conduzidos em um Notebook AMD Turion 2,10 GHz, com 4GB de RAM, sob o sistema operacional Windows Vista. Os valores utilizados para cada parâmetro da metodologia se encontram na Tabela 19:

Método	Parâmetro	Descrição	Valor
<b>SO + RC</b>	$\beta$	Penalização aplicada a cada inviabilidade	1.000.000.000
<b>SO</b>	$R$	Quantidade de replicações	100 replicações
<b>SO (GRASP)</b>	$\alpha$	Parâmetro que regula o nível de gulosidade ou aleatoriedade da Construção	0,05
	$GRASP_{max}$	Número máximo de iterações do GRASP	5 iterações
<b>RC</b>	$ C $	Cardinalidade do Conjunto Elite	10 soluções
	$MDif$	Medida mínima de diferença entre soluções	100
<b>RC + MRD<sup>(R)</sup> e RC + MRD<sup>(T)</sup></b>	$IterMax$	Número máximo de iterações sem melhora do Método Randômico de Descida	15.000 iterações

Tabela 19. Valores utilizados para cada parâmetro dos métodos

Fonte: próprio autor (2010)

Inicialmente, a seção 6.3.1 apresenta como a frota ideal de sondas é dimensionada para, então, serem detalhados os resultados e análises da Simulação-Otimização e da Reconexão por Caminhos nas seções 6.3.2 e 6.3.3, respectivamente. As análises da Simulação-Otimização somente são realizadas para SO (HC). O método SO (GRASP) apenas é utilizado para geração de soluções elites, a fim de se comparar SO (HC) + RC e SO (GRASP) + RC na seção 6.3.3.

### **6.3.1 Dimensionamento da frota de sondas**

A variação do tamanho da frota empenhada de sondas apresenta forte impacto no desempenho operacional de suas atividades. Isso pode ser constatado pelas Tabelas 20 e 21, que mostram as estatísticas de 10 cenários gerados por SO (HC) para a instância TB, onde cada cenário é dado pela quantidade de sondas em operação (único fator de variação entre cenários). Assim, as tabelas apresentam valores mínimos, médios e máximos obtidos dentre todas as replicações e dentre todas as sondas de cada cenário. A seguir, a Tabela 20 apresenta as medidas de desempenho para os recursos (sondas). Nesta tabela, o *makespan* divide-se em tempo produtivo e tempo improdutivo, onde o tempo produtivo corresponde aos tempos de intervenção e o improdutivo refere-se aos tempos de deslocamento e *setup*. O *makespan* total é a soma de ambos e o índice de aproveitamento é a razão do tempo produtivo pelo total.

Cenários	Makespan (dias)									Índice de aproveitamento		
	Tempo produtivo			Tempo improdutivo			Total			Mín.	Méd.	Máx.
	Mín.	Médio	Máx.	Mín.	Médio	Máx.	Mín.	Médio	Máx.			
1	2116,42	2399,67	2706,10	454,78	507,94	568,31	2654,41	2907,61	3202,93	80%	83%	85%
2	1110,79	1293,83	1479,60	176,53	248,14	328,84	1370,51	1541,98	1709,98	79%	84%	89%
3	781,46	920,94	1049,20	92,02	161,58	234,50	947,39	1082,52	1221,69	78%	85%	91%
4	595,72	733,90	859,22	51,86	121,44	212,72	735,87	855,34	994,95	74%	86%	94%
5	516,96	619,26	760,13	34,37	97,76	170,75	623,85	717,02	832,10	78%	86%	95%
6	405,44	492,17	587,71	26,45	75,54	142,74	476,36	567,71	662,49	75%	87%	96%
7	306,75	418,65	521,85	17,80	62,56	132,40	399,02	481,21	565,04	72%	87%	96%
8	283,63	370,03	454,55	16,11	54,11	112,69	348,03	424,14	502,27	74%	87%	96%
9	261,48	335,61	420,12	8,56	47,06	106,49	319,36	382,67	453,51	72%	88%	98%
10	242,16	309,37	388,48	8,73	42,64	98,61	282,44	352,01	417,97	72%	88%	98%

Tabela 20. Análise de cenários para obtenção de medidas de desempenho para as sondas

Fonte: próprio autor (2010)

A Tabela 22, por sua vez, mostra a análise de cenários para as entidades (poços). São apresentadas medidas de desempenho relacionadas a: tempo médio de espera em fila e tamanho de fila, o qual é dado pelo número de poços que esperam pelo atendimento de uma sonda qualquer.

Cenários	Tempo médio de espera em fila (dias)			Tamanho de fila		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
1	1269,71	1438,70	1834,59	100	100,00	100
2	634,28	746,33	953,22	44	50,00	56
3	423,00	513,52	672,65	27	33,33	39
4	323,25	398,36	525,77	21	25,00	31
5	266,43	329,49	443,14	15	20,00	25
6	210,12	257,55	354,36	12	16,67	21
7	167,59	215,04	305,16	11	14,29	19
8	140,64	186,80	261,63	9	12,50	17
9	121,09	165,65	237,71	8	11,11	14
10	108,05	149,85	219,50	7	10,00	13

Tabela 21. Análise de cenários para obtenção de medidas de desempenho para os poços  
 Fonte: próprio autor (2010)

Observa-se que um maior dimensionamento da quantidade de sondas propicia melhores resultados para todas as medidas de desempenho: redução do *makespan*, aumento do índice de aproveitamento de sondas (dado pelo aumento do tempo produtivo e redução do tempo improdutivo), além da redução do tempo médio de espera em fila e do tamanho de fila.

Em decorrência destes melhores resultados, menores são os custos provenientes da perda total de óleo. A Tabela 22 mostra os valores apurados para a perda total de óleo em termos de média e desvio padrão. Para cada cenário, é realizado o teste de normalidade Anderson-Darling (MONTGOMERY E RUNGER, 2003) pelo *software Minitab*, o qual calcula a estatística de teste ( $A^2$ ) e o seu P-valor correspondente. Como se pode observar pelo teste de hipóteses, não há evidências significativas que permitam afirmar que a perda total de óleo se distribui de acordo com uma Normal.

Cenários	Perda de óleo média (m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (m <sup>3</sup> )	Teste de Anderson-Darling	
			A <sup>2</sup>	P-valor
1 sonda	131.931.692,99	6.410.236,24	0,27	0,681
2 sondas	69.851.329,76	3.580.890,42	0,24	0,756
3 sondas	49.149.631,82	2.634.967,85	0,28	0,643
4 sondas	38.995.059,13	1.990.603,30	0,34	0,482
5 sondas	33.076.894,31	1.681.999,54	0,43	0,301
6 sondas	26.568.058,91	1.363.192,03	0,49	0,221
7 sondas	22.771.790,96	1.144.726,04	0,47	0,239
8 sondas	20.327.667,11	1.060.285,57	0,47	0,245
9 sondas	18.500.564,33	976.734,82	0,56	0,143
10 sondas	17.212.074,44	899.716,16	0,39	0,371

Tabela 22. Análise de cenários para obtenção das perdas totais de óleo

Fonte: próprio autor (2010)

Apesar dos menores custos provenientes da perda total de óleo, maiores são os custos necessários para a operação das sondas. A Tabela 23 mostra o impacto da variação de cenários nos custos totais. A construção desta tabela parte de dois pressupostos: (1) o m<sup>3</sup> de óleo vale US\$ 77,00 e (2) o custo de aquisição de sondas é dado pelo aluguel a ser pago por um período de 3 anos (ou 1.080 dias). Assim, o custo esperado da perda total de óleo é dado pelo produto da quantidade esperada pelo valor do m<sup>3</sup> de óleo. Já o custo total de locação de sondas é dado pelo produto dos custos presentes na Tabela 17 (conforme a quantidade de sondas) por 1.080 dias. Até o quinto cenário, é utilizada uma sonda de cada tipo. A partir do mesmo, o sexto cenário passa a utilizar duas sondas do tipo 1, o sétimo cenário emprega duas sondas do tipo 1 e duas sondas do tipo 2, e assim por diante.



Cenários	CUSTOS (US\$ bi)		
	Perda de óleo	Locação de sondas	Total
1 sonda	10,16	0,56	10,72
2 sondas	5,38	1,12	6,50
3 sondas	3,78	1,70	5,49
4 sondas	3,00	2,19	5,19
5 sondas	2,55	2,55	5,10
6 sondas	2,05	3,21	5,26
7 sondas	1,75	3,77	5,53
8 sondas	1,57	4,35	5,92
9 sondas	1,42	4,84	6,26
10 sondas	1,33	5,30	6,63

Tabela 23. Análise de cenários para obtenção de custos  
 Fonte: próprio autor (2010)

A partir desta tabela, verifica-se na Figura 39 o *trade-off* de custos à medida que se aumenta a quantidade de sondas. Para o custo da perda total de óleo, três curvas são utilizadas para mostrar sua distribuição: média (ou custo esperado), média somada a 5 desvios-padrão e média subtraída a 5 desvios-padrão.

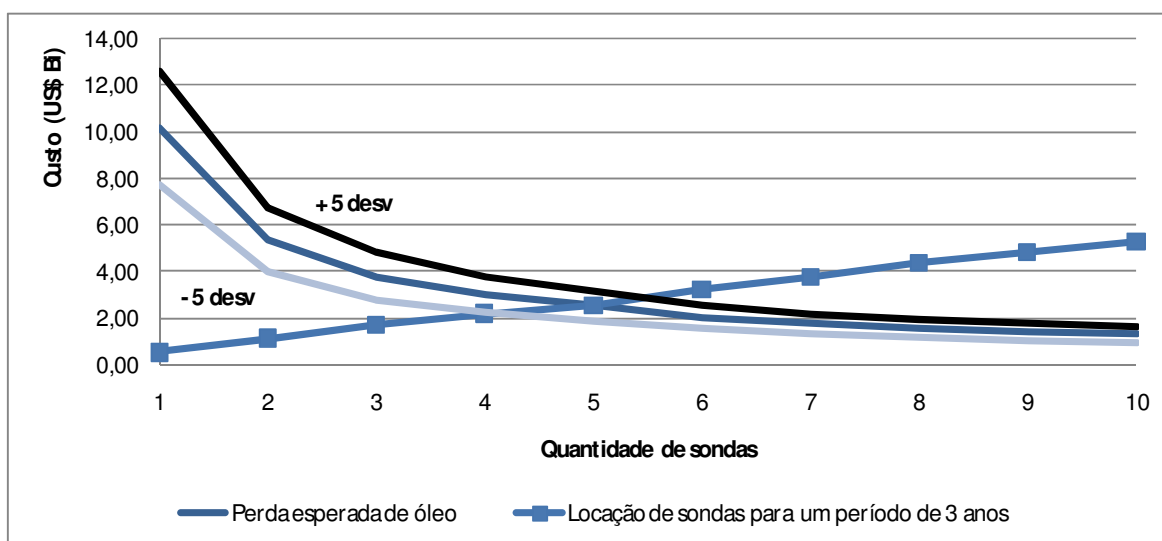


Figura 39. *Trade-off* de custos à medida que se incrementa a quantidade de sondas  
 Fonte: próprio autor (2010)

Por meio desta figura, torna-se claro que o dimensionamento ideal da frota empenhada de sondas deve ser aquele que minimiza os custos totais de utilização de sondas e de perda total de óleo. Portanto, para todos os experimentos conduzidos nas seções 6.3.2 e 6.3.1, é considerado um conjunto de 5 sondas.

### 6.3.2 Simulação-Otimização

Uma vez escolhido o conjunto de 5 sondas, o método SO (HC) é aplicado em cada instância de comparação – BC, BS e BES – para análise das distribuições das perdas totais de óleo e levantamento das medidas médias de desempenho de cada sonda. Posteriormente, são apresentadas para TB as probabilidades de alocação por meio das matrizes Poço-Sonda e Poço-Ordem, também utilizando o método SO (HC).

A seguir, a Tabela 24 mostra as perdas totais de óleo em cada instância. Observa-se novamente que não há evidências significativas, para nenhuma instância, que permitam afirmar que a perda total de óleo se distribui conforme uma Normal, de acordo com o teste de Anderson-Darling (MONTGOMERY E RUNGER, 2003) realizado pelo *software Minitab*. Ao se comparar as medidas de dispersão dos poços da Tabela 15 com as perdas médias de óleo da Tabela 24, verifica-se que: quanto maior a dispersão dos poços (e, portanto, maior o tempo de deslocamento entre poços), maior a perda total de óleo. Assim, observa-se uma maior perda total de óleo para a instância BS, seguida por TB, BES e BC.

Instâncias	Perda de óleo média (m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (m <sup>3</sup> )	Teste de Anderson-Darling	
			A <sup>2</sup>	P-valor
<b>TB</b>	33.076.894,31	1.681.999,54	0,43	0,301
<b>BC</b>	30.446.881,57	1.624.916,53	0,42	0,316
<b>BS</b>	37.613.310,70	1.713.238,82	0,56	0,144
<b>BES</b>	30.798.196,22	1.613.836,54	0,39	0,378

Tabela 24. Perdas totais de óleo obtidas em cada instância  
 Fonte: próprio autor (2010)

Ainda para as perdas totais de óleo, são construídos gráficos de dispersão para cada instância. Por meio das Figuras 40 a 43, nota-se que um padrão de comportamento que se mantém em todas elas.

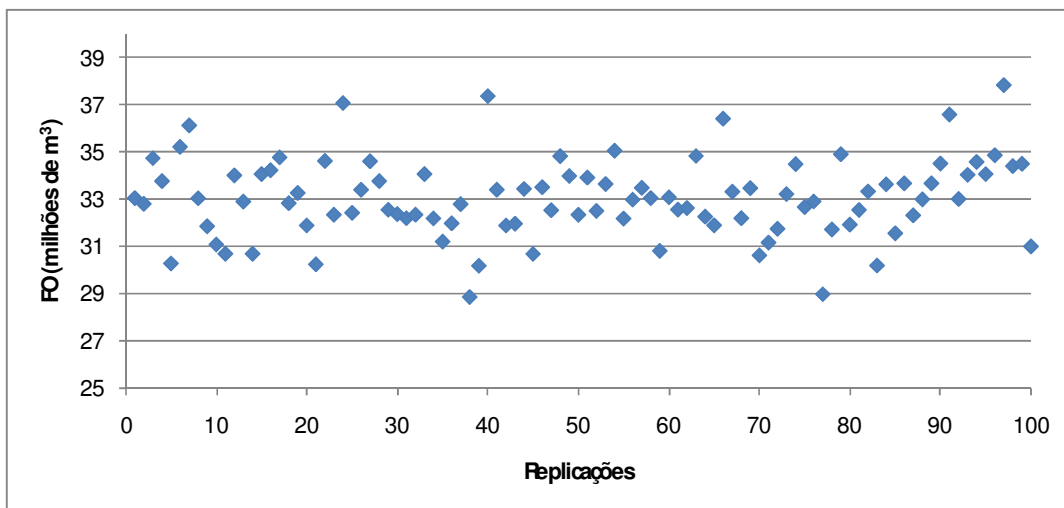


Figura 40. Gráfico de dispersão para perda total de óleo em TB

Fonte: próprio autor (2010)

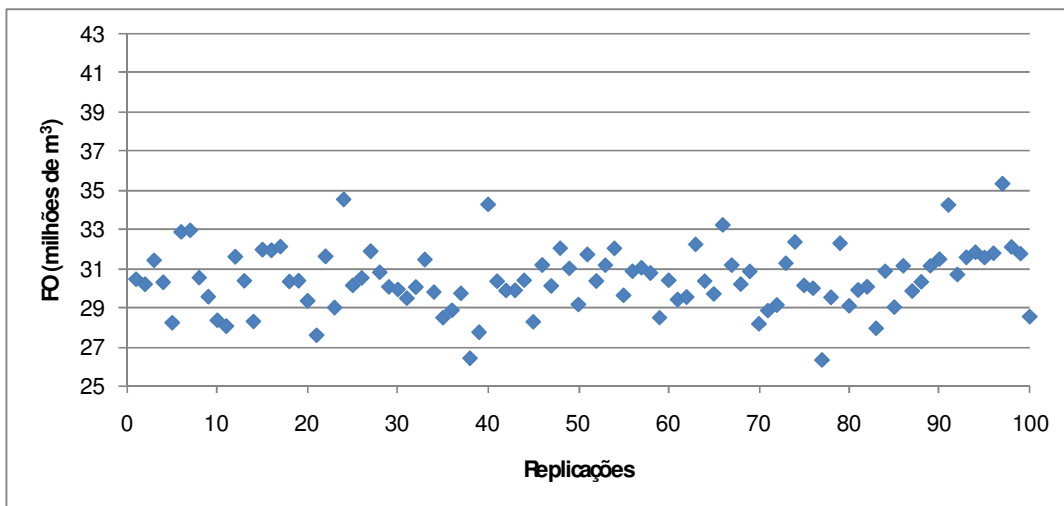


Figura 41. Gráfico de dispersão para perda total de óleo em BC

Fonte: próprio autor (2010)

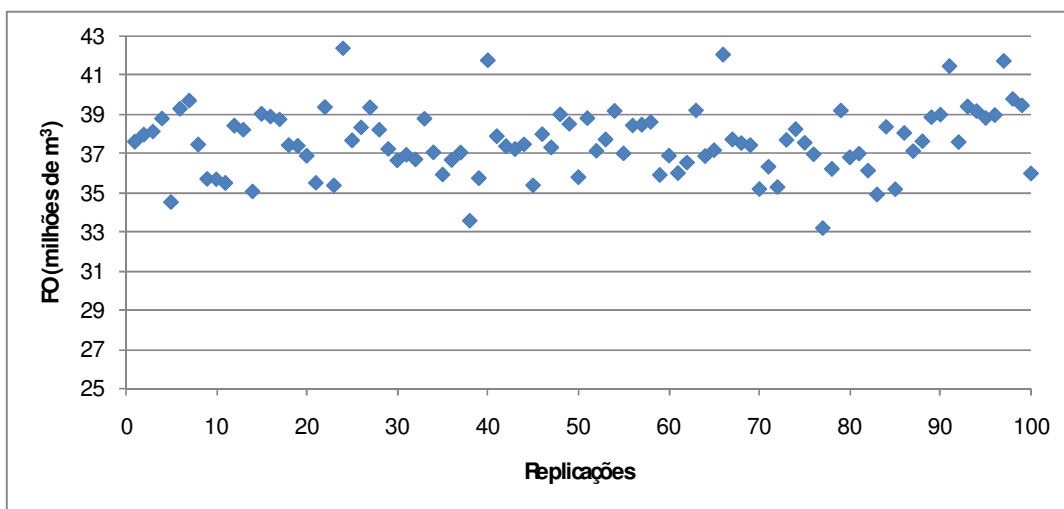


Figura 42. Gráfico de dispersão para perda total de óleo em BS

Fonte: próprio autor (2010)

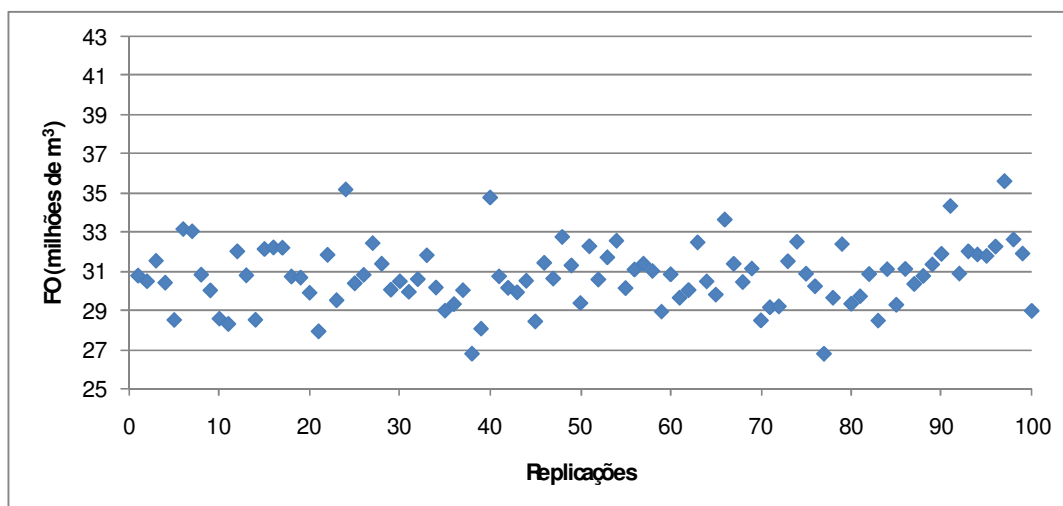


Figura 43. Gráfico de dispersão para perda total de óleo em BES

Fonte: próprio autor (2010)

Ao serem calculadas as medidas médias de desempenho para cada sonda, são obtidos os valores da Tabela 25. Nesta tabela, constata-se o impacto dos dados referentes aos parâmetros das sondas, presentes na Tabela 18, da seguinte forma:

- O *makespan* total, o tempo médio de espera em fila e o tamanho de fila estão relacionados com a capacidade operacional de cada sonda (produtividade e velocidade de deslocamento). Em geral, quanto maior a capacidade da sonda, maiores estas medidas de desempenho, pois mais poços são atendidos.
- O tempo improdutivo encontra-se influenciado pelo tempo de *setup* entre poços. Isso pode ser observado por meio das sondas 2 e 4, que, em geral, apresentam os menores tempos improdutivos. São estas mesmas sondas que não intervêm em presença de  $H_2S$ , e dessa forma despendem menos tempo em atividades de desmobilização / mobilização. Conseqüentemente, o índice de aproveitamento para essas sondas tende a ser maior.

Instâncias	Sonda	RECURSOS (SONDAS)			ENTIDADES (POÇOS)		
		Makespan (dias)			Índice de aproveitamento	Tempo médio de espera em fila (dias)	Tamanho de fila
		Tempo produtivo	Tempo improdutivo	Total			
TB	1	612,87	114,33	727,20	84%	334,31	21,78
	2	636,48	85,41	721,89	88%	331,16	21,15
	3	608,07	105,71	713,78	85%	331,20	19,12
	4	627,96	87,45	715,41	88%	326,14	19,42
	5	610,92	95,89	706,81	86%	324,64	18,53
BC	1	618,69	33,53	652,22	95%	308,84	21,03
	2	631,98	17,17	649,16	97%	302,54	20,50
	3	611,80	34,83	646,62	95%	304,41	18,86
	4	628,07	13,30	641,37	98%	294,44	20,37
	5	602,87	32,49	635,36	95%	293,53	19,24
BS	1	630,09	159,73	789,82	80%	361,26	23,23
	2	633,61	153,45	787,06	80%	371,38	21,24
	3	608,53	173,88	782,41	78%	374,59	19,26
	4	614,59	163,91	778,50	79%	368,10	18,94
	5	600,59	175,92	776,51	77%	372,24	17,33
BES	1	615,65	45,75	661,40	93%	317,33	20,67
	2	636,97	17,19	654,16	97%	295,02	21,04
	3	615,09	34,64	649,73	95%	300,41	19,54
	4	624,01	25,65	649,66	96%	304,13	19,86
	5	601,21	42,07	643,28	93%	302,83	18,89

Tabela 25. Medidas médias de desempenho para cada sonda

Fonte: próprio autor (2010)

A seguir, a matriz Poço-Sonda de TB encontra-se na Tabela 26. Conforme definido no capítulo 4, a matriz Poço-Sonda indica as probabilidades de alocação de cada poço em cada sonda. Além disso, a Tabela 26 também possui um quadro com a marcação das maiores probabilidades para cada poço. Por meio de um sombreado neste quadro, cada sonda é associada ao conjunto de poços da bacia onde ela se localiza inicialmente (ver Tabelas 10 e 18). Uma interessante constatação é que a região sombreada coincide com

grande parte das marcações, o que revela uma tendência à clusterização de poços. Essa clusterização é tanto mais forte quanto maior a capacidade operacional das sondas.

Finalmente, a Tabela 27 apresenta uma possível matriz Poço-Ordem para TB. Conforme também definido no capítulo 4, a matriz Poço-Ordem é inerente a uma sonda específica e apresenta as distribuições de probabilidades (ou mesmo de frequências) para sua ordem de atendimento de cada poço. No caso da Tabela 27, a sonda considerada é a do tipo 1, onde são mostradas as distribuições de frequências até o poço 50. A partir dessa tabela, a Figura 44 mostra graficamente essas distribuições até o poço 20.

	SONDAS									
	Probabilidades de alocação					Maiores probabilidades				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	22%	23%	23%	15%	17%		X	X		
2	19%	27%	18%	16%	20%		X			
3	24%	24%	17%	22%	13%	X	X			
4	22%	18%	15%	21%	24%					X
5	26%	26%	14%	26%	8%	X	X		X	
6	26%	22%	18%	12%	22%	X				
7	10%	55%	25%	6%	4%		X			
8	13%	29%	15%	28%	15%		X			
9	15%	33%	30%	16%	6%		X			
10	26%	0%	48%	0%	26%			X		
11	21%	31%	17%	18%	13%		X			
12	11%	41%	18%	21%	9%		X			
13	8%	55%	34%	1%	2%		X			
14	23%	17%	17%	25%	18%				X	
15	16%	29%	19%	19%	17%		X			
16	20%	20%	15%	29%	16%				X	
17	29%	20%	19%	17%	15%	X				
18	10%	47%	10%	26%	7%		X			
19	15%	37%	10%	31%	7%		X			
20	8%	0%	76%	0%	16%			X		
21	9%	27%	27%	23%	14%		X	X		
22	8%	34%	32%	15%	11%		X			
23	5%	58%	26%	9%	2%		X			
24	12%	37%	14%	25%	12%		X			
25	17%	22%	11%	28%	22%				X	
26	12%	24%	25%	18%	21%			X		
27	18%	15%	22%	18%	27%					X
28	23%	26%	15%	17%	19%		X			
29	28%	17%	16%	20%	19%	X				
30	38%	0%	30%	0%	32%	X				
31	14%	20%	17%	20%	29%					X
32	18%	13%	13%	25%	31%					X
33	15%	24%	17%	21%	23%		X			
34	9%	22%	16%	21%	32%					X
35	17%	20%	20%	25%	18%				X	
36	12%	25%	11%	25%	27%					X
37	15%	13%	21%	23%	28%					X
38	22%	15%	23%	16%	24%					X
39	5%	36%	15%	25%	19%		X			
40	34%	0%	29%	0%	37%					X
41	12%	25%	16%	29%	18%				X	
42	22%	26%	15%	17%	20%		X			
43	16%	22%	24%	23%	15%			X		
44	14%	16%	22%	23%	25%					X
45	26%	21%	17%	13%	23%	X				
46	7%	29%	15%	35%	14%				X	
47	11%	17%	11%	31%	30%				X	
48	17%	18%	19%	26%	20%				X	
49	14%	31%	14%	24%	17%		X			
50	13%	0%	34%	0%	53%					X

POÇOS

	SONDAS									
	Probabilidades de alocação					Maiores probabilidades				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
51	19%	18%	24%	22%	17%			X		
52	19%	16%	20%	20%	25%					X
53	14%	19%	18%	25%	24%				X	
54	8%	19%	13%	41%	19%				X	
55	4%	32%	12%	30%	22%		X			
56	19%	21%	7%	34%	19%				X	
57	17%	14%	14%	31%	24%				X	
58	32%	19%	13%	19%	17%	X				
59	15%	18%	11%	31%	25%				X	
60	25%	0%	26%	0%	49%					X
61	8%	18%	13%	35%	26%				X	
62	11%	20%	9%	36%	24%				X	
63	9%	25%	15%	29%	22%				X	
64	9%	23%	14%	32%	22%				X	
65	17%	26%	22%	21%	14%		X			
66	14%	22%	23%	19%	22%			X		
67	17%	13%	22%	21%	27%					X
68	30%	16%	21%	20%	13%	X				
69	9%	30%	21%	18%	22%		X			
70	27%	0%	28%	0%	45%					X
71	23%	15%	24%	15%	23%			X		
72	14%	27%	18%	19%	22%		X			
73	20%	21%	16%	26%	17%				X	
74	13%	25%	24%	23%	15%		X			
75	24%	25%	15%	18%	18%		X			
76	18%	16%	25%	22%	19%			X		
77	27%	15%	17%	23%	18%	X				
78	24%	26%	21%	12%	17%		X			
79	26%	14%	16%	26%	18%	X			X	
80	31%	0%	25%	0%	44%					X
81	8%	39%	8%	27%	18%		X			
82	23%	25%	8%	31%	13%				X	
83	24%	21%	12%	22%	21%	X				
84	18%	27%	21%	17%	17%		X			
85	15%	16%	24%	27%	18%				X	
86	78%	8%	4%	8%	2%	X				
87	93%	5%	0%	2%	0%	X				
88	26%	26%	18%	17%	13%	X	X			
89	67%	9%	5%	15%	4%	X				
90	34%	0%	41%	0%	25%			X		
91	22%	21%	24%	24%	9%			X	X	
92	64%	12%	4%	15%	5%	X				
93	24%	17%	18%	22%	19%	X				
94	22%	24%	22%	18%	14%		X			
95	25%	25%	20%	25%	5%	X	X		X	
96	24%	26%	19%	21%	10%		X			
97	93%	4%	2%	1%	0%	X				
98	43%	23%	9%	19%	6%	X				
99	26%	27%	25%	19%	3%		X			
100	59%	0%	36%	0%	5%	X				

Tabela 26. Matriz Poço-Sonda

Fonte: próprio autor (2010)



		ORDEM DE ATENDIMENTO																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
POÇOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7	7	0	3	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	2	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	10	5	2	1	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	9	4	4	1	0	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	9	6	4	2	0	0	
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	9	7	5	0	1	0	
	7	0	0	1	0	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	1	4	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	7	15	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	4	6	1	1	0	0
	12	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	1	1	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	5	8	3	1	1	0	
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	13	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	9	9	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	1	0	1	0	0	0	
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3	4	3	0	0	0	0	
	20	0	0	0	3	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	1	0	0	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	1	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	1	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	3	9	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	1	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	9	5	3	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	12	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	6	12	2	2	0	0	
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	11	17	2	1	0	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	5	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	6	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	33	0	0	0	0	0	0	0	5	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	8	1	2	0	0	0	0	0
	36	0	0	0	0	0	3	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	37	0	0	0	0	0	0	4	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	9	9	1	1	0	0	0
	39	0	1	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	40	0	0	0	0	0	2	13	15	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	41	0	0	0	0	0	0	0	1	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	16	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	3	2	0	0	0	0
	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	14	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	46	0	1	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	47	0	0	0	0	2	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	10	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50	0	0	0	0	3	8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 27. Mariz Poço-Ordem da sonda 1

Fonte: próprio autor (2010)

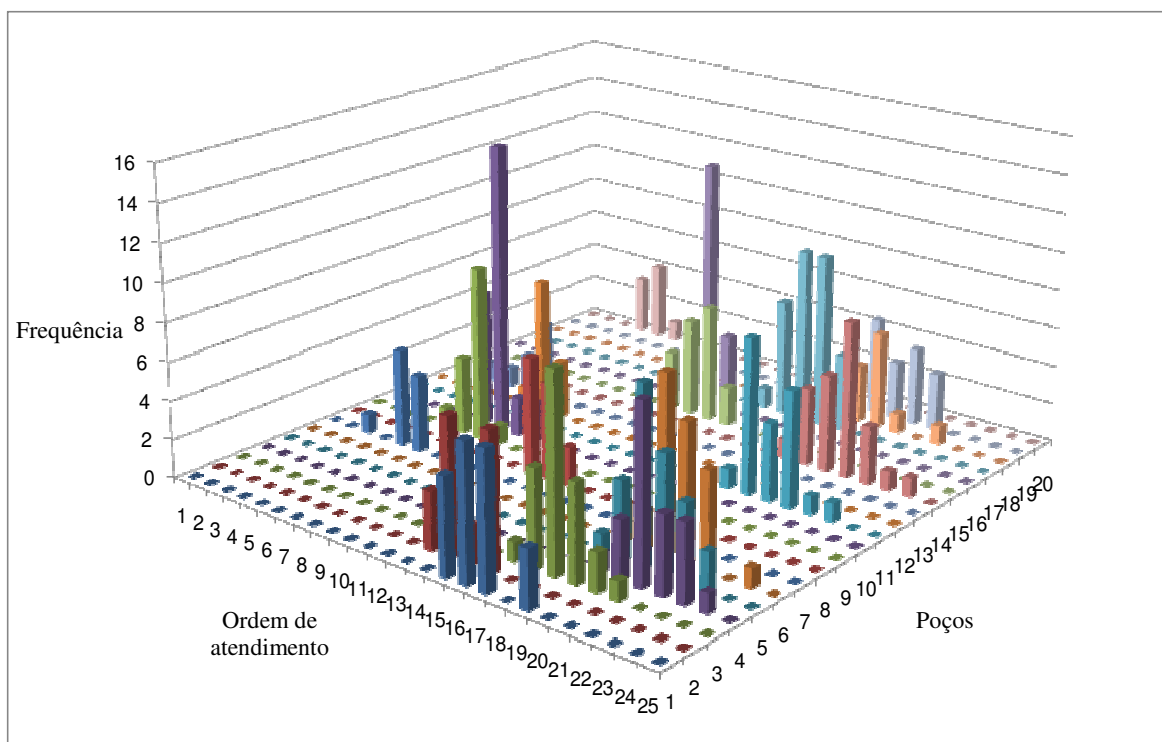


Figura 44. Gráfico da matriz Poço-Ordem para os 20 primeiros poços da sonda 1  
 Fonte: próprio autor (2010)

Uma vez geradas as soluções por Simulação-Otimização, dá-se início ao método de Reconexão por Caminhos, cujos experimentos computacionais e análises estão na seção seguinte.

### 6.3.3 Reconexão por Caminhos

Conforme descrito na seção 5.2, a Reconexão por Caminhos se inicia com a seleção de soluções para compor o Conjunto Elite (C), cujos valores para a Função Objetivo apresentam os menores desvios absolutos em relação à média da Simulação-Otimização. A Tabela 28 apresenta um exemplo de um Conjunto Elite inicial, gerado por SO (HC), considerando TB. São apresentados os valores para a Função Objetivo, bem como os desvios absolutos e percentuais em relação à média, dada por  $33.076.894,31 \text{ m}^3$ . Observa-se que, devido ao método apresentado na seção 5.2, as soluções estão ordenadas por ordem decrescente de desvio.

Soluções	FO (m <sup>3</sup> )	Desvio absoluto em relação à média da SO (m <sup>3</sup> )	Desvio percentual em relação à média da SO
58	33.077.645,89	751,58	0,00%
8	33.073.828,35	3.065,96	0,01%
92	33.043.953,86	32.940,45	0,10%
60	33.115.336,12	38.441,81	0,12%
88	33.025.423,19	51.471,12	0,16%
56	33.016.833,70	60.060,61	0,18%
76	32.938.834,82	138.059,49	0,42%
13	32.934.338,44	142.555,87	0,43%
73	33.250.729,35	173.835,04	0,53%
18	32.867.793,27	209.101,04	0,63%

Tabela 28. Exemplo de um conjunto inicial de soluções elite, gerado por SO (HC)

Fonte: próprio autor (2010)

Ao aplicar a Reconexão por Caminhos entre todos os pares de soluções deste conjunto, são analisadas  $C_{10}^2 = 45$  soluções candidatas a serem inseridas no Conjunto Elite. Para tanto, o parâmetro *MDif* (ver seção 5.2) é estipulado em 100. Como o número de poços também vale 100, o “deslocamento de posições” para um dado poço entre a solução candidata e uma solução elite qualquer deve ser, em média, superior a 1 para que a candidata seja inserida no Conjunto Elite.

A seguir, a Tabela 29 apresenta os valores para FO (Função Objetivo) e TP (tempo de processamento da Reconexão por Caminhos) das soluções finais obtidas pela aplicação da SO (HC) + RC, sem aplicação de Busca Local. Além disso, é calculado o percentual de melhora em relação à solução do Conjunto Elite inicial cuja FO encontra-se mais próxima da média da SO (HC) de cada instância. Assim, TB apresenta o maior percentual de melhora, seguida por BS, BC e BES.

Soluções	INSTÂNCIAS			
	TB	BC	BS	BES
FO (m <sup>3</sup> )	31.829.252,55	30.032.072,83	36.831.097,99	30.400.539,46
% melhora	3,77%	1,36%	2,08%	1,29%
TP (mm:ss)	00:05	00:05	00:04	00:04

Tabela 29. Soluções finais obtidas por SO (HC) + RC

Fonte: próprio autor (2010)

Ao serem aplicadas as versões RC + BL propostas na Tabela 9 a partir da SO (HC), são gerados os seguintes dados para as soluções finais obtidas em cada instância, apresentados na Tabela 30. Verifica-se um desempenho consideravelmente superior para todos os métodos RC + BL em relação à RC pura, à custa de um maior tempo de processamento. As melhorias obtidas são tanto maiores à medida que se emprega a vizinhança  $N^{(T)}(s)$  e o método MD, à exceção de BS, em que a vizinhança  $N^{(R)}(s)$  é explorada para geração de melhores resultados. Em todas as instâncias, o MD é superior ao MRD. Para o MRD, o número máximo de iterações sem melhora (*IterMax*) é fixado em 15.000. A barreira  $\beta$ , que penaliza a realização de movimentos inviáveis, é estipulada em 1.000.000.000. A escolha desse valor, na casa dos bilhões, justifica-se por ser uma ordem acima dos valores das Funções Objetivo das soluções geradas por Simulação-Otimização, de maneira que o controle de inviabilidades seja significativo.

		ESTRUTURAS DE VIZINHANÇA					
		$N^{(T)}(s)$			$N^{(R)}(s)$		
		FO (m <sup>3</sup> )	% melhora	TP (mm:ss)	FO (m <sup>3</sup> )	% melhora	TP (mm:ss)
TB	MD	<b>25.936.788,79*</b>	21,59%	26:09	27.326.493,13	17,38%	27:33
	MRD	27.440.786,99	17,04%	25:19	27.887.947,42	15,69%	22:29
BC	MD	<b>27.591.510,56*</b>	9,38%	20:17	27.784.635,50	8,74%	20:36
	MRD	27.978.678,70	8,11%	16:31	28.437.533,31	6,60%	20:51
BS	MD	30.472.215,19	18,99%	20:14	<b>29.657.846,03*</b>	21,15%	20:26
	MRD	31.762.688,54	15,55%	18:34	30.479.296,26	18,97%	20:18
BES	MD	<b>27.245.617,52*</b>	11,54%	20:10	27.754.332,67	9,88%	17:27
	MRD	27.885.127,49	9,46%	18:37	28.219.966,82	8,37%	19:02

Tabela 30. Soluções finais obtidas por SO (HC) + RC + BL

Fonte: próprio autor (2010)

Para a geração dos Conjuntos Elites iniciais, que originaram as soluções da Tabela 30, um algoritmo guloso foi utilizado na fase de Otimização da SO. Ao se realizar a troca do algoritmo guloso pelo GRASP, verifica-se a melhor qualidade dos Conjuntos Elites iniciais. Contudo, a um maior custo computacional: para cada uma das 100 replicações da SO, há 5 iterações do GRASP, cada uma composta de uma Construção e uma Busca Local, ao passo que o algoritmo guloso apenas contrói uma solução em cada replicação da SO.

Assim, por apresentar soluções de melhor qualidade nos Conjuntos Elites gerados por SO (GRASP), a Reconexão por Caminhos (com ou sem Busca Local) não obteve uma solução final melhor do que a melhor solução elite e, assim, apenas retornou a melhor solução elite como resultado. A seguir, a Tabela 31 apresenta as soluções finais obtidas ao aplicar SO (GRASP) + RC + BL em cada instância. Para estes testes, a mesma combinação de método de Busca Local e estrutura de vizinhança utilizada no GRASP é também empregada pela Reconexão por Caminhos. Como se pode observar, a qualidade destas soluções supera as soluções finais obtidas por SO (HC) + RC + BL da Tabela 30, mesmo sem o refinamento da RC.

		ESTRUTURAS DE VIZINHANÇA			
		N <sup>(T)</sup> (s)		N <sup>(R)</sup> (s)	
		FO (m <sup>3</sup> )	TP (mm:ss)	FO (m <sup>3</sup> )	TP (mm:ss)
TB	MD	24.946.042,11	24:34	<b>24.902.665,53*</b>	26:45
	MRD	24.904.826,76	23:02	25.029.888,74	24:08
BC	MD	<b>23.627.571,76*</b>	21:43	23.778.301,32	22:14
	MRD	23.670.321,03	18:22	23.790.310,70	19:30
BS	MD	28.659.536,69	22:50	28.331.179,50	24:13
	MRD	28.622.906,53	19:51	<b>28.252.513,98*</b>	21:59

BES	MD	23.909.386,96	21:29	23.876.731,66	20:12
	MRD	<b>23.808.123,75*</b>	20:03	23.976.023,32	18:40

Tabela 31. Soluções finais obtidas por SO (GRASP) + RC + BL

Fonte: próprio autor (2010)

A seguir, algumas análises de desempenho são realizadas para a RC e suas versões RC + BL, a partir da SO (HC), considerando TB. Os gráficos das Figuras 45 a 49 mostram a evolução da FO em relação ao tempo de processamento para cada método. As medições são feitas nas melhores soluções obtidas de cada trajetória. Observa-se o aspecto singular da RC em comparação aos demais. É observado um padrão de comportamento para cada método (MD e MRD), no qual a convergência do MD se dá mais lentamente do que o MRD, apesar dos melhores resultados obtidos. Quanto ao tipo de movimento realizado na Busca Local, verifica-se maior variabilidade de soluções quando são realizados movimentos de realocação, uma vez que sua vizinhança é maior do que a de troca, conforme visto na seção 5.5.2. Apesar disso, os movimentos de realocação não produziram melhores resultados, já que as restrições de janela de tempo impedem grandes alterações nas ordens de atendimento dos poços para cada sonda.

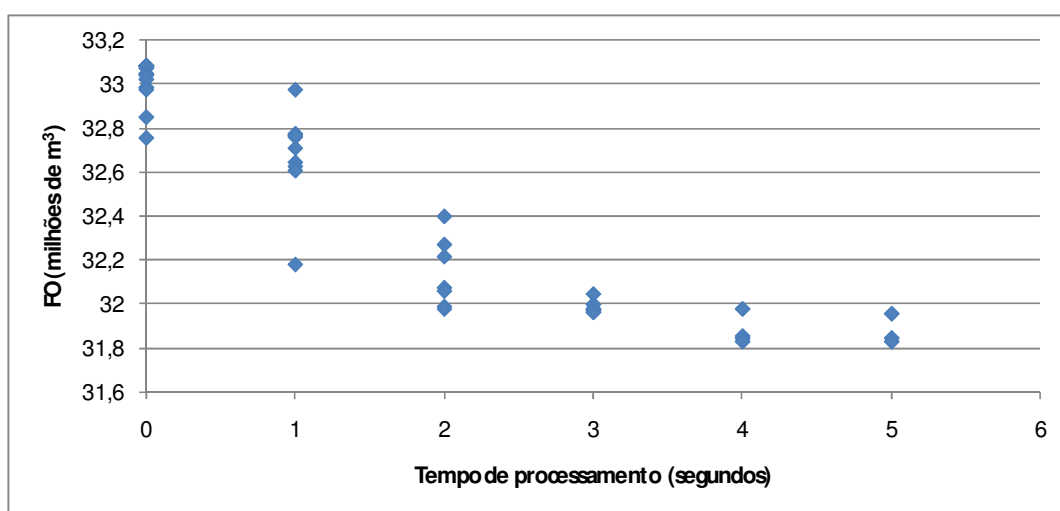


Figura 45. Evolução da FO em relação ao tempo para RC

Fonte: próprio autor (2010)

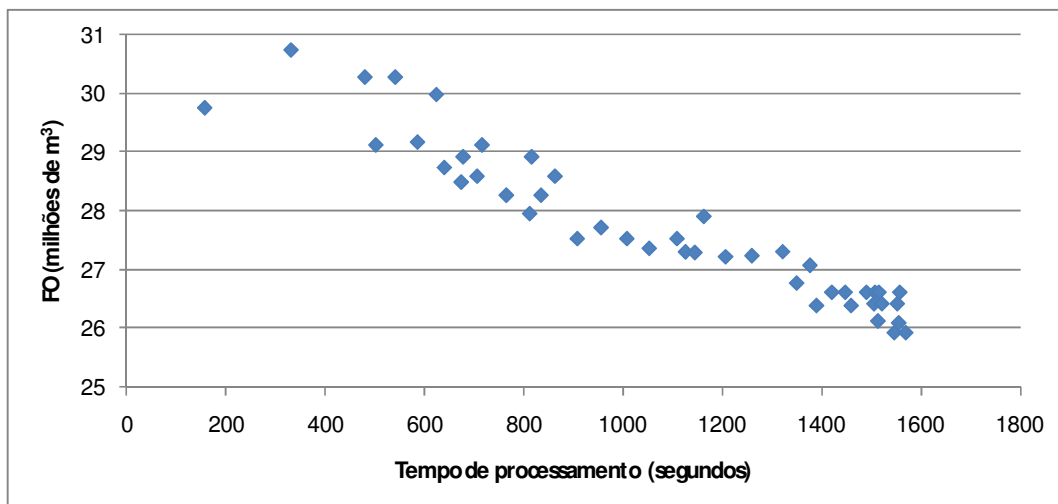


Figura 46. Evolução da FO em relação ao tempo para RC+MD<sup>(T)</sup>

Fonte: próprio autor (2010)

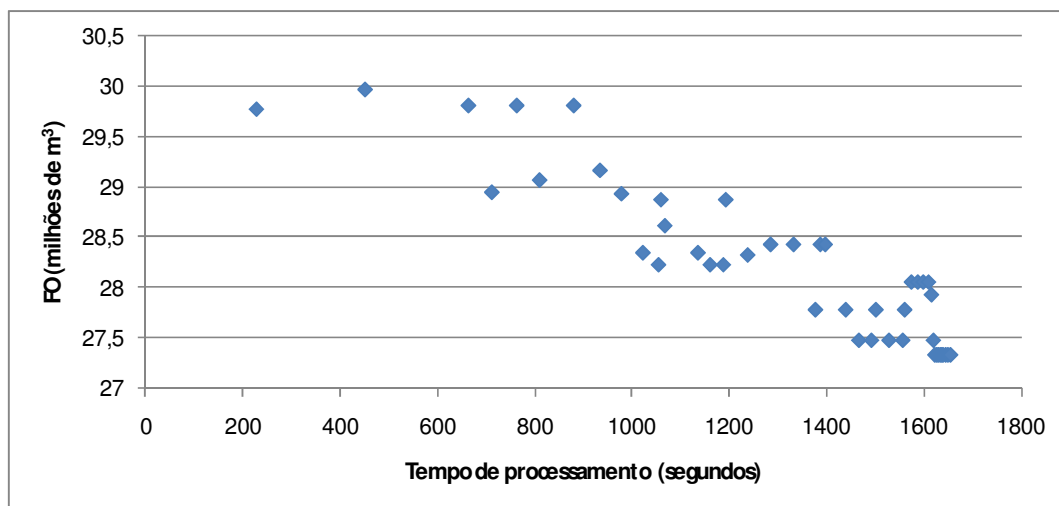


Figura 47. Evolução da FO em relação ao tempo para RC+MD<sup>(R)</sup>

Fonte: próprio autor (2010)

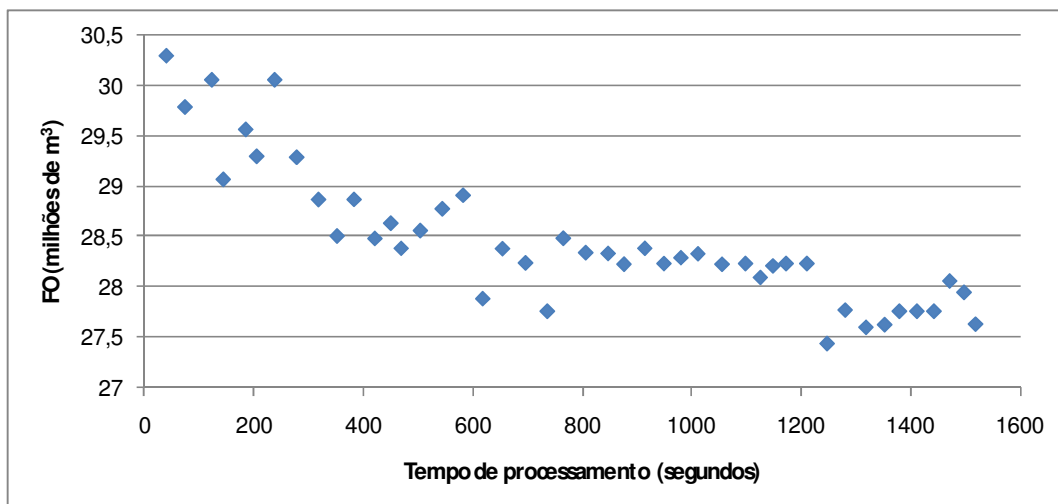


Figura 48. Evolução da FO em relação ao tempo para RC+MRD<sup>(T)</sup>

Fonte: próprio autor (2010)

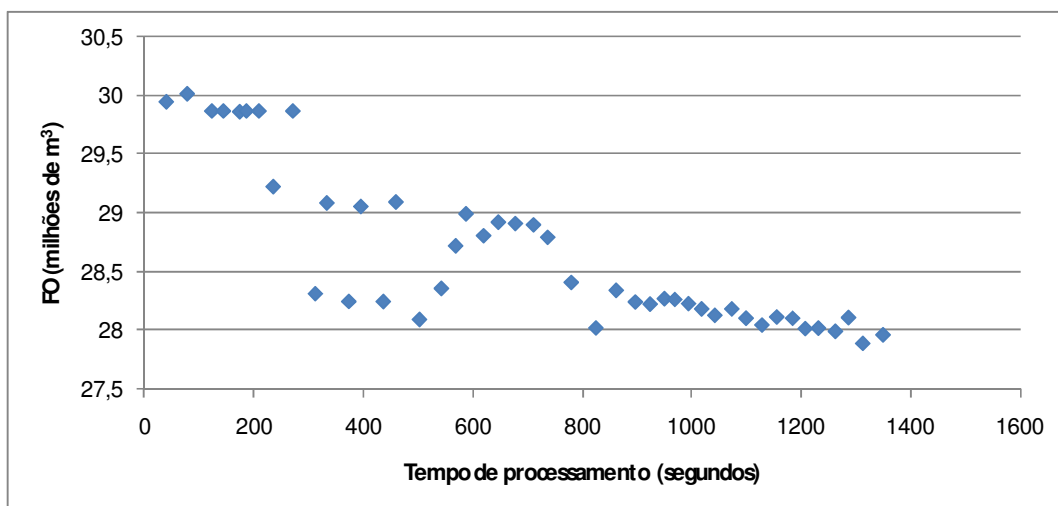


Figura 49. Evolução da FO em relação ao tempo para RC+MRD<sup>(R)</sup>

Fonte: próprio autor (2010)

Outra análise possível é o estudo da frequência de movimentos que produzem as melhores soluções de cada método, dado pelas Figuras 50 a 54, onde as análises são feitas considerando SO (HC), também para TB. Em geral, observa-se que os primeiros movimentos são os principais responsáveis pelas soluções obtidas a partir de cada trajetória (de um total de  $C_{10}^2 = 45$  soluções, 20 a 45% aproximadamente foram obtidas com o primeiro movimento realizado pela Reconexão por Caminhos). Isso confirma uma das conclusões de Rosseti (2003), de que melhores soluções são normalmente encontradas próximas da solução inicial. Essa constatação permite, inclusive, que a Reconexão por Caminhos possa ser interrompida após algumas iterações, antes de a solução guia ser alcançada.

Além disso, novamente verifica-se o aspecto singular da RC e um padrão de comportamento para cada método e vizinhança da Busca Local. Dentre todas as aplicações, a RC é a que apresenta maior faixa de movimentos que produzem melhores soluções (que se estende até o 22º movimento), além da menor frequência relativa para o primeiro movimento (em torno de 20%). Quando a vizinhança de troca é explorada na Busca Local, essa frequência é de aproximadamente 40% para o primeiro movimento, independentemente do método utilizado, assim como quando é explorada a vizinhança de realocação (aproximadamente 30%). Isso reflete a maior variabilidade de soluções geradas pelos movimentos de realocação, já constatada na análise anterior. Ainda, é observado que a faixa de movimentos que produzem melhores soluções para o MRD se estende até o 17º e 18º movimento (em oposição ao MD, que abrange até o 10º e 14º movimento), devido ao seu caráter aleatório.



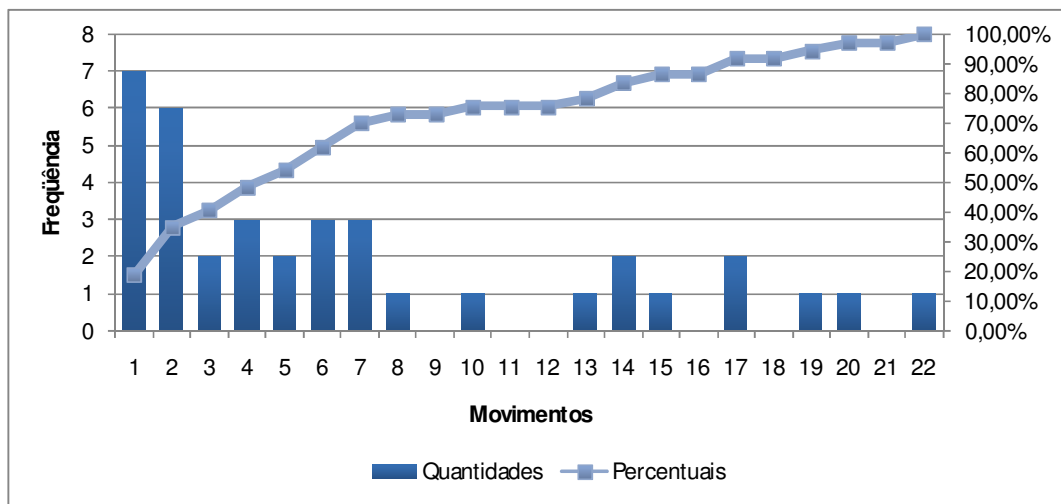


Figura 50. Frequência de movimentos que produzem melhores soluções (RC)

Fonte: próprio autor (2010)

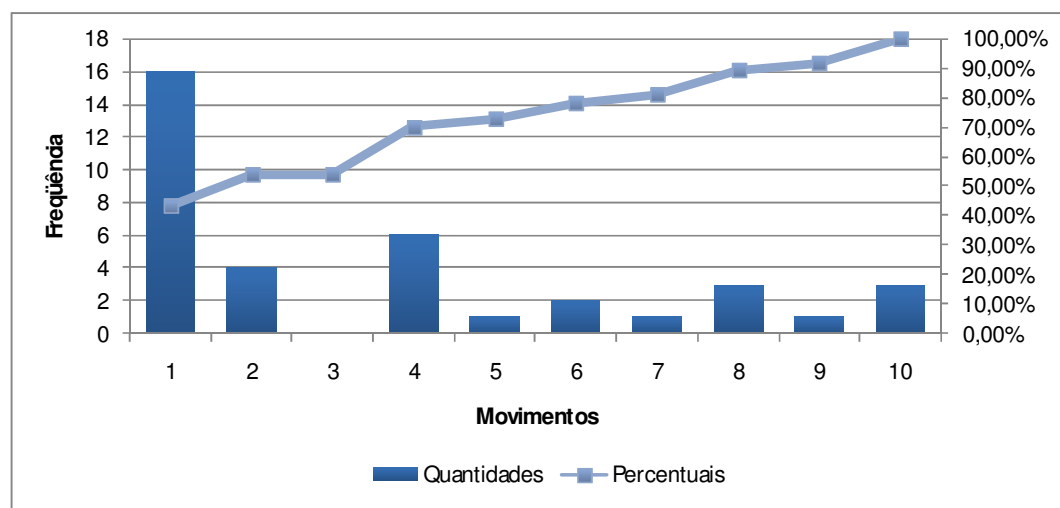


Figura 51. Frequência de movimentos que produzem melhores soluções (RC+MD<sup>(T)</sup>)

Fonte: próprio autor (2010)

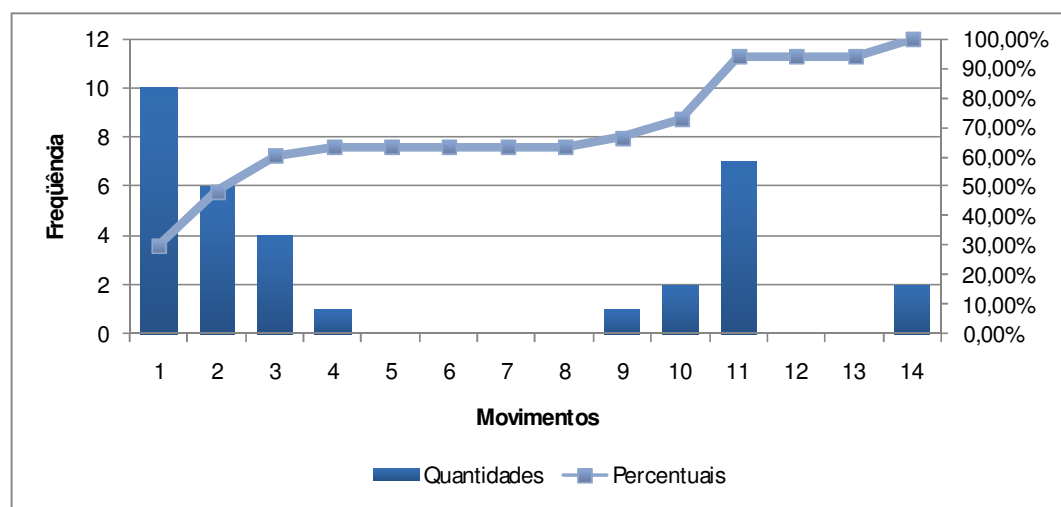


Figura 52. Frequência de movimentos que produzem melhores soluções (RC+MD<sup>(R)</sup>)

Fonte: próprio autor (2010)

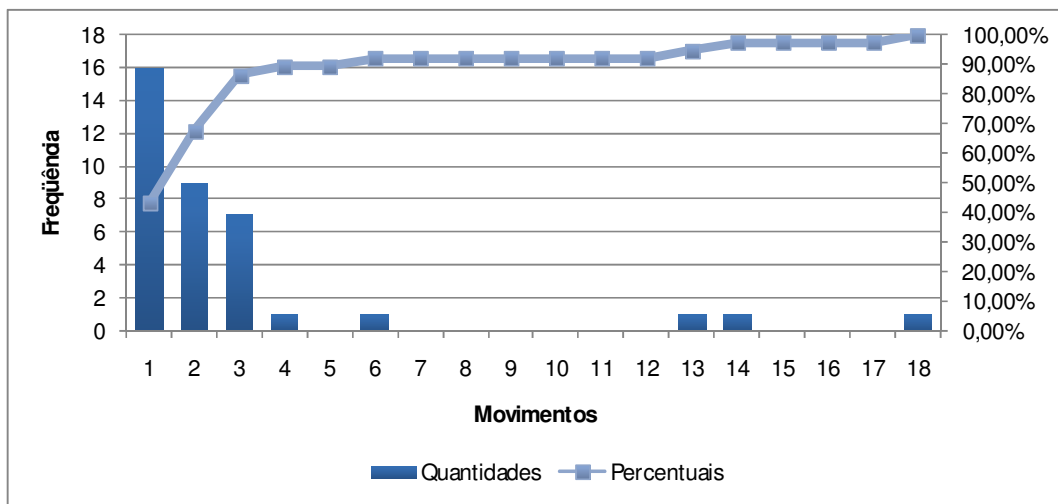


Figura 53. Frequência de movimentos que produzem melhores soluções (RC+MRD<sup>(T)</sup>)

Fonte: próprio autor (2010)

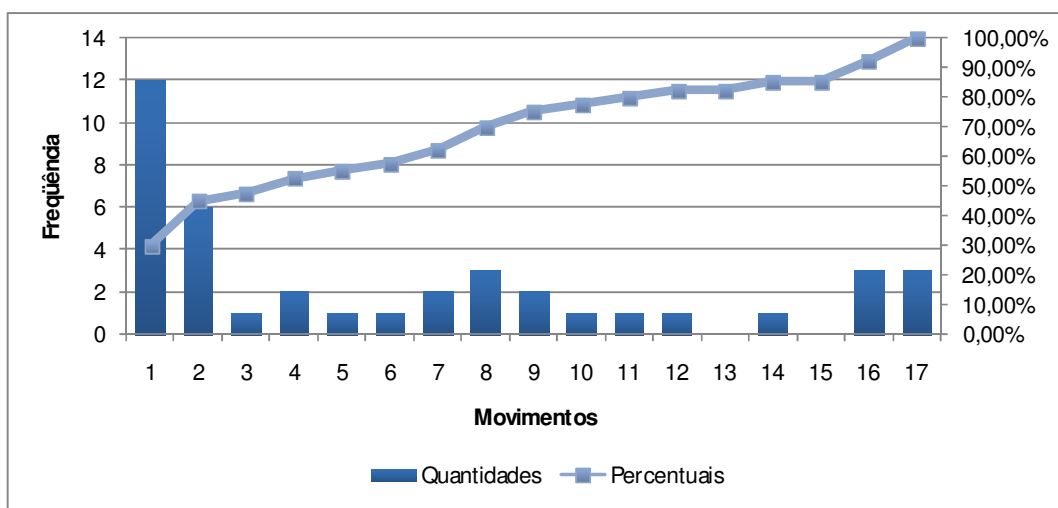


Figura 54. Frequência de movimentos que produzem melhores soluções (RC+MRD<sup>(R)</sup>)

Fonte: próprio autor (2010)

Finalmente, são analisados os gráficos de Gantt das soluções produzidas para TB, a partir de SO (HC), por meio das Figuras 55 a 60. Em geral, observa-se a menor quantidade de espaços vazios para as soluções das versões RC + BL, uma vez que atingem melhores resultados. Além disso, para a abordagem SO (HC) + RC, confirma-se o atingimento do objetivo proposto de se preservar alguns atributos das soluções geradas por Simulação-Otimização na solução final obtida pela Reconexão por Caminhos. Ao se considerar as Figuras 56 a 60, ao menos um poço se encontra alocado na mesma sonda e ordem de atendimento da replicação 58 da SO (HC), a qual apresenta menor desvio absoluto para a perda total de óleo (ver Tabela 28). Esta similaridade é ainda maior para a solução final da RC pura, em decurso de nenhum método de Busca Local ter sido aplicado.

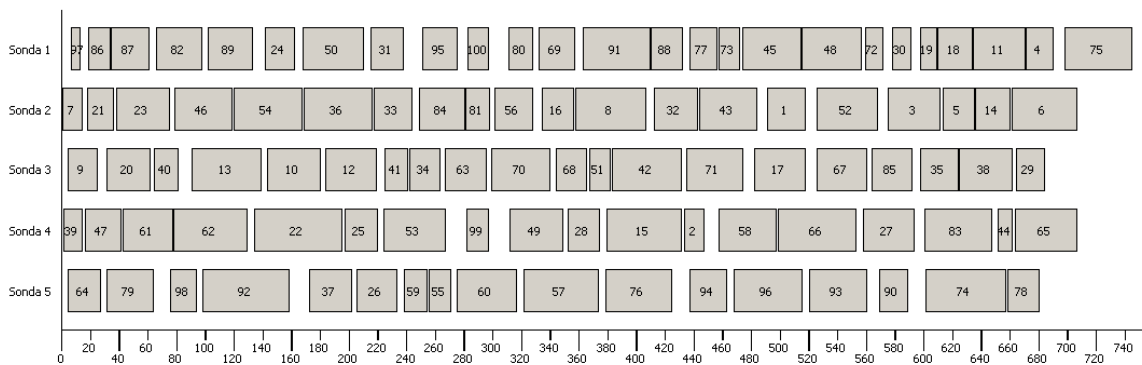


Figura 55. Gráfico de Gantt para replicação 58 da SO (HC)

Fonte: próprio autor (2010)

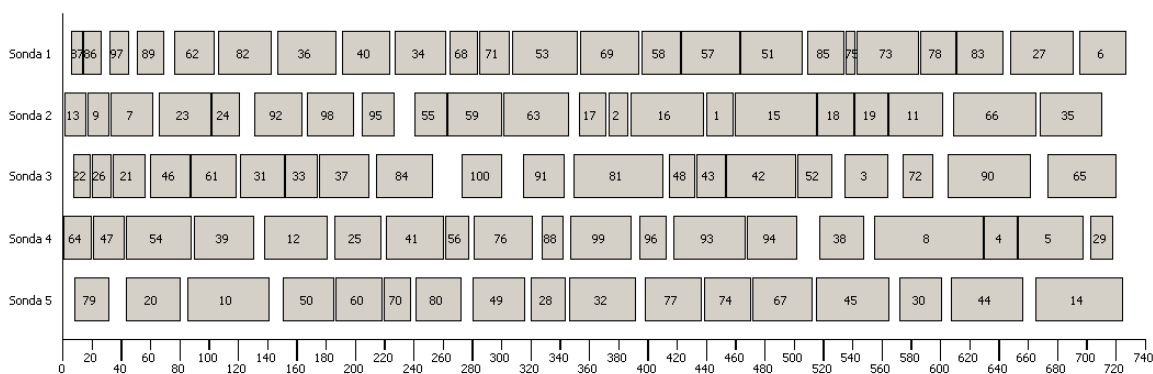


Figura 56. Gráfico de Gantt para a solução final da RC

Fonte: próprio autor (2010)

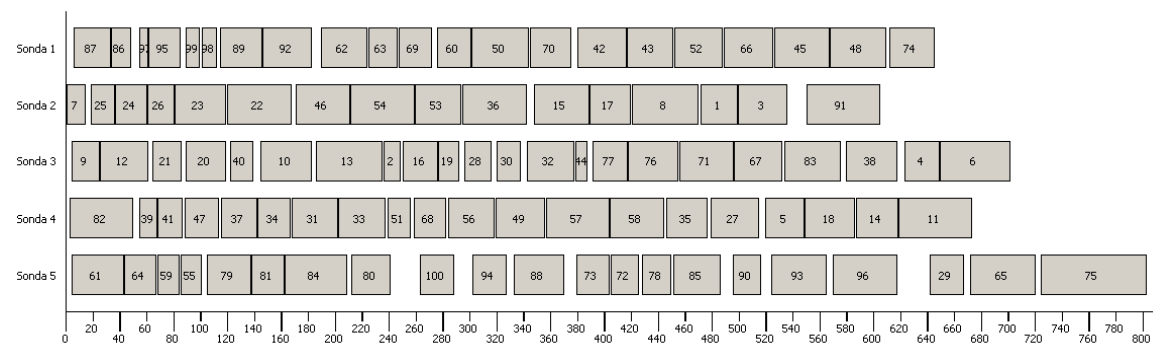


Figura 57. Gráfico de Gantt para a solução final da RC+MD<sup>(T)</sup>

Fonte: próprio autor (2010)

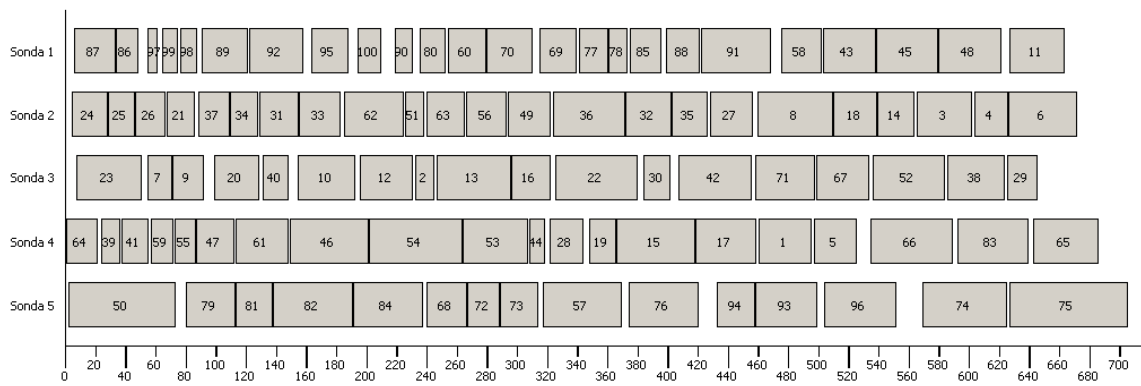


Figura 58. Gráfico de Gantt para a solução final da RC+MD<sup>(R)</sup>  
 Fonte: próprio autor (2010)

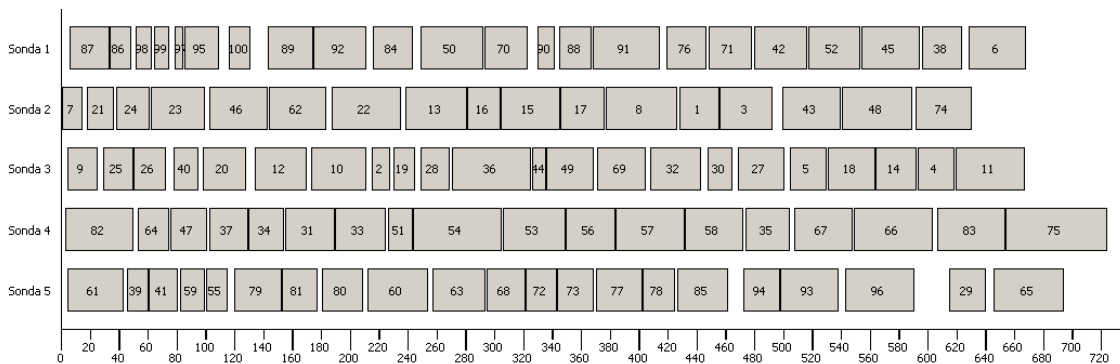


Figura 59. Gráfico de Gantt para a solução final da RC+MRD<sup>(T)</sup>  
 Fonte: próprio autor (2010)

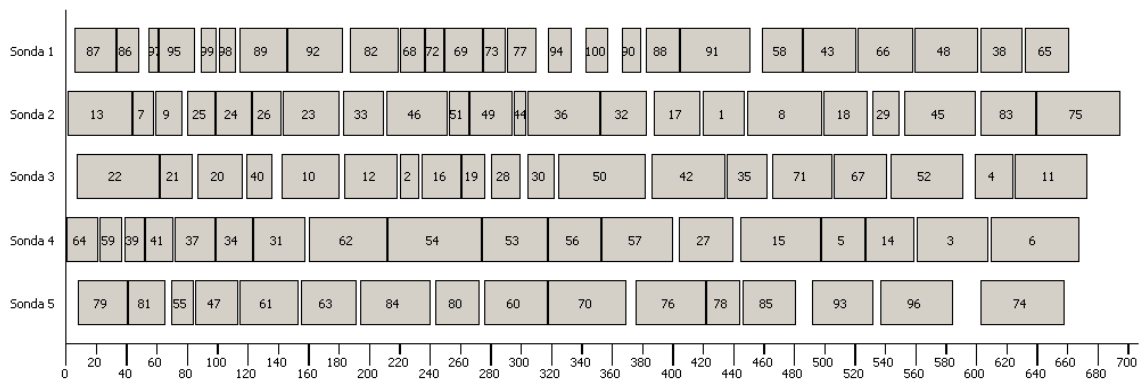


Figura 60. Gráfico de Gantt para a solução final da RC+MRD<sup>(R)</sup>  
 Fonte: próprio autor (2010)

## CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abordou o Problema de Planejamento de Sondas de Intervenção (PPSI) por meio de sua contextualização teórica e prática, a qual envolveu: uma revisão bibliográfica acerca do problema e de métodos de resolução, uma aplicação de Simulação-Otimização e Reconexão por Caminhos, além de experimentos computacionais para teste da metodologia proposta. Os resultados obtidos indicam possibilidade de ganho financeiro por meio de uma logística eficiente da operação de sondas de intervenção quanto ao aproveitamento dos poços de petróleo.

Na fase inicial, procurou-se entender os principais aspectos inerentes às intervenções *offshore*, no que tange a suas causas e possíveis classificações. A partir de então, um estudo foi desenvolvido em que se buscou levantar o maior número possível de atributos para os poços, parâmetros para as sondas e restrições operacionais, com o objetivo de tornar o problema mais aderente à realidade. Obviamente, devido a sua complexidade, nem todas as características do problema real foram consideradas no modelo. Uma delas é a influência nas atividades de *workover* da clusterização de poços conforme as sondas de produção aos quais estão associados. Neste caso, a atuação de uma sonda de intervenção em um dado poço implicaria na intervenção em todos os demais poços pertencentes ao mesmo cluster.

Durante o estudo, almejou-se preencher uma lacuna existente na literatura, em que a maioria dos autores aborda o problema como de sequenciamento ou roteamento, de forma mutuamente exclusiva. Portanto, ambas as perspectivas são contempladas neste trabalho ao considerar significativo o deslocamento entre poços, além de restrições temporais inerentes às janelas de atendimento. Assim, fórmulas de cálculo apropriadas para o tempo de intervenção e perda total de óleo foram desenvolvidas.

Foi constatada a natureza estocástica do tempo de intervenção, e o conseqüente impacto nos métodos a serem utilizados. Diante disso, o emprego da Simulação-Otimização se tornou conveniente face esta imprevisibilidade aliada à complexidade de resolução do problema. Alternativamente, poderiam ser empregados métodos de otimização estocástica. Para a implementação da Simulação-Otimização, duas estratégias distintas foram utilizadas no método de Otimização: uma baseada em um algoritmo guloso, de rápida execução, e outra baseada na metaheurística GRASP, que, apesar de ser mais sofisticada, consome maior tempo de processamento. Independentemente do método de Otimização, uma única solução não foi possível de ser obtida, mas sim um conjunto de

“soluções esperadas”, bem como medidas de desempenho para a operação das sondas e estatísticas relacionadas às alocações dos poços às sondas.

Diante de diversas soluções, emergiu-se o desafio de se obter uma única, que incorporasse alguns atributos das demais, e que fosse de melhor qualidade. A estratégia utilizada para tanto consistiu na aplicação da Reconexão por Caminhos. Entretanto, isso somente foi possível para soluções em que o algoritmo guloso foi utilizado na Simulação-Otimização. Para as soluções processadas pelo GRASP, a Reconexão por Caminhos não gerou uma solução final de qualidade superior, uma vez que a qualidade delas já estava acima, inclusive, da solução final produzida a partir da Simulação-Otimização com o algoritmo guloso.

Pôde-se verificar que técnicas de Busca Local são eficientes para o aprimoramento da Reconexão por Caminhos. O Método de Descida (MD), apesar de consumir maior tempo de processamento, explora toda a vizinhança e, por isso, atinge melhores resultados do que o Método Randômico de Descida (MRD). Por outro lado, o MRD foi importante durante a implementação dos métodos para testar a correta delimitação das condições de contorno para a geração de vizinhos pelo MD, já que seu processo de realização de movimentos é trivial por ser aleatório. Para o PPSI, os movimentos de troca produzem melhores resultados para a maioria das instâncias testadas. Uma hipótese que justifica isso se baseia nas restrições de janela de tempo, que impedem grandes alterações nas ordens de atendimento dos poços provocados pelos movimentos de realocação.

Uma dificuldade encontrada na fase de experimentação computacional foi a indisponibilidade de um banco de dados público para alimentar a metodologia proposta. A contramedida pra tal foi a utilização de distribuições de probabilidades e regras de geração de dados artificiais, porém aderentes à realidade das bacias contempladas.

Como extensão deste trabalho, é interessante expandi-lo para um método dinâmico em que é possível reprogramar as intervenções solicitadas. O trabalho atual parte da premissa de que todas as demandas dos poços são conhecidas previamente, e não apresenta flexibilidade de reprogramação. Em vez disso, cada falha em um poço seria inicialmente analisada, em tempo real, e assim verificada a possibilidade de uma intervenção ser inserida no planejamento das atividades de manutenção. Uma vez inserida, o método deste trabalho seria acionado em um ambiente dinâmico, para determinar qual a sequência de poços para cada sonda. Dessa forma, a combinação dos métodos de Simulação-Otimização e Reconexão por Caminhos também estaria presente na resolução de problemas com alterações nos dados de entrada em tempo real.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, R. M. S.; CHIYOSHI, F. Y.. **Simulando operações de manutenção em poços de petróleo.** *In:* Anais do XVIII ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Niterói, 1998. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1998\\_ART340.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1998_ART340.pdf)>. Acesso em: 10/04/2009.

ALOISE, D. J.; ALOISE, D.; ROCHA, C. T. M.; RIBEIRO, C. C. C.; RIBEIRO, J. C.; MOURA, L. S. S.. **Scheduling workover rigs for onshore oil production.** *Discrete Applied Mathematics*, v. 154, n. 5, pp. 695-702, 2006. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.97.1950&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 18/07/2009.

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:* Anais do XXXIV SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro, 2002.

ALVES, V. R. F. M.; FERREIRA FILHO, V. J. M.. **Proposta de algoritmo genético para o problema de roteamento e sequenciamento de sondas de manutenção.** *In:* Anales del XIII CLAIO – Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa. Montevideo, 2006.

ANDRADE, M. R. Q.. **Um GRASP com Reconexão por Caminhos para a solução do problema da maximização da diversidade.** Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Niterói, 2004. Universidade Federal Fluminense. Disponível em: <[http://www.bdt.d.ndc.uff.br/tde\\_arquivos/41/TDE-2008-06-12T123156Z-1468/Publico/Marcos%20Andrade-dissert.pdf](http://www.bdt.d.ndc.uff.br/tde_arquivos/41/TDE-2008-06-12T123156Z-1468/Publico/Marcos%20Andrade-dissert.pdf)>. Acesso em: 04/01/2010.

BAKER, K. R.. **Introduction to Sequencing and Scheduling.** New York: John Wiley & Sons Inc, 1974.

BODIN, L. D., GOLDEN, B., ASSAD, A., BALL, E. M.. **Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art.** *Computers and Operations Research*, v. 10, n. 2, pp. 63-211, 1983.

BORCHARDT, M.. **Algoritmos evolucionários na solução do problema de programação de sondas de produção terrestre.** Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação). Natal, 2002. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em:

<[http://www.ccet.ufrn.br/prh22/trabalhos/dissertacao/2002/Marcia\\_Borchardt\\_PRH22\\_UFRN\\_M.pdf](http://www.ccet.ufrn.br/prh22/trabalhos/dissertacao/2002/Marcia_Borchardt_PRH22_UFRN_M.pdf). Acesso em: 10/04/2009.

CECILIANO, W. R. A.. **Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos). São Paulo, 2007. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3148/tde-09012008-160657>. Acesso em: 25/04/2009.

COSTA, L. R.. **Soluções para o problema de otimização de itinerário de sondas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Rio de Janeiro, 2005. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.petroleo.ufrj.br/lorde/?q=file/49/download/49>. Acesso em: 23/04/2009.

COSTA, L. R.. **Uma heurística de montagem dinâmica para o problema de otimização de itinerários de sondas**. In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Gramado, 2005. Disponível em: <<http://www.petroleo.ufrj.br/lorde/?q=file/74/download/74>. Acesso em: 23/04/2009.

CUNHA, C. B.. **Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). São Paulo, 1997. Universidade de São Paulo.

CURY, R. M.. **Uma abordagem difusa para o problema de *flow-shop scheduling***. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Florianópolis, 1999. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://www.eps.ufsc.br/teses99/cury>. Acesso em: 25/09/2009.

DE OLIVEIRA, M. J. F.; ASSUMPÇÃO, F. J. S.. **Introdução à simulação**. Notas de aula. Rio de Janeiro, 2001. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. DOU, DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **Legislação Federal - Lei Federal 11.097**. Brasília, 2005. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>. Acesso em: 16/12/2009.

DOURO, R. F.; LORENZONI, L. L.. **Um algoritmo genético-2opt aplicado ao problema de otimização de itinerário de sondas de produção terrestre**. In: Anais do XLI SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Porto Seguro, 2009. Disponível



em: <[http://sobrapo.org.br/simposios/XLI-2009/XLI\\_SBPO\\_2009\\_artigos/artigos/54493.pdf](http://sobrapo.org.br/simposios/XLI-2009/XLI_SBPO_2009_artigos/artigos/54493.pdf). Acesso em: 11/10/2009.

FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C.. **Greedy randomized adaptive search procedures**. Journal of Global Optimization, v. 6, pp. 109-133, 1995. Disponível em: <<http://www2.research.att.com/~mgcr/doc/gtut.pdf>. Acesso em 26/08/2010.

FREITAS, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. Florianópolis: Editora Visual Books, 2001.

FROTA, H. M.. **Desenvolvimento de método para planejamento da manutenção de poços petrolíferos em águas profundas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reservatório e de Exploração). Macaé, 2003. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Disponível em: <<http://www.lenep.uenf.br/HP/biblioteca/tese/tese/mestrado/Tese%20-%20Helder%20Mamede%20Frota.pdf>. Acesso em: 24/04/2009.

GAREY, M.R.; JOHNSON, D.S.. **Computers and intractability – a guide to the theory of NP-Completeness**. Nova Iorque: W. H. Freeman, 1979

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L.. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GOUVÊA, E. F.. **Transgenética computacional: um estudo algorítmico**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Rio de Janeiro, 2001. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

HORNYAK, O.; ERDELYI, F.; KULCSAR, G.. **Detailed scheduling and uncertainty management in customized mass production**. In: The 12th International Conference on Machine Design and Production. Kusadasi (Turkey), 2006. Disponível em: <[http://ait.iit.uni-miskolc.hu/~kulcsar/publications/06\\_OHEF\\_KulcsarGy\\_UMTIK.pdf](http://ait.iit.uni-miskolc.hu/~kulcsar/publications/06_OHEF_KulcsarGy_UMTIK.pdf). Acesso em 20/02/2010.

JUNKINS, J. L.; SHUSTER, M. D.. **The geometry of the euler angles**. The Journal of the Astronautical Sciences, v. 41, n. 4, pp. 531-543, 1993. Disponível em: <[http://home.comcast.net/~mdshuster/Pub\\_1993i\\_J\\_SphEuler\\_scan.pdf](http://home.comcast.net/~mdshuster/Pub_1993i_J_SphEuler_scan.pdf). Acesso em: 21/02/2010.

KIMURA, R. M.. **Indústria brasileira de petróleo: uma análise da cadeia de valor agregado**. Monografia (Bacharelado em Economia). Rio de Janeiro, 2005. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.prh21.ie.ufrj.br/pdfs/00033\\_](http://www.prh21.ie.ufrj.br/pdfs/00033_)

industria\_brasileira\_de\_petroleo\_uma\_analise\_da\_cadeia\_de\_valor\_agregado.pdf. Acesso em: 16/12/2009.

LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F.. **Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem**. International Transactions in Operational Research, v. 7, n. 4, pp. 285-300, 2000. Disponível em: <[http://www2.imm.dtu.dk/conferences/route2000/TexImpl/PDF/ABSTRACT\\_laporte.pdf](http://www2.imm.dtu.dk/conferences/route2000/TexImpl/PDF/ABSTRACT_laporte.pdf)>. Acesso em: 20/02/2010.

\_\_\_\_\_. **LORDE. Laboratório de otimização de recursos, de simulação operacional e de apoio a decisões na indústria do petróleo**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www.petroleo.ufrj.br/lorde>>. Acesso em: 20/02/2010.

LIMA, M. L.; MELO, J. D.; DÓRIA, A. D.. **Utilização de sistemas inteligentes baseados em aprendizagem por reforço para a otimização do problema do gerenciamento de sondas de produção terrestre**. In: Anais do III Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Salvador, 2004. Disponível em: <[http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0587\\_05.pdf](http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0587_05.pdf)>. Acesso em: 10/04/2009.

LINS, M. P. E.; CALÔBA, G. M.. **Programação linear: com aplicações em teoria dos jogos e avaliação de desempenho**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.

MAIA, R.; ALOISE, D.; SATORU, L.. **Sistema de apoio à decisão georreferenciado para o gerenciamento dinâmico das sondas de produção terrestre na bacia Potiguar**. In: II *Workshop* de Avaliação Anual dos PRH's. Natal, 2002. Disponível em: <<http://www.ccet.ufrn.br/prh22/workshops/2002/rosiery22m.pdf>>. Acesso em: 16/09/2009.

MIYASHITA, R.. **Desenvolvimento de um ambiente visual e interativo para modelagem e processamento de simulação a eventos discretos usando a abordagem DCA – três fases**. Tese (doutorado em Engenharia de Produção). Rio de Janeiro, 2002. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.eng.uerj.br/deptos/professor/215/tesemiyashita\\_final.pdf](http://www.eng.uerj.br/deptos/professor/215/tesemiyashita_final.pdf)>. Acesso em: 05/12/2009.

MONTGOMERY, D. C; RUNGER, G. C.. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

\_\_\_\_\_. **NABORS INDUSTRIES LTD. Rig fleet**. Disponível em: <[www.nabors.com/Public/Index.asp?Page\\_ID=10&skip\\_frames=0](http://www.nabors.com/Public/Index.asp?Page_ID=10&skip_frames=0)>. Acesso em 20/02/2010.

NATAL, A. C.. **Aplicação de programação matemática na racionalização do uso de sondas de perfuração e completação de poços de petróleo *off-shore***. Monografia

(graduação em Engenharia de Produção). Rio de Janeiro, 2003. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.anp.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH21/Andre-Correa-Natal\\_PRH21\\_UFRJ\\_G.pdf](http://www.anp.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH21/Andre-Correa-Natal_PRH21_UFRJ_G.pdf). Acesso em: 10/03/2009.

NEVES, T. A.. **Resolução do problema de roteamento de veículos com frota heterogênea e janelas de tempo**. Monografia (graduação em Ciência da Computação). Ouro Preto, 2004. Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <<http://www.iceb.ufop.br/decom/prof/marcone/Orientacoes/PRVFHJTviaSimulatedAnnealing.pdf>. Acesso em: 30/09/2009.

NEVES, T. A.; OCHI, L. S.. **GRASP com memória adaptativa aplicado ao problema de roteamento e *scheduling* de sondas de manutenção**. In: XXVII Congresso da SBC – Sociedade Brasileira de Computação. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.ic.uff.br/~satoru/conteudo/artigos/ENIA2007-Tiago.pdf>. Acesso em: 10/04/2009.

NORONHA, T. F.; ALOISE, D. J.. **Algoritmos e estratégias e solução para o problema do gerenciamento de sondas de produção terrestre na bacia petrolífera Potiguar**. REIC – Revista Eletrônica de Iniciação Científica, v. 1, n. 2, pp. 1-11, 2001. Disponível em: <<http://www.sbc.org.br/reic/edicoes/2001e2/cientificos/AlgoritmosEstrategiasdeSolucaoParaProblemaGerenciamentodeSondas.pdf>. Acesso em: 10/04/2009.

OLIVEIRA, E. F.; PAGOTO, F. B.; SILVA, F. T.; LORENZONI, L. L.. **Scatter search aplicado ao problema de otimização da alocação de sondas de produção em poços de petróleo**. In: Anais do XXVII ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu, 2007. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007\\_TR620461\\_9846.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR620461_9846.pdf). Acesso em: 10/04/2009.

PAIVA, R. O.. **Otimização do itinerário de sondas de intervenção com quantificação de perdas através de simuladores de reservatórios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Petróleo). Campinas, 1997. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <[http://www.unisim.dep.fem.unicamp.br/publicacoes/tese\\_mestrado\\_RonaldoPaiva.pdf](http://www.unisim.dep.fem.unicamp.br/publicacoes/tese_mestrado_RonaldoPaiva.pdf). Acesso em: 03/09/2009.

PRADO, D. S. **Teoria das filas e da simulação**. Belo Horizonte: Editora do Instituto de Desenvolvimento Gerencial, 2004.

RADCLIFFE, N. J.; SURRY, P. D.. **Formal memetic algorithms**. In: Evolutionary Computing: AISB Workshop. Scotland, 1994. Disponível em: <<http://www.stochastic-solutions.com/pdf/aisb94.pdf>>. Acesso em: 11/05/2010.

\_\_\_\_\_. **RIGZONE. Offshore rig day rates**. Disponível em: <[www.rigzone.com/data/dayrates](http://www.rigzone.com/data/dayrates)>. Acesso em: 01/05/2009.

RINNOOY KAN, A. H. G.. **Machine Scheduling Problems, Classification, Complexity and Computations**. The Hague: Nijhoff, 1976.

ROSENBLATT, L.. **Aplicação de dinâmica de sistemas ao estudo do comportamento das taxas diárias de aluguel de sondas de perfuração *off-shore***. Monografia (graduação em Engenharia de Produção). Rio de Janeiro, 2006. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.anp.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH21/Lucia-Roseblatt\\_PRH21\\_UFRJ\\_G.pdf](http://www.anp.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH21/Lucia-Roseblatt_PRH21_UFRJ_G.pdf)>. Acesso em: 11/08/2009.

ROSSETI, I. C. M.. **Estratégias sequenciais e paralelas de GRASP com Reconexão por Caminhos para o problema de síntese de redes a 2-caminhos**. Tese (Doutorado em Informática). Rio de Janeiro, 2003. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=4365@1](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=4365@1)>. Acesso em: 30/12/2009.

SCHAFFEL, S. B.. **A questão ambiental na etapa da perfuração de poços marítimos de óleo e gás no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Rio de Janeiro, 2002. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/schaffelsb.pdf>>. Acesso em: 23/09/2009.

SILVA, R. A.. **Estudo numérico e experimental visando desenvolvimento de dutos compósitos submarinos pela técnica de enrolamento filamentar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Rio de Janeiro, 2008. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://teses2.ufrj.br/Teses/COPPE\\_M/RaphaelAraujoDeFigueiredoESilva.pdf](http://teses2.ufrj.br/Teses/COPPE_M/RaphaelAraujoDeFigueiredoESilva.pdf)>. Acesso em: 23/09/2009.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R.. **Administração da produção**. 2ª edição. São Paulo: Atlas, 2008.

SOUZA, M. J. F. **Inteligência computacional para otimização**. Notas de aula. Ouro Preto, 2009. Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <<http://www.iceb.ufop>>.

br/decom/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf. Acesso em: 09/01/2010.

SUTTON, R. S.; BARTO, A. G.. **Reinforcement learning: an introduction**. The MIT Press, 1998. Disponível em: < <http://home.dei.polimi.it/bonarini/Didattica/SoftComputing/download/ReinforcementLearningSutton.pdf>. Acesso em: 11/05/2010.

THOMAS, J. E.. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

TRINDADE, V. A.. **Desenvolvimento e análise experimental da metaheurística GRASP para um problema de planejamento de sondas de manutenção**. Dissertação (Mestrado em Computação). Niterói, 2005. Universidade Federal Fluminense. Disponível em: <<http://www.ic.uff.br/PosGraduacao/Dissertacoes/273.pdf>. Acesso em: 10/04/2009.

TUBINO, D. F.. **Manual de planejamento e controle da produção**. 2ª edição. São Paulo: Atlas, 2000.

WATKINS, C. J. C. H.; DAYAN, P.. **Q-Learning: machine learning**. Kluwer Academic Publishers, v. 8, pp. 279-292, 1992.

XENOS, H. G.. **Gerenciando a manutenção produtiva**. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda, 2004.