



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

DAYAN DE CASTRO BISSOLI

UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA O
PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE
INTERVENÇÃO BI-OBJETIVO

SÃO MATEUS - ES

2014

DAYAN DE CASTRO BISSOLI

**UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE
ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO BI-
OBJETIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energia, na área de concentração em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador: Prof. Dr. Glaydston Mattos Ribeiro.

Co-Orientadora: Prof. Dra. Gisele de Lorena Diniz Chaves

SÃO MATEUS - ES

2014

UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO BI-OBJETIVO

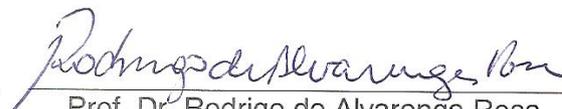
DAYAN DE CASTRO BISSOLI

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia, para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada: 18/08/2014.



Prof. Dr. Luciano Lessa Lorenzoni
Instituto Federal do Espírito Santo

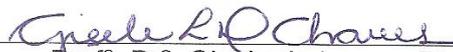


Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Roney Pignaton da Silva

Universidade Federal do Espírito Santo



Prof.ª Dr.ª Gisele de Lorena Diniz
Chaves

Universidade Federal do Espírito Santo
Co-orientadora



Prof. Dr. Glaydston Mattos Ribeiro
Universidade Federal do Rio de Janeiro
(Orientador)

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

B623u Bissoli, Dayan de Castro, 1987-
Uma abordagem heurística para o problema de roteamento
de sondas de intervenção bi-objetivo / Dayan de Castro Bissoli. –
2014.
107 f. : il.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro.
Coorientador: Gisele de Lorena Diniz Chaves.
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal
do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Otimização. 2. Sondas (Instrumentos eletrônicos). 3. Produção.
4. Petróleo. 5. Metaheurística. I. Ribeiro, Glaydston Mattos. II.
Chaves, Gisele de Lorena Diniz. III. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV.
Título.

CDU: 620.9

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pelo amor e apoio incondicional.

À Katia, pelo amor e força nas horas de dificuldade. Pelo seu companheirismo e compreensão nos momentos distantes.

Aos orientadores Glaydston e Gisele, pelas oportunidades cedidas, pelos conselhos e rumos ministrados.

Aos demais professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Energia-UFES, os quais deram as bases para obtenção do aprendizado.

Aos colegas de mestrado, que me acompanharam nesta jornada.

A todos meus amigos, pelo incentivo e força.

À Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional.

À CAPES pelo fomento financeiro indispensável para realização deste trabalho.

RESUMO

Ao longo da vida produtiva dos poços de petróleo, geralmente são necessárias intervenções, designadas genericamente de *workovers*, realizadas por sondas de intervenção que por sua vez, são recursos escassos e de alto custo, com o objetivo de manter a produção ou eventualmente melhorar a produtividade. Dado um conjunto de poços terrestres requerendo manutenção e uma frota heterogênea de sondas, cada sonda com uma posição inicial específica, o Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção (PRSI) consiste em determinar rotas viáveis para as sondas de modo que a perda total de produção dos poços dentro de um horizonte de planejamento seja minimizada. A rota de uma sonda é considerada viável se ela apresenta os equipamentos necessários para realizar todas as manutenções associadas aos poços programados, e se respeita o horizonte de planejamento estipulado. Na literatura, verifica-se que muitos autores propuseram modelos e métodos de solução para o PRSI mono-objetivo, ou seja, que buscam minimizar apenas a perda total de produção, não considerando os custos envolvidos na locação das sondas de intervenção. Sendo assim, busca-se neste trabalho estudar o PRSI bi-objetivo que minimiza a perda total de produção dos poços e o custo com aluguel das sondas. A metaheurística *Adaptive Large Neighborhood Search* foi implementada para este problema e resultados computacionais foram obtidos considerando instâncias propostas na literatura assim como a partir de novas instâncias propostas neste trabalho, de modo a aproximar o problema do real contexto operacional. Os resultados dessa pesquisa mostram que, embora a minimização da perda total de produção seja um objetivo muito importante, a variação do custo de locação das sondas, assim como a cotação do petróleo, impactam no processo de definição das rotas.

PALAVRAS CHAVE. *Sondas de Intervenção. Adaptive Large Neighborhood Search. Otimização Multi-objetivo.*

ABSTRACT

Throughout the productive life of oil wells, some interventions known as workovers are usually necessary. These repairs, are held by intervention rigs and are essential to maintain production or possibly improve it, these being scarce and expensive. Given a set of wells requiring maintenance and a heterogeneous fleet of rigs, each rig with a specific starting position, the Workover Rig Routing Problem (WRRP) consists in finding routes for the rigs so that the total loss of production of wells within a planning horizon is minimized. The route of a rig is considered feasible if it has the necessary equipment to carry out all the maintenance of associated wells and respect the stipulated planning horizon. In the literature, many authors have proposed models and solution methods for the WRRP mono-objective, i.e., trying to minimize just the total loss of production, not considering the rental of rigs. Therefore, this paper studies the WRRP bi-objective which minimizes both the total loss of production of the wells and the rental costs of rigs. We implemented an Adaptive Large Neighborhood Search metaheuristic for this problem, which was tested considering instances proposed in the literature as well as from new situations proposed in this paper, in order to approach the problem in real-life context. The results of this research show that although the minimization the total loss of production is an a very important objective, the variation of the rental cost of the probes and as oil prices affect in the definition process of routes.

KEYWORDS. Workover Rigs. Adaptive Large Neighborhood Search. Multi-objective Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sonda realizando intervenção.	14
Figura 2 – Transporte de uma sonda de intervenção.	14
Figura 3 – Comparação entre sondas heterogêneas e homogêneas por gráficos representativos de conjuntos e subconjuntos.	15
Figura 4 – Os principais componentes de perdas em campos de petróleo	20
Figura 5 – Situação hipotética ideal versus distribuição real de sondas.....	26
Figura 6 – Abordagens do prsi encontradas na literatura.	29
Figura 7 – (a) Localização dos poços e sondas e (b) Rota ótima para a instância com 100 poços e 10 sondas.	35
Figura 8 - Exemplo de aplicação da metaheurística alns.....	48
Figura 9 – Heurística <i>adaptive large neighborhood search</i>	50
Figura 10 – Heurística de remoção shaw.	53
Figura 11 - Exemplo de aplicação da heurística de remoção aleatória	54
Figura 12 – Heurística de remoção do pior.....	55
Figura 13 – Heurística de remoção de cluster.	56
Figura 14 – Convergência da meta-heurística alns – variação da perda de produção das soluções aceitas durante o processo de busca do alns em função do número de iterações. Instância utilizada: 200w_10r_1_300ph.	62
Figura 15 – Variáveis analisadas em ambos os cenários.....	87
Figura 16 – Análise da cotação do m ³ de petróleo <i>versus</i> n ^o de sondas e poços atendidos <i>versus</i> custo total – instância 100w_5r_360ph.....	89
Figura 17 – Análise da cotação do m ³ de petróleo <i>versus</i> n ^o de sondas e poços atendidos <i>versus</i> custo total – instância 200w_10r_720ph.....	89
Figura 18 – Análise do custo de aluguel das sondas <i>versus</i> n ^o de sondas e poços <i>versus</i> custo total.– instância 100w_5r_360ph.	91

Figura 19 – Análise do custo de aluguel das sondas *versus* nº de sondas e poços
versus custo total – instância 200w_10r_720ph.91

Figura 20 – Regressão linear da cotação do metro cúbico de petróleo entre
janeiro/2009 a abril/2014 105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise da quantidade de iterações	61
Tabela 2 – Comparação dos resultados gerados pelo alns mono-objetivo com os resultados gerados pelo bcp (ribeiro; desaulniers; desrosiers, 2012) – instância com 100 poços, 5 sondas e 200 unidades de horizonte de planejamento.	64
Tabela 3 – Comparação dos resultados gerados pelo alns mono-objetivo com os resultados gerados pelo bcp (ribeiro; desaulniers; desrosiers, 2012) – instância com 100 poços, 10 sondas e 200 unidades de horizonte de planejamento.	65
Tabela 4 – Comparação dos resultados gerados pelo alns mono-objetivo com os resultados gerados pelo bcp (ribeiro; desaulniers; desrosiers, 2012) – instância com 200 poços, 5 sondas e 200 unidades de horizonte de planejamento.	66
Tabela 5 – Comparação dos resultados gerados pelo alns mono-objetivo com os resultados gerados pelo bcp (ribeiro; desaulniers; desrosiers, 2012) – instância com 200 poços, 10 sondas e 200 unidades de horizonte de planejamento.	67
Tabela 6 – Comparação dos resultados gerados pelo alns mono-objetivo com os resultados gerados pelo bcp (ribeiro; desaulniers; desrosiers, 2012) – instância com 100 poços, 5 sondas e 300 unidades de horizonte de planejamento.	68
Tabela 7 – Comparação dos resultados gerados pelo alns mono-objetivo com os resultados gerados pelo bcp (ribeiro; desaulniers; desrosiers, 2012) – instância com 100 poços, 10 sondas e 300 unidades de horizonte de planejamento.	69
Tabela 8 – Comparação dos resultados gerados pelo alns mono-objetivo com os resultados gerados pelo bcp (ribeiro; desaulniers; desrosiers, 2012) – instância com 200 poços, 5 sondas e 300 unidades de horizonte de planejamento.	70

Tabela 9 – Comparação dos resultados gerados pelo alns mono-objetivo com os resultados gerados pelo bcp (ribeiro; desaulniers; desrosiers, 2012) – instância com 200 poços, 10 sondas e 300 unidades de horizonte de planejamento.	71
Tabela 10 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 100 poços, 5 sondas, ph=360 e custo da sonda=90000 com frota homogênea.....	76
Tabela 11 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 100 poços, 10 sondas, ph=360 e custo da sonda=90000 com frota homogênea.....	76
Tabela 12 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 200 poços, 5 sondas, ph=360 e custo da sonda=90000 com frota homogênea.....	77
Tabela 13 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 200 poços, 10 sondas, ph=360 e custo da sonda=90000 com frota homogênea.....	77
Tabela 14 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 100 poços, 5 sondas, ph=720 e custo da sonda=180000 com frota homogênea.....	78
Tabela 15 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 100 poços, 10 sondas, ph=720 e custo da sonda=180000 com frota homogênea.....	78
Tabela 16 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 200 poços, 5 sondas, ph=720 e custo da sonda=180000 com frota homogênea.....	79
Tabela 17 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 200 poços, 10 sondas, ph=720 e custo da sonda=180000 com frota homogênea.....	79
Tabela 18 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 100 poços, 5 sondas, ph=360 e custo da sonda=90000 com frota heterogênea.....	81

Tabela 19 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 100 poços, 10 sondas, ph=360 e custo da sonda=90000 com frota heterogênea.....	81
Tabela 20 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 200 poços, 5 sondas, ph=360 e custo da sonda=90000 com frota heterogênea.....	82
Tabela 21 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 100 poços, 10 sondas, ph=360 e custo da sonda=90000 com frota heterogênea.....	82
Tabela 22 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 100 poços, 5 sondas, ph=720 e custo da sonda=180000 com frota heterogênea.....	83
Tabela 23 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 100 poços, 10 sondas, ph=720 e custo da sonda=180000 com frota heterogênea.....	83
Tabela 24 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 200 poços, 5 sondas, ph=720 e custo da sonda=180000 com frota heterogênea.....	84
Tabela 25 – Média dos resultados do alns para o prsi bi-objetivo para instância com 200 poços, 10 sondas, ph=720 e custo da sonda=180000 com frota heterogênea.....	84
Tabela 26 - Resultados da média de cada grupo de instâncias, que foram executadas 5 vezes para cada instância pelo alns.....	86
Tabela 27 – Layout dos arquivos das novas instâncias.....	106

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVO GERAL	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO	18
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
2.2 COMPONENTES DA PERDA DE PRODUÇÃO	19
2.3 IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO DOS POÇOS DE PETRÓLEO	21
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
3 REVISÃO DE LITERATURA SOBRE O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO	28
3.1 PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO	29
3.2 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO	32
3.3 PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS MULTIOBJETIVO	37
4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO BI-OBJETIVO.....	42
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	42
4.2 MODELO MATEMÁTICO	43
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
5 METAHEURÍSTICA ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH HEURISTIC	47
5.1 ALNS PARA O PRSI-BO.....	49
5.2 SOLUÇÃO INICIAL	50
5.3 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO, DE PARADA E RECÁLCULO DOS PESOS	50
5.4 HEURÍSTICAS DE REMOÇÃO E DE CONSTRUÇÃO.....	52
5.4.1 Heurística de remoção shaw baseada em tempos de chegada.....	52
5.4.2 Heurística de remoção shaw baseado em distâncias	53

5.4.3	Heurística de remoção aleatória	53
5.4.4	Heurística de remoção do pior	54
5.4.5	Remoção de cluster	55
5.4.6	Remoção utilizando um dígrafo de vizinhos.....	56
5.4.7	Remoção baseada nos poços mais selecionados conforme histórico	57
5.4.8	Algoritmo de inserção guloso	57
5.4.9	Heurística de inserção gulosa básica.....	57
5.4.10	Heurística de inserção gulosa míope	58
6	RESULTADOS COMPUTACIONAIS	59
6.1	PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO ALNS	59
6.2	RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI MONO-OBJETIVO	62
6.3	PROPOSTAS DE NOVAS INSTÂNCIAS	72
6.4	RESULTADOS - FROTA HOMOGÊNEA	74
6.5	RESULTADOS - FROTA HETEROGÊNEA	80
6.6	ANÁLISE DO TRADEOFF ENTRE PERDA DE PRODUÇÃO E ALUGUEL DE SONDAS HETEROGÊNEAS	85
6.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A.....	105
	APÊNDICE B.....	106

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é um recurso natural de grande importância para a sociedade. Seu uso como fonte energética é amplamente difundido em todo o mundo. No Brasil, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (2013), o petróleo representava 38,5% da matriz energética no ano de 2012.

O mercado de petróleo é bastante competitivo, e somando-se a isso, a característica de ser um recurso não-renovável exige que sua exploração seja bastante eficiente, de modo que os custos sejam minimizados, e os recursos melhores aproveitados. Dessa forma, problemas relacionados à exploração de petróleo tornam-se um grande desafio para as empresas. Dentre estes problemas, esta dissertação busca estudar e propor uma nova abordagem para a alocação de sondas de intervenção em poços de petróleo *onshore* que melhor se adequem a situação real.

1.1 Contextualização e Justificativa

A exploração de petróleo e gás do subsolo, seja em terra (*onshore*) ou mar (*offshore*), é uma atividade de elevado custo, pois requer mão-de-obra especializada, alta tecnologia e equipamentos sofisticados. De acordo com Thomas (2001), ao longo da vida produtiva dos poços, geralmente são necessárias intervenções designadas genericamente de *workover*, com o objetivo de manter a produção ou eventualmente melhorar a sua produtividade.

Quando há necessidade de intervenções com sonda, estas geralmente visam corrigir falhas mecânicas na coluna de produção ou revestimento, restrições que causam redução de produtividade, excesso de gás ou água e produção de areia. As intervenções de *workover* costumam ser classificadas como: avaliação, recompletação, restauração, limpeza, estimulação e mudança no método de elevação e abandono (THOMAS, 2001).

Aloise *et al.* (2006) afirmam que sondas de *workover* (intervenção) são unidades móveis que se deslocam a uma baixa velocidade (cerca de 20 km/h). Devido aos seus elevados custos de aluguel, existem relativamente poucas sondas de

intervenção em comparação com o número de poços necessitando atendimento e, por isso, deve-se estabelecer uma associação entre poços e sondas, de forma que minimize o custo de operação. A Figura 1 mostra uma sonda realizando intervenção e na Figura 2 é possível verificar as características do veículo que faz o seu transporte.



Figura 1 – Sonda realizando intervenção.
Fonte: Aloise *et al.*, (2006, p. 696)



Figura 2 – Transporte de uma sonda de intervenção.
Fonte: Aloise *et al.*, (2006, p. 696)

Uma vez que vários tipos de manutenção devem ser realizadas por estes equipamentos (limpeza, estimulação, reintegração, etc), os níveis de serviço devem ser considerados, principalmente, quando estas sondas são heterogêneas (DUHAMEL; SANTOS; GUEDES, 2012). Níveis de serviço são relacionados com a capacidade das sondas em realizar determinados tipos de serviços. Dessa forma, considera-se a possibilidade de haver sondas que realizam serviços específicos, i.e., a frota pode ser heterogênea.

A Figura 3 mostra a diferença entre considerar as sondas como heterogêneas e homogêneas. No caso do exemplo da figura da esquerda, a sonda de nível 3 tem capacidade de atender qualquer poço (representados pelos pontos) por outro lado, as de níveis mais baixos estão restritas a subconjuntos aninhados do espaço de busca, onde uma sonda de nível mais alto pode atender todos os poços de uma sonda de nível mais baixo em capacidade. Na direita temos o caso das sondas homogêneas, que pode ser considerado como um caso particular das sondas heterogêneas onde o nível de qualquer uma das sondas é maior ou igual à necessidade de manutenção de qualquer um dos poços.

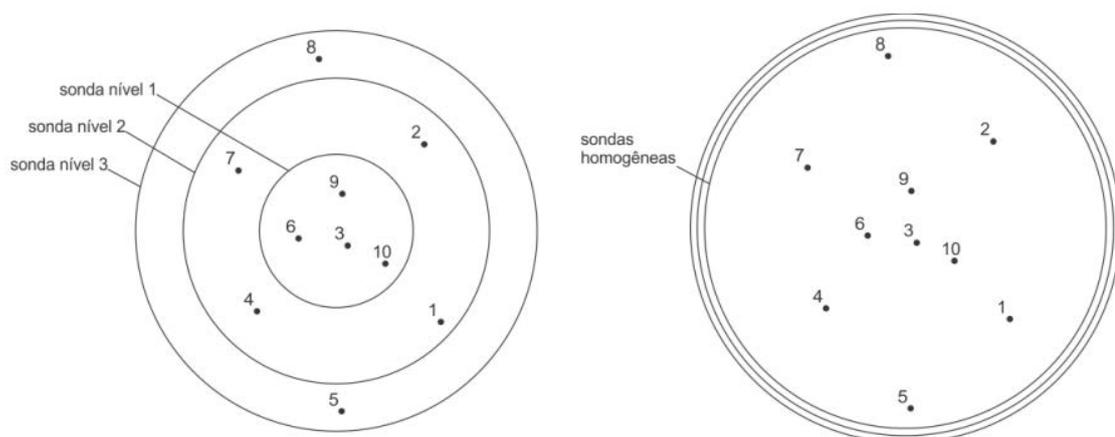


Figura 3 – Comparação entre sondas heterogêneas e homogêneas por gráficos representativos de conjuntos e subconjuntos.

Fonte: Soares, Costa e Aloise (2011, p. 2207)

Portanto, dado um conjunto de poços requerendo manutenção e uma frota heterogênea de sondas distribuídas pelos campos de poços, isto é, cada sonda com uma posição inicial específica, o Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção (PRSI) consiste em determinar rotas viáveis para as sondas de modo que a perda total de produção dos poços ao longo de um determinado período de tempo seja minimizada. Uma rota é viável para uma sonda quando sua duração, incluindo os tempos de serviço, não excede o horizonte de planejamento, e quando cada poço é atendido por, no máximo, uma sonda. A rota de uma sonda inicia na posição inicial e termina na localização do último poço visitado (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012).

Problemas de roteamento, como o PRSI, normalmente possuem um único objetivo que, geralmente, está associado ao custo da solução. Entretanto, os objetivos nem

sempre se limitam ao custo. Na verdade, muitos outros aspectos, tais como o equilíbrio da carga de trabalho das equipes envolvidas, redução da distância percorrida, redução da jornada de trabalho, entre outros, podem ser levados em consideração, simplesmente por adição de novos objetivos. Nesse contexto, alguns trabalhos estudam a inclusão de novos objetivos, denominado problemas multiobjetivo (JOZEFOWIEZ; SEMET; TALBI, 2008a; JOZEFOWIEZ; SEMET; TALBI, 2008b).

1.2 Objetivo Geral

O objetivo desse estudo é aproximar o problema clássico de roteamento de sondas de intervenção ao real contexto operacional dos campos petrolíferos *onshore*, adicionando ao objetivo clássico do problema que minimiza a taxa de perda de produção, o objetivo que visa minimizar o custo com aluguel de sondas. Para solucionar este problema bi-objetivo, foi necessário implementar uma metaheurística, neste caso o *Adaptive Large Neighborhood Search* ALNS.

1.3 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos estão:

- a) Classificar os problemas encontrados relacionados ao PRSI;
- b) Aperfeiçoar um modelo matemático para o PRSI bi-objetivo (PRSI-BO), para minimização do custo da perda de produção e a custo de sondas;
- c) Implementar e adaptar a metaheurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) para o PRSI-BO;
- d) Avaliar o desempenho do ALNS em relação aos apresentados em Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012);
- e) Propor novas instâncias, para a criação de cenários mais próximos do problema real; e

- f) Comparar os resultados do ALNS para diferentes cenários, de forma a avaliar o impacto da variação no preço do barril de petróleo e do custo de aluguel das sondas para a tomada de decisão.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. No presente capítulo, apresentou-se a introdução do assunto em questão, seguido da contextualização e justificativa, e dos objetivos gerais e específicos.

No Capítulo 2, faz-se a descrição do problema de roteamento de sondas, com a descrição de algumas informações gerais sobre o tema. Esse capítulo aborda os componentes da perda de produção, bem como a importância da manutenção de poços de petróleo.

No Capítulo 3, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o problema de roteamento de sondas de intervenções. Realiza-se uma classificação dos trabalhos em problema de programação de sondas de intervenção e problema de roteamento de sondas de intervenção. Além disso, são destacados estudos de adição de novos objetivos a problemas clássicos de roteamento de veículos, de modo a sustentar a proposta da formulação matemática que é apresentada no próximo capítulo.

No Capítulo 4 é proposto o modelo matemático para o problema de roteamento de sondas bi-objetivo. Na sequência, descreve-se, no Capítulo 5, a metaheurística ALNS implementada, utilizada para solucionar o PRSI-BO.

No Capítulo 6 são apresentados os parâmetros utilizados na calibração do ALNS. Além disso, é explicado o processo de criação das novas instâncias. Análises de cenários são realizadas a partir dos resultados gerados com a aplicação do ALNS às novas instâncias.

Por fim, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são sintetizadas no Capítulo 7.

2 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde a sua descoberta, o petróleo tem sido uma das matérias-primas industriais mais importantes, com uma grande influência no desenvolvimento da economia global. Grandes investimentos em novas tecnologias têm sido feitos para promover a extração eficaz, segura e rentável.

A indústria do petróleo é formada, de uma forma macro, 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).

De acordo com Rosenblatt (2006), uma vez identificada a existência de petróleo em um poço, este é avaliado quanto aos aspectos técnicos e econômicos para uma possível declaração de comercialização. Assim, novos poços são, então, perfurados com intuito de 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, inicia-se o 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.

Maior eficiência na exploração de campos de petróleo pode ser alcançada através de uma utilização racional dos recursos, especialmente os mais escassos. Algumas das atividades mais importantes e caras durante as fases de

desenvolvimento e produção de campos de petróleo estão relacionados ao uso de sondas (BASSI; FERREIRA FILHO; BAHIENSE, 2012). A utilização de sondas nos poços de petróleo *onshore* se dá principalmente para perfuração e para *workover*. No primeiro caso, as sondas de perfuração demandam um tempo prolongado para a realização dos trabalhos e, em função disso, a programação destas sondas altera-se pouco, pois envolve decisões planejadas. Neste caso, a decisão envolve estrategicamente a relação custo *versus* benefício para a perfuração do dado poço. No segundo caso, as sondas de *workover* não demandam um tempo prolongado e precisam manter os poços executando as atividades previstas de maneira otimizada. Como normalmente são muitos poços solicitando atendimento que se encontram distribuídos espacialmente, uma das variáveis que influencia na definição da sequência de atendimento é o tempo de deslocamento entre um poço e outro que é função do veículo e das condições da via. Em muitos casos, como na região norte do Estado do Espírito Santo, as vias são não pavimentadas (na maioria dos casos, em leito natural) e os veículos de transporte são antigos, conforme apresentado na Figura 2 (COSTA; FERREIRA FILHO, 2005; ALOISE *et al.*, 2006).

2.2 COMPONENTES DA PERDA DE PRODUÇÃO

Nas regiões Sudeste e Nordeste do Brasil, os poços de petróleo *onshore* utilizam métodos de elevação artificial, que consiste em estimular o poço para elevar ou manter sua produtividade. Estimulação e elevação artificial são as duas principais atividades na indústria de petróleo e afins. No entanto, o principal objetivo do estímulo é agregar valor ao produto pela entrega mais rápida do fluido e/ou para aumentar a recuperação econômica final (ECONOMIDES; NOLTE, 2000). Os procedimentos da operação do campo petrolífero são normalmente afetados por alguns fatores que levam a grandes perdas de produção, como o tempo de inatividade do processo de operação (SONATRACH; FORAGE, 2007). Tais fatores são mostrados na Figura 4.

As perdas nas intervenções estão relacionadas às sondas, isto é, custos gerados a partir do seu tempo de deslocamento, ou mesmo sua ociosidade. Na elevação artificial também podem ocorrer perdas, como falhas em equipamentos e problemas relacionados ao bombeio centrífugo submerso. Outros tipos de perdas também são considerados, desde a operação da produção, até fatores políticos.

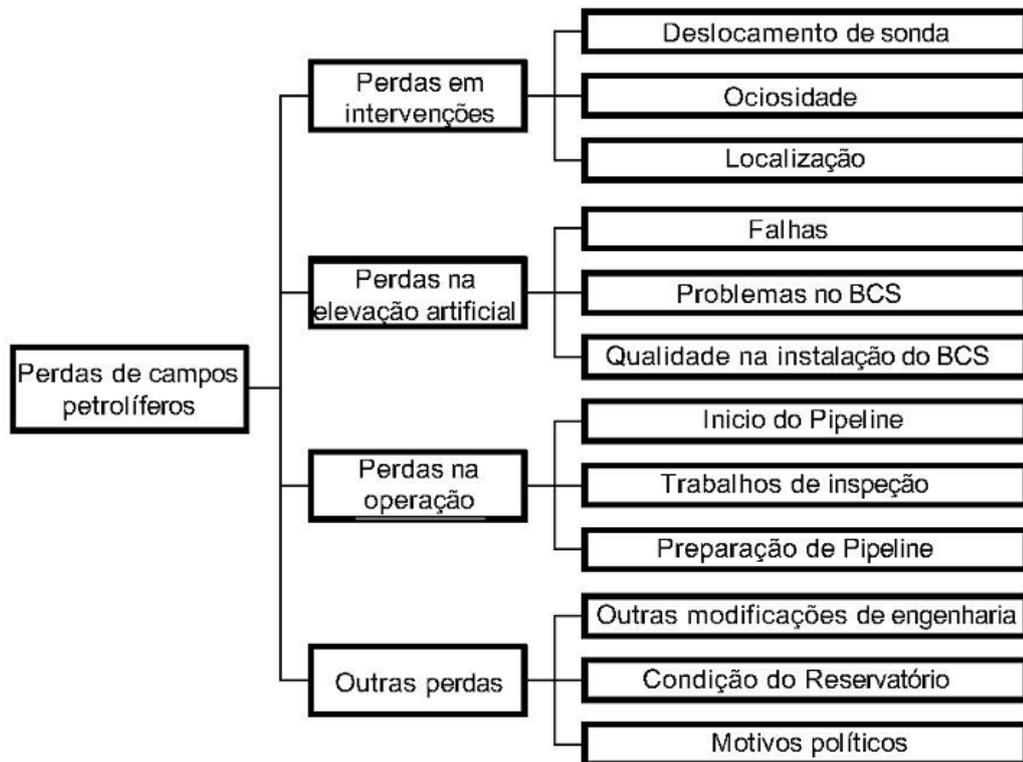


Figura 4 – Os principais componentes de perdas em campos de petróleo
 Fonte: Adaptado de Mansour *et al.*, (2013, p. 207)

O óleo é produzido com equipamento de alto custo, que opera sob condições difíceis por um longo período de tempo. O equipamento e os poços de petróleo necessitam de serviços de manutenção ao longo do tempo, tais como a limpeza, substituição e estímulo (Bombeio Centrífugo Submerso – BCS – é um recurso amplamente utilizado como método de elevação artificial com o objetivo de estimular a produção), que são essenciais para alcançar a maior eficiência possível. Outros serviços são mudança de método de elevação e abandono do poço (THOMAS, 2001; NORONHA; ALOISE, 2001; ALOISE *et al.*, 2006). Intervenções de *workover* são encaminhadas para essas operações que são realizadas para resolver problemas específicos que são encontrados depois que a produção já foi iniciada (KEN; STEWART, 1987; GÁBOR, 1999).

Workover geralmente envolve uma sonda de serviço para resolver os problemas nos poços de petróleo, com uma programação proposta. Estes serviços são realizados por sondas de intervenção, como mencionado no Capítulo 1. O custo de uma sonda é influenciado pela quantidade de equipamento necessário para a operação, pela profundidade e pelo tipo de operação.

O óleo pode ser elevado por diferentes técnicas, que requerem equipamento especializado que opera sob condições difíceis, por longos períodos de tempo. A rentabilidade de um poço depende de quanto tempo ele está em fluxo e de quanto ele produz, devido às características iniciais do reservatório. No entanto, esses equipamentos também são responsáveis por manter o poço em boas condições de funcionamento. Falhas nestes equipamentos ao longo do tempo necessitam de serviços de manutenção que são essenciais para a exploração dos poços (RIBEIRO; MAURI; LORENA, 2011).

Operações de rotina em um poço produtor deve incluir uma série de programas de monitoramento e de segurança, as tarefas de manutenção e assistência técnica periódica de poços usando uma *wireline* (ferramenta de perfilagem) ou uma sonda de intervenção para manter a produção. Segundo Accioly e Chiyoshi (2000) e Srivastava (2010), uma sonda de intervenção é uma unidade móvel compacta anexa a algum outro equipamento externo para a preparação de lama e de geração de energia, etc. Essa unidade é muito importante na produção de petróleo/gás, realizando uma variedade de operações corretivas em um poço de óleo/gás como requisito técnico, com a intenção de recuperar ou aumentar a produção.

2.3 IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO DOS POÇOS DE PETRÓLEO

A manutenção de poços abrange todas as operações que podem ser executadas para manter ou adaptar o poço para manter as melhores condições de operação possíveis (ONGC, 2012). As estatísticas de operação de intervenções mostram uma frequência de uma ruptura em cada 2.500 intervenções de poços de petróleo, e um por 1000 para operações em poço de gás. Ruptura é um problema que pode

surgir em poços em produção, no qual tendem a ocasionar instabilidade no interior destes, o que se procura evitar por motivos de riscos e produtividade. A intervenção é um procedimento de manutenção que requer serviço em um poço produtor depois do fluxo de hidrocarboneto está parado (UNEP IE/PAC, 1997).

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

- Baixa produtividade;
- Produção excessiva de gás;
- Produção excessiva de água;
- Produção de areia;
- Falhas mecânicas em quaisquer componentes integrantes do poço;
- Formação de hidratos na árvore de natal ou na linha de surgência. De uma forma geral, a árvore de natal é um conjunto de válvulas que controla o fluxo de óleo e gás, sendo instalada na cabeça do poço. É interligada a uma plataforma de produção ou a um *manifold* por uma linha de surgência, isto é, poço no qual o petróleo sobe à superfície espontaneamente, em função da pressão existente no reservatório;
- Deposição de parafina na linha de surgência;
- Remanejamento de poços (decisão gerencial); e
- Abandono provisório ou definitivo.

Thomas (2001) acrescenta que as atividades de *workover* visam, eventualmente, melhorar a produtividade do poço. Em nível de classificação, Thomas (2001) divide as intervenções nas seguintes atividades:

- 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;

- **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;
- **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;
- **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;
- **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;
- **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; e
- **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 minimizar riscos de acidentes e danos ao meio ambiente.

A perda de produtividade de um poço pode ser causada por diversos fatores (COCHRANE, 1989). Operações de manutenção podem ser relacionadas por motivos operacionais, como uma queda anormal da produção; sonda prematuramente desgastada ou obsoleta; ou mesmo por ter perdido algum equipamento, onde se utiliza a técnica de “pescaria” (obtenção de qualquer ferramenta, equipamento ou outro item qualquer perdido acidentalmente ou preso no poço) (PERRIN, 1999).

De acordo com ONGC (2012), intervenções são realizadas por duas razões principais: problemas mecânicos ou problemas relacionados com reservatório. Problemas mecânicos inclui o reparo/substituição de equipamento danificado, substituir equipamentos de elevação artificial, trabalhos de pescaria, manutenção de poços, reparação de cimento, recompletação, remoção de depósitos no interior do poço e perfuração, limpeza de bloqueio/danos na coluna de produção do poço.

Os problemas de reservatório incluem transferência de zona, estimulação, conversão do poço de produção para injeção, reparar danos naturais gerados dentro do poço (danos na rocha reservatório, como dano na formação do poço, produção de areia, produção excessiva de gás, e produção excessiva de água, por exemplo) (KALFAYAN, 2000; MEDEIROS; TREVISAN, 2005; ONGC, 2012).

O tipo de operação é importante, pois cada operação demanda um tempo para realização. As intervenções de completação, por exemplo, podem ser mais estratégicas, e demandam 15 dias de operação, em média. A recompletação (mudança da zona de produção dos poços) e a restauração (conjunto de técnicas utilizadas para o aumento da produção dos poços) são procedimentos também demorados e que variam de 5 a 15 dias. Já as operações de limpeza e estimulação de poços podem ser realizadas com 2 dias de trabalho. A recuperação avançada, no qual a equipagem e desequipagem para vapor é requerida, também é importante, pois o vapor é um recurso crítico para a estimulação do poço (imersão) (ARNOLD; STEWART, 1999; MANSOUR *et al*, 2013).

Sondas de intervenção podem trazer benefícios com relação a atrasos no cronograma (estimativa) de produção e a poços inativos, com alta taxa de perda de produção, devido a perda de tempo. As perdas são compostas do deslocamento da sonda, ociosidade da sonda e desligamento, que estão relacionados a razões de segurança, as condições meteorológicas e as perdas devido a sonda no local (ARNOLD; STEWART, 1999; MANSOUR *et al*, 2013).

O programa de intervenção é um procedimento ordenado passo-a-passo a ser seguido, para alcançar o objetivo necessário de forma segura, com custo mínimo associado a recursos (KEN; STEWART, 1987; SPOERKER; DOSCHEK, 2005). Portanto, quando há necessidade da utilização de sondas, a rota deve ser planejada cuidadosamente para maximizar a lucratividade, ou seja, reduzir os custos de utilização das sondas, mas garantindo evitar as perdas de produtividade.

Deve-se atentar para o tipo de operação, pois quando ocorre a cimentação de um poço, por exemplo, deve-se aguardar 24 horas, no mínimo, para o processo de cura do cimento. Se houver necessidade de outra atividade de curta duração em um outro poço (limpeza e estimulação, por exemplo) e que esteja próximo do poço atendido, pode ser mais viável economicamente deslocar a sonda para este novo serviço enquanto ocorre o processo de cura do cimento.

Além disso, cada poço possui um tempo limite definido para realização do serviço de manutenção, e a sonda deve iniciar o atendimento antes que esse prazo esteja esgotado para evitar problemas permanentes para o poço. Além disso, as sondas se localizam em diferentes posições, podendo levar um tempo considerável para alcançar os poços (RIBEIRO; LAPORTE; MAURI; 2012). A perda de tempo nos procedimentos de intervenção e na instalação e retirada de bombeio centrífugo submerso, que afetam a produção dos poços de petróleo, devem ser eliminados de forma a reduzir o custo. Isto reduz os custos de intervenção e aumenta o número de dias em que o poço produz sem interrupções. Mansour *et al.* (2013) propôs um método prático para avaliar a performance operacional das sondas de intervenção e apresenta uma abordagem para medir a eficácia global do equipamento baseado nos resultados do método de avaliação. Esse estudo apoia esforços contínuos em melhorias de processos e liderança de custos em campos petrolíferos.

Todos estes fatores devem ser considerados em conjunto, o que gera complexidade na tomada de decisão pelos gestores. A decisão de qual sonda alocar a uma determinada solicitação de serviço depende de fatores como: potencial produtivo do poço, localização geográfica da sonda em relação ao poço, tempo de intervenção no poço, questões de risco ambiental e segurança e limitação técnica das sondas em relação ao tipo de intervenção visto que a frota de sondas pode não ser homogênea (SILVA; LORENZONI, 2011; NORONHA; ALOISE, 2001). Os riscos ambientais podem ser decorrentes da demora de atendimento ou por falhas na manutenção preventiva (SABRY; GOLDBARG; GOLDBARG, 2012). Especialistas na programação de sondas para o Espírito Santo apontam que, para minimizar os custos totais, deve-se avaliar a viabilidade da alocação das sondas segundo uma ordem de prioridade. Primeiramente, ou seja, mais importante, é a produtividade de um poço, seguida da necessidade de equipagem e desequipagem para uma dada operação, seguida da distância entre

os poços. No entanto, esta ordem de prioridade deve ser feita considerando um dado tipo de operação, que requer um tempo específico, o tipo da sonda para realizar esta operação e seu custo. Além disso, a programação não é estática, ou seja, ela é influenciada por problemas (mecânicos e naturais) que surgem ao longo do tempo e que podem alterar a ordem de prioridade de serviço nos poços.

Em uma situação hipotética ideal, em que a quantidade de sondas disponíveis é igual ao número de poços que demandam intervenções, Bassi, Ferreira Filho e Bahiense (2012) 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 5, 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.

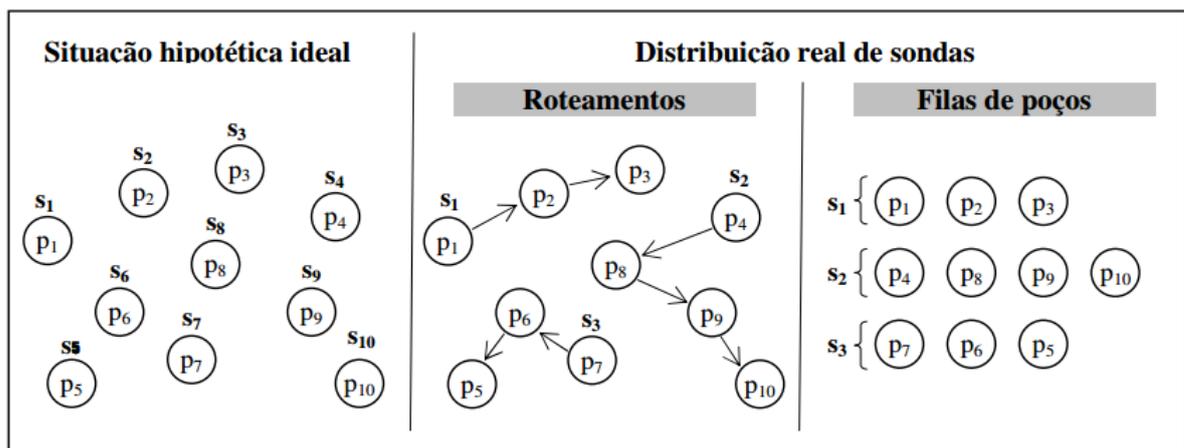


Figura 5 – Situação hipotética ideal versus distribuição real de sondas.
 Fonte: adaptado de Bassi, Ferreira Filho e Bahiense (2012, p. 4).

Com o aumento do número de sondas de perfuração e intervenção, os desafios envolvidos na programação e transporte crescem, mas é essencial utilizar um método de otimização automatizado para a movimentação das sondas (BASSI;

FERREIRA FILHO; BAHIENSE, 2012). Quando o número de poços solicitando atendimento é maior do que o número de sondas disponíveis, a ordem ou sequência pela qual as sondas percorrem pode ter um impacto significativo sobre o volume total de óleo produzido nesses poços, durante o período de intervenção (BARNES; BRENNAN; KNAPP, 1977).

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Se um poço altamente produtivo tem sua intervenção adiada por uma sonda, uma alta perda de produção surge. Dessa forma, é necessário definir uma programação das sondas disponíveis de modo a minimizar a perda de produção associada aos poços que estão aguardando atendimento. A operação de cada sonda disponível deve ser cuidadosamente planejada com o objetivo de estabelecer uma programação prática - *scheduling* (BASSI; FERREIRA FILHO; BAHIENSE, 2012). A perda de produção de cada poço em inatividade é calculada a partir de sua taxa de produção diária, multiplicada pelo número de dias em que a sua produção é interrompida (ALOISE *et al.*, 2006). Dada à complexidade e importância econômica da alocação de sondas, na literatura existem algumas abordagens referentes ao PRSI que serão abordadas no próximo capítulo.

3 REVISÃO DE LITERATURA SOBRE O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO

O PRSI pode ser definido como o um problema de gerenciamento de veículos com demandas conhecidas nos pontos da rede na qual os veículos devem se movimentar. Segundo Bodin *et al.* (1983), quando as decisões são relativas à configuração espacial dos movimentos dos veículos, o gerenciamento é considerado como um problema de roteamento e esses problemas geralmente se importam com a sequência de locais que cada veículo deve visitar. O problema do caixeiro viajante e os problemas de roteamento de veículos são exemplos dessa categoria (BODIN *et al.*, 1983). Por outro lado, ao se fazer considerações no que diz respeito aos tempos e instantes em que os pontos da rede são visitados, o problema de gerenciamento pode ser classificado como “problema de *scheduling*”, ou na língua portuguesa, “problema de programação”. Na maioria dos casos práticos esses dois tipos de problemas se fundem gerando os denominados “problemas de roteamento e *scheduling*”.

Costa e Ferreira Filho (2004) e Costa (2005) destacaram que o PRSI apresentou algumas variações durante os anos para corresponder às diferentes características presentes em vários campos de petróleo. Considerando isto, é difícil apresentar uma abordagem genérica para o problema. No entanto, o PRSI pode ser dividido em dois grupos principais, considerando a literatura: *scheduling* puro e com roteamento. Para o grupo de *scheduling* puro, as abordagens são realizadas para atender a todos os poços dentro de um horizonte de planejamento e com prazos para os serviços. Às vezes, esses prazos são substituídos por janelas de tempo como em Costa e Ferreira Filho (2004, 2005). A frota de sondas é homogênea e as distâncias entre os poços não são consideradas. Para o grupo de roteamento, um horizonte de planejamento é considerado utilizando uma frota homogênea ou heterogênea. Neste caso, não é obrigatório a realização de manutenção em todos os poços dentro do horizonte de planejamento. Os poços não atendidos são adiados para a próxima sessão de planejamento, juntamente com as novas manutenções a serem emitidas nos próximos períodos, ou seja, até o próximo planejamento. A Figura 6 sintetiza bem a classificação encontrada na literatura, de acordo com o que foi apresentado anteriormente.

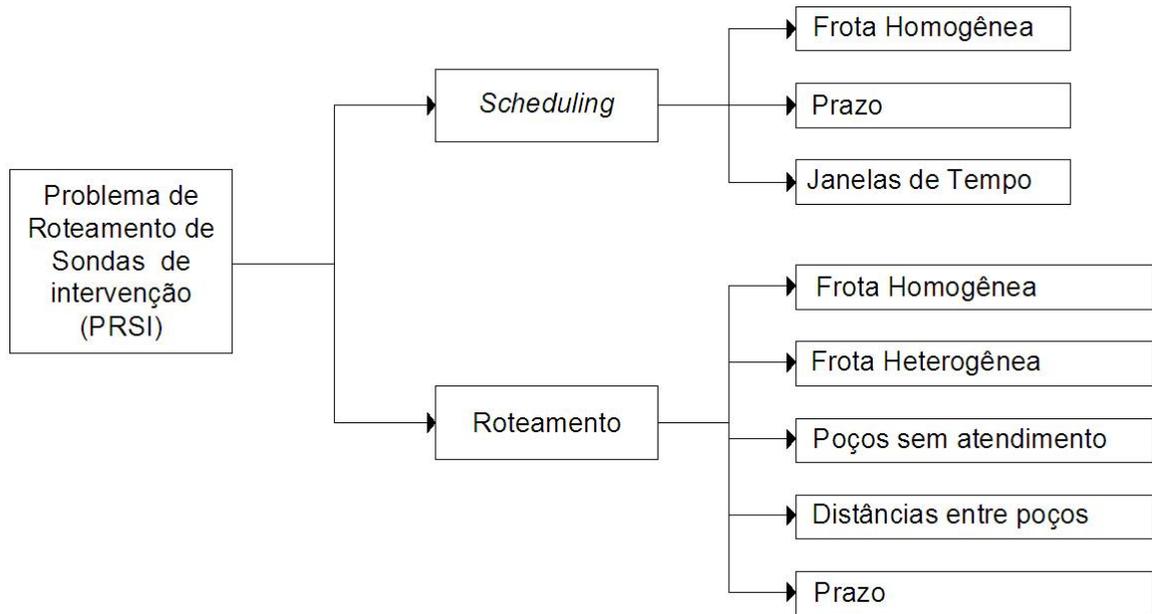


Figura 6 – Abordagens do PRSI encontradas na literatura.

3.1 PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO

O trabalho de Barnes, Brennan e Knapp (1977) é o primeiro trabalho encontrado na literatura a abordar o Problema de Programação de Sondas de Intervenção (PPSI). Neste estudo, os autores introduziram a importância de se estudar o problema, destacando os custos atribuídos aos equipamentos. Os tempos de viagem não foram utilizados e uma frota homogênea foi considerada. Considera-se ainda que quando a manutenção é iniciada, ela não pode ser interrompida.

Paiva (2000) utiliza o conceito de priorização baseada no equilíbrio entre o custo das sondas e as perdas monetárias dos poços, com ênfase no uso de apenas uma sonda para realizar os serviços. O autor propôs a heurística *Simulated Annealing* e fez testes computacionais em instâncias com até 20 poços. Para mais de uma sonda, Paiva (2000) propôs o uso da heurística para cada sonda separadamente.

Noronha e Aloise (2001) apresentaram uma heurística baseada no contexto encontrado na bacia Potiguar, localizada no Rio Grande do Norte, Brasil, que possuía cerca de 4.000 poços de petróleo. A heurística utiliza um critério guloso para priorizar cada serviço, que é definido pelo fluxo dos poços e o risco ambiental

associado com o serviço solicitado. Antes de iniciar a sua execução, o algoritmo define as prioridades dos serviços e os classifica em ordem decrescente. Os poços com maior prioridade são atendidos primeiro. O tempo de serviço é calculado tendo em conta o tempo para realizar o itinerário já programado para a sonda.

Gouvêa, Goldbarg e Costa (2002) descreveram o problema como um problema de programação onde a programação deve ser definida para cada sonda de modo a atender um conjunto de poços. Os custos incluem a instalação e a operação que é em função do tempo e das distâncias entre poços. Não há um número pré-definido de sondas, por isso é permitido usar quantas forem necessárias. Os autores propuseram dois algoritmos evolutivos para resolver o problema onde o tempo de manutenção é considerado prioritário.

Costa e Ferreira Filho (2004, 2005) propuseram uma formulação matemática, uma heurística de montagem dinâmica e a metaheurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) para resolver o problema que considera janelas de tempo. Costa e Ferreira Filho (2004) apresentaram instâncias baseadas em casos reais de um campo de petróleo localizado na região sudeste do Brasil, mais precisamente na Cidade de São Mateus, Espírito Santo. Essas instâncias não apresentam custos de transporte, porque os poços são próximos uns dos outros. Elas têm janelas de tempo para os serviços de manutenção e cada poço possui uma perda constante de produção diária.

O trabalho de Costa e Ferreira Filho (2004) apresentou um estudo de caso, a partir de dados reais obtidos junto à companhia Petrobras. Nesta empresa, a programação das plataformas é monitorada e definida por meio de uma reunião semanal com representantes de alguns departamentos. Quatro programações reais foram selecionadas por Costa e Ferreira Filho (2004, 2005) e as heurísticas foram testadas nesses casos. A heurística de montagem dinâmica melhorou as soluções encontradas pelos profissionais da Petrobras. Um ganho de 21 mil barris foi obtido, o que significou cerca de 2,3 milhões de dólares, considerando à taxa de câmbio disponível para o mês de Novembro de 2013.

Alves e Ferreira Filho (2006) implementaram um Algoritmo Genético para o problema proposto por Costa e Ferreira Filho (2005). Nesse algoritmo, um cromossomo (uma solução viável) é representado por uma série de números inteiros que indicam poços que necessitam de manutenção. A função de aptidão

de um cromossomo é definida como a perda de produção gerada pela solução viável correspondente. Este algoritmo apresentou soluções melhores do que os encontrados por Costa e Ferreira Filho (2005).

Oliveira *et al.* (2007) propuseram a metaheurística *Scatter Search* também para o problema proposto por Costa e Ferreira Filho (2005). Esse algoritmo é uma estratégia evolutiva que provou ser útil para diferentes problemas de otimização combinatória. Veja, por exemplo, os trabalhos de Cung *et al.* (1996), Glover, Laguna, Martí (2000) e Martí, Laguna, Glover (2006). Oliveira *et al.* (2007) usaram dois movimentos (mudanças) no quadro de busca de dispersão, com o objetivo de diversificar as soluções. No entanto, este algoritmo apresentou resultados inferiores ao do Algoritmo Genético proposto por Alves e Ferreira Filho (2006).

Pacheco, Ferreira Filho e Ribeiro (2009) apresentaram a heurística *Bubble Swap* onde a solução é representada por uma matriz: as linhas representam as sondas e as colunas indicam os poços. Esta heurística realiza permutações de poços entre linhas e colunas, garantindo que cada poço seja atribuído a uma única sonda. Trata-se de uma heurística rápida que apresenta bons resultados para instâncias de pequeno porte, mas este comportamento não é válido para instâncias de grande porte.

Um Algoritmo Genético com uma heurística *2-opt* é apresentado por Douro e Lorenzoni (2009). Em primeiro lugar, este algoritmo cria uma solução utilizando uma abordagem semelhante ao proposto por Alves e Ferreira Filho (2006) que distribui os poços para as sondas. Esta solução é combinada entre si para criar a população inicial. O operador *single-point* é usado como operador de cruzamento e a heurística *2-opt* é usada para a mutação. A heurística *2-opt* consiste em uma estratégia de melhoria partindo de um ciclo hamiltoniano (Goldberg e Luna, 2000). Esta heurística proporcionou boas soluções para as instâncias propostas por Costa e Ferreira Filho (2005).

Um GRASP com *path relinking* foi desenvolvido por Pacheco, Ribeiro e Mauri (2010). O mecanismo *path relinking* melhorou o processo de solução e consiste em uma estratégia de intensificação com o objetivo de explorar o espaço de busca ou o caminho entre duas soluções, denominadas de origem e guia, respectivamente. Os autores também usaram um *solver* comercial para comparação. Para as

instâncias propostas por Costa e Ferreira Filho (2004, 2005), essa heurística superou o Algoritmo Genético proposto por Douro e Lorenzoni (2009).

Ribeiro, Mauri e Lorena (2011) propuseram a metaheurística *Simulated Annealing* para o problema de Costa e Ferreira Filho (2005). O algoritmo proposto que, conforme indicado pelos autores, é simples e robusto, foi capaz de melhorar as soluções encontradas até 2011 para as instâncias de Costa e Ferreira Filho (2004, 2005). Esta heurística utiliza uma estrutura simples para explorar a vizinhança e a técnica de *re-annealing* (reaquecimento).

Sabry, Goldberg e Goldberg (2012) estudaram o Problema de programação de Sondas de Intervenção (PPSI) definindo um horizonte de planejamento e considerando que todos os poços devem ser atendidos. No entanto, eles estudaram a necessidade de alugar mais sondas quando não for possível atender a todos os poços com as sondas disponíveis. Os autores propuseram uma formulação matemática, uma heurística GRASP e um Algoritmo Memético para resolver o problema. Nesse trabalho foram geradas 30 instâncias com valores aleatórios baseados à realidade do problema. Os resultados mostraram que o GRASP alcança boas soluções em um tempo computacional melhor que o Algoritmo Memético. Entretanto, o Algoritmo Memético obtém um melhor desempenho qualitativo quando é disponível um tempo de processamento maior.

3.2 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO

Aloise *et al.* (2002) e Maia *et al.* (2002) consideraram o tempo de transporte entre os poços. Os autores utilizaram a distância mínima entre todos os poços para calcular o tempo, as perdas de produção e diferentes tipos de sondas. A formulação matemática é apresentada e diferentes heurísticas são propostas como GRASP, Colônia de Formigas, Busca Tabu e Algoritmos Genéticos. Testes computacionais foram realizados com instâncias geradas aleatoriamente com até 299 poços, no qual o algoritmo Colônia de Formigas apresentou em grande parte dos casos, melhor desempenho tanto na qualidade das soluções quanto no tempo computacional demandado.

Aloise *et al.* (2006) consideraram o tempo necessário para cada serviço e os tempos de deslocamento entre poços. Os autores desenvolveram uma metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) para resolver o problema. Soluções iniciais são geradas por uma heurística construtiva e nove diferentes estruturas de vizinhança foram desenvolvidas. Os autores realizaram experimentos práticos com dados da Petrobras, como em Costa e Ferreira Filho (2005), e também conseguiram melhorar os resultados produzidos pelos técnicos da empresa. Neste trabalho, os autores ainda relataram que a locação de 10 sondas custava, anualmente, aproximadamente 10 milhões de dólares para a Petrobras.

Neves e Ochi (2007) e Neves (2007) resolveram o PRSI com as heurísticas GRASP, GRASP com *path-relinking*, Busca Tabu e *Iterated Local Search* (ILS). Estes autores propuseram casos com 50, 100 e 500 poços, com cinco e 10 sondas. A metaheurística ILS apresentou melhores resultados do que as outras utilizadas na comparação.

As instâncias propostas por Neves (2007) foram utilizadas por Ribeiro, Laporte e Mauri (2012). Estes autores implementaram as metaheurísticas *Clustering Search* e *Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic* (ALNS) para o problema. Ribeiro, Laporte e Mauri (2012) compararam os resultados encontrados com os melhores fornecidos por Neves e Ochi (2007) e Neves (2007) e mostraram que para pequenas instâncias, os três algoritmos (ILS, *Clustering Search* e ALNS) apresentam desempenho semelhante. No entanto, quando o tamanho da instância aumenta, a heurística ALNS supera as demais.

Soares, Costa e Aloise (2011) propuseram novas instâncias para o problema e também um modelo matemático bi-objetivo, que é baseado no proposto por Aloise *et al.* (2006). Os autores acrescentaram o custo diário das sondas como segunda função objetivo a ser otimizada. Uma heurística construtiva foi proposta para um horizonte de planejamento de 15 dias, que considera poços não atendidos.

Nessa heurística construtiva, buscou-se simular uma escolha que poderia ser feita pela equipe responsável pelo agendamento, isto é, organiza-se uma lista de priorização de poços em ordem decrescente da sua perda de produção diária, sendo atribuído cada poço ao final da fila da sonda que possua o nível de serviço requerido para atendê-lo que menos afete o custo da função objetivo (SOARES; COSTA; ALOISE, 2011).

Em relação à adição da segunda função objetivo, Soares, Costa e Aloise (2011) constataram que o preço do barril de petróleo poderia influenciar na viabilidade da exploração, considerando que dentro de um período de dois anos o valor do barril oscilou entre menos de U\$ 40,00 e mais de U\$ 140,00. Dessa forma, essa análise poderia ser útil no caso de quantificar as perdas nos poços e os custos das sondas em termos monetários a fim de minimizar o custo/prejuízo de forma integrada, avaliando quando seria menos rentável deixar poços sem atendimento ou contratar mais sondas.

Duhamel, Santos e Guedes (2012) adaptaram a formulação matemática proposta por Aloise *et al.* (2006) para considerar poços não atendidos. Em seguida, novos aperfeiçoamentos foram realizados para proporcionar novas formulações matemáticas. Eles incorporaram novas restrições e uma estratégia de redução de variáveis em uma formulação matemática que se baseia no problema de roteamento de veículos aberto e no *Team Orienteering Problem*. Os autores também propuseram uma abordagem de geração de colunas e as melhores soluções encontradas são reportadas para as instâncias analisadas.

Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012) mostraram que o tempo de atendimento dos poços tem um papel importante no processo de solução. Em seguida, com base na metodologia considerada estado-da-arte para a solução de problemas de roteamento de veículos, é proposto um algoritmo *branch-price-and-cut* (BPC). O BPC utiliza as técnicas mais recentes desenvolvidas para o problema de roteamento de veículos, tais como Busca Tabu para gerar colunas (DESAULNIERS; LESSARD; HADJAR, 2008), a relaxação *ng-path* de BALDACCI *et al.* (2010) e as desigualdades de *subset-row* propostas por Jepsen *et al.* (2008).

Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012) consideraram em um horizonte de planejamento, um conjunto de poços que solicitam serviços de manutenção e uma frota heterogênea de sondas localizadas em diferentes posições no campo de produção de petróleo. Dessa forma, o objetivo é minimizar a perda de produção, não sendo necessário o atendimento de todos os poços.

A Figura 7 mostra a solução ótima de uma instância com 100 poços e 10 sondas abordada por Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012). A Figura 7(a) mostra a localização dos poços e as posições iniciais das sondas, enquanto a Figura 7(b) mostra o conjunto ótimo de rotas, em que o número de poços atendidos por cada

rota aparece entre parênteses. Observe o aspecto aberto das rotas das sondas e que há poços sem atendimento dentro do horizonte de planejamento.

Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012) propuseram 80 novas instâncias, com frota heterogênea, 100 ou 200 poços, cinco ou 10 sondas e um horizonte de planejamento de 200 e 300 períodos de tempo (10 instâncias para cada possível combinação de parâmetros). Os tamanhos dos horizontes de 200 e 300 correspondem a cerca de 14 e 21 dias, respectivamente. Para instâncias com 100 poços, o BPC é muito eficiente e soluciona de forma ótima 38 dos 40 problemas. Para as instâncias com 200 poços, o BPC achou a solução ótima em 28 dos 40 casos estudados. Para as instâncias não resolvidas otimamente, os autores encontram bons limítantes superiores e inferiores.

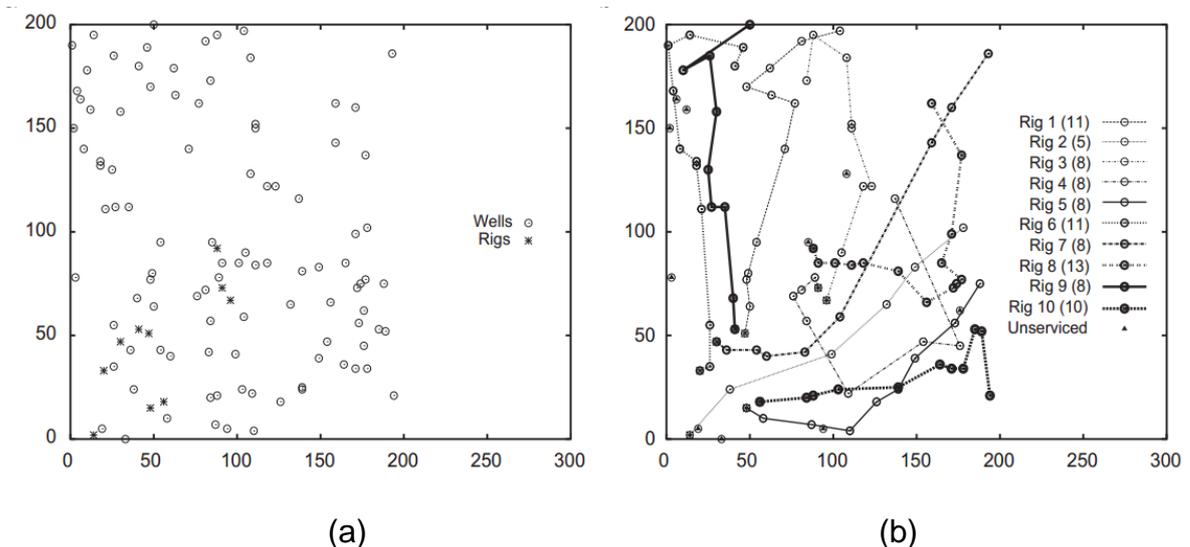


Figura 7 – (a) Localização dos Poços e Sondas e (b) rota ótima para a instância com 100 poços e 10 sondas.

Fonte: Ribeiro; Desaulniers; Desrosiers (2012, p. 3306).

Irgens *et al.* (2008) apresentaram o primeiro estudo que considera uma abordagem estocástica, onde o roteamento é otimizado com múltiplos objetivos. Eles tentaram avaliar o impacto das decisões de roteamento em indicadores-chave de desempenho, que é apoiado por uma interface de usuário que permite a manipulação do roteamento diretamente em resposta às novas necessidades. Sondagens de perfuração são consideradas ao invés de sondagens de *workover*, ou seja, menor quantidade de serviços são considerados nesse estudo. Quando sondagens de perfuração são consideradas, devem-se definir rotas também, no entanto, os custos de transporte são muito importantes. Os resultados mostram uma

diminuição no tempo de planejamento da rota, trazendo um melhor retorno em termos de qualidade de serviço e utilização dos recursos disponíveis. Os experimentos relatados no artigo mostram redução no custo de transporte e que o valor presente líquido do investimento é aumentado.

Outra abordagem estocástica foi recentemente proposta por Bassi, Ferreira Filho e Bahiense (2012) onde o problema de planejamento e programação de uma frota *offshore* de sondas de petróleo é considerado com incerteza no tempo de serviço. O método *Simulation-optimization* é usado para gerar soluções e medidas de desempenho para sondas, bem como estatísticas sobre alocação de poços a sondas.

Bassi, Ferreira Filho e Bahiense (2012) consideram características determinísticas e probabilísticas. Por exemplo, as posições geográficas e a profundidade da água (lâmina d'água) são consideradas determinísticas, enquanto o potencial de óleo e o tempo de serviço são probabilísticos. Outras características incertas, como o H_2S^1 , podem ser tratadas como um parâmetro determinístico. As incertezas sobre o potencial de petróleo são manipuladas por engenheiros especializados, quando eles fazem o planejamento estratégico da área. Planejamento e sequenciamento de plataformas podem ser considerados no nível tático. A este nível, a incerteza da duração da perfuração afeta o planejamento. Os autores ainda consideraram algumas restrições, tais como:

- Cada poço deve ser atendido por uma única sonda durante o período de planejamento;
- Em determinado momento, uma sonda pode atender, no máximo, um único poço, dessa forma, a sonda não estará disponível para realizar serviço em outros poços;
- A profundidade máxima de água atingida por uma sonda deve ser maior ou igual à profundidade do poço;
- Se o poço produz H_2S^1 , a sonda deve ser capaz de trabalhar na sua presença; e

¹ Sulfeto de Hidrogênio: Temido agente de risco encontrado no formato de gás em alguns campos de petróleo.

- O tempo para concluir um trabalho deve respeitar as janelas de tempo do poço.

Os autores encontraram bons resultados, tendo como base experiências em situações reais de operação.

Considerando os estudos publicados em língua inglesa, o termo *workover*, abrange todos os termos citados e, no Brasil, dependendo da localização, utiliza-se uma nomenclatura distinta para este termo. Alguns trabalhos utilizam termos diferentes para o mesmo problema, considerando que foram encontrados vários termos, como “Problema de roteamento de sondas de produção terrestres”, “Problema de roteamento de sondas de manutenção *onshore*”, ou mesmo “Problema de roteamento de sondas de intervenção”.

Como mostrado anteriormente, o PRSI tem recebido atenção dos pesquisadores nos últimos anos. No entanto, a adição de novos objetivos à função objetivo clássica vem se mostrando uma boa prática para tornar o problema mais próximo do real contexto de operação. Dessa forma, na seção seguinte é apresentada a inserção de novos objetivos em variações de problemas de roteamento de veículos, de modo a estimular a aplicação ao PRSI.

3.3 PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS MULTIOBJETIVO

Problemas de roteamento, tais como PRSI, geralmente têm apenas um objetivo que normalmente está associado ao custo da solução, conforme mencionado anteriormente. Em problemas dinâmicos, algumas ou todas as entradas são desconhecidas, sendo revelados em tempo real. Além disso, os objetivos não são limitados a apenas custo. Na verdade, muitos outros aspectos, tais como o equilíbrio de carga ou da carga de trabalho, podem ser levados em consideração, simplesmente por adição de novos objetivos. Assim, alguns trabalhos estudam a inclusão de novos objetivos, chamados de problemas de otimização multi-objetivos (JOZEFOWIEZ; SEMET; TALBI, 2008a; JOZEFOWIEZ; SEMET; TALBI, 2008b; GARCIA-NÁJERA; BULLINARIA, 2011; BAÑOS *et. al*, 2013). Alguns novos

objetivos poderiam ser adicionados ao PRSI baseado nos estudos encontrados na literatura para o problema de roteamento de veículos.

Conforme Jozefowicz, Semet e Talbi (2008b), a introdução de problemas de roteamento multiobjetivos é motivada por três razões: para estender problemas clássicos acadêmicos, a fim de melhorar a sua aplicação prática sem nunca perder de vista o objetivo inicial, generalizar problemas clássicos e estudar os casos da vida real em que os objetivos foram claramente identificados pelo tomador de decisões.

Em relação à extensão de problemas clássicos acadêmicos, Jozefowicz, Semet e Talbi (2008a) afirmam que otimização multiobjetivo pode ser usada como uma possibilidade de estudar outros objetivos além do definido inicialmente, o que é muitas vezes relacionado com uma solução de custo. Neste contexto, a definição do problema permanece inalterada e novos objetivos são adicionados. A finalidade de tais extensões muitas vezes é para melhorar as aplicações práticas do modelo, reconhecendo que os problemas não se baseiam somente em custos. Isso pode ser feito, a fim de considerar a carga de trabalho do motorista e tentar equilibrá-lo de modo a trazer a sensação de “justiça” entre os motoristas. A satisfação do cliente também pode ser um problema e modelado como um objetivo. Outra motivação para usar otimização multiobjetivo é generalizar um problema adicionando objetivos em vez de uma ou mais restrições e/ou parâmetros.

Em Jozefowicz, Semet e Talbi (2008a) é comentado que esta estratégia tem sido aplicada principalmente para o problema de roteamento de veículos com restrições de janela de tempo em que as janelas de tempo são substituídas por um ou vários objetivos. Outro exemplo, abordado em Feillet, Dejax e Gendreau (2005), descreve uma classe de problema, chamado problemas do caixeiro viajante com lucros (PCVCL), que pertencem a esta categoria, no qual buscam adicionar novos objetivos na Função Objetivo de problemas clássicos. Nestes problemas, o lucro, associado a cada cliente, pode ser adquirido ao se visitar um cliente, mas não é obrigatório visitar todos. Dessa forma, dois objetivos conflitantes podem ser claramente identificados:

1. Maximizar o lucro, visitando um número máximo de clientes, consequentemente aumentando o custo da solução (distância); e

2. Minimizar o custo da solução visitando um número menor de clientes, consequentemente diminuindo o lucro gerado pela solução.

Normalmente, este problema é resolvido por meio da definição do problema com um único objetivo que na verdade é uma combinação dos objetivos iniciais, ou um objetivo com restrição de otimizar o outro. Mas é também possível resolver o problema de forma bi-objetiva, de modo a gerar um conjunto de soluções não-dominadas, sem beneficiar nenhum dos objetivos em específico (JOZEFOWIEZ; SEMET; TALBI, 2008b).

Problemas de roteamento multiobjetivo também são estudados especificamente para situações da vida real, em que os tomadores de decisão definem vários objetivos claros a serem otimizados. Grande parte destes estudos visam a minimização de custos (principalmente o comprimento das rotas), mas adicionam novos objetivos de acordo com as necessidades da situação. Os objetivos mais ilustrativos são apresentados a seguir, com as suas aplicações. No caso de uma empresa de transporte, por exemplo, pode haver múltiplas questões, como: balanceamento de trabalho, tempo de ociosidade e violação da restrição de janela de tempo.

Por outro lado, o roteamento de ônibus escolar, por exemplo, apresenta outros desafios: há necessidade do ônibus parar em uma posição estratégica que minimize a distância em relação aos passageiros para evitar longas caminhadas até o ponto. Existe também uma necessidade de equilibrar o número de passageiros a embarcar entre os pontos selecionados, de modo a distribuir a carga (ou seja, o número de passageiros) entre os ônibus (CORBERAN; FERNANDEZ; LAGUNA, 2002). Avaliar o tempo em que cada passageiro fica no ônibus também pode vir a ser um objetivo, para garantir que eles não fiquem muito tempo no veículo e que não haja grandes desigualdades entre o primeiro e o último aluno que embarcou. Esse objetivo também pode ser utilizado no caso de recolhimento de lixo urbano, mas por razões diferentes. Neste novo problema, há uma necessidade de classificar os resíduos após a colheita. As duas tarefas (recolhimento e triagem) são feitas pelos mesmos trabalhadores. Portanto, as rotas precisam ser concluídas o mais rápido possível para que os trabalhadores possam começar a trabalhar na triagem dos resíduos na instalação de tratamento de resíduos (LACOMME; PRINS; SEVAUX, 2006). No planejamento de visitas

realizadas por unidades de saúde, por exemplo, o principal problema vem do fato de que não é possível visitar toda a população. Portanto, além de um objetivo econômico, há uma necessidade de facilitar o acesso da população ao recurso. Isto é feito por meio de dois objetivos adicionais: a maximização da população atendida dentro de um dado raio a partir dos pontos selecionados de parada, minimizando a distância total que deve ser percorrida pela população para chegar a um ponto de atendimento. Outra importante aplicação na vida real é o caso do transporte de produtos perigosos, sendo que os objetivos não visam somente a minimização do custo, mas lidam também com a minimização da população ao longo da estrada utilizada e a minimização da probabilidade global de um acidente acontecer, evitando consequências drásticas (CORBERAN; FERNANDEZ; LAGUNA, 2002; JOZEFOWIEZ; SEMET; TALBI, 2008b).

De acordo com Jozefowicz, Semet e Talbi (2008a), os novos objetivos introduzidos nos estudos de problemas de roteamento de veículos multiobjetivos na literatura podem ser classificados conforme o componente do problema que estão relacionados com:

- A rota: objetivos que incluem os custos (tempo, distância, etc.), como por exemplo, tempo de espera, balanceamento da rota e objetivos relacionados com problemáticas como, por exemplo, minimizar o risco;
- A atividade no arco/nó: lidar com problemas de roteamento de veículos com janelas de tempo, removendo as janelas de tempo e adicionar objetivos adicionais para minimizar o atraso ou precocidade para os limites das janelas e/ou o número de restrições violadas, objetivos ligados à atribuição de prioridade aos arcos ou nós que buscam visitar aqueles com as maiores prioridades, objetivos econômicos ou de marketing, como o aumento da satisfação do cliente ou melhorar o relacionamento com o cliente, entre outros; e
- Os recursos: são relacionados com o gerenciamento da frota (minimizar o tamanho, otimizar a eficácia da utilização do veículo, etc.) podendo ser relacionados com as mercadorias transportadas que deve considerar os passageiros ou evitar a deterioração de produtos perecíveis.

Considerando o exposto, no próximo capítulo é abordado o PRSI-BO, objeto de estudo desta dissertação, onde é adicionado o objetivo de minimizar a quantidade de sondas utilizadas à versão clássica do problema, que é minimizar a taxa de perda de produção.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO BI-OBJETIVO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Considerando o estado da arte do PRSI apresentado anteriormente e a necessidade de maior aproximação dos problemas estudados ao real contexto de operação, neste trabalho é realizada uma abordagem bi-objetiva onde o objetivo de minimizar o conjunto de sondas utilizadas é incorporado à modelagem matemática proposta por Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012), de modo a fornecer apoio à tomada de decisão para avaliar quando é viável contratar mais sondas, ou reduzir o conjunto de sondas já alugadas, levando em consideração o confronto do custo das sondas e o custo gerado pela perda de produção dos poços que necessitam atendimento.

O PRSI é um problema baseado em grafos. Um grafo, segundo Goldberg e Goldberg (2012), é definido como uma estrutura abstrata que representa um conjunto de elementos denominados nós (ou vértices) e suas relações de interdependência ou arestas. Denominando por N o conjunto de nós da estrutura e por A o conjunto de arestas ou ligações entre os vértices, um grafo pode ser representado matematicamente por $G = (N, A)$ (GOLDBARG; GOLDBARG, 2012).

Como no PRSI o sentido das ligações entre os nós (entre os poços) é importante, sua representação baseia-se em grafos direcionados, também chamados de grafos orientados ou dígrafos. Neste caso, as arestas possuem um sentido definido, recebendo o nome de arcos. Denominando-se V o conjunto de vértices da estrutura e A o conjunto dos pares ordenados do produto cartesiano $V \times V$ das ligações existentes em G (os arcos), o grafo orientado é representado matematicamente por $G = (V, E)$, onde $E = V \times V$ (BOAVENTURA NETTO, 2012; GOLDBARG, GOLDBARG, 2012).

4.2 MODELO MATEMÁTICO

Considerando a modelagem matemática apresentada por Ribeiro, Desaulniers, e Desrosiers (2012), seja K o conjunto de sondas. Sendo assim, considere o grafo (ou rede) $G^k = (N^k, A^k)$ associada com cada sonda $k \in K$, onde N^k e A^k representam o conjunto de nós e arcos, respectivamente.

O conjunto N^k possui três tipos de nós: origem, destino e tarefa. O nó de origem $o(k)$ representa a posição inicial da sonda k , enquanto o nó de destino $d(k)$ representando o fim do horizonte. Um atendimento corresponde a um serviço de manutenção a ser executado em um poço e é representado por um nó tarefa. O conjunto dos nós tarefa é denotado por W , enquanto o subconjunto dos nós-tarefas que pode ser realizado por uma sonda k é denotado $W^k \subseteq W$. Portanto, $N^k = \{o(k), d(k)\} \cup W^k$.

O conjunto A^k contém quatro tipos de arcos: vazio, início, fim e entre-tarefa. O arco vazio entre $o(k)$ e $d(k)$ representa uma rota vazia quando a sonda k não é utilizada. O arco início $(o(k), j)$ entre $o(k)$ e cada nó tarefa $j \in W^k$ representa a viagem da sonda k a partir de sua posição inicial para o poço j seguido de seu serviço em j . O arco fim $(i, d(k))$ entre cada nó tarefa $i \in W^k$ e $d(k)$ indica que a rota da sonda k é finalizada no poço i . Finalmente, o arco entre-tarefa (i, j) entre cada par de nós tarefas $i, j \in W^k$ representa o movimento de uma sonda k a partir de um poço i para um poço j , seguido do serviço em j . Portanto, $A^k = \{o(k), d(k)\} \cup (o(k) \times W^k) \cup (W^k \times d(k)) \cup (W^k \times W^k)$.

O horizonte de planejamento é dividido em H períodos de tempos, enumerados de 1 a H . Com cada arco $(i, j) \in A^k$ associa-se o parâmetro não negativo t_{ij} que especifica o tempo decorrido (tempo de viagem mais tempo de serviço, se houver) no arco (i, j) . Assume-se que t_{ij} é o número de períodos de tempo não-negativo e que os parâmetros t_{ij} , $(i, j) \in A^k$ satisfazem a desigualdade triangular, isto é, a matriz de distância é euclidiana e simétrica. Finalmente, para cada nó $i \in W^k$, define-se o parâmetro positivo l_i que indica a taxa de perda de produção por período de tempo no nó i .

O modelo matemático de Ribeiro, Desaulniers, e Desrosiers (2012) é baseado no conceito fluxo em rede que possui dois tipos principais de variáveis: para cada arco $(i, j) \in A^k, k \in K$, define-se a variável binária de fluxo de arco X_{ij}^k que assume o valor 1 se o arco (i, j) é usado pela sonda k e zero, caso contrário; e para cada nó $i \in W^k \cup \{o(k)\}, k \in K$, define-se ainda a variável de tempo $T_i^k \in [0, H]$ que indica o período de tempo que a sonda k completa o serviço no nó i , caso o serviço tenha sido realizado. Por definição, considera-se $T_i^k = 0$ se $i = o(k)$ ou se $i \in W^k$ e o poço i não é atendido pela sonda k . É importante frisar que nenhuma variável de tempo $T_{d(k)}^k, k \in K$ precisa ser definida no nó fim porque $t_{i,d(k)} = 0$ para todo $k \in K$.

As variáveis de tempo permitem determinar a perda de produção em cada poço. Dessa forma, se a sonda atende o poço i , isto é, se $T_i^k > 0$, o poço i retorna a sua capacidade total de produção no período $T_i^k + 1$, então a perda de produção para esse poço é dado por $\ell_i T_i^k$. Por outro lado, se o poço i não é atendido por nenhuma sonda dentro do horizonte, $T_i^k = 0$ para todo $k \in K$, a perda de produção é igual a $\ell_i H$.

Para facilitar a apresentação do modelo, Ribeiro; Desaulniers; Desrosiers (2012) introduziram dois tipos de variáveis auxiliares: para cada nó $i \in W^k, k \in K$, existe a variável binária $X_i^k := \sum_{j:(j,i) \in A^k} X_{ji}^k$ que recebe o valor 1 se o poço i é atendido pela sonda k e 0, caso contrário; e define-se também a variável não negativa de simplificação S_i^k que é igual a perda de produção economizada no poço i se atendido pela sonda k . Desta forma, são ainda impostas as seguintes restrições sobre as variáveis de tempo:

$$0 \leq T_i^k \leq H X_i^k, \quad \forall k \in K, i \in W^k \quad (1)$$

Com isso, pode-se expressar as variáveis de simplificação da seguinte forma:

$$S_i^k := \ell_i (H X_i^k - T_i^k), \quad \forall k \in K, i \in W^k \quad (2)$$

Note que $S_i^k = 0$ se a sonda k não atende o poço i , isto é, $X_i^k = 0$. Para poupar variáveis, a taxa total de perda de produção é dada por:

$$H \sum_{i \in W} \ell_i - \sum_{k \in K} \sum_{i \in W^k} S_i^k \quad (3)$$

onde o primeiro termo corresponde a máxima perda de produção e o segundo a melhora total de perda de produção realizada pelas sondas, que está associada ao atendimento dos poços.

Utilizando a notação descrita em Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012), o PRSI pode ser formulado como segue:

Minimizar

$$H \sum_{i \in W} \ell_i - \sum_{k \in K} \sum_{i \in W^k} \ell_i (HX_i^k - T_i^k) \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j) \in A^k} X_{ij}^k \leq 1, \quad \forall i \in W, \quad (5)$$

$$\sum_{j: (o(k),j) \in A^k} X_{o(k),j}^k = \sum_{i: (i,d(k)) \in A^k} X_{i,d(k)}^k = 1, \quad \forall k \in K, \quad (6)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A^k} X_{ij}^k - \sum_{j: (j,i) \in A^k} X_{ji}^k = 0, \quad \forall k \in K, i \in W^k, \quad (7)$$

$$X_{ij}^k (T_i^k + t_{ij} - T_j^k) \leq 0, \quad \forall k \in K, (i,j) \in A^k, j \neq d(k), \quad (8)$$

$$0 \leq T_i^k \leq HX_i^k, \quad \forall k \in K, i \in W^k, \quad (9)$$

$$T_{o(k)}^k = 0, \quad \forall k \in K, \quad (10)$$

$$X_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, (i,j) \in A^k, \quad (11)$$

$$X_i^k = \sum_{j: (j,i) \in A^k} X_{ji}^k = 0, \quad \forall k \in K, i \in W^k, \quad (12)$$

$$S_i^k = \ell_i (HX_i^k - T_i^k), \quad \forall k \in K, i \in W^k. \quad (13)$$

A Função Objetivo (4) tem como objetivo minimizar a perda de produção total durante o horizonte. As Restrições (5) garantem que cada poço (nó tarefa) é atendido por no máximo uma sonda. Para cada sonda k , as Restrições (6) e (7) são as restrições clássicas de fluxo em rede, considerando que a sonda deixa o nó de origem $o(k)$, finalizando no nó destino $d(k)$. A Restrição não-linear (8) expressam os requisitos de compatibilidade entre o fluxo de arco, variáveis de tempo e a garantia de eliminação de sub-rota. As Restrições (9) impõem a duração máxima de H para as rotas, o que também garante que as variáveis de tempo recebem o valor 0 quando o poço correspondente não é atendido pela sonda. As Restrições (10) indicam o horário de início para todas as rotas. A Restrição (11) impõe valores binários para as variáveis de fluxo em arco. Finalmente, as variáveis

auxiliares são definidas em (12) e (13). Elas podem facilmente ser removidas do modelo substituindo-as em (4) e (9).

O PRSI contém o problema do reparador viajante (*traveling repairman problem*) (TSITSIKLIS, 1992) como um caso especial na presença de uma única sonda com um horizonte de planejamento muito grande. O problema do reparador viajante é classificado como *NP-Hard* por Sahni e Gonzalez (1976) e, portanto, o PRSI é *NP-Hard* também.

A partir do modelo matemático apresentado anteriormente, a Função Objetivo (14) busca minimizar o custo de aluguel de sondas, minimizando o conjunto K de sondas utilizadas.

Minimizar

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (o(k), j) \in A^k} X_{o(k)j}^k \quad (14)$$

Assim, as Funções Objetivo (4) e (14) podem ser unidas para compor o PRSI-BO. Seja assim, τ_1 e τ_2 fatores de ponderação associados às Funções Objetivos (4) e (14), respectivamente. Dessa forma, o modelo matemático PRSI-BO pode ser assim apresentado:

Minimizar

$$\begin{aligned} & +\tau_1 (H \sum_{i \in W} \ell_i - \sum_{k \in K} \sum_{i \in W^k} \ell_i (HX_i^k - T_i^k)) \\ & +\tau_2 \sum_{k \in K} \sum_{j: (o(k), j) \in A^k} X_{o(k)j}^k \end{aligned} \quad (15)$$

Sujeito a: (5) – (13).

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como o PRSI-BO é uma variação do PRSI, ele também é *NP-Hard*. Assim, embora o PRSI-BO se aproxime mais da realidade vivenciada pelas empresas do setor, o mesmo apresenta um grau de complexidade elevado, com isso, métodos exatos não são aconselháveis. Dessa forma, no próximo capítulo apresenta-se uma metaheurística para o PRSI-BO.

5 METAHEURÍSTICA ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH HEURISTIC

Considerando o fato de o PRSI ser um problema da classe *NP-Hard*, Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012) utilizaram o método exato *branch-price-and-cut* para resolver instâncias de médio e grande porte com frota heterogênea de sondas. Neste contexto, somado a eficiência demonstrada em Ribeiro, Laporte e Mauri (2012), este trabalho utiliza a metaheurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) para solucionar o PRSI-BO, que é descrita a seguir.

Proposto por Ropke e Pisinger (2006), o ALNS é uma metaheurística consolidada na literatura, aplicada com êxito a diversos problemas de otimização combinatória, em especial, a alguns problemas de roteamento de veículos (RIBEIRO; LAPORTE 2012; ROPKE; PISINGER, 2006). O ALNS é uma extensão da heurística LNS (*Large Neighborhood Search*) proposta por Shaw (2007) que, além de permitir utilizar múltiplos métodos para destruir e reparar uma solução como na heurística original, ainda considera uma camada adaptativa que permite pontuar e assim direcionar a preferência a um dado par de heurísticas de destruição e remoção, mais adaptadas à instância sendo resolvida.

Os procedimentos de destruição e reparação são selecionados de acordo com um mecanismo probabilístico adaptativo. A cada iteração, a probabilidade de selecionar um dado procedimento depende do quão bem ele se comportou no passado. Os procedimentos são na verdade heurísticas que permitem remover nós utilizados (destruição) e inserir os nós removidos de volta (reparação), onde um nó representa um poço.

A cada iteração, o ALNS destrói parte de uma de solução corrente X e a repara de um modo diferente gerando uma nova solução X' . Essa nova solução é aceita de acordo com um critério de aceitação definido pelo paradigma de busca aplicado em um nível superior, como os critérios de aceitação do *Simulated Annealing* (SA) no qual se X' é melhor que X , a busca continua a partir de X' , caso contrário, a busca continua a partir de X com uma dada probabilidade.

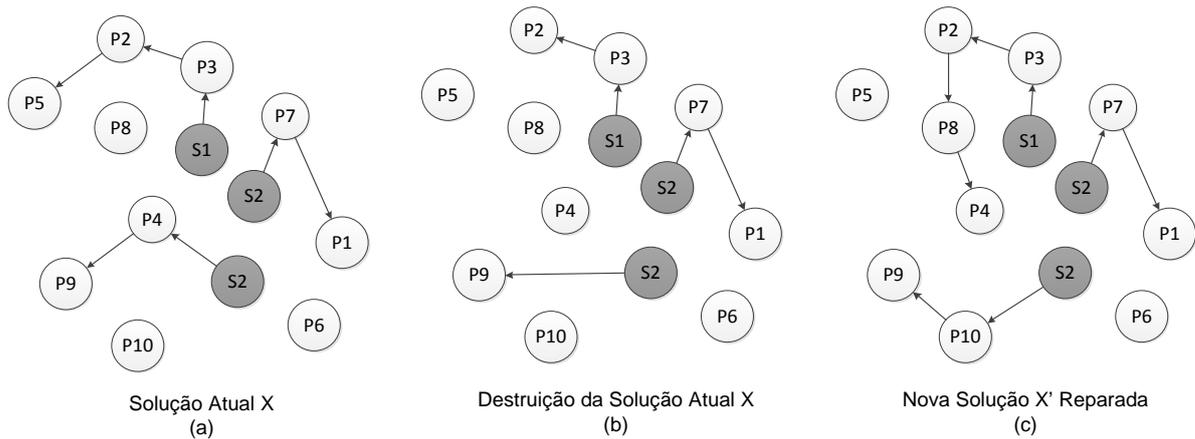


Figura 8 - Exemplo de aplicação da metaheurística ALNS.

Apresenta-se na Figura 8 um exemplo de instância com 10 poços requerendo manutenção, representados por P1 a P10 e 3 sondas disponíveis, denominadas S1 a S3. A solução atual X é apresentada em (a), no qual três sondas atendem a sete poços, ficando os poços P6, P8 e P10 sem atendimento. A solução atual X é destruída e apresentada em (b). Após a reparação da solução apresentada em (b), uma nova solução X' é apresentada em (c), em que todas as sondas disponíveis são utilizadas, ficando sem atendimento apenas dois poços: P5 e P6.

A escolha das heurísticas de remoção e inserção é regida por um mecanismo de roleta no qual cada heurística recebe um peso que depende de seu comportamento no passado. Mais precisamente, considere ω_i uma medida de quão bem a heurística i se comportou em iterações passadas. Dessa forma, dado h heurísticas com pesos ω_i , a heurística j é selecionada com a probabilidade $\omega_j / \sum_{i=1}^h \omega_i$. A heurística de inserção é escolhida independentemente da heurística de remoção.

O ALNS apresenta os seguintes componentes: grande vizinhança, mecanismo de busca adaptativa, ajuste de pesos adaptativo das heurísticas de remoção e de inserção e critérios de aceitação e parada. Em relação a grande vizinhança, dada a solução s , a cada iteração, γ poços são removidos da solução e reinseridos. Isso é feito por meio de uma das várias heurísticas de remoção e de inserção.

Em grande parte dos problemas, o êxito do ALNS depende do número de nós removidos e inseridos em cada iteração. Se somente uma pequena parte da solução é destruída, então o ALNS pode não ser capaz de explorar eficientemente

o espaço de busca porque o efeito da grande vizinhança foi perdido. Por outro lado, se uma grande parte da solução é destruída, então o ALNS degrada muito a solução, aumentando o tempo computacional e produzindo soluções de baixa qualidade (PISINGER; ROPKE, 2007).

Ropke e Pisinger (2006) desenvolveram uma heurística unificada baseada no ALNS para resolver diversos problemas de roteamento de veículos com *backhauls* (*Vehicle Routing Problem with Backhauls* - VRPB), em que rotas são definidas para veículos de entrega que, no retorno ao depósito, passam a realizar coleta de mercadorias. No VRPB capacitado, a heurística foi examinada em 338 instâncias diferentes e o ALNS conseguiu melhorar as soluções conhecidas de 227 (ROPKE; PISINGER, 2006). Para o VRPB com coleta e entrega com janelas de tempo, Ropke e Pisinger (2006) executaram o ALNS em mais de 350 instâncias com até 500 clientes e o algoritmo foi capaz de encontrar melhores soluções em mais de 50% deles.

Pisinger e Ropke (2007) aplicaram o ALNS em outras variantes do problema de roteamento de veículos (PRV), como o PRV com janelas de tempo (VRPTW), o PRV capacitado (*Capacitated Vehicle Routing Problem* - CVRP), o PRV com múltiplos depósitos (*Multi-Depot Vehicle Routing Problem* - MDVRP), o PRV com carga fracionada (*Split Delivery Vehicle Routing Problem* - SDVRP), e o problema aberto de roteamento de veículos (*Open Vehicle Routing Problem* - OVRP). Os autores transformaram todos estes problemas no denominado *Rich Vehicle Routing Problems*, e usaram o ALNS. De 486 instâncias testadas, o ALNS foi capaz de encontrar novas melhores soluções em 183 delas, ou seja, em 37,6% dos casos analisados.

5.1 ALNS para o PRSI-BO

O ALNS proposto nesta dissertação foi baseado em Ribeiro e Laporte (2012) e está descrito a seguir na Figura 9, sendo $f(.)$ a Função Objetivo do problema definida em (15). Inicialmente uma solução é criada e enquanto um critério de aceitação não for atingido, as heurísticas de remoção e construção são aplicadas.

```

Construir uma solução inicial  $X$  para o problema.
 $X^* \leftarrow X$ 
Repeat
   $N^- \leftarrow \text{SelecionaDestrutivo}$ 
   $X' \leftarrow N^-(X)$ 
   $N^+ \leftarrow \text{SelecionaConstrutivo}$ 
   $X' \leftarrow N^+(X')$ 
  if  $\text{CritérioDeAceitacao}(X, X')$  then
     $X \leftarrow X'$ 
  end if
  if  $f(X) < f(X^*)$  then
     $X^* \leftarrow X$ 
  end if
  Atualiza os pesos de  $N^+$  e  $N^-$ 
  Atualiza temperatura
until Critério de parada seja atendido
return  $X^*$ 

```

Figura 9 – Heurística *Adaptive Large Neighborhood Search*.
 Fonte: adaptado de Ribeiro e Laporte (2012).

5.2 SOLUÇÃO INICIAL

A geração da solução inicial baseia-se em um algoritmo guloso onde inicialmente os poços são classificados em ordem decrescente de taxa de perda de produção, no qual avalia-se na atribuição poço-sonda se ambos possuem o nível de serviço equivalentes (quando considera-se frota heterogênea), e após a formação das rotas, é atribuído os pesos referentes para cálculo do custo da solução conforme (15).

5.3 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO, DE PARADA E RECÁLCULO DOS PESOS

O critério de aceitação foi o mesmo utilizado por Ribeiro e Laporte (2012), ou seja, baseado no critério de aceitação do SA. Seja X a solução corrente e X' uma solução obtida a partir da destruição e reparação de X , então se $f(X') < f(X)$, a busca continua a partir de X' , caso contrário, a busca ainda pode ser executada a

partir de X' com uma probabilidade dada por $e^{(f(X)-f(X'))/T}$, onde $T > 0$ é um parâmetro que representa a temperatura atual que decresce à medida que o algoritmo é executado.

A temperatura inicia em T_{start} e vai reduzindo a cada iteração do algoritmo da seguinte maneira: $T \leftarrow cT$; onde $0 < c < 1$ é a taxa de resfriamento. Nos testes realizados, foi considerado $T_{start} = 25000$ e $c = 0.99975$. Quando a temperatura chega a um valor limite, denominado temperatura de congelamento, indica que o critério de parada do algoritmo foi atingido.

As funções de seleção das heurísticas de construção e remoção possuem inicialmente pesos iguais e são recalculados com base no resultado de suas aplicações. O recálculo de um peso ω_j é dado por $\omega_j \leftarrow (1 - \alpha) \omega_j + \alpha (Pontuação/Número\ de\ Vezes\ Utilizado)$ sendo α uma constante que determina as contribuições dos pesos ao longo das iterações.

O valor α foi escolhido de maneira que ao passar 1/3 do número total de iterações, os pesos sejam estabilizados. O recálculo dos pesos das heurísticas a cada iteração pode causar uma convergência prematura das mesmas. Então foi definido um tamanho de segmento K para que a atualização dos pesos seja efetuada. Cada segmento possui um número φ de iterações consecutivas. No primeiro segmento, todas as heurísticas devem possuir o mesmo peso, isto é, $\omega_i = 1$ para $i = 1, \dots, h$. Depois de φ iterações, os pesos usados na seleção das heurísticas de inserção e remoção são atualizados considerando a pontuação obtida durante o segmento. As pontuações mostram quão bem foram as performances das heurísticas de remoção e inserção no último segmento.

A pontuação da heurística é incrementada por σ_1 , σ_2 ou σ_3 . Para o PRSI-BO, se o par de heurísticas de inserção-remoção encontra uma nova melhor solução, a pontuação é incrementada em $\sigma_1 = 3000$, se é encontrada uma solução melhor que a atual, a pontuação é incrementada por $\sigma_2 = 2000$, e se é encontrada uma solução que não há melhora, mas que é aceita pelo critério de aceitação do SA, a pontuação é incrementada por $\sigma_3 = 1000$.

Quando um segmento termina, novos pesos são calculados usando as pontuações obtidas, e todas as pontuações são zeradas para o próximo segmento. Seja π_i e

o_{ij} , respectivamente, a pontuação da heurística i e o número de vezes que a heurística i foi escolhida no último segmento j , então,

$$\omega_{ij+1} = \begin{cases} \omega_{ij} & \text{se } o_{ij} = 0 \\ (1 - \eta)\omega_{ij} + \eta\pi_i & \text{se } o_{ij} \neq 0. \end{cases} \quad (16)$$

Onde $\eta \in [0,1]$ é um parâmetro denominado fator de reação que controla o quão rápido o algoritmo de ajuste de peso reage às mudanças na eficácia das heurísticas.

5.4 HEURÍSTICAS DE REMOÇÃO E DE CONSTRUÇÃO

Esta seção descreve os métodos de destruição e de reconstrução de uma solução. A cada iteração do ALNS, poços da solução atual são removidos e reinseridos na mesma rota ou em rotas diferentes.

5.4.1 Heurística de remoção shaw baseada em tempos de chegada

A ideia geral desta heurística é a remoção de poços semelhantes, pois poços semelhantes podem ser facilmente remanejados, possibilitando soluções melhores, conceito este apresentado genericamente por Shaw (2007).

O grau de similaridade entre dois poços foi determinado nesta heurística pelo tempo de chegada nos mesmos por cada sonda. Basicamente o algoritmo inicia garantindo que haja no mínimo um poço fora da solução atual e seleciona um poço i dentro da lista de poços fora da solução. Com base no tempo de chegada anterior em i , ordena a lista de poços L na solução atual em ordem crescente conforme a diferença absoluta do tempo de chegada de i para qualquer outro poço j na solução. Então é sorteado um número aleatório y entre 0 e 1, que seleciona o poço a ser retirado da solução com base no índice $y^\varphi |L|$, sendo $\varphi \geq 1$. Este processo é repetido até que γ poços sejam removidos. A Figura 10 descreve o algoritmo dessa heurística.

```

Entrada: Solução  $X$ , parâmetros  $\gamma$  e  $\varphi \geq 1$ 
if Lista de Poços fora de  $X = \{\}$  then
   $r \leftarrow$  um poço aleatório de  $X$ 
   $D \leftarrow \{r\}$ 
  Remova  $r$  de  $X$ 
end if
while  $|D| < \gamma$  do
   $r \leftarrow$  um poço aleatório de  $D$ 
   $L \leftarrow$  poços atendidos de  $X$ 
  Ordene  $L$  tal que  $i < j \Rightarrow |t(r) - t(L_i)| < |t(r) - t(L_j)|$ 
  Escolha um número aleatório  $y \in [0,1]$ 
   $i \leftarrow y^\varphi |L|$ 
  Remova  $L_i$  de  $X$ 
   $D \leftarrow L_i$ 
end while
return  $X, D$ 

```

Figura 10 – Heurística de Remoção Shaw.
 Fonte: adaptado de Ribeiro e Laporte (2012).

5.4.2 Heurística de remoção shaw baseado em distâncias

É uma Heurística de Remoção Shaw (SHAW, 2007), isto é, remove poços que estão geograficamente próximos uns dos outros, utilizando como critério de ordenação a diferença absoluta das distâncias Euclidianas entre o poço selecionado e os outros ao seu redor. Fora a diferença relatada, esse algoritmo é idêntico ao apresentado na Figura 10.

5.4.3 Heurística de remoção aleatória

Esta heurística de remoção simplesmente remove γ poços selecionados aleatoriamente da solução atual X . De acordo com Ribeiro e Laporte (2012), esta heurística tende a gerar um pior conjunto de poços removidos, porém ajuda a diversificar a busca.

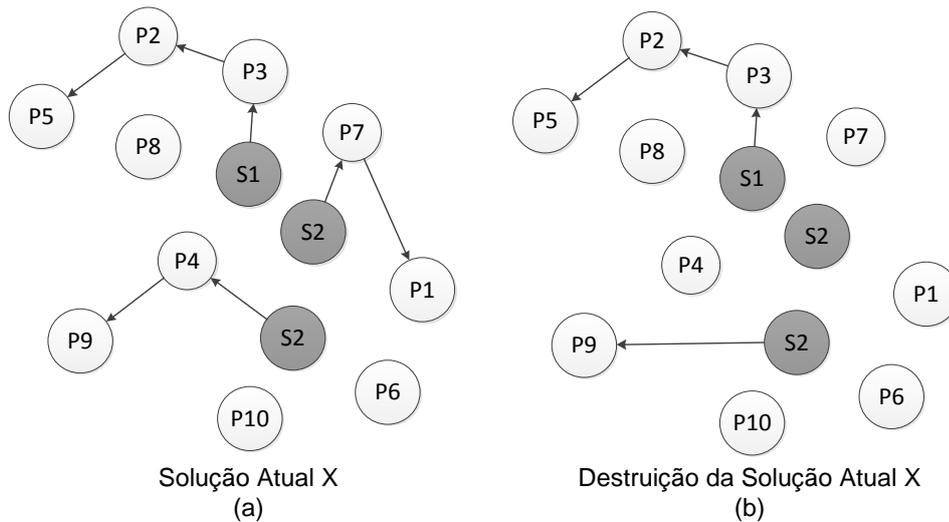


Figura 11 - Exemplo de aplicação da heurística de remoção aleatória

A Figura 11 ilustra a execução da heurística de remoção aleatória, em que no cenário contendo 10 poços (representados por P1 a P10) e 3 sondas (representadas por S1 a S3), foi removido da solução atual X, três poços aleatoriamente, para posteriormente serem re-inseridos. Após a destruição de X, a solução atual baseia-se na utilização de apenas dois poços, que atendem quatro poços.

5.4.4 Heurística de remoção do pior

Esta heurística remove poços de alto custo na solução X atual, na possibilidade da inserção de poços melhores posteriormente. Considere $Custo^-(i, X) = v(X) - v^-i(X)$ o custo associado ao poço i na solução atual X , onde $v^-(s)$ representa o custo da solução sem o poço i em X . A heurística ordena os poços de maneira crescente conforme o $Custo^-(i, X)$ e então escolhe um a ser removido da mesma maneira que a heurística de Shaw (SHAW, 2007). Este processo é repetido até que γ poços sejam removidos. A Figura 12 descreve o algoritmo dessa heurística.

```

Entrada: Solução  $X$ , parâmetros  $\gamma$  e  $\varphi \geq 1$ 
 $D \leftarrow$  Lista Vazia
while  $|D| < \gamma$  do
   $L \leftarrow$  poços atendidos de  $X$ 
  Ordene  $L$  tal que  $i < j \Rightarrow \text{Custo}^-(L_i, X) < \text{Custo}^-(L_j, X)$ 
  Escolha um número aleatório  $y \in [0,1]$ 
   $i \leftarrow y^\varphi |L|$ 
  Remove  $L_i$  de  $X$ 
   $D \leftarrow L_i$ 
end while
return  $X, D$ 

```

Figura 12 – Heurística de Remoção do Pior.
 Fonte: adaptado de Ribeiro e Laporte (2012).

5.4.5 Remoção de *cluster*

Algumas instâncias do PRSI-BO possuem *clusters* de poços, ou seja, poços agrupados em regiões do campo de petróleo. Suponha que uma sonda atenda poços de dois clusters geograficamente distantes. Então, é importante dividir estes dois grupos e remover um deles. Isso possibilita uma melhor reinserção dos mesmos.

Dado uma rota r , a heurística de remoção de clusters divide a rota r em dois grupos $G1$ e $G2$ de poços, que são obtidos com uma versão modificada do algoritmo de Kruskal (1956) para a obtenção da Árvore Geradora Mínima. O algoritmo de Kruskal obtém a árvore geradora mínima, porém, ao remover a última aresta da árvore, surgem dois subgrupos denominados $G1$ e $G2$. Esta foi a maneira encontrada para se definir os *clusters*, pois a última aresta inserida pelo algoritmo de Kruskal é a maior das menores que une todo o conjunto de poços.

Assim, um dos *clusters* é escolhido aleatoriamente e removido por completo. E se repete o algoritmo enquanto o número γ mínimo de poços a serem removidos não for atendido. A Figura 13 descreve o algoritmo desta heurística.

```

Entrada: Solução  $X$  e  $\gamma$ 
 $D \leftarrow$  Lista Vazia
while  $|D| < \gamma$  do
   $r \leftarrow$  seleciona aleatoriamente uma rota de  $X$ 
  Aplique o algoritmo de Kruskal modificado em  $r$  para encontrar  $G_1$  e  $G_2$ 
   $L \leftarrow$  os poços de  $G_1$  ou  $G_2$  aleatoriamente
  Remova os poços de  $L$  em  $X$ 
   $D \leftarrow D \cup L$ 
end while
return  $X$  e  $D$ 

```

Figura 13 – Heurística de Remoção de Cluster.
 Fonte: adaptado de Ribeiro e Laporte (2012).

5.4.6 Remoção utilizando um dígrafo de vizinhos

Esta heurística de remoção utiliza o histórico para retirada de poços. Um dígrafo entre todos os poços é construído e utiliza-se como peso em cada aresta (i, j) o valor da melhor função objetivo encontrada durante as iterações do ALNS tal que o poço i seja atendido imediatamente antes do poço j .

Assim, este dígrafo é atualizado a cada iteração do algoritmo. Inicialmente cada aresta possui peso infinito. Quando uma nova solução é encontrada, o peso da aresta no dígrafo é atualizado, se necessário, ou seja, caso a nova solução seja melhor, os pesos atuais são atualizados para os pesos da melhor solução encontrada na iteração.

Dado a solução atual, essa heurística de remoção calcula uma pontuação para cada poço pela soma dos pesos das arestas no dígrafo correspondente à configuração do vizinho na solução atual X . Os poços com maiores pontuações são sujeitos a estarem em posições ruins, então são selecionados para remoção. Quando um poço é removido, a pontuação dos vizinhos é recalculada.

5.4.7 Remoção baseada nos poços mais selecionados conforme histórico

Outra heurística que usa o histórico de busca para a remoção. Neste caso, o histórico funciona armazenando as B melhores soluções únicas encontradas até o momento pelo ALNS.

Nesta heurística, conta-se a quantidade de vezes que cada poço apareceu em cada uma destas B soluções, e então usando, a ideia da heurística de Shaw (2007), estes quantitativos são considerados como pesos para ordenação dos poços. Foi utilizado $B = 100$ nos testes computacionais.

5.4.8 Algoritmo de inserção guloso

Este algoritmo não é utilizado diretamente pelo ALNS, mas sim pelas duas heurísticas de inserção a seguir. Dado um poço i que está fora da solução em construção X , o algoritmo encontra o ponto de inserção (rota e aresta) que reduz ao máximo o valor da Função Objetivo (Equação 15), e insere o tal poço na solução atual caso o horizonte de planejamento não seja violado.

5.4.9 Heurística de inserção gulosa básica

Dada uma solução em construção X , esta heurística aplica o algoritmo de Inserção Guloso a cada poço na ordem inversa de sua remoção, considerando a última heurística de remoção de poços aplicada. Esse algoritmo de inserção busca inserir cada poço individualmente naquela posição que reduz o custo imediatamente.

5.4.10 Heurística de inserção gulosa míope

Esta heurística é uma variação da Heurística de Inserção Gulosa. Dada uma solução X , busca-se o poço i que possui a melhor redução para o custo total da solução, caso inserido. O poço i é inserido e um novo poço j é selecionado da mesma maneira até que não haja mais inserções possíveis. Quando não é possível inserir um poço, ele é marcado como poço sem atendimento ficando na lista de poços removidos. Essa heurística necessita de um tempo computacional maior que a Heurística de Inserção Gulosa.

6 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Todos os testes computacionais foram realizados em um computador com sistema operacional Windows 7, processador Intel Core i5-2450M 2.5 Ghz e 6GB de memória RAM e compilador GCC. Para calibração inicial, foram utilizadas as instâncias disponibilizadas em Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012) que possuem 80 problemas envolvendo 100 ou 200 poços, 5 ou 10 sondas e um horizonte de planejamento $H=200$ ou 300 períodos de tempo, ou seja, 10 instâncias para cada combinação de parâmetros possível. As instâncias com $H=300$ são idênticas às instâncias com $H=200$, exceto pelo valor de H .

De modo a buscar maior aproximação com a vida real, foram propostas 80 novas instâncias baseadas em dados reais, que permitiram a simulação de cenários factíveis e auxiliar a tomada de decisão pelas empresas para, assim, avaliar tanto o comportamento do ALNS quanto a relação entre os dois objetivos do PRSI-BO proposto neste trabalho.

6.1 Processo de Calibração dos Parâmetros do ALNS

A escolha da grande maioria dos parâmetros do ALNS ocorreu de maneira determinística com base em dados preliminares obtidos durante a fase de desenvolvimento para maximizar o desempenho da heurística no maior número de situações. Como o ALNS apresenta aspectos aleatórios em várias etapas do algoritmo, cada instância foi resolvida cinco vezes para obtenção da melhor solução encontrada, do valor médio e do tempo computacional médio.

Com base em Ropke e Pisinger (2006), cada parâmetro foi analisado e, uma vez encontrado o valor que apresentasse o melhor resultado médio, este foi fixado e o processo de calibração seguiu para o parâmetro seguinte, sem retorno àqueles já fixados.

Quatro instâncias das 80 propostas por Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012) foram utilizadas no processo de calibração:

- 200 poços, 10 sondas e horizonte de planejamento igual a 200;

- 200 poços, 10 sondas e horizonte de planejamento igual a 300;
- 100 poços, 10 sondas e horizonte de planejamento igual a 200; e
- 100 poços, 10 sondas e horizonte de planejamento igual a 300.

O parâmetro γ foi escolhido com base em outras implementações do ALNS, ou seja, conforme Ribeiro, Laporte e Mauri (2012) e Ribeiro e Laporte (2012). O valor de γ utilizado variou entre 10% e 40% do total de poços na solução atual. A variação do parâmetro γ não resultou em impacto significativo na maioria das instancias.

O número máximo de iterações foi escolhido com base nos trabalhos de Ribeiro, Laporte e Mauri (2012) e Ropke e Pisinger (2006), ou seja, foram utilizadas 25.000 e 50.000 iterações.

Quanto à temperatura, o valor inicial (T_{start}) utilizado foi definido como sendo igual a 1/3 do valor da perda de produção total da solução inicial (veja Função Objetivo (4)). Não foi utilizada temperatura fixa, como encontrado em outras implementações do SA, com o objetivo de utilizar temperaturas proporcionais ao valor da FO de instâncias de diferentes tamanhos. Desta forma, a variação do parâmetro T_{start} varia juntamente com o valor da Função Objetivo das diferentes instâncias. A temperatura de congelamento (T_{frozen}) foi escolhida como sendo igual a 1/5000 do valor da solução inicial. Desta forma, o taxa de resfriamento foi criada de acordo com as características do problema, sendo definida como $c = \left(\frac{T_{frozen}}{T_{start}}\right)^{1/I_{Max}}$, onde I_{Max} representa o número máximo de iterações utilizado. Para outros problemas e outras instâncias pode ser que outros valores sejam mais adequados.

O fator de reação η foi definido como sendo 0,04 e 0,02 para 25.000 e 50.000 iterações, respectivamente, para recálculo dos pesos das heurísticas de remoção e reconstrução. Considerando o tamanho do segmento, definiu-se o valor de 50 iterações como sendo adequado, conforme relatado em Ribeiro, Laporte e Mauri (2012) e Ribeiro e Laporte (2012).

Com os parâmetros definidos acima, a Tabela 1 mostra os resultados para as quatro instâncias citadas sendo que:

- A primeira coluna identifica a instância. Por exemplo, a nomenclatura 200w_10r_1_200PH indica que a instancia possui 200 poços, 10 sondas, que é a primeira da relação do conjunto com essas características, e que o horizonte de planejamento é igual 200;
- A coluna Ótimo indica o resultado ótimo encontrado para a instância em Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012);
- A coluna “Melhor” indica o melhor resultado obtido nas cinco execuções do ALNS;
- A coluna “Média” indica a média dos cinco resultados obtidos;
- A coluna “T (s)” indica o tempo médio de execução do algoritmo em segundos; e
- A coluna “Desvio” apresenta a diferença em percentagem dos resultados gerados pelo BCP (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012) e ALNS.

TABELA 1 – ANÁLISE DA QUANTIDADE DE ITERAÇÕES

Instância	Ótimo	Qtd. Iterações: 25000				Qtd. Iterações: 50000			
		Melhor	Média	T(s)	Desvio	Melhor	Média	T(s)	Desvio
100w_10r_1_200PH	-52034	-52020	-51965,1	14,0	0,03%	-52034	-52018,0	24,1	0,00%
100w_10r_1_300PH	-111649	-111649	-111629,9	10,4	0,00%	-111649	-111649,0	18,2	0,00%
200w_10r_1_200PH	-67670	-67670	-67376,4	103,5	0,00%	-67670	-67500,0	187,5	0,00%
200w_10r_1_300PH	-149076	-147996	-147368,0	126,7	0,72%	-148427	-148111,0	221,6	0,44%

A Figura 14 mostra a convergência da metaheurística ALNS, para 25000 iterações. Percebe-se na imagem um comportamento semelhante ao do conhecido SA, o que é justificado pela característica do ALNS, que utiliza o conceito do SA para controlar a camada adaptativa do algoritmo. Nesta figura, são mostrados os valores referente ao custo da Função Objetivo, isto é, a taxa de perda de produção total l_i (primeiro termo da equação (4)), desconsiderando o segundo termo da equação (4), que transforma a Função Objetivo para ganho de produção.

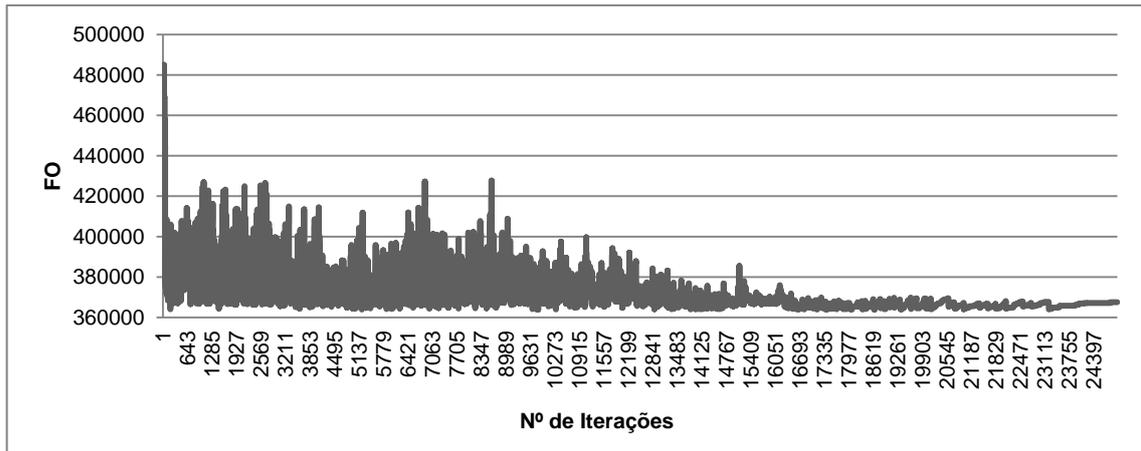


Figura 14 – Convergência da Meta-Heurística ALNS – Variação da perda de produção das soluções aceitas durante o processo de busca do ALNS em função do número de iterações. Instância utilizada: 200w_10r_1_300PH.

6.2 Resultados do ALNS para o PRSI mono-objetivo

As Tabelas 2 a 9 apresentam os resultados do ALNS mono-objetivo para as 80 instâncias propostas em Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012). Essas tabelas exibem também os resultados obtidos pelo algoritmo de *branch-price-and-cut* (BCP) de modo a verificar a eficiência do ALNS.

Nas Tabelas 2 a 9 são apresentadas as seguintes colunas:

- A coluna “Instância” indica o nome da instância e segue o mesmo padrão apresentado anteriormente;
- No grupo de colunas BPC, apresentam-se os resultados gerados em Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012), considerados o estado-da-arte, que são divididos da seguinte maneira:
 - A coluna “Ótimo” indica o resultado ótimo encontrado para a instância. As células que possuem a informação NE* indicam que o BCP não chegou à solução ótima dentro do tempo de execução de 3.600 segundos;
 - A coluna “Limitante Inferior” indica o melhor limitante inferior encontrado pelo BCP para a instância relacionada; e

- A coluna “Tempo (s)” indica o tempo necessário para o BCP encontrar a solução ótima.
- No grupo de colunas ALNS, apresentam-se os resultados gerados pelo ALNS descrito no Capítulo 5. Este grupo de colunas é assim subdividido:
 - A coluna “Melhor” indica a melhor solução encontrada para a instância durante as cinco execuções do algoritmo;
 - A coluna “Média” indica a média dos cinco resultados gerados pela execução do algoritmo para a instância relacionada;
 - A coluna “Tempo Médio(s)” o tempo computacional média para as cinco execuções do algoritmo.
- A coluna “Desvio” apresenta a diferença em percentagem dos resultados gerados pelo BCP e ALNS. Nesta coluna são considerados prioritariamente os resultados listados na coluna “Ótimo” do BPC, porém, nas instâncias em que o BPC não encontrou as soluções ótimas, foi considerado o limitante inferior para o cálculo.
- A coluna “Desvio Padrão” apresenta a diferença em percentagem dos resultados gerados nas colunas “Melhor” e “Média”, com o objetivo de avaliar a robustez das do algoritmo.

TABELA 2 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS PELO ALNS MONO-OBJETIVO COM OS RESULTADOS GERADOS PELO BCP (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012) – INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 5 SONDAS E 200 UNIDADES DE HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.

Instância	BPC			ALNS			Desvio	Desvio Padrão
	Ótimo	Limitante Inferior	Tempo (s)	Melhor	Média	Tempo Médio (s)		
100w_5r_1_200PH	-32275	-32285	3,0	-32275	-32275	23,5	0,00%	0,00%
100w_5r_2_200PH	-29068	-29140	4,8	-29068	-29068	20,2	0,00%	0,00%
100w_5r_3_200PH	-28466	-28487	13,4	-28466	-28395	26,9	0,00%	0,25%
100w_5r_4_200PH	-27929	-27929	1,2	-27929	-27884	23,7	0,00%	0,16%
100w_5r_5_200PH	-26398	-26506	4,1	-26398	-26398	20,4	0,00%	0,00%
100w_5r_6_200PH	-26661	-26661	2,3	-26661	-26566	28,8	0,00%	0,36%
100w_5r_7_200PH	-26128	-26128	0,5	-26128	-26128	13,8	0,00%	0,00%
100w_5r_8_200PH	-32912	-32999	8,6	-32912	-32912	30,6	0,00%	0,00%
100w_5r_9_200PH	-26704	-26704	1,0	-26704	-26704	21,6	0,00%	0,00%
100w_5r_10_200PH	-33521	-33521	2,6	-33521	-33521	22,8	0,00%	0,00%
MÉDIA	-28643	-29036	4,1	-29006	-28985,1	23,2	0,00%	0,07%

TABELA 3 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS PELO ALNS MONO-OBJETIVO COM OS RESULTADOS GERADOS PELO BCP (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012) – INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 10 SONDAS E 200 UNIDADES DE HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.

Instância	BPC			ALNS			Desvio	Desvio Padrão
	Ótimo	Limitante Inferior	Tempo (s)	Melhor	Média	Tempo Médio (s)		
100w_10r_1_200PH	-52034	-52128	14,9	-52034	-52018	24,1	0,00%	0,03%
100w_10r_2_200PH	-46189	-46216	6,5	-46189	-46075	23,7	0,00%	0,25%
100w_10r_3_200PH	-47003	-47205	85,9	-47003	-47003	29,3	0,00%	0,00%
100w_10r_4_200PH	-46513	-46528	6,6	-46513	-46513	21,9	0,00%	0,00%
100w_10r_5_200PH	-47734	-47734	2,7	-47734	-47734	23,0	0,00%	0,00%
100w_10r_6_200PH	-41834	-42000	10,2	-41834	-41834	27,5	0,00%	0,00%
100w_10r_7_200PH	-44703	-44703	3,5	-44703	-44700	17,6	0,00%	0,01%
100w_10r_8_200PH	-51208	-51296	5,8	-51208	-51208	24,6	0,00%	0,00%
100w_10r_9_200PH	-45796	-45876	26,2	-45796	-45786	23,8	0,00%	0,02%
100w_10r_10_200PH	-51279	-51279	4,8	-51279	-51279	26,9	0,00%	0,00%
MÉDIA	-47429,3	-47496,5	16,7	-47429	-47415	24,2	0,00%	0,03%

TABELA 4 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS PELO ALNS MONO-OBJETIVO COM OS RESULTADOS GERADOS PELO BCP (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012) – INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 5 SONDAS E 200 UNIDADES DE HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.

Instância	BPC			ALNS			Desvio	Desvio Padrão
	Ótimo	Limitante Inferior	Tempo (s)	Melhor	Média	Tempo Médio (s)		
200w_5r_1_200PH	-40257	-40447	194,8	-40257	-40219	136,0	0,00%	0,09%
200w_5r_2_200PH	-35084	-35084	12,5	-34855	-34484	99,5	0,65%	1,06%
200w_5r_3_200PH	-40195	-40273	85,8	-40195	-40184	152,0	0,00%	0,03%
200w_5r_4_200PH	-40523	-40757	45,4	-40523	-40462	140,2	0,00%	0,15%
200w_5r_5_200PH	-40194	-40291	55,0	-40194	-40154	123,0	0,00%	0,10%
200w_5r_6_200PH	-42335	-42411	137,7	-42322	-42322	193,2	0,03%	0,00%
200w_5r_7_200PH	-33070	-33180	96,8	-33070	-33068	86,8	0,00%	0,01%
200w_5r_8_200PH	-39517	-39517	20,7	-39517	-39492	163,3	0,00%	0,06%
200w_5r_9_200PH	-45683	-45683	28,4	-45683	-45478	143,5	0,00%	0,45%
200w_5r_10_200PH	-38036	-38036	15,2	-38036	-38008	121,6	0,00%	0,07%
MÉDIA	-39489,4	-39567,9	69,23	-39465	-39387,1	135,9	0,07%	0,20%

TABELA 5 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS PELO ALNS MONO-OBJETIVO COM OS RESULTADOS GERADOS PELO BCP (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012) – INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 10 SONDAS E 200 UNIDADES DE HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.

Instância	BPC			ALNS			Desvio	Desvio Padrão
	Ótimo	Limitante Inferior	Tempo (s)	Melhor	Média	Tempo Médio (s)		
200w_10r_1_200PH	-67670	-67670	76,4	-67670	-67500	187,5	0,00%	0,25%
200w_10r_2_200PH	-61377	-61592	290,9	-61354	-61295	155,0	0,04%	0,10%
200w_10r_3_200PH	-66032	-66353	380,7	-65853	-65645	206,4	0,27%	0,32%
200w_10r_4_200PH	-67445	-67813	2734,5	-67399	-67302	184,6	0,07%	0,14%
200w_10r_5_200PH	-72658	-72773	288,8	-72658	-72621	189,9	0,00%	0,05%
200w_10r_6_200PH	NE*	-67602	3600,0	-67122	-66815	205,5	0,71%*	0,46%
200w_10r_7_200PH	-60036	-60087	51,0	-60036	-59954	135,5	0,00%	0,14%
200w_10r_8_200PH	-60350	-60512	401,8	-60350	-60302	198,2	0,00%	0,08%
200w_10r_9_200PH	-79301	-79670	412,4	-79301	-79247	224,9	0,00%	0,07%
200w_10r_10_200PH	-61968	-62090	177,5	-61968	-61723	195,9	0,00%	0,40%
MÉDIA	-66315,2	-66616,2	841,4	-66371	-66240,4	188,3	0,11%	0,20%

TABELA 6 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS PELO ALNS MONO-OBJETIVO COM OS RESULTADOS GERADOS PELO BCP (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012) – INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 5 SONDAS E 300 UNIDADES DE HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.

Instância	BPC			ALNS			Desvio	Desvio Padrão
	Ótimo	Limitante Inferior	Tempo (s)	Melhor	Média	Tempo Médio (s)		
100w_5r_1_300PH	-71487	-71609	38,1	-71487	-71478	33,2	0,00%	0,01%
100w_5r_2_300PH	-63737	-63779	32,9	-63737	-63700	27,4	0,00%	0,06%
100w_5r_3_300PH	NE*	-64625	3600,0	-63641	-63588	36,9	1,52%*	0,08%
100w_5r_4_300PH	-60144	-60633	372,7	-60144	-60123	32,3	0,00%	0,03%
100w_5r_5_300PH	-60598	-61059	258,0	-60598	-60575	29,9	0,00%	0,04%
100w_5r_6_300PH	-60081	-60195	269,5	-60081	-60000	40,1	0,00%	0,13%
100w_5r_7_300PH	-59372	-59554	28,1	-59372	-59372	18,4	0,00%	0,00%
100w_5r_8_300PH	-74611	-74688	140,0	-74611	-74363	39,2	0,00%	0,33%
100w_5r_9_300PH	-61860	-61874	21,4	-61860	-61860	29,6	0,00%	0,00%
100w_5r_10_300PH	-72805	-73214	103,7	-72805	-72758	29,1	0,00%	0,06%
MÉDIA	-64966,1	-65123	486,4	-64834	-64781,7	31,6	0,15%	0,08%

TABELA 7 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS PELO ALNS MONO-OBJETIVO COM OS RESULTADOS GERADOS PELO BCP (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012) – INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 10 SONDAS E 300 UNIDADES DE HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.

Instância	BPC			ALNS			Desvio	Desvio Padrão
	Ótimo	Limitante Inferior	Tempo (s)	Melhor	Média	Tempo Médio (s)		
100w_10r_1_300PH	-111649	-111672	56,9	-111649	-111649	18,2	0,00%	0,00%
100w_10r_2_300PH	-97802	-98052	363,8	-97802	-97797	18,1	0,00%	0,01%
100w_10r_3_300PH	-100913	-101390	2356,3	-100913	-100908	18,6	0,00%	0,00%
100w_10r_4_300PH	-96886	-97048	205,0	-96886	-96823	18,5	0,00%	0,07%
100w_10r_5_300PH	-102631	-102668	48,4	-102631	-102602	18,3	0,00%	0,03%
100w_10r_6_300PH	NE*	-90624	3600,0	-89949	-89949	20,7	0,74%*	0,00%
100w_10r_7_300PH	-96842	-97245	121,4	-96842	-96832	14,7	0,00%	0,01%
100w_10r_8_300PH	-108731	-109079	134,3	-108731	-108674	17,5	0,00%	0,05%
100w_10r_9_300PH	-98843	-99129	359,5	-98843	-98707	19,2	0,00%	0,14%
100w_10r_10_300PH	-109304	-109309	42,6	-109304	-109133	18,8	0,00%	0,16%
MÉDIA	-102622,3	-101621,6	728,8	-101355	-101307,4	18,3	0,07%	0,05%

TABELA 8 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS PELO ALNS MONO-OBJETIVO COM OS RESULTADOS GERADOS PELO BCP (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012) – INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 5 SONDAS E 300 UNIDADES DE HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.

Instância	BPC			ALNS			Desvio	Desvio Padrão
	Ótimo	Limitante Inferior	Tempo (s)	Melhor	Média	Tempo Médio (s)		
200w_5r_1_300PH	-90317	-90317	268,1	-90301	-90094	228,1	0,02%	0,23%
200w_5r_2_300PH	-83684	-83740	262,1	-83640	-82165	171,6	0,05%	1,76%
200w_5r_3_300PH	-91981	-91995	686,7	-91955	-91586	252,2	0,03%	0,40%
200w_5r_4_300PH	-91917	-91917	243,4	-91901	-91466	230,8	0,02%	0,47%
200w_5r_5_300PH	-91957	-92052	2456,1	-91757	-91508	205,1	0,22%	0,27%
200w_5r_6_300PH	NE*	-96757	3600,0	-95916	-95467	303,0	0,87%*	0,47%
200w_5r_7_300PH	-76049	-76183	1897,0	-76049	-75950	154,9	0,00%	0,13%
200w_5r_8_300PH	-89421	-89421	632,7	-89421	-89373	269,3	0,00%	0,05%
200w_5r_9_300PH	-99962	-99962	545,3	-99959	-99027	228,3	0,00%	0,93%
200w_5r_10_300PH	-86564	-87145	1803,6	-86548	-86421	204,1	0,02%	0,15%
MÉDIA	-89094,6	-89948,9	1239,5	-89744,7	-89305,7	224,7	0,12%	0,49%

TABELA 9 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS PELO ALNS MONO-OBJETIVO COM OS RESULTADOS GERADOS PELO BCP (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012) – INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 10 SONDAS E 300 UNIDADES DE HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.

Instância	BPC			ALNS			Desvio	Desvio Padrão
	Ótimo	Limitante Inferior	Tempo (s)	Melhor	Média	Tempo Médio (s)		
200w_10r_1_300PH	NE*	-149076	3600,0	-148427	-148111	221,6	0,44%*	0,21%
200w_10r_2_300PH	NE*	-139450	3600,0	-137935	-137862	182,4	1,09%*	0,05%
200w_10r_3_300PH	NE*	-151256	3600,0	-149890	-149221	248,2	0,90%*	0,45%
200w_10r_4_300PH	NE*	-152692	3600,0	-151996	-151043	227,1	0,46%*	0,63%
200w_10r_5_300PH	NE*	-159988	3600,0	-159094	-158663	219,1	0,56%*	0,27%
200w_10r_6_300PH	NE*	-154021	3600,0	-153497	-152816	241,0	0,34%*	0,44%
200w_10r_7_300PH	NE*	-134695	3600,0	-133996	-133603	148,4	0,52%*	0,29%
200w_10r_8_300PH	NE*	-141087	3600,0	-139436	-138969	234,5	1,17%*	0,33%
200w_10r_9_300PH	NE*	-170977	3600,0	-169543	-169017	257,7	0,84%*	0,31%
200w_10r_10_300PH	NE*	-144645	3600,0	-143593	-142646	242,5	0,73%*	0,66%
MÉDIA	NE*	-149788,7	3600,0	-148740,7	-148195,1	222,2	0,71%	0,37%

Ao analisar as Tabelas 2 a 9, constata-se a eficiência do ALNS que chegou à solução ótima em 54 dos casos analisados, ou seja, em 67,5% do número total de instâncias. Dentre essas, o BPC não encontrou a solução ótima de 14 das 80 instâncias processadas, e o ALNS, por sua vez, apresentou um desvio médio de apenas 0,78% para elas, ou seja, o ALNS apresentou soluções muito próximas dos limitantes inferiores e, assim, conjectura-se que algumas das soluções obtidas sejam ótimas.

Quanto aos problemas resolvidos de maneira ótima, as soluções do ALNS apresentaram um desvio médio de apenas 0,02%, isto é, o ALNS consegue apresentar resultados muito próximos dos valores ótimos.

Ressalta-se a robustez do ALNS, ao avaliar os valores apresentados na coluna Desvio Padrão, no qual verifica-se que em apenas duas instâncias o algoritmo superou a barreira de um por cento, sendo que as médias ficam bem abaixo desse valor.

Em relação ao tempo computacional necessário para geração das soluções, se torna difícil realizar uma análise exata, pois trata-se de uma comparação de resultados gerados em computadores com configurações distintas. Destaca-se, porém que o ALNS levou, no pior caso, aproximadamente quatro minutos para ser concluído. Ressalta-se que para instâncias maiores o ALNS foi mais eficiente.

Com base nessas análises, verifica-se que o ALNS aqui proposto apresenta bons resultados o para o PRSI mono objetivo proposto por Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012), e desta forma, pode ser utilizado no PRSI-BO, como é mostrado a seguir.

6.3 Propostas de Novas Instâncias

De modo a buscar uma maior aproximação do real contexto do problema, nesta seção são propostas 80 novas instâncias, que foram baseadas nas informações fornecidas por Aloise *et al.* (2006) no qual objetiva-se gerar resultados com

grandezas próximas das apresentadas no citado estudo. Ribeiro, Desaulniers, e Desrosiers (2012) não consideram distâncias reais em seu estudo.

Para a determinação do número de poços, da quantidade de sondas e horizonte de planejamento, este trabalho se baseou nos dados de Ribeiro, Desaulniers, e Desrosiers (2012). Buscando utilizar dados que representassem a realidade de uma bacia, os dados relativos a distância percorrida, tempo de serviço e taxa de perda de produção, se basearam no trabalho de Aloise *et al.* (2006) que trazem dados reais da bacia potiguar, no nordeste brasileiro. Desta forma, a utilização de dados próximos à realidade destas duas referências permite analisar cenários factíveis que possam auxiliar a tomada de decisão pelas empresas.

Os detalhes considerados na geração das novas instâncias, segundo as referências citadas, foram os seguintes:

- O horizonte de planejamento baseia-se em 15 e 30 dias, ou mais especificamente, 360 e 720 horas, respectivamente;
- O tempo de deslocamento entre Sonda-Poço e Poço-Poço limita-se entre 1 e 6 horas;
- De acordo com Aloise *et al.* (2006), cada poço possui uma perda de produção média de dois metros cúbicos de óleo por dia, mas no campo, alguns destes possuem alta produção. Dessa forma, é gerada aleatoriamente a taxa de perda de produção em metros cúbicos por dia de petróleo como segue:

$$0,5 + \exp(2) \tag{21}$$

onde o termo $\exp(2)$ define uma distribuição exponencial com média igual a dois, neste caso, sendo considerado como limitante superior, isso é, na geração das instâncias, considera-se neste termo, o valor entre 0 e $\exp(2)$. A constante 0,5 permite explicar o fato de que os poços que solicitam manutenção sempre apresentam uma perda de produção mínima, caso contrário, não seria atendido.

Entretanto, foi considerado o valor monetário que poderia ser obtido com a recuperação da produção uma vez que o poço teve o seu problema corrigido após sofrer a manutenção prevista. Assim, ao analisar o valor do

metro cúbico de petróleo no ano de 2014, veja APÊNDICE A, verificou-se, por meio de uma regressão linear, que o valor seria de 750,00 dólares por dia considerando a média de todos os meses do ano de 2014. Com isso a perda de produção de cada poço pode ser assim apresentada:

$$(0,5 + \exp(2))[m^3/dia] \left(\frac{750[m^3/dia]}{24[h/dia]} \right) = 16,625 + 15,625 \exp(2) [m^3/h] \quad (22)$$

- Tempos de serviço são gerados aleatoriamente entre um e seis dias, ou seja, entre 24 e 144 horas, conforme Aloise *et al.* (2006).

Ao traduzir a perda de produção em valores monetários por hora, pode-se utilizar o custo horário das sondas e, assim, a Função Objetivo (15) apresenta compatibilidade entre unidades.

De acordo com especialistas que trabalham na Unidade da Petrobras localizada em São Mateus, Espírito Santo, o custo diário de uma sonda se aproxima de 6.000,00 dólares. Dessa forma, o custo horário de uma sonda é dado por 250,00 dólares.

Analisando novamente a Função Objetivo (15) e considerando os dados apresentados acima, destaca-se que todas as instâncias geradas estão disponibilizadas na mídia do APÊNDICE B.

6.4 Resultados - Frota Homogênea

Embora o problema real considere frota heterogênea de sondas, foram realizados testes computacionais com frota homogênea de modo a avaliar o ALNS para o PRSI-BO com este tipo de frota.

As instâncias foram alteradas da seguinte maneira para trabalhar com frota heterogênea: o nível de serviço das sondas foi modificado para o nível máximo. Dessa maneira, todas as sondas se tornaram iguais e podem realizar qualquer tipo de serviço.

Assim como na Seção 6.2, o ALNS foi aplicado cinco vezes a cada instância e os resultados estão mostrados nas Tabelas 10 a 17. Os testes consideram um horizonte de planejamento de:

- 360 h. Com um custo horário da sonda de US\$ 250,00, o custo total associado à utilização dessa sonda durante esse horizonte de planejamento é de $\tau_2 = \text{US\$ } 90.000,00$; e
- 720 h. Neste caso, seguindo o mesmo raciocínio anterior, o custo total associado à utilização dessa sonda durante esse horizonte de planejamento é de $\tau_2 = \text{US\$ } 180.000,00$

Nas Tabelas 10 a 17:

- A coluna “Instância” indica o nome da instância que segue o padrão anteriormente apresentado, exceto pelo horizonte de planejamento que pode ser 360 h ou 720 h;
- A coluna “FO” representa o valor médio da função objetivo (15), isto é, o ganho médio gerado após execução do algoritmo;
- A coluna “Tempo (s)” apresenta o tempo computacional médio necessário para a execução do ALNS;
- A coluna “Sondas” indica o número médio de sondas utilizadas;
- A coluna “Poços Atendidos” indica o número médio de poços servidos; e
- A coluna “Distância” indica a distância média percorrida pelas sondas.

TABELA 10 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 5 SONDAS, PH=360 E CUSTO DA SONDA=90000 COM FROTA HOMOGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços atendidos	Distância
100w_5r_1_360PH	-703827,0	25,2	5,0	37,2	57,0
100w_5r_2_360PH	-772002,6	25,7	5,0	38,2	66,0
100w_5r_3_360PH	-638511,0	23,0	5,0	33,2	57,0
100w_5r_4_360PH	-576995,6	22,0	5,0	31,8	53,6
100w_5r_5_360PH	-522053,4	20,3	5,0	32,4	63,6
100w_5r_6_360PH	-622202,2	22,9	5,0	33,4	55,8
100w_5r_7_360PH	-634804,6	22,8	5,0	33,8	55,4
100w_5r_8_360PH	-569194,6	20,9	5,0	31,4	54,6
100w_5r_9_360PH	-526976,4	22,2	5,0	32,8	55,0
100w_5r_10_360PH	-699430,4	24,3	5,0	36,2	63,4
MÉDIA	-626599,7	22,9	5,0	34,0	58,1

TABELA 11 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 10 SONDAS, PH=360 E CUSTO DA SONDA=90000 COM FROTA HOMOGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços atendidos	Distância
100w_10r_1_360PH	-737652,8	26,8	10,0	58,4	98,8
100w_10r_2_360PH	-788873,8	26,3	10,0	56,6	100,2
100w_10r_3_360PH	-653678,0	26,8	10,0	56,0	88,2
100w_10r_4_360PH	-805546,6	26,1	10,0	53,8	98,6
100w_10r_5_360PH	-826909,6	26,2	10,0	56,2	100,6
100w_10r_6_360PH	-692329,8	26,5	10,0	53,4	91,4
100w_10r_7_360PH	-792022,6	24,7	10,0	53,6	93,8
100w_10r_8_360PH	-642353,4	23,8	10,0	54,2	101,0
100w_10r_9_360PH	-683098,0	24,4	10,0	54,2	85,6
100w_10r_10_360PH	-818313,2	25,4	10,0	56,4	97,6
MÉDIA	-744077,8	25,7	10,0	55,3	95,6

TABELA 12 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 5 SONDAS, PH=360 E CUSTO DA SONDA=90000 COM FROTA HOMOGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços atendidos	Distância
200w_5r_1_360PH	-838538,0	123,1	5,0	39,2	60,8
200w_5r_2_360PH	-890838,8	119,2	5,0	38,2	61,8
200w_5r_3_360PH	-976654,6	124,8	5,0	43,2	62,2
200w_5r_4_360PH	-795135,0	134,4	5,0	40,0	58,0
200w_5r_5_360PH	-1091065,3	157,2	5,0	44,4	69,6
200w_5r_6_360PH	-775163,0	136,0	5,0	39,0	63,4
200w_5r_7_360PH	-918750,8	139,3	5,0	41,4	67,4
200w_5r_8_360PH	-851962,2	129,3	5,0	40,6	63,8
200w_5r_9_360PH	-931080,4	128,6	5,0	40,6	62,2
200w_5r_10_360PH	-916074,6	131,3	5,0	42,0	68,6
MÉDIA	-898526,3	132,3	5,0	40,9	63,8

TABELA 13 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 10 SONDAS, PH=360 E CUSTO DA SONDA=90000 COM FROTA HOMOGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços atendidos	Distância
200w_10r_1_360PH	-1043870,0	161,9	10,0	66,2	104,4
200w_10r_2_360PH	-968697,0	159,5	10,0	64,8	103,4
200w_10r_3_360PH	-1374210,3	181,4	10,0	71,0	119,8
200w_10r_4_360PH	-1440791,3	178,6	10,0	71,0	112,4
200w_10r_5_360PH	-1044063,0	164,5	10,0	67,4	107,6
200w_10r_6_360PH	-1104268,6	164,5	10,0	68,0	103,2
200w_10r_7_360PH	-973814,8	149,5	10,0	63,8	102,8
200w_10r_8_360PH	-932936,6	151,6	10,0	62,6	105,2
200w_10r_9_360PH	-1147587,0	165,3	10,0	68,6	114,2
200w_10r_10_360PH	-1190163,6	167,8	10,0	70,4	109,8
MÉDIA	-1122040,2	164,5	10,0	67,4	108,3

TABELA 14 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 5 SONDAS, PH=720 E CUSTO DA SONDA=180000 COM FROTA HOMOGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços atendidos	Distância
100w_5r_1_720PH	-2812888,0	34,4	5,0	56,4	85,6
100w_5r_2_720PH	-2983856,3	36,1	5,0	60,0	107,4
100w_5r_3_720PH	-2673817,5	33,1	5,0	52,0	86,4
100w_5r_4_720PH	-2535548,5	33,2	5,0	52,6	90,6
100w_5r_5_720PH	-2398363,5	32,5	5,0	50,0	89,6
100w_5r_6_720PH	-2684422,3	35,9	5,0	54,0	90,8
100w_5r_7_720PH	-2673427,3	36,1	5,0	54,8	97,8
100w_5r_8_720PH	-2422796,8	32,3	5,0	49,2	85,0
100w_5r_9_720PH	-2420154,3	33,8	5,0	52,6	82,2
100w_5r_10_720PH	-2836409,0	35,9	5,0	57,2	97,6
MÉDIA	-2644168,3	34,3	5,0	53,9	91,3

TABELA 15 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 10 SONDAS, PH=720 E CUSTO DA SONDA=180000 COM FROTA HOMOGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços atendidos	Distância
100w_10r_1_720PH	-3260522,5	21,6	10,0	90,4	147,8
100w_10r_2_720PH	-3526708,0	23,6	10,0	88,6	152,0
100w_10r_3_720PH	-3105169,3	25,4	10,0	85,8	139,6
100w_10r_4_720PH	-3619362,5	26,0	10,0	83,8	152,4
100w_10r_5_720PH	-3793168,0	24,3	10,0	87,0	141,2
100w_10r_6_720PH	-3405726,5	25,6	10,0	84,8	150,8
100w_10r_7_720PH	-3520382,5	25,9	10,0	84,0	146,0
100w_10r_8_720PH	-3228825,5	23,6	10,0	85,8	152,8
100w_10r_9_720PH	-3381508,8	23,7	10,0	86,8	137,6
100w_10r_10_720PH	-3662311,5	23,3	10,0	85,4	137,6
MÉDIA	-3450368,5	24,3	10,0	86,2	145,8

TABELA 16 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 5 SONDAS, PH=720 E CUSTO DA SONDA=180000 COM FROTA HOMOGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços atendidos	Distância
200w_5r_1_720PH	-3507166,5	237,6	5,0	64,6	98,0
200w_5r_2_720PH	-3620124,0	232,6	5,0	62,4	100,4
200w_5r_3_720PH	-3998755,5	246,6	5,0	73,8	106,8
200w_5r_4_720PH	-3444232,0	212,9	5,0	66,2	102,8
200w_5r_5_720PH	-4246019,5	227,7	5,0	74,4	115,0
200w_5r_6_720PH	-3251094,5	218,6	5,0	63,0	94,4
200w_5r_7_720PH	-3774618,5	232,5	5,0	68,0	105,0
200w_5r_8_720PH	-3568781,5	233,7	5,0	66,8	102,6
200w_5r_9_720PH	-3877906,5	220,0	5,0	67,6	105,0
200w_5r_10_720PH	-3748935,3	228,9	5,0	70,6	109,0
MÉDIA	-3703763,4	229,1	5,0	67,7	103,9

TABELA 17 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 10 SONDAS, PH=720 E CUSTO DA SONDA=180000 COM FROTA HOMOGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços atendidos	Distância
200w_10r_1_720PH	-4897183,0	226,8	10,0	106,0	159,6
200w_10r_2_720PH	-4538921,5	223,7	10,0	102,6	156,4
200w_10r_3_720PH	-5579637,5	235,9	10,0	110,0	174,4
200w_10r_4_720PH	-5753964,5	231,7	10,0	111,4	169,8
200w_10r_5_720PH	-4755694,5	233,4	10,0	108,6	161,4
200w_10r_6_720PH	-4717159,0	232,1	10,0	106,2	158,8
200w_10r_7_720PH	-4338027,5	218,7	10,0	97,8	148,6
200w_10r_8_720PH	-4350605,5	216,5	10,0	100,0	155,6
200w_10r_9_720PH	-4903005,5	223,6	10,0	107,6	161,4
200w_10r_10_720PH	-5209244,0	229,5	10,0	111,2	172,2
MÉDIA	-4904344,3	227,2	10,0	106,1	161,8

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 10 a 17, percebe-se que o ALNS usou todas as sondas disponíveis em cada instância, e mesmo assim não consegue atender a todos os poços, devido a limitação do horizonte de

planejamento. Dessa forma, constata-se que, no cenário avaliado, compensa custear o número de sondas disponíveis, considerando o custo total da perda de produção, juntamente com o valor do metro cúbico de petróleo e o custo de aluguel das sondas.

Na próxima seção são apresentados os resultados quando considerado as instâncias com frota heterogênea, foco deste trabalho, por ser mais próximo da realidade de diversos campos de petróleo.

6.5 Resultados - Frota Heterogênea

As Tabelas 18 a 25 apresentam os resultados gerados para as instâncias descritas anteriormente, considerando frota heterogênea. Essas tabelas possuem a mesma estrutura das Tabelas 10 a 17.

A partir das Tabelas 18 a 25, percebe-se que o ALNS apresenta resultados iguais aos das Tabelas 10 a 17 quanto ao número de sondas utilizadas, ou seja, todas as sondas disponíveis foram acionadas e em ambos os casos também foi gerada soluções com poços sem atendimento. Por outro lado, percebe-se que o tempo computacional aumentou um pouco, passando de aproximadamente 160 s para 180 s, no pior caso.

TABELA 18 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 5 SONDAS, PH=360 E CUSTO DA SONDA=90000 COM FROTA HETEROGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços Atendidos	Distância
100w_5r_1_360PH	-700261,4	18,5	5,0	37,0	65,2
100w_5r_2_360PH	-746738,2	16,3	5,0	37,4	77,2
100w_5r_3_360PH	-636898,4	18,5	5,0	33,0	56,2
100w_5r_4_360PH	-572946,2	17,2	5,0	31,4	54,4
100w_5r_5_360PH	-518934,8	15,4	5,0	31,6	70,0
100w_5r_6_360PH	-621699,8	21,2	5,0	33,2	56,2
100w_5r_7_360PH	-580412,8	12,7	5,0	32,2	60,2
100w_5r_8_360PH	-568478,8	19,2	5,0	31,0	55,8
100w_5r_9_360PH	-519328,2	16,0	5,0	32,0	66,0
100w_5r_10_360PH	-694346,4	18,0	5,0	36,0	65,2
MÉDIA	-616004,5	17,3	5,0	33,5	62,6

TABELA 19 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 10 SONDAS, PH=360 E CUSTO DA SONDA=90000 COM FROTA HETEROGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços Atendidos	Distância
100w_10r_1_360PH	-734414,8	19,0	10,0	58,2	108,0
100w_10r_2_360PH	-767136,6	17,2	10,0	56,2	117,8
100w_10r_3_360PH	-651444,6	21,9	10,0	55,4	97,4
100w_10r_4_360PH	-799500,2	17,7	10,0	54,0	106,8
100w_10r_5_360PH	-819317,6	21,1	10,0	55,4	110,4
100w_10r_6_360PH	-686242,0	21,3	10,0	54,2	101,8
100w_10r_7_360PH	-769054,4	13,2	10,0	50,4	101,0
100w_10r_8_360PH	-630823,8	20,9	10,0	54,2	104,2
100w_10r_9_360PH	-681640,8	21,8	10,0	54,0	95,2
100w_10r_10_360PH	-813518,8	22,1	10,0	55,8	100,8
MÉDIA	-735309,4	19,6	10,0	54,8	104,3

TABELA 20 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 5 SONDAS, PH=360 E CUSTO DA SONDA=90000 COM FROTA HETEROGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços Atendidos	Distância
200w_5r_1_360PH	-830941,0	111,8	5,0	39,8	70,2
200w_5r_2_360PH	-884704,6	97,2	5,0	37,2	62,8
200w_5r_3_360PH	-976884,4	113,6	5,0	43,2	63,6
200w_5r_4_360PH	-794465,2	103,0	5,0	40,0	62,2
200w_5r_5_360PH	-1083764,0	121,3	5,0	43,6	81,6
200w_5r_6_360PH	-772286,8	136,0	5,0	39,6	62,6
200w_5r_7_360PH	-845408,4	99,3	5,0	40,6	65,2
200w_5r_8_360PH	-850163,0	115,3	5,0	40,6	66,4
200w_5r_9_360PH	-920016,8	101,9	5,0	40,2	73,4
200w_5r_10_360PH	-909795,0	111,9	5,0	42,4	73,6
MÉDIA	-886842,9	111,1	5,0	40,7	68,2

TABELA 21 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 10 SONDAS, PH=360 E CUSTO DA SONDA=90000 COM FROTA HETEROGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços Atendidos	Distância
200w_10r_1_360PH	-1027758,2	132,8	10,0	65,0	115,0
200w_10r_2_360PH	-951632,4	119,6	10,0	62,4	121,0
200w_10r_3_360PH	-1372765,6	147,9	10,0	71,4	129,0
200w_10r_4_360PH	-1434353,3	140,2	10,0	71,2	121,0
200w_10r_5_360PH	-1037920,8	135,1	10,0	66,6	112,6
200w_10r_6_360PH	-1100380,6	133,7	10,0	68,2	110,2
200w_10r_7_360PH	-936258,0	110,9	10,0	63,0	126,8
200w_10r_8_360PH	-924140,6	130,7	10,0	62,0	122,2
200w_10r_9_360PH	-1145593,0	151,9	10,0	68,6	118,8
200w_10r_10_360PH	-1182174,0	151,1	10,0	69,6	115,8
MÉDIA	-1111297,7	135,4	10,0	66,8	119,2

TABELA 22 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 5 SONDAS, PH=720 E CUSTO DA SONDA=180000 COM FROTA HETEROGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços Atendidos	Distância
100w_5r_1_720PH	-2804928,3	30,4	5,0	56,6	105,2
100w_5r_2_720PH	-2942873,5	27,2	5,0	58,8	109,4
100w_5r_3_720PH	-2670517,8	30,6	5,0	52,0	93,4
100w_5r_4_720PH	-2530504,0	27,2	5,0	52,0	94,6
100w_5r_5_720PH	-2388036,8	25,1	5,0	50,0	95,6
100w_5r_6_720PH	-2684375,3	33,2	5,0	53,8	88,0
100w_5r_7_720PH	-2407169,5	18,9	5,0	50,6	108,6
100w_5r_8_720PH	-2415862,8	29,9	5,0	49,4	93,8
100w_5r_9_720PH	-2390328,3	25,5	5,0	52,2	101,4
100w_5r_10_720PH	-2818639,5	28,0	5,0	57,4	104,0
MÉDIA	-2605323,6	27,6	5,0	53,3	99,4

TABELA 23 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 100 POÇOS, 10 SONDAS, PH=720 E CUSTO DA SONDA=180000 COM FROTA HETEROGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços Atendidos	Distância
100w_10r_1_720PH	-3251282,5	16,5	10,0	90,4	167,6
100w_10r_2_720PH	-3434062,5	17,2	10,0	88,2	195,0
100w_10r_3_720PH	-3101414,8	20,4	10,0	86,0	150,4
100w_10r_4_720PH	-3605252,8	16,7	10,0	84,8	180,2
100w_10r_5_720PH	-3776814,5	18,4	10,0	87,4	165,8
100w_10r_6_720PH	-3397869,5	21,6	10,0	84,2	160,2
100w_10r_7_720PH	-3401342,8	12,9	10,0	80,0	156,2
100w_10r_8_720PH	-3214443,5	19,9	10,0	84,8	166,2
100w_10r_9_720PH	-3371304,8	19,7	10,0	86,2	149,4
100w_10r_10_720PH	-3651908,8	19,4	10,0	85,8	151,0
MÉDIA	-3420569,6	18,3	10,0	85,8	164,2

TABELA 24 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 5 SONDAS, PH=720 E CUSTO DA SONDA=180000 COM FROTA HETEROGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços Atendidos	Distância
200w_5r_1_720PH	-3498568,0	186,1	5,0	64,6	106,0
200w_5r_2_720PH	-3598702,5	163,0	5,0	61,6	108,8
200w_5r_3_720PH	-3992988,8	220,2	5,0	73,4	113,8
200w_5r_4_720PH	-3440468,0	191,3	5,0	65,8	100,4
200w_5r_5_720PH	-4228103,0	190,1	5,0	73,4	125,6
200w_5r_6_720PH	-3252589,8	214,6	5,0	63,4	96,8
200w_5r_7_720PH	-3570530,0	155,6	5,0	65,4	101,0
200w_5r_8_720PH	-3563070,5	212,2	5,0	66,4	104,2
200w_5r_9_720PH	-3861438,5	185,6	5,0	66,6	120,0
200w_5r_10_720PH	-3718716,8	194,9	5,0	70,2	132,0
MÉDIA	-3672517,6	191,4	5,0	67,1	110,9

TABELA 25 – MÉDIA DOS RESULTADOS DO ALNS PARA O PRSI BI-OBJETIVO PARA INSTÂNCIA COM 200 POÇOS, 10 SONDAS, PH=720 E CUSTO DA SONDA=180000 COM FROTA HETEROGÊNEA

Instância	FO	Tempo (s)	Sondas	Poços Atendidos	Distância
200w_10r_1_720PH	-4868433,5	189,3	10,0	106,0	182,2
200w_10r_2_720PH	-4497003,5	174,2	10,0	102,0	199,8
200w_10r_3_720PH	-5579703,5	204,0	10,0	109,8	189,2
200w_10r_4_720PH	-5735637,0	195,2	10,0	110,6	188,6
200w_10r_5_720PH	-4741931,0	195,8	10,0	107,6	179,4
200w_10r_6_720PH	-4706295,0	192,6	10,0	106,6	177,6
200w_10r_7_720PH	-4260949,0	155,4	10,0	97,2	182,8
200w_10r_8_720PH	-4334076,0	188,1	10,0	99,4	169,6
200w_10r_9_720PH	-4894436,0	199,1	10,0	107,2	174,4
200w_10r_10_720PH	-5197191,0	207,3	10,0	111,0	185,8
MÉDIA	-4881565,6	190,1	10,0	105,7	182,9

6.6 Análise do *Tradeoff* entre perda de produção e aluguel de sondas heterogêneas

A seguir são apresentados os resultados computacionais do ALNS para avaliar a relação entre perda de produção e o uso das sondas. O ALNS novamente foi aplicado 5 vezes para cada instância em dois cenários: 1 e 2. O primeiro consiste no cenário clássico, onde é considerado somente um objetivo (FO1), que consiste em minimizar a perda de produção. No Cenário 2 considera-se além do objetivo clássico do problema (FO1), o segundo objetivo que consiste em minimizar o custo da frota de sondas (FO2). Os resultados médios de cada grupo de instâncias estão na Tabela 26 sendo que as colunas indicam:

- FO1 - Ganho associado à perda de produção (US\$) - Cenário 1 (apenas Produção);
- TE (s) - Tempo computacional médio em segundos necessário para execução do ALNS;
- SU - Número médio de sondas utilizadas;
- PA: Número médio de poços atendidos dentro do horizonte de planejamento;
- PP: Valor médio da perda de produção;
- DTS: Distância total média percorrida pelas sondas; e
- FO2 - Ganho associado à perda de produção e do uso das sondas (US\$) – Cenário 2 (Bi-Objetivo).

Como a perda de produção representa uma redução da receita, e o uso de sondas representa uma despesa operacional, a Função Objetivo possui valores negativos.

TABELA 26 - RESULTADOS DA MÉDIA DE CADA GRUPO DE INSTÂNCIAS, QUE FORAM EXECUTADAS 5 VEZES PARA CADA INSTÂNCIA PELO ALNS.

Instância	Cenário Produção						Cenário Bi-Objetivo					
	FO1	TE (s)	SU	PA	PP	DTS	FO2	TE (s)	SU	PA	PP	DTS
100w_5r_360PH	-1.065.910,5	11,6	5,0	33,4	811.532,7	63,4	-616.004,5	17,3	5,0	33,5	808.364,3	62,6
100w_5r_720PH	-3.505.849,6	16,1	5,0	53,2	2.378.767,9	98,0	-2.605.323,6	27,6	5,0	53,3	2.380.762,9	99,4
100w_10r_360PH	-1.635.858,5	13,0	10,0	54,7	1.229.683,9	103,6	-735.309,4	19,6	10,0	54,8	1.220.369,1	104,3
100w_10r_720PH	-5.221.813,1	10,9	10,0	85,7	2.905.028,5	163,7	-3.420.569,6	18,3	10,0	85,8	2.909.785,7	164,2
200w_5r_360PH	-1.337.263,9	69,9	5,0	40,5	1.103.420,9	68,0	-886.842,9	111,1	5,0	40,7	1.098.751,5	68,2
200w_5r_720PH	-4.572.490,8	115,8	5,0	66,9	3.349.157,1	111,0	-3.672.517,6	191,4	5,0	67,1	3.361.565,5	110,9
200w_10r_360PH	-2.011.861,4	79,1	10,0	66,7	1.541.756,2	118,7	-1.111.297,7	135,4	10,0	66,8	1.542.456,8	119,2
200w_10r_720PH	-6.682.256,9	117,9	10,0	106,0	4.591.877,6	183,4	-4.881.565,6	190,1	10,0	105,7	4.584.605,7	182,9

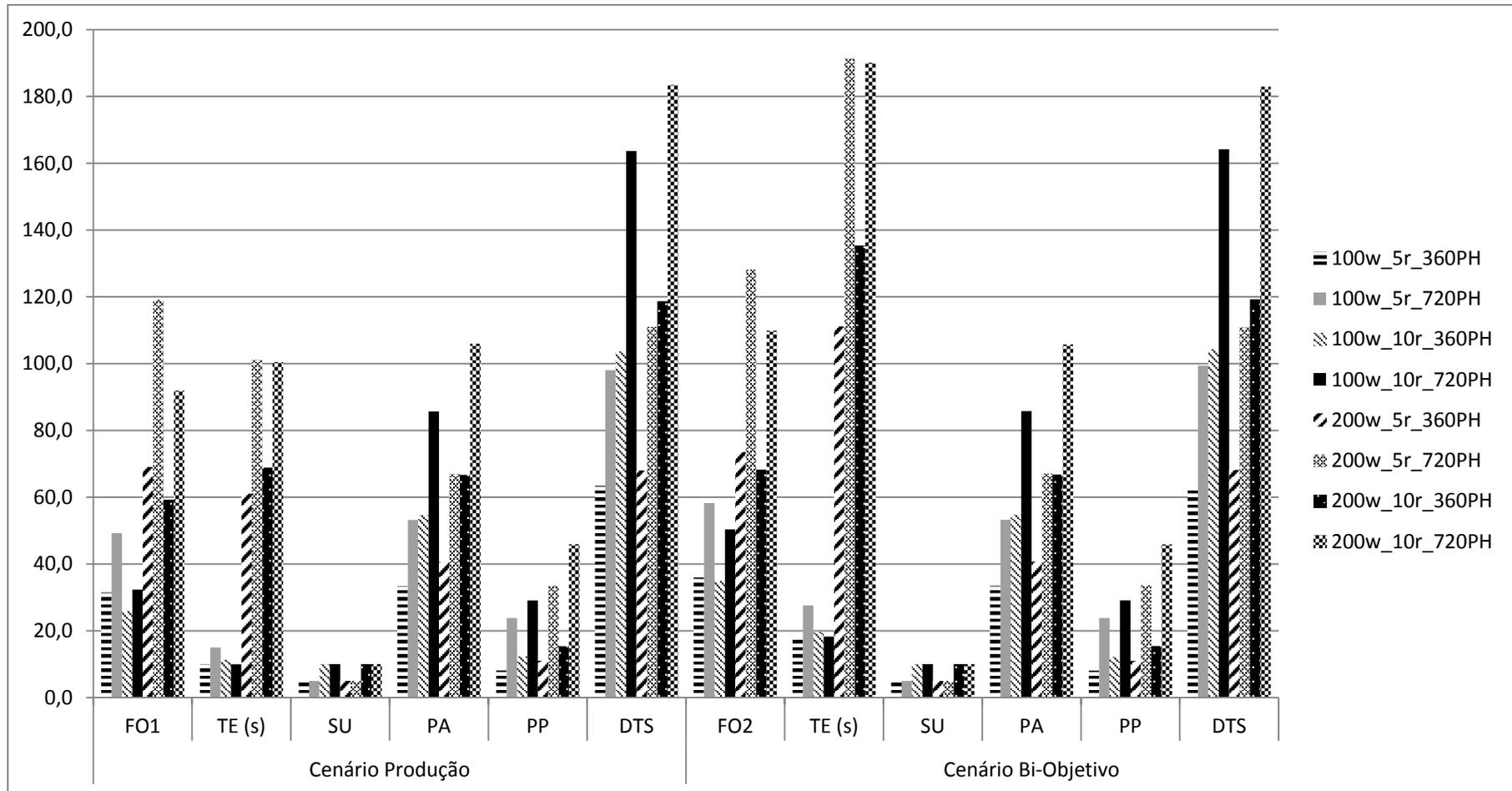


Figura 15 – Variáveis analisadas em ambos os cenários

Analisando a Tabela 26 verifica-se que o cenário Bi-Objetivo, onde é levado em consideração o custo de utilização das sondas, em todas as instâncias, a coluna FO2 apresenta um valor maior que a FO1. Isto acontece, pois está sendo somando em FO2 o custo de utilização das sondas.

A Figura 15 apresenta um resumo dos resultados obtidos com base nas variáveis (colunas) analisadas na Tabela 26. Para construção dessa figura, foram consideradas apenas as médias de cada métrica avaliada para todos os tamanhos de instâncias analisadas, para as configurações do Cenário Produção e Cenário Bi-Objetivo.

Com base na Figura 15, pode-se perceber que as variáveis possuem uma ordem de grandeza próxima, sendo a maior diferença entre os cenários é a custo da FO, que no cenário bi-objetivo sempre é maior, por agregar além do custo da perda de produção, o custo de aluguel das sondas.

Verifica-se ainda na Tabela 26 e com auxílio da Figura 15, que em todos os cenários, todas as sondas disponíveis são utilizadas. Isso se deve ao *tradeoff* existente entre o custo do uso das sondas e a cotação do petróleo, pois quanto maior for a cotação do petróleo, maior é a rentabilidade proporcionada, dessa forma, tornando vantajosa a contratação de uma frota maior de sondas. Caso contrário, com uma cotação menor do metro cúbico do recurso mineral, uma frota grande de sondas pode se tornar muito onerosa.

As Figuras 16 e 17 evidenciam a existência desse *tradeoff*. Os dados foram obtidos a partir da média de cinco execuções do ALNS.

Considerando a análise da cotação do metro cúbico de petróleo *versus* número de sondas e poços atendidos *versus* custo total apresentado na Figura 16 para a instância 100w_5r_1_360PH, verifica-se que somente após a cotação do metro cúbico de petróleo ultrapassar o patamar de 320 dólares, que o ALNS apresentou soluções utilizando a quantidade total de sondas disponíveis. Verifica-se ainda que com uma cotação inferior a 320 dólares, a utilização de todas as sondas disponíveis não se torna vantajosa.

Ao analisar a maior instância (200w_10r_1_720PH), constata-se o mesmo comportamento, sendo que quando a cotação do metro cúbico de petróleo ultrapassa o valor de 220 dólares, o ALNS apresenta soluções utilizando a

quantidade total de sondas disponíveis, ou seja, o retorno da cotação se torna mais rentável, se tornando vantajoso contratar um conjunto maior de sondas.

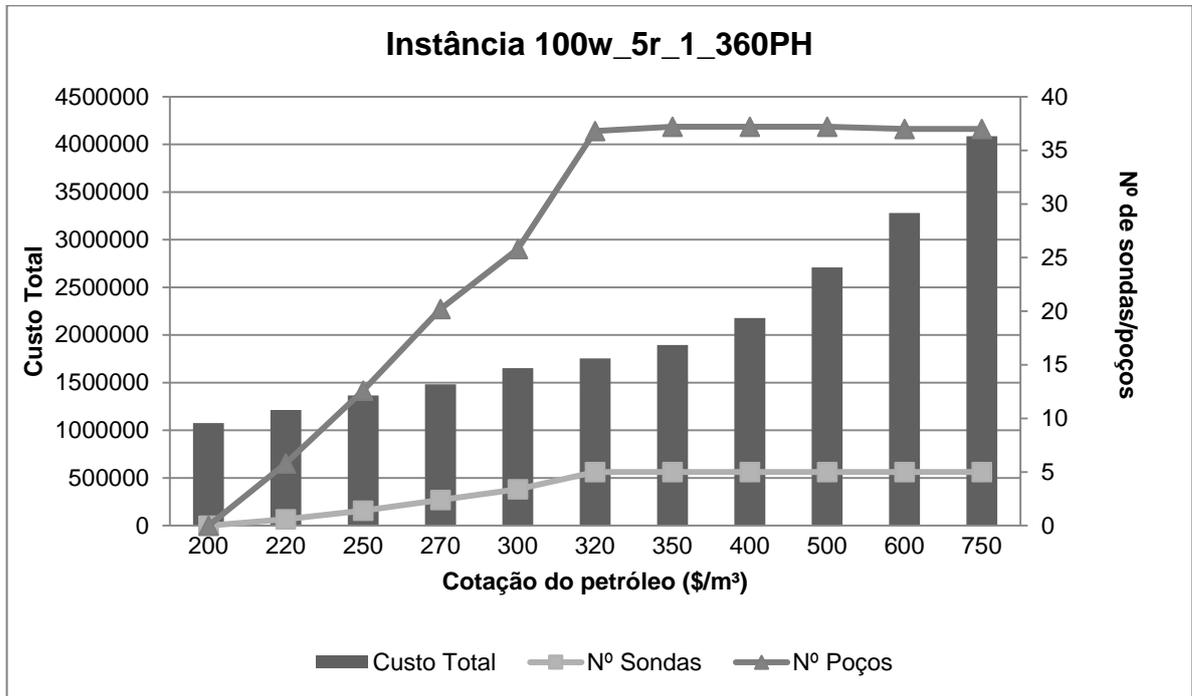


Figura 16 – Análise da cotação do m³ de petróleo versus nº de sondas e poços atendidos versus custo total – Instância 100w_5r_360PH.

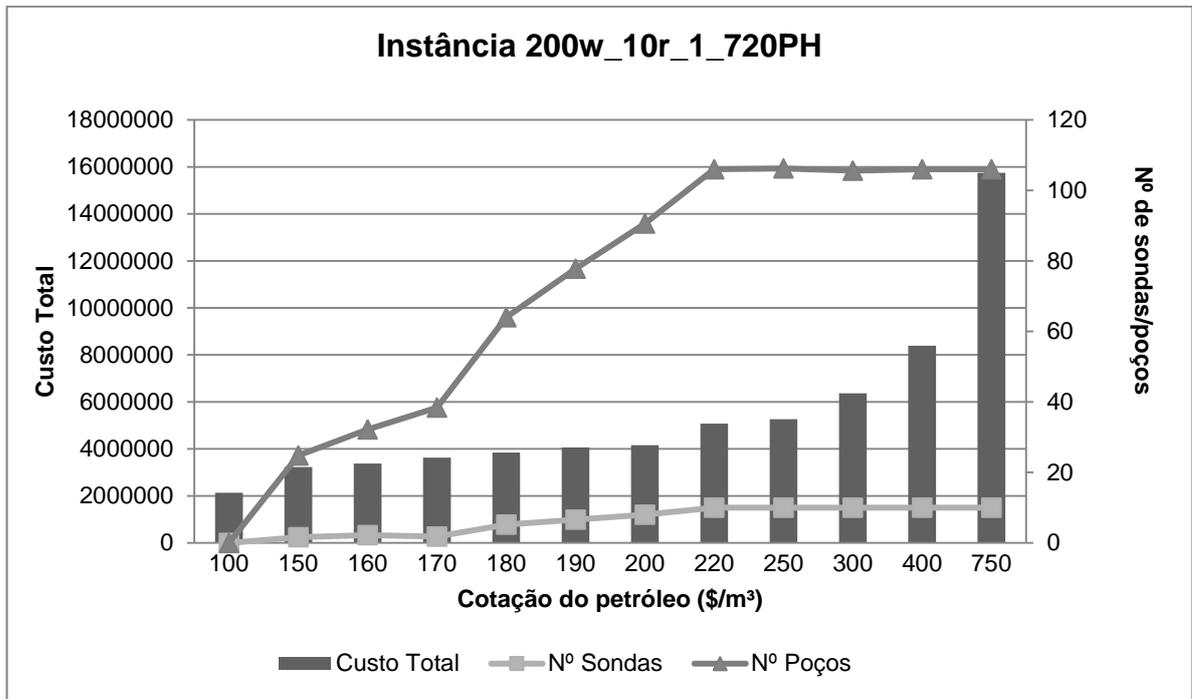


Figura 17 – Análise da cotação do m³ de petróleo versus nº de sondas e poços atendidos versus custo total – Instância 200w_10r_720PH.

É importante avaliar a quantidade de poços atendidos nos cenários apresentados nas Figuras 16 e 17. Na primeira figura, quando a cotação do metro cúbico de petróleo está em 200 dólares, o retorno proporcionado por esse valor é tão baixo, que não compensa contratar nenhuma sonda para melhorar a perda de produção. Caso a cotação do óleo aumente em 100 dólares, a figura indica que compensa contratar 3,4 sondas, atendendo o número médio de 25,8 poços, ou seja, 25,8% do total de poços requerendo manutenção, dentro do horizonte de planejamento de 360 horas. Somente a partir da cotação do metro cúbico do recurso mineral ultrapassar o patamar de 320 dólares, se torna vantajoso custear o número total de sondas disponíveis, na média atendendo o número de 37 poços, isto é, 37% do total.

Nos cenários apresentados na Figura 17, percebe-se a mesma tendência relatada na análise da Figura 16, sendo que quando o valor do metro cúbico de petróleo possui o valor de 100 dólares, não compensa contratar nenhuma sonda para melhorar a perda de produção. Porém, se a cotação aumentar em 50%, já se torna viável custear 1,6 sondas, que atendem 24,8 poços (12,4% do total de poços). Considerando a cotação no valor de 200 dólares, é interessante contratar 8 sondas, atendendo 90,6 poços em média. Caso o valor da cotação ultrapasse 220 dólares, para todos os casos torna-se vantajoso custear o número total de sondas disponíveis, atendendo na média relatada, um total de 106 poços.

O número total de poços atendidos nunca chega ao seu número máximo nos cenários apresentados nas Figuras 16 e 17 devido ao horizonte de planejamento ser limitado, considerando que cada poço possui um tempo de serviço específico e as sondas possuem um tempo de deslocamento entre poços.

A partir das Figuras 16 e 17, percebe-se que a cotação do petróleo pode influenciar diretamente no planejamento das intervenções. Se o valor do barril de petróleo diminui, a lucratividade com o aumento da produtividade pela intervenção das sondas não cobre o custo com a utilização destas sondas, tornando seu uso menos vantajoso, e por este motivo, a redução do número de veículos utilizados pode ser uma alternativa interessante.

Além do valor do barril de petróleo, deve-se considerar a influência do valor dos custos com o aluguel das sondas. Considerando o alto custo de aluguel das sondas de intervenção, e que esse custo pode variar, foram realizados testes

criando cenários em que a cotação do metro cúbico de petróleo é fixo em US\$ 750,00 e o custo de aluguel das sondas é variado. Tais cenários são apresentados nas Figuras 18 e 19. Novamente, destaca-se que o ALNS foi executado cinco vezes em cada instância.

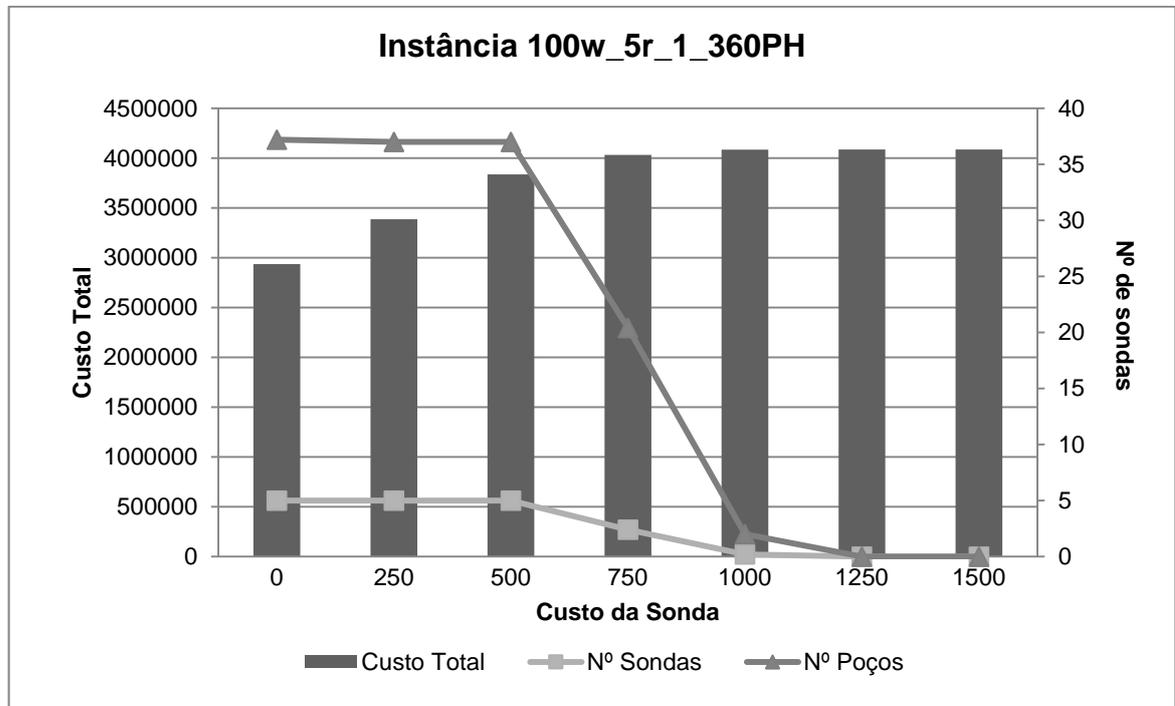


Figura 18 – Análise do custo de aluguel das sondas *versus* nº de sondas e poços *versus* custo total.– Instância 100w_5r_360PH.

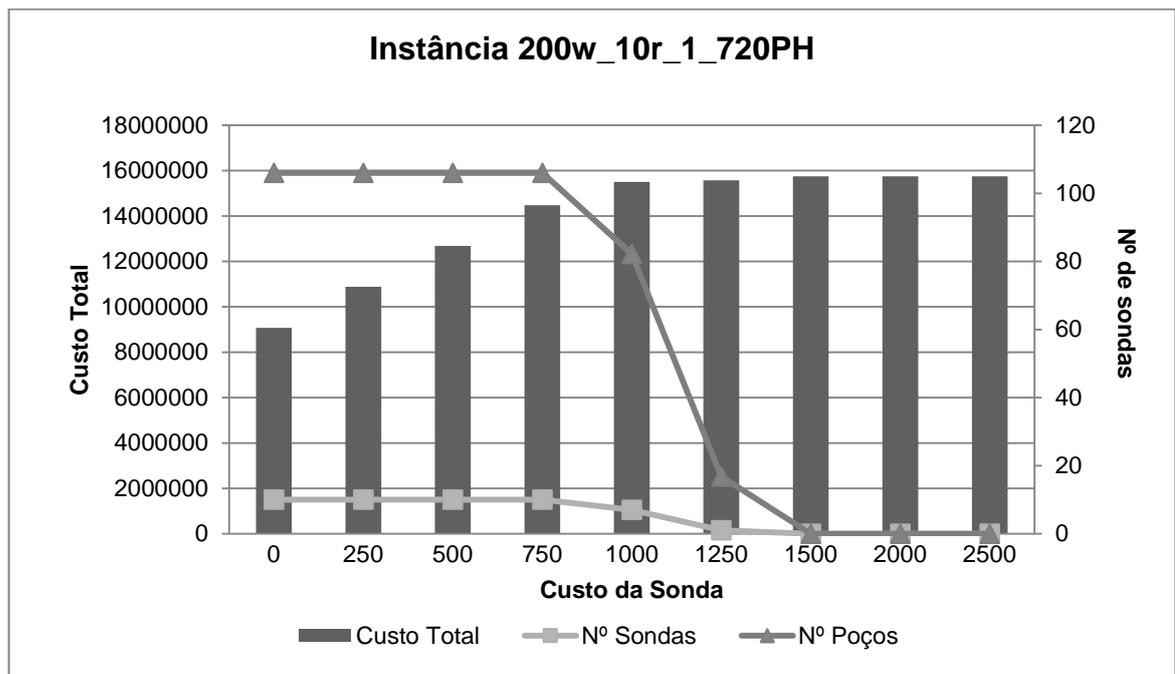


Figura 19 – Análise do custo de aluguel das sondas *versus* nº de sondas e poços *versus* custo total – Instância 200w_10r_720PH.

Considerando a análise do custo de aluguel das sondas *versus* número de sondas *versus* custo total apresentado na Figura 18 para a instância com 100 poços, 5 sondas e horizonte de planejamento de 360 horas (100w_5r_1_360PH), verifica-se que somente após o custo das sondas ultrapassar o patamar de 500 dólares/hora é que o ALNS apresentou soluções com uma quantidade menor de sondas. Verifica-se ainda que com um custo de sonda menor, inferior ao valor citado (US\$ 750,00), a utilização de mais sondas é vantajoso.

Ao analisar a maior instância, representada pela Figura 19, com 200 poços, 10 sondas e horizonte de planejamento igual a 720 horas (200w_10r_1_720PH), constata-se o mesmo comportamento, sendo que quando o custo de aluguel ultrapassa o valor de 750 dólares/hora, o ALNS apresenta soluções com uma quantidade de sondas menor que o total disponível, ou seja, o aluguel passa a ficar tão caro, que é mais vantajoso diminuir a frota de sondas.

A partir das Figuras 18 e 19, percebe-se que o custo de aluguel das sondas pode influenciar diretamente no planejamento das intervenções. Se o custo do aluguel aumenta, a lucratividade com a elevação da produtividade pela intervenção das sondas não cobre o custo com a utilização destas sondas, tornando seu uso menos vantajoso, e por este motivo, a redução da frota pode ser uma alternativa interessante.

6.7 Considerações finais

A partir da análise realizada na Seção 6.6, onde é avaliado o *tradeoff* entre os custos das sondas e a perda de produção, evidenciou-se a diferença com relação ao estudo realizado por Soares, Costa e Aloise (2011), no qual é abordada uma análise do momento em que compensa contratar mais sondas ou não, conforme cotação do petróleo. Estes autores consideraram a possibilidade de alugar mais sondas conforme necessário, pois há uma quantidade fixa de sondas contratadas, podendo estender a frota conforme a necessidade. Cenário diferente do considerado nesta dissertação, onde no momento de contratação das sondas tem-se de definir a quantidade de sondas a ser contratada.

Neste trabalho, vários cenários são avaliados, sendo considerada a variação da cotação do metro cúbico de petróleo e a variação do custo de aluguel das sondas como fatores de impacto no planejamento das rotas. Para realização dessa análise, consideram-se as instâncias propostas neste trabalho, que possui uma maior aproximação do real contexto operacional do problema.

Considerando o caso específico da região Norte do Estado do Espírito Santo, Brasil, em que os contratos de aluguel de sondas são realizados para longos prazos de execução, e somente na renovação considera-se se a frota deve aumentar ou reduzir. Este estudo, assim, pode fornecer subsidio que apoie a tomada de decisão em um horizonte maior de tempo.

É importante ressaltar que o presente método também possibilita o uso em nível operacional, dado o tempo computacional necessário para o ALNS. Neste caso, basta aplicar $\tau_2 = 0$ em (15), que o ALNS passa a gerar soluções baseadas somente na função objetivo clássica do PRSI, que se baseia em minimizar a perda total de produção, utilizando todos os recursos disponíveis, neste caso, todas as sondas.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a importância que o petróleo possui na matriz energética brasileira, seu valor econômico, sua característica de ser um recurso finito cuja extração da natureza é custosa, estudos que buscam otimizar a cadeia produtiva dessa indústria vem se tornando cada vez mais relevantes para a sociedade.

Considerando que a realização de intervenções por sondas em poços de petróleo terrestres é necessária para a viabilidade econômica da exploração do recurso mineral em poços *onshore*, este trabalho propôs o problema de roteamento de sondas de intervenção bi-objetivo (PRSI-BO), por meio de sua contextualização teórica e prática, a qual envolveu: uma revisão bibliográfica acerca do problema e de método de solução, uma implementação da meta-heurística ALNS, além de experimentos computacionais para teste da metodologia proposta. Os resultados obtidos indicam possibilidade de ganho financeiro por meio de uma logística eficiente na operação das sondas de intervenção e apoio a tomada de decisão no quesito contratação de sondas.

Nesse estudo buscou-se adicionar um segundo objetivo à função objetivo clássica do problema, visando confrontar a taxa de perda de produção com o custo das sondas, de modo a possibilitar a realização de uma análise de quando pode ser interessante aumentar o número de sondas, mesmo que isso resulte em um custo maior de aluguel. A proposta de novas instâncias possibilitou a realização de testes mais próximos da realidade, gerando resultados em dólares.

Ao aplicar o ALNS nas novas instâncias, pôde-se verificar o impacto que a cotação do petróleo pode implicar no roteamento das sondas, isto é, com uma valorização maior do óleo, compensa custear mais sondas, de modo a minimizar a taxa de perda de produção, conseqüentemente, maximizar os lucros. Da mesma forma, constatou-se que a variação no custo de aluguel das sondas influencia no roteamento de forma inversa, ou seja, quanto maior o valor necessário para o aluguel das sondas, menor é a lucratividade com sua utilização até o ponto de sua utilização não mais gerar retorno financeiro. Percebe-se que estes dois fatores geram um *tradeoff* entre esses parâmetros na tomada de decisão pelo planejador.

Optou-se pelo uso de frota heterogênea, pois modelos com frota homogênea, apesar de serem muito utilizados na literatura, podem resultar em soluções que necessitem ser substancialmente alteradas quando se considera o real contexto operacional do problema, isto é, existem sondas com especialidades diferentes, não podendo ser utilizadas em todos os tipos de serviços, ou mesmo resultar em sondas subutilizadas.

De modo a realizar testes computacionais, o ALNS foi escolhido por seu reconhecimento nos últimos anos na área de problemas de roteamento de veículos, e principalmente por já ter apresentado bons resultados quando aplicado ao PRSI. O ALNS é uma metaheurística que utiliza o princípio de destruir e construir durante o seu processo de busca, que é guiado por uma camada adaptativa.

Frente às 80 instâncias testadas, o ALNS surpreendeu no tempo de execução das instâncias menores, já que apresentou bons resultados em um tempo bastante reduzido. Nas instâncias maiores, conforme a complexidade aumenta consideravelmente, o tempo computacional conseqüentemente também aumentou, mas o método se destacou na geração de bons resultados com um custo computacional razoável.

Os resultados dessa pesquisa mostram que, embora a minimização da perda total de produção seja um objetivo muito importante, a variação do custo de locação das sondas, assim como a cotação do petróleo, impacta no processo de definição das rotas. Desta forma, verifica-se que existe um *tradeoff* entre os dois objetivos, como evidenciado na Seção 6.6.

Como extensão desse trabalho, outros fatores podem influenciar o roteamento, como a definição de custos e tempos de deslocamento diferentes para as sondas que constituem frota heterogênea, a consideração de janelas de tempo para atendimento dos poços, ou mesmo a adição de novos objetivos, como o equilíbrio de carga de trabalho entre as sondas. O trabalho atual partiu da premissa de que todas as demandas dos poços são conhecidas previamente, e não apresenta flexibilidade de reprogramação. Assim, é interessante realizar uma abordagem dinâmica, em que seja possível reprogramar as intervenções solicitadas. Neste caso, a taxa de perda de produção seria analisada em tempo real, e caso haja

alguma mudança, o método, em ambiente dinâmico, seria acionado para determinar o novo sequenciamento das sondas, em tempo real.

Em relação ao método de solução, a implementação do ALNS utilizando conceitos de computação paralela pode tende a apresentar bons resultados, considerando que a presente implementação utiliza somente um processador, o que subutiliza a atual geração de processadores, que em grande parte já possuem mais de um núcleo de processamento.

Portanto, apesar deste trabalho atingir o objetivo de incorporação de outro objetivo ao problema do roteamento de sondas de intervenção, inclusive por meio de instâncias mais próximas da realidade, outras questões devem ser consideradas para um aperfeiçoamento deste problema e seguem como sugestão para pesquisas futuras. No entanto, ressalta-se a contribuição teórica e prática, em que realiza-se a proposta de um modelo matemático bi-objetivo para o problema, a proposta de novas instâncias, que aproximam os resultados do problema do real contexto operacional, e a metaheurística ALNS implementada como método de solução para o problema, de modo a tornar-se uma ferramenta de apoio a tomada de decisão para empresas da área.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, R, E CHIYOSHI, Y. **Modelando as operações de suas Sondas de Petróleo utilizadas na Manutenção da produção**. Editora Petrobrás, 2000.
- ALOISE, D. J.; ALOISE, D.; ROCHA, C. T. M.; RIBEIRO, C. C.; FILHO, J. C. R.; MOURA, L. S. S. (2006). Scheduling workover rigs for onshore oil production. **Discrete Applied Mathematics**, n. 154, p. 695–702.
- ALOISE, D.; NORONHA, T.F.; MAIA, R.S.; BITTENCOURT, V.G.; ALOISE, D.J. Heurísticas de colônia de Formigas com Path-Relinking para o problema de otimização da alocação de sondas de produção terrestre – SPT. In **XXXIV SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro – Brazil, 2002.
- ALVES, V. R. F. M.; FERREIRA FILHO, V. J. M. Proposta de Algoritmo genético para a solução do problema de roteamento e sequenciamento de sondas de. In **XXXVIII SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional** (pp. 1837–1848). Goiânia, Brasil: SOBRAPO, 2006.
- ARNOLD, K.; STEWART, M. **Surface Production Operations**, Volume 2: Design of Gas-Handling Systems and Facilities (Vol. 2). Gulf Professional Publishing, 1999.
- BALDACCI, R; BARTOLINI, E; MINGOZZI, A; ROBERTI, R. (2010). An exact solution framework for a broad class of vehicle routing problems. **Computational Management Science**, n. 7(3), p. 229–268, <http://dx.doi.org/10.1007/s10287-009-0118-3>.
- BAÑOS , R., ORTEGA, J., GIL, C., MÁRQUEZ, A. L., & TORO, F. DE. (2013). A hybrid meta-heuristic for multi-objective vehicle routing problems with time windows. **Computers & Industrial Engineering**, 65(2), 286 – 296.
- BARNES, J. W.; BRENNAN, J. J.; KNAPP, R. M. (1977). Scheduling a backlog of oilwell workovers. **Journal of Petroleum Technology**, n. 29(12), p. 1651–1653.
- BASSI, H. V.; FERREIRA FILHO, V.J.M.; BAHIENSE, L. (2012). Planning and scheduling a fleet of rigs using simulation-optimization. **Computers & Industrial Engineering**.
- BOAVENTURA NETTO, P. O. (2012). **Grafos: Teoria, modelos, algoritmos**. 5ª ed. Editora Bluscher: São Paulo, 2012.

BODIN, L. D.; GOLDEN, B. L.; ASSAD, A. A.; BALL, M. O. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews. The state of the art. **Computers & Operations Research**, n. 10, p. 69–211.

COCHRANE, J. E. Rig Performance Monitoring and Measurement: Can It Again Be Useful?. In **SPE/IADC Drilling Conference**, 1989.

CORBERAN, A.; FERNANDEZ, E.; LAGUNA, M.; MARTI, R. (2002). Heuristic solutions to the problem of routing school buses with multiple objectives. **Journal of the Operational Research Society**, n. 53, p. 427–435.

COSTA, L. R. **Soluções para o Problema de Otimização de Itinerário de Sondas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005. <<http://www.petroleo.ufrj.br/lorde/?q=node/49>>

COSTA, L. R.; FERREIRA FILHO, V. J. M. Uma Heurística de Montagem Dinâmica para o Problema de Otimização de Itinerários de Sondas. In **XXXVII SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional** (pp. 2176–2187). Gramado – Brazil: Sobrapo, 2005.

COSTA, L. R.; FERREIRA FILHO, V. J. M. Uma Heurística para o Problema do Planejamento de Itinerários de Sondas em Intervenções de Poços de Petróleo. In **XXXVI SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional** (pp.1844–1853). São João del-rei – Brasil: Sobrapo, 2004.

CUNG, V-D.; MAUTOR, T.; MICHELON, P.; TAVARES, A. **A Scatter Search based approach for the Quadratic Assignment problem**. In T. Bäck, Z.; Michalewicz, X. Yao (eds.), *Proceedings of ICEC '97*, IEEE Press, p.165-170, 1996.

DESAULNIERS, G; LESSARD, F.; HADJAR, A. Tabu search, partial elementarity, and generalized k-path inequalities for the vehicle routing problem with time windows. **Transportation Science**, 2008, n. 42(3), p. 387–404. <<http://dx.doi.org/10.1287/trsc.1070.0223>>

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: 05/12/2013

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

DUHAMEL, C.; SANTOS, A. C.; GUEDES, L. M. (2012). Models and Hybrid Methods for the onshore wells maintenance problem. **Computers & Operations Research**, n. 39, p. 2944–2953.

ECONOMIDES, M. J.; NOLTE, K. G. **Reservoir Stimulation**, 3rd ed., Wiley, Chichester, UK, 2000.

FEILLET, D., DEJAX, P., e GENDREAU, M. (2005) Traveling salesman problems with profits. **Transportation Science**, v. 36,p. 188–205.

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.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=65804>. Acesso em: 05/12/2013.

GÁBOR, T. **Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations, and Maintenance**, ISBN: 185617557X, Gulf Professional, Burlington, 1999.

GARCIA-NAJERA, A., & BULLINARIA, J. A. An improved multi-objective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with time windows. **Computers & Operations Research**, 38 (1), January 2011, 287-300.

GLOVER, F.; LAGUNA, M.; MARTÍ, R. (2000). Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking. **Control and Cybernetics**, 29 (3), 653-684.

GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. (2012). **Grafos: Conceitos, algoritmos e aplicações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. (2000). **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

GOUVÊA, E. F., GOLDBARG, M. C., & COSTA, W. E. Algoritmos evolucionários na solução do problema de otimização do emprego de sondas de produção em

poços de petróleo. In **XXXIV SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

IRGENS, M.; GUZMAN, R. P.; STAMATOPOULOS, J.; JACKSON, K. Optimization for operational decision support: The rig fleet management case. In **Proceedings of SPE annual technical conference and exhibition** (pp. 1–14). Denver: SPE, 2008.

JEPSEN, M.; PETERSEN, B.; SPOORENDONK, S; PISINGER. D. (2008). Subset-row inequalities applied to the vehicle-routing problem with time windows. **Operations Research**, n. 56(2), p. 497–511. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.1070.0449>

JOZEFOWIEZ, N.; SEMET, F.; TALBI, E. (2008a). Multi-objective vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**, 189(2): 293-309.

JOZEFOWIEZ, N.; SEMET, F.; TALBI, E. From Single-Objective to Multi-Objective Vehicle Routing Problems: Motivations, Case Studies, and Methods. In **The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges**. Vol. 43. Springer US. Part II, 2008b p. 445-471.

JOZEFOWIEZ, N.; SEMET, F.; TALBI, E. Parallel and hybrid models for multi-objective optimization: Application to the vehicle routing problem, in: J. J. MERELO GUERVOS et al. (Eds.), **Parallel Problem Solving from Nature VII**, Lecture Notes in Computer Science, vol. 2439, Springer-Verlag, (2002) p. 271–280.

KALFAYAN, L. **Production Enhancement with Acid Stimulation**. Editora Penn Well Books, p. 262. 2000.

KEN, A.; STEWART, M. **Surface Operations in Petroleum Production**, ISBN: 0444426779, Elsevier, Burlington, 1987.

KRUSKAL, J. B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. In: **Proceedings of the American Mathematical Society**, vol. 7. American Mathematical Society; 1956. p. 48–50.

LACOMME, P.; PRINS, C.; SEVAUX, M. (2006). A genetic algorithm for a bi-objective capacitated arc routing problem. **Computers and Operations Research**, n. 33, p. 3473–3493.

MAIA, R.S., GONZAGA, C.S.M., LIMA JÚNIOR, F.C., BITTENCOURT, V.G. Otimização das Intervenções em poços de petróleo por sondas de produção

terrestre. In **XXXIV SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro. RJ, 2002.

MANSOUR, H.; AHMAD, M. M.; DHAFR, N.; AHMED, H. (2013). Evaluation of operational performance of workover rigs activities in oilfields. **International Journal of Productivity and Performance Management**, n. 62(2), p. 204-218.

MARTÍ, R.; LAGUNA, M.; GLOVER, F. (2006). Principles of Scatter search. **European Journal of Operational Research**, n. 169 (2), p. 359-372.

MEDEIROS JR, F.; TREVISAN, O.V. (2005). Thermal analysis in matrix acidization. **Journal Petroleum Science & Engineering**. USA: Elsevier Publishing, n. 51 (11), p. 85-96.

Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética – Brasil. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021**. Brasília: MME:EPE, 2013. Disponível em <http://www.epe.gov.br/PDEE/20130326_1.pdf>. Acesso em outubro de 2013.

NEVES, T. A.; OCHI, L. S. GRASP com Memória Adaptativa Aplicado ao Problema de Roteamento e Scheduling de Sondas de Manutenção. In **XXVII CSBC – Sociedade Brasileira de Computação** (pp. 1–10). SBC, 2007.

NEVES, T.A. **Heurísticas com memória adaptativa aplicadas ao problema de roteamento e scheduling de sondas de manutenção**. 2007. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói.

NORONHA, T. F.; ALOISE, D. J. Algoritmo e Estratégias de solução para o problema do gerenciamento de sondas de produção terrestre na Bacia Petrolífera de Potiguar, In **XXI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação**, Fortaleza, CE, 2001.

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 **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção** (pp.1–10). Foz do Iguaçu – Brazil: ABEPRO, 2007. <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR620461_9846.pdf>

ONGC - Oil and Natural Gas Corporation Limited. **Workover Operations Onshore Standard Operating Procedures Manual**. January, 2012.

PACHECO, A. V. F.; FILHO, A. C. T. D.; RIBEIRO, G. M. Uma heurística para o problema da alocação de sondas de produção em poços de petróleo. In: **XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Salvador – BA, 2009. <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_091_615_13693.pdf>.

PACHECO, A. V. F.; RIBEIRO G. M.; MAURI, G. R. (2010). A GRASP with path-relinking for the workover rig scheduling problem. **International Journal of Natural Computing Research**, n. 1, p. 1–14.

PAIVA, R. O.; SCHIOZER, D. J.; BORDALO, S. N. Optimizing the itinerary of workover rigs in petroleum production. In Proceedings of **16th world petroleum congress** (p. 1–10). Canada, 2000.

PERRIN, D. **Well Completion and Servicing**: Oil and Gas Field Development Techniques. Editions OPHRYS, 1999.

PISINGER, D.; ROPKE, S. (2007). A general heuristic for the vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, n. 34, p. 2403-2435.

RIBEIRO, G. M.; DESAULNIERS, G.; DESROSIERS, J. (2012). A branch-price-and-cut algorithm for the workover rig routing problem. **Computers & Operations Research**, n. 39, p. 3305-3315.

RIBEIRO, G. M.; LAPORTE, G.; MAURI, G. R. (2012). Comparison of three metaheuristics for the workover rig routing problem. **European Journal of Operational Research**, n. 220, p. 28-36.

RIBEIRO, G. M.; MAURI, G. R.; LORENA, L. A. N. (2011). A simple and robust Simulated Annealing algorithm for scheduling workover rigs on onshore oil fields. **Computers & Industrial Engineering**, v. 60, p. 519–526.

RIBEIRO, G.M.; LAPORTE, G. (2012). An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem. **Computers & Operations Research**, n. 39, p. 728-735.

ROPKE, S.; PISINGER, D. D. (2006). A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls. **European Journal of Operational Research**, n. 171, p. 750-775.

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>. Acesso em: 05/12/2013.

SABRY, G. A.; GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. F. G. (2012). Um Estudo Algorítmico do Problema da Programação de Sondas de Produção. In **XVI CLAIO – Congresso Latino Iberoamericano de Investigation Operativa/ XLIV SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro, RJ, 2012. <<http://www2.claiosbpo2012.iltc.br/pdf/98794.pdf>>.

SAHNI, S.; GONZALEZ, T. (1976). P-complete approximation problems. **Journal of the ACM**, n. 23, p. 555-565.

SHAW, P. (1997). A new local search algorithm providing high quality solutions to vehicle routing problems. Technical report, **University of Strathclyde Glasgow**.

SILVA, L. R. A.; LORENZONI, L. L. Algoritmos evolucionários para a resolução do problema de otimização da alocação de sondas de produção terrestre em poços de petróleo. In **VI Jornada de Iniciação Científica, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação**. Vitória - Brasil. <http://pse.ifes.edu.br/prppg/pesquisa/jornadas/jornada_2010_2011/anais/T2402.pdf>. Acesso em: 04/12/2013

SOARES, W. K. S; COSTA, A. P. C. S; ALOISE, D. J. Considerações sobre o Problema do Agendamento de Sondas de Manutenção “Onshore” e proposição de instâncias. In **XLIII SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Ubatuba, SP, 2011. <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2011/pdf/88119.pdf>>.

SONATRACH, R.; FORAGE, D. Drilling performance management system”, Working. Paper No. 11099, In **International Petroleum Technology Conference, Society of Petroleum Engineer**, Dubai, 2007.

SPOERKER, H. F., & DOSCHEK, M. Performance drilling onshore Iran – introducing new concepts to a mature area. In **Proceedings of Society of Petroleum Engineer**. Amsterdam, Holanda, 2005.

SRIVASTAVA, A. Safety and Environmental Concerns In Upstream. Lecture Notes. In **Proceedings of Technology Imperatives for Exploration and Production of**

Oil and Gas. Kaziranga Assam, India, 2010. http://www.petrofed.org/17-20_Mar_10_prog.asp

TSITSIKLIS, J.N. (1992). Special cases of traveling salesman and repairman problems with time Windows. **Networks**, n. 22, p. 263-282.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

UNEP IE/PAC Technical Report 37. (1997) Environmental management in oil and gas exploration and production: an overview of issues and management approaches.

APÊNDICE A

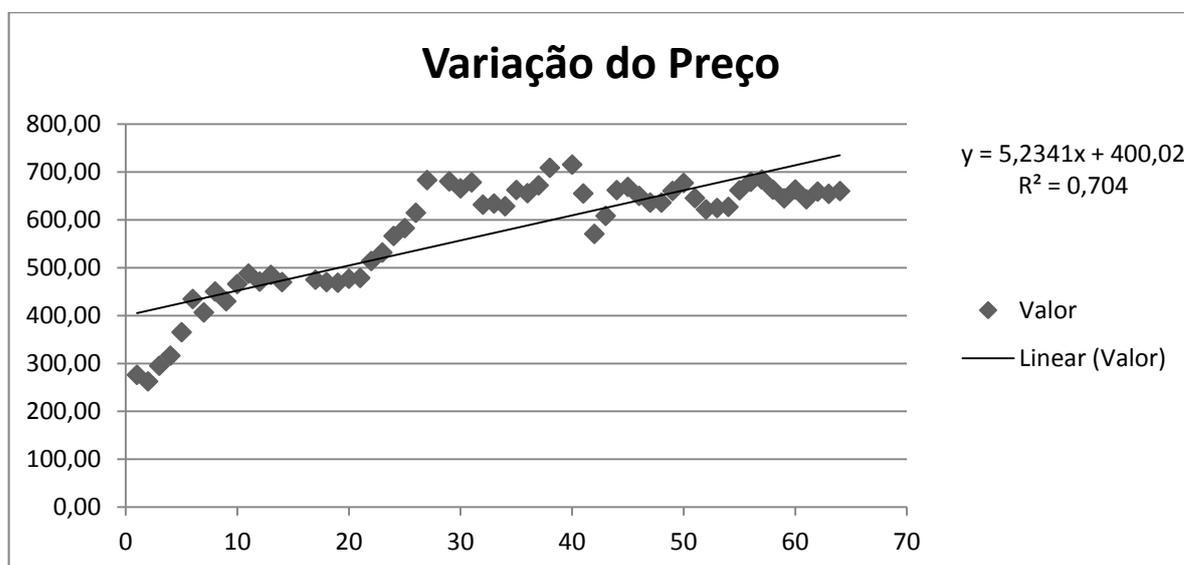


Figura 20 – Regressão linear da cotação do metro cúbico de petróleo entre janeiro/2009 a abril/2014

Fonte: <http://www.indexmundi.com>.

A Figura 20 foi gerada a partir da aplicação da regressão linear entre o mês de Janeiro do ano de 2009 ao mês de Abril do ano de 2014. Optou-se por utilizar valores a partir da data citada pelo motivo do ano anterior a cotação do petróleo ter variado drasticamente, o que dificultava a aplicação do método citado.

Para gerar a equação resultado da regressão linear, os meses foram enumerados partindo do valor 1 para o mês inicial – Janeiro/2009 – até o valor 64 para mês final da análise – Abril/2014 – dessa forma, chegando a equação apresentada na Figura 20, no qual a variável x representa o mês a ser calculado a regressão linear. Para cálculo da projeção da cotação dos meses posteriores a Abril/2014, basta continuar com a numeração sequencial do valor de x .

APÊNDICE B

Segue em DVD em anexo com as instâncias propostas com base nas informações explicitadas no capítulo 6.3.

TABELA 27 – LAYOUT DOS ARQUIVOS DAS NOVAS INSTÂNCIAS

Arquivo	Geral	X	Y	Z
d_Rigs_Wells_X_Y_Z	Contêm a matriz de tempo de deslocamento entre sonda-poço	Nº de poços	Nº de sondas	Índice da instância
d_Wells_Wells_X-Y_Z	Contêm a matriz de tempo de deslocamento entre poço-poço	Nº de poços	Nº de sondas	Índice da instância
i_rigX-Y	Representa os dados das sondas, sendo a primeira linha do arquivo o número de sondas, e as demais possuem 4 informações, separadas por espaço: Índice, coordenada x e y (não utilizadas nas novas instâncias) e nível de serviço.	Nº de poços	Nº de sondas	-
i_wellX-Y-Z	Representa os dados dos poços, sendo a primeira linha do arquivo o número de poços, e as demais possuem 5 informações, separadas por espaço: Índice, taxa de perda de produção, tempo de serviço, fim do prazo do serviço (não considerado neste estudo) e nível de serviço requerido.	Nº de poços	Nº de sondas	