

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

FLAVIO TONGO DA SILVA

**PROPOSTA DE MODELO MATEMÁTICO PARA O
PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE
INTERVENÇÃO A POÇOS DE PETRÓLEO
TERRESTRES REVELADOS DINAMICAMENTE COM
PERÍODO DE ATENDIMENTO VIÁVEL**

SÃO MATEUS - ES

2016

FLAVIO TONGO DA SILVA

**PROPOSTA DE MODELO MATEMÁTICO PARA O
PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE
INTERVENÇÃO A POÇOS DE PETRÓLEO TERRESTRES
REVELADOS DINAMICAMENTE COM PERÍODO DE
ATENDIMENTO VIÁVEL**

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. Roney Pignaton da Silva.

SÃO MATEUS - ES

2016

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES - BC, ES, Brasil)

S586p Silva, Flavio Tongo da, 1974-
Proposta de modelo matemático para o problema de roteamento de sondas de intervenção a poços de petróleo terrestres revelados dinamicamente com período de atendimento viável / Flavio Tongo da Silva. – 2016.
74 f. : il.

Orientador: Roney Pignaton da Silva.
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Poços de petróleo. 2. Eficiência energética. 3. Modelo matemático. I. Silva, Roney Pignaton da. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. III. Título.

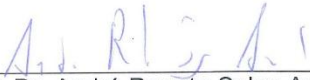
CDU: 620.9

**PROPOSTA DE MODELO MATEMÁTICO PARA O
PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE
INTERVENÇÃO A POÇOS DE PETRÓLEO
TERRESTRES REVELADOS DINAMICAMENTE COM
PERÍODO DE ATENDIMENTO VIÁVEL**

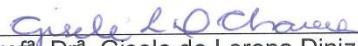
FLÁVIO TONGO DA SILVA

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: 07/04/2016.



Prof. Dr. André Renato Sales Amaral
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Externo



Prof.ª Dr.ª Gisele de Lorena Diniz Chaves
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno



Prof. Dr. Roney Pignaton da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pelo amor e apoio incondicional. À Dalívia, pelo amor e força nas horas de dificuldade, por seu companheirismo e compreensão nos momentos distantes. À minha filha Valentina presente que DEUS nos deu ao longo da jornada desse trabalho. À Francisco da Silva e Arlete Tongo da Silva, meus pais. Aos meus avós paternos Francisco da Silva Butta que trabalhou com logística enquanto tropeiro e Paulina da Silva Butta; a meus avós maternos Sebastião da Silva Tongo, Leonina da Conceição Tongo e Arnóbia Lopes Tongo; a meus tataravós Ignácia e João Mulato Tongo, pais de Ciro Tongo, que persistiram e resistiram à condição de trabalhadores escravizados na localidade de Cachoerinha do Riacho em Aracruz-ES, por volta de 1860. À minha sogra Jorgina Bento Bulhões e sogro Ailton Rodrigues Bulhões pelo ajudarem a ficar com nossa filha durante períodos de estudos. À minha irmã Renata Lopes Tongo que com apenas 7 anos de idade, pela ausência do estado que até o presente dia não viabilizou creche no Morro da Capixaba onde morávamos, tinha a grande responsabilidade de cuidar da casa e de mais duas crianças, seu irmão (eu) e nossa irmã (Ana), e assim possibilitar que nossos pais pudessem trabalhar e aumentar nossas chances de sobrevivência.

À minha irmã e sócia Ana Paula Tongo da Silva por liderar a Bitável Tecnologia, junto com nossa equipe formada por profissionais dedicados como o Hiran, Nelson, Johnson, Alex, Wagner, Darcy, Ivoneide e demais colaboradores atuais e passados. E com isto possibilitar manter vivo meu sonho de criança de poder fazer ciência e tecnologia e concretizar estes conhecimentos em produtos e serviços para a sociedade.

Aos orientadores Roney e Glaydston, pelas oportunidades cedidas, pelas orientações 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. Ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES, pelo fomento financeiro indispensável para realização deste trabalho.

RESUMO

Durante a fase de produção em poços de petróleo terrestres uma das atividades mais importantes e caras é o uso de sondas de intervenção. O funcionamento de cada um desses poços ocorre, na maioria das vezes, em condições difíceis com perfil de produção com grande variação em função da sua geologia, localização e a maneira como o poço é desenvolvido. Estas características levam ao longo da vida produtiva dos poços à necessidade de intervenções de manutenção nomeadas como workover, que são fundamentais para manter a produção ou mesmo melhorar a produtividade ao corrigir falhas que tipicamente ocorrem nos equipamentos dos poços. Como as sondas de intervenção são equipamentos caros e, por isto, em menores quantidades comparadas a quantidade de poços terrestres que demandam intervenções de manutenção, ocorre a geração de filas de poços aguardando atendimento. Isto leva a necessidade de geração de rotas de atendimento aos diferentes poços com as escassas sondas existentes, desafio conhecido como Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção (PRSI). Na literatura, verificam-se modelos e métodos de solução para o PRSI estático, ou seja, que busca minimizar a perda total de produção, não considerando a possibilidade de novas informações relevantes para o roteamento serem reveladas ao longo do horizonte de planejamento. Sendo assim, busca-se neste trabalho estudar e propor um modelo matemático com abordagem dinâmica para o PRSI que minimize a perda total de produção dos poços revelados ao longo de um horizonte de planejamento. O PRSI Dinâmico foi resolvido ao ser criado algoritmo estrutural executado ao longo de um horizonte de planejamento, contendo o modelo matemático proposto, linearizado para execução no solver CPLEX, utilizando técnicas de Programação Linear Inteira Mista. Os resultados computacionais foram obtidos considerando instâncias geradas artificialmente, e a conclusão dessa pesquisa mostra que o modelo proposto aproxima o PRSI Dinâmico do contexto operacional do problema, o que impacta no processo de definição das rotas e agendamento dos atendimentos.

PALAVRAS CHAVE. Sondas de Intervenção. Dinâmico. Otimização Multi-período.

ABSTRACT

During the production phase in onshore oil wells one of the most important and expensive activities is the use of Intervention probes. The operation of each of these wells occurs most often in much climatic conditions and has intemperes production profile with wide variation depending on the geology, location and how it is developed. These characteristics lead throughout the productive life of the well to the need for maintenance interventions named as workover, which are essential to maintain production or even improve productivity when correcting failure which typically occur in the equipment of the wells. As the intervention probes are expensive equipment, and therefore a lesser amount compared to the amount of land wells that require maintenance work, is the generation of rows of wells waiting for service. This leads to the need to generate service to different wells routes with the few existing probes, challenge known as Intervention probes Routing Problem (PRSI). In the literature, it appears that authors proposed models and solution methods for static PRSI, ie that seek to minimize the total loss of production, not considering the possibility of new information relevant to the routing be revealed over the planning horizon . Thus the models for PRSI, in the literature, one should have full knowledge of all the wells that can be prevented, and their information before the start of the planning horizon. Thus, the aim of this work was to study and propose a mathematical model with dynamic approach to the PRSI that minimizes the total loss of production of the wells revealed over a planning horizon. The model was linearized to run the CPLEX solver, using techniques of Linear Programming Mixed Integer, and computational results were obtained considering a hypothetical instance in order to approach the real operational context problem model contemplate dynamic characteristics of the problem and time to meet. The results of this research show that the proposed model approaches the PRSI operating context of the problem, which impacts the process of defining the routes and scheduling of calls.

KEYWORDS. Workover Rigs. Dynamic. Multi-period Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Abordagens do PRSI encontradas na literatura.....	22
Figura 2 – Pedidos revelados antes do dia 1.....	29
Figura 3 – Rota Planejada para o dia 1, ou seja, $t=1$	29
Figura 4 – Durante a execução da rota é revelado ordem de pedido para o poço “3”	29
Figura 5 – Rota Reprogramada no dia 2, ou $t=2$, considerando o poço “3” revelado.	30
Figura 6 – Pedidos revelados antes do dia 1.....	30
Figura 7 – Rota Planejada para o dia 1, ou seja, $t=1$	31
Figura 8 – Durante a execução da rota é revelada ordem de pedido para o poço “3”... ..	31
Figura 9 – Rota Reprogramada no dia 2, ou $t=2$, considerando o poço “3” revelado	31
Figura 10 – 2º termo da função objetivo representa a economia conseguida.	38
Figura 11 – Exemplo de Instância com Dados dos Poços.....	45
Figura 12 – Exemplo de Instância com Dados das Sondas.....	46
Figura 13 – Histograma de Freqüências dos Potenciais de Produção dos Poços..	56
Figura 14 – Histograma de Freqüências dos Tempos de Intervenção	57
Figura 15 – Instância PRSI Estático.	58
Figura 10 – 2º termo da função objetivo representa a economia conseguida.	38
Figura 14 – Histograma de Freqüências dos Tempos de Intervenção	57
Figura 15 – Instância PRSI Estático.	58
Figura 16 – Instância de Poços para o PRSI Dinâmico.	60
Figura 17 – Instância de Sondas para o PRSI Dinâmico.....	60
Figura 18 – Instância de Poços para o PRSI Dinâmico Revelado até 10% do [HP]	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 0 – Resultados computacionais	55
Tabela 1 – Layout dos arquivos das novas instâncias.....	70
Tabela 2 – Resultados para Grupo 25 poços – 1 Sonda – hp = 110	71
Tabela 3 – Resultados para Grupo 25 poços – 2 Sondas – hp = 110	71
Tabela 4 – Resultados para Grupo 25 poços – 4 Sondas – hp = 55	71
Tabela 5 – Resultados para Grupo 25 poços – 6 Sondas – hp = 40	72
Tabela 6 – Resultados para Grupo 25 poços – 8 Sondas – hp = 30	72
Tabela 7 – Resultados para Grupo 25 poços – 10 Sondas – hp = 20	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	11
1.2 OBJETIVO GERAL.....	13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	14
2 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO	16
3 REVISÃO DE LITERATURA SOBRE O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO	19
3.1 ABORDAGEM ESTÁTICA	20
3.2 ABORDAGEM DINÂMICA	22
4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PRSI DINÂMICO	24
4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E ANÁLISE DO PRSI DINÂMICO	27
4.2 MODELO MATEMÁTICO PARA O PRSI DINÂMICO	33
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
5 ALGORITMO ESTUTURAL PARA SOLUÇÃO DO PRSI DINÂMICO	42
6 RESULTADOS COMPUTACIONAIS	50
7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE I	71

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é uma das riquezas minerais de relevante importância no mundo. Seu uso como fonte de energia, assim como seus derivados, está disseminado nos diferentes setores econômicos da sociedade, agregando valor ao gerar renda, empregos e facilidades no dia-a-dia de governos, organizações, empresas e pessoas. O fato de ser um recurso não-renovável aumenta a necessidade da indústria de petróleo ser o mais eficiente possível no processo de exploração e produção de petróleo no mar (offshore) ou em terra (onshore).

Poços de petróleo terrestres são importantes ativos que, em condições normais de funcionamento, produzem 24 horas por dia, 7 dias por semana e 365 dias por ano. O funcionamento de cada um desses ativos ocorre, na maioria das vezes, em condições climáticas difíceis e possui perfil de produção com grande variação em função da sua geologia, localização e a maneira como é desenvolvido (BISSOLI; CHAVES; RIBEIRO, 2016). Estas características levam, ao longo da vida produtiva dos poços, segundo Thomas (2001), à necessidade de intervenções de manutenção nomeadas como workover, que são fundamentais para manter a produção ou mesmo melhorar a produtividade ao corrigir falhas que tipicamente ocorrem nos equipamentos dos poços (BASSI; FERREIRA FILHO; BAHIENSE, 2012).

Como as sondas de intervenção são equipamentos caros, e por isto em menor quantidade comparada a quantidade de poços terrestres que demandam intervenções de manutenção, ocorre à geração de filas de poços aguardando atendimento (NORONHA; ALOISE, 2001). Isto leva a necessidade de geração de rotas de atendimento aos diferentes poços com as escassas sondas existentes, desafio conhecido como Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção (PRSI). Estas rotas devem ser organizadas de forma a restabelecer o funcionamento dos poços o mais rápido possível, dentro de suas restrições de atendimento, com objetivo de minimizar as perdas de produção de petróleo.

Os modelos matemáticos existentes, até o momento, para o PRSI possuem abordagem estática, ou seja, é necessário possuir prévio conhecimento dos poços a serem atendidos antes do início do planejamento das rotas, com seus respectivos atributos (BISSOLI; CHAVES; RIBEIRO, 2016) sejam estes determinísticos ou probabilísticos. Assim nesta dissertação é apresentada proposta de modelo

matemático para o PRSI, com abordagem dinâmica, onde os poços a serem atendidos podem ser revelados tanto antes do início do planejamento das rotas, quanto durante a execução das mesmas, uma vez que é comum a planejadores práticos terem esta necessidade. Modelando-o como um problema de programação linear inteira mista, com objetivo de possibilitar o uso de métodos exatos, via software CPLEX, na resolução de instâncias do PRSI dinâmico.

1.1 Contextualização e Justificativa

Os modelos matemáticos existentes para os problemas PRSI, encontrados na literatura, possuem abordagem estática não oferecendo flexibilidade para reprogramação antes do final do horizonte de planejamento, ou seja, parte do princípio que todas as informações dos poços que demandam manutenção estão disponíveis antes do planejamento das rotas, e que estas informações não mudam ao longo da execução das rotas. Esta premissa desconsidera situações relevantes que ocorrem na prática dos planejadores e programadores das rotas das sondas para atendimentos aos poços (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS; VIDAL; VIEIRA, 2014; BISSOLI; CHAVES; RIBEIRO, 2016).

Por exemplo, supondo que foram geradas rotas para atendimento e as sondas estão executando tais rotas. Como os planejadores e programadores destas rotas devem reagir quando um poço de grande produção parar de funcionar? O programador deve aguardar a liberação da próxima sonda e esta desviar-se de sua rota, já planejada, para o atendimento a este novo poço? Qual o impacto desta decisão em termos de perdas de produção comparada à possibilidade de manter a rota já programada? Qual o impacto desta decisão em caso do poço seguinte a ser atendido na rota já planejada tivesse uma janela de atendimento viável e o não atendimento desta pudesse aumentar o risco de inviabilizar investimento no ativo? E se a taxa da perda de produção dos poços mudasse? Ou deve-se aguardar a conclusão da rota pela sonda e em seguida atender ao poço que fora revelado ao longo da execução das rotas? Estas são algumas das perguntas que um modelo matemático dinâmico do PRSI pode ajudar a responder.

A alternativa utilizada é deixar a cargo da experiência dos planejadores e programadores a decisão sobre o que deve ser feito. Contudo ferramentas computacionais para auxílio à tomada de decisão podem contribuir neste processo decisório tanto para os profissionais quanto para as empresas envolvidas de forma a munirem-se do ferramental necessário para garantir a melhor decisão e minimizar perdas e prejuízo no curto, médio e longo prazo. Outro benefício para as empresas que trabalham com exploração e produção de petróleo onshore, terrestre, é possuírem maior gestão do conhecimento para o processo de priorização do uso das sondas uma vez que são utilizadas em atividades de elevado custo, pois demandam mão-de-obra especializada, alta tecnologia e equipamentos sofisticados.

Alguns autores sugerem utilizar o modelo PRSI estático para resolver comportamentos dinâmicos do PRSI, onde recomendam incluir os poços revelados ao longo da execução das rotas na próxima seção de planejamento, que no caso do PRSI estático será planejada apenas no final do horizonte de planejamento (RIBEIRO; DESAULNIERS E DESROSIERS, 2012). Esta abordagem pode não atender situações quando o poço revelado possui grande taxa de produção e atendê-lo antes do final do horizonte de planejamento gera economia justificável. E em situações onde mesmo o poço revelado tendo taxa de produção que justifique seu atendimento, do ponto de vista de produção de óleo, não é estratégico postergar o atendimento de outro poço com menor taxa de produção, pois este pode correr o risco de ser desativado de forma permanente.

Aliado à necessidade dos planejadores e programadores práticos, trabalhos acadêmico apontam para a necessidade de estender o modelo do PRSI estático para um método dinâmico (BASSI; FERREIRA FILHO; BAHIENSE, 2012). Assim as solicitações para atendimento aos poços podem ser reprogramadas ao longo do horizonte de planejamento, ou seja, é possível ter várias seções de planejamento ao longo do horizonte de planejamento, ao contrário do PRSI estático que possui apenas uma seção de planejamento ao longo do horizonte de planejamento.

O dinamismo é muito importante para as empresas de petróleo, tendo em vista que a produção dos poços de alta produtividade podem decair repentinamente e, nestes casos, pode ser preferível revisar imediatamente o plano das rotas das sondas a fim de evitar perdas elevadas (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS; VIDAL; VIEIRA, 2014).

A linha de estudos com abordagem dinâmica do PRSI, onde as rotas das sondas podem ser modificadas dinamicamente quando novas solicitações de manutenção são geradas ao longo do horizonte de planejamento atende essa necessidade de forma satisfatória.

Em recente trabalho acadêmico acerca dos temas para estudos do PRSI é recomendada a abordagem dinâmica para representar o real contexto do PRSI (BISSOLI; CHAVES; RIBEIRO, 2016).

O PRSI dinâmico é um caso especial do Problema Dinâmico de Roteamento de Veículos (PDRV) que em função do avanço das tecnologias de comunicação, localização e processamento computacional tem aumentado o número de trabalhos acadêmicos sobre o PDRV de forma considerável após os anos 2000 (PSARAFTIS; WEN; KONTOVAS, 2016).

Entre os trabalhos que mais se aproximam ao PRSI Dinâmico são os que estudam a distribuição de solicitações ao longo de um horizonte de tempo multi-período, nomeado problema dinâmico multi-período de roteamento de veículos apresentado por WEN, CORDEAU, LAPORTE, LARSEN (2010). Esse modelo foi utilizado no processo de desenvolvimento do modelo matemático, proposto nesta dissertação, em conjunto com o trabalho de Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012), para o PRSI estático.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo desse estudo é contribuir para aproximar o problema clássico de roteamento de sondas de intervenção ao real contexto operacional dos campos petrolíferos *onshore*, ao propor modelo matemático dinâmico e com período de tempo viável para atendimento aos poços que minimize a taxa de perda de produção. Sendo uma alternativa ao clássico modelo matemático do PRSI estático, o modelo matemático proposto abordará o Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção a Poços de Petróleo Terrestres Revelados Dinamicamente com Período de Atendimento Viável (PRSI-DP).

1.3 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos estão:

- a) Realizar estudos sobre os modelos PRSI estático;
- b) Propor modelo matemático para o PRSI-DP para minimizar a perda de produção;
- c) Propor algoritmo estrutural, para resolver o PRSI Dinâmico, a ser executado ao longo de um horizonte de planejamento; e
- d) Propor novas instâncias, para a criação de cenários mais próximos do problema real.

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 breve revisão bibliográfica sobre o problema de roteamento de sondas de intervenções com abordagem estática e dinâmica, seja com informações determinísticas ou estocásticas. Além disso, são destacados estudos sobre o problema dinâmico de roteamento de veículos determinísticos, de modo a sustentar a proposta da formulação matemática que é apresentada no capítulo seguinte.

No Capítulo 4 é proposto o modelo matemático criado pelo autor para o Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção a Poços de Petróleo Terrestres Revelados Dinamicamente com Período de Atendimento Viável (PRSI-DP). Na sequência, descreve-se, no Capítulo 5, algoritmo estrutural, para resolver o PRSI Dinâmico, a ser executado ao longo de um horizonte de planejamento atualizado, além de serem definidas as instâncias dos poços e sondas, assim como a solução do modelo matemático proposto via CPLEX para determinado instante de tempo.

No Capítulo 6 são apresentados resultados computacionais com instâncias geradas artificialmente utilizadas na solução do PRSI-DP. Além disso, é explicado o processo de criação das instâncias.

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

2 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO

O processo de exploração e produção de petróleo terrestre demanda elevados investimentos, pois exigem equipes especializadas, técnicas avançadas e equipamentos sofisticados. Tanto que segundo Rosenblatt (2006), é necessário laudo quanto a viabilidade técnica e econômica, após detectado petróleo em um poço, para avaliar as possibilidades de sua comercialização.

Conforme Noronha e Aloise (2001), em muitos casos, a elevação dos fluidos é feita de forma artificial com o uso de equipamentos especiais devido ao fato de que os poços nem sempre possuem pressão suficiente para que os fluidos atinjam a superfície. Por isso, serviços como os de limpeza e manutenção dos equipamentos de elevação de fluidos são essenciais para se evitar paradas no processo de extração.

Para realizar tais serviços de manutenção, limpeza e até mesmo reparo para poços terrestres (onshore) são realizados por equipamentos móveis, denominados sondas, que estão disponíveis em um número limitado e muito pequeno se comparado à quantidade de poços que demandam serviços (BASSI; FERREIRA FILHO; BAHIANSE, 2012). Seria ideal que houvesse uma sonda de manutenção fixa para cada poço; assim, quando um poço demandasse manutenção seria prontamente atendido. Contudo, devido ao seu alto custo de locação, não é lucrativo manter um número grande de sondas disponíveis. Logo, a manutenção imediata de um poço nem sempre é possível, o que provoca a ocorrência de uma fila de poços à espera de atendimento.

Assim que uma falha nos equipamentos de algum poço é detectada, para que este volte a funcionar o mais breve possível, é feito um pedido de manutenção. Em seguida, é feito um planejamento de atendimento para cada sonda disponível em um dado período de tempo pré-estabelecido e, posteriormente, essas sondas são designadas para a correção dos poços que aguardam manutenção na ordem estabelecida pelo seu escalonamento. Todo este processo, da detecção de problemas nos poços, até a execução dos escalonamentos pelas sondas, é chamado de horizonte de trabalho. Em Trindade (2005) é apresentado uma descrição muito didática do protocolo de agendamento de manutenção para os poços.

Cada poço possui sua respectiva vazão, que é a capacidade de produção de óleo bruta por unidade de tempo. Quando algum problema nos equipamentos de extração de um poço é detectado, por questões de segurança, os equipamentos são desligados e a vazão desse poço deixa de ser coletada até que o problema seja corrigido.

No PRSI deve-se encontrar a programação das rotas mais adequadas para as sondas atenderem aos poços de petróleo de forma a minimizar a perda total de produção. Sendo a perda de produção de petróleo de um poço dada pela vazão desse poço vezes a quantidade de tempo que teve sua produção paralisada. Considera-se uma boa solução para o problema, quando é feito o sequenciamento das sondas para o conjunto de poços, considerando dados como: vazão do poço, sua posição em relação aos demais poços que necessitam ser reparados, tipo do serviço requerido pelo poço, tempo para a manutenção e o prazo limite para seu atendimento.

Assim cada poço que solicita a manutenção possui: uma vazão, que indica a capacidade de produção deste poço, um tempo de serviço, que indica o tempo estimado para realizar a manutenção e um limite de tempo, que representa o tempo máximo que este poço pode ficar ocioso (sem produzir) e o tipo de manutenção que depende do tipo de sonda. Cada poço deve ser atendido uma única vez e por uma única sonda. Segundo Bissoli (2014), muitos técnicos de planejamento e programação dizem que após a definição das rotas e início de sua execução, ocorrem imprevistos como a quebra de equipamentos, mudanças climáticas, mudança nas taxas de perda de produção e a chegada de novos poços que aguardam manutenção. Contudo os modelos matemáticos atuais para o PRSI não possuem abordagem dinâmica (BISSOLI; CHAVES; RIBEIRO, 2016).

Cada sonda parte de um ponto inicial diferente no começo do planejamento, o que torna o PRSI integrante da classe dos Problemas de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos.

O PRSI é uma generalização do Problema de Roteamento de Veículos (PRV). Como o PRV pertence à classe NP-difícil e por se tratar de uma generalização desde último, o PRSI também é classificado como pertencente à classe NP-difícil conforme

evidenciado por Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012), limitando com isso o uso exclusivo de métodos exatos para a solução do problema de maneira viável.

Contudo, mesmo com estas limitações ao uso de métodos exatos, é importante desenvolver formulações matemáticas para estes problemas, tanto para avaliar os resultados de métodos aproximados em instâncias de pequeno porte, como para tentar obter limites inferiores de boa qualidade para o valor ótimo.

A quantidade de variáveis envolvidas no processo de tomada de decisão na criação das rotas de atendimento, além do impacto econômico e ambiental, desta decisão, é considerável. A ausência de modelos matemáticos que capturem a complexidade do problema real do PRSI é fundamental para diminuir erros humanos e aumentar as chances de decisão assertiva e dependa menos do bom senso dos programadores. No próximo capítulo relata-se o que a literatura científica aborda sobre o PRSI, de forma a orientar no processo de criação do modelo dinâmico proposto por este trabalho com respectivo método de solução.

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

3.1 Abordagem Estática

O Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção (PRSI) é uma generalização do problema clássico de roteamento de veículos (PRV). Em função das várias aplicações práticas destes problemas, elevada complexidade, avanço das tecnologias de informação e comunicação, o problema de roteamento de veículos e suas variações têm sido extensivamente estudado.

Em Bissoli (2014) e Bissoli, Chaves, Ribeiro (2016) o PRSI é organizado nas categorias "Problema de Programação de Sondas de Intervenção" e "Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção". Um problema é considerado como um "problema de roteamento" quando as decisões são relativas à configuração espacial dos movimentos dos veículos, segundo Bodin, Golden, Assad, Ball (1983). Estes problemas normalmente consideram a sequência de locais que o veículo deve percorrer, e quando se fazem considerações no que diz respeito aos momentos em que os pontos da rede são visitados, esses problemas são nomeados como "problemas de programação". Em grande parte dos casos reais, esses dois tipos de problemas se fundem gerando os "problemas de roteamento e programação" (PRP). Ao analisar as características dos PRP sugeridas por Bodin et al. (1983), e citadas por Costa (2005), podemos classificar o PRSI como um PRP com múltiplos veículos não capacitados, com demandas nos vértices da rede, sem rota máxima imposta, com uma única operação por vértice, com custos variáveis com as rotas e com objetivo não baseados nos cursos das rotas e sim em um critério conforme prioridade do cliente. Assim o problema PRSI proposto neste trabalho é um Problema de Roteamento e Programação de Veículos, pois leva em consideração características espaciais do movimentos dos veículos assim como os momentos em que os pontos na rede são visitados.

O primeiro registro sobre o PRSI foi feito por Barnes, Brennan, Knapp (1977) que aborda a importância de se realizar estudo eficiente na sequência de atendimento das sondas aos poços. Os autores informam que naquela época os serviços eram programados pela intuição e experiência profissional dos planejadores e

programadores. Esse esforço intuitivo geralmente não leva até soluções boas ou ótimas, que minimizem as perdas de produção, uma das razões é a complexidade do problema. O problema abordado Barnes; Brennan; Knapp (1977) não contempla a questão de restrições de datas de atendimento aos poços, as sondas são idênticas em suas capacidades, os tempos de viagens entre os poços são assumidos insignificantes e uma vez iniciada a intervenção esta é realizada até ser completada (sem cancelamentos).

Outra abordagem do problema é feita por Paiva (1997) que apresenta descrição do PRSI. Neste trabalho é apresentada a ideia de priorização de atendimentos baseando-se na comparação entre os gastos de sondas e as perdas monetárias de um poço parado. Ao agregar mais uma sonda, o autor propõe resolver problema de forma particionada, tal como se costuma fazer na prática, que o planejador ou programador responsável pelo sequenciamento das sondas, decide quais poços serão atendidos por determinada sonda. O autor sugere, após feita esta atribuição, aplicar os algoritmos individualmente em cada sonda para obter rotas melhores.

O problema da "Otimização do emprego de sondas de produção em poços de petróleo", foi descrito por Gouvêa, Goldberg e Costa (2002) como um problema que consiste em estabelecer uma programação de trabalho para a operação de uma frota de sondas sobre um conjunto de poços de petróleo. A frota pode ser considerada heterogênea e não possui número pré-estabelecido, o que permite a inserção de sondas quando necessário. Os autores alertam para a maior significância dos tempos de intervenção em relação aos de deslocamentos.

Um modelo matemático que considera janelas de tempo para atendimento foi proposto por Costa e Ferreira Filho (2004, 2005). Nestes trabalhos foram apresentadas instâncias conforme casos reais, não foram consideradas as distâncias entre os poços e cada poço possui produção diária constante.

O PRSI foi abordado como um modelo matemático que considera o tempo de transporte entre os poços por Aloise, Noronha, Maia, Bittencourt e Aloise (2002), que também utiliza a distância mínima entre os poços para calcular o tempo. Em Aloise et al. (2006) os autores consideram o tempo para cada serviço e os tempos de deslocamento entre os poços. Neste trabalho foram realizados experimentos práticos com dados da Petrobras, como em Costa e Ferreira Filho (2005) e também conseguiram melhorar os resultados produzidos pelos técnicos da empresa.

Um modelo matemático bi-objetivo foi proposto por Soares, Costa e Aloise (2011) e também propuseram novas instâncias para o problema. A primeira função objetiva foi minimizar as perdas de produção e o custo diário das sondas foi a segunda função objetiva a ser otimizada.

Duhamel, Santos e Guedes (2012) ajustaram o modelo matemático proposto por Aloise et al. (2006) e assim contabilizaram os poços não atendidos. No trabalho de Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012) foi mostrado que o tempo de atendimento aos poços tem papel fundamental para o processo de solução, além de ser considerado um horizonte de planejamento, sondas com diferentes capacidades e poços podem ficar sem atendimento.

O PRSI com abordagem estocástica tem seu primeiro estudo apresentado por Irgens, Guzman, Stamatopoulos, Jackson (2008), em que o roteamento é otimizado com múltiplos objetivos. Bassi, Ferreira Filho e Bahiense (2012) também fazem abordagem estocástica para o problema de planejamento e programação de uma frota *offshore* de sondas de petróleo considerando o tempo de serviço com incerteza. Ambos os modelos estocásticos propostos possuem abordagem estática segundo conceitos de Pillac, Gendreau, Guéret e Medaglia (2013).

Bissoli (2014) propõe um modelo matemático para o PRSI bi-objetivo que minimiza a perda total de produção dos poços e o custo com locação das sondas. Os resultados mostram que, apesar da minimização da perda total de produção seja um objetivo fundamental, a variação do custo de locação das sondas, assim como o preço do barril de petróleo, influencia no planejamento das rotas.

Segundo Pillac, Gendreau, Guéret e Medaglia (2013) um problema possui abordagem dinâmica quando parte ou todos os dados de entrada são desconhecidos e revelados dinamicamente durante o planejamento ou execução das rotas. Logo conforme a revisão bibliográfica apresentada, ratificada pelos trabalhos de Bissoli (2014) e Bissoli, Chaves, Ribeiro (2016) não se tem conhecimento de modelo matemático com abordagem dinâmica para o PRSI, conforme critério de Pillac et al. (2013). Assim na próxima seção será abordado os conceitos sobre o problema de roteamento dinâmico de veículos apresentados fornecerá base teórica para apresentar o modelo matemático para o PRSI dinâmico proposto neste trabalho. A Figura 1 resume a classificação encontrada na literatura para o PRSI.

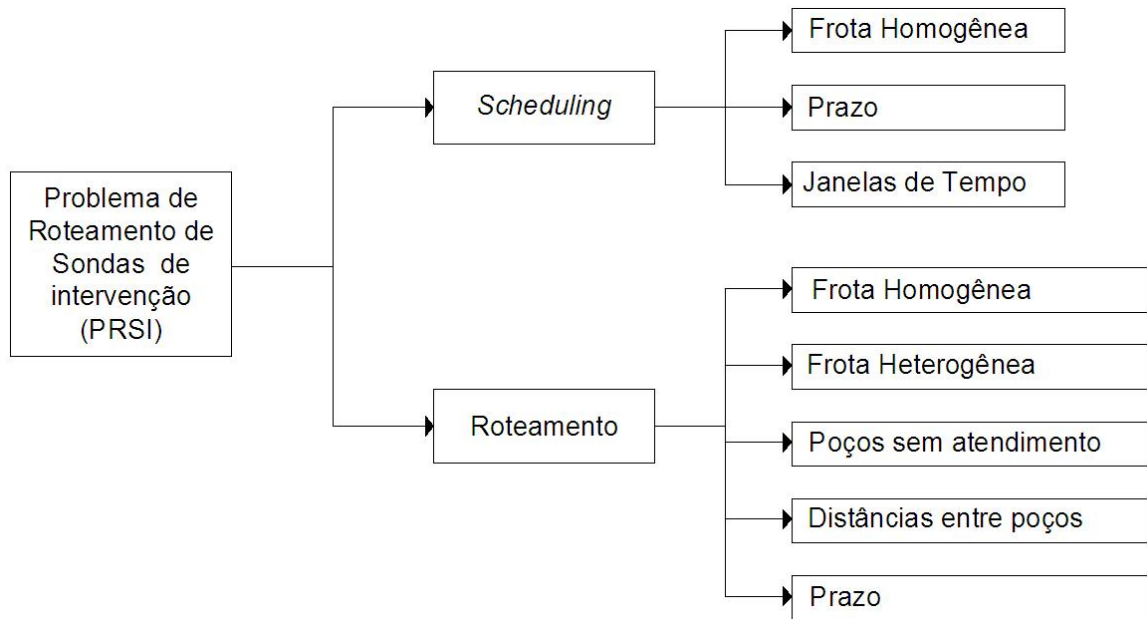


Figura 1 – Abordagens do PRSI encontradas na literatura.
 Fonte: Bissoli (2014, p.29)

3.2 Abordagem Dinâmica

Hvattum, Løkketangen, Laporte (2006) afirmam que a abordagem estática do problema de roteamento de veículos (PRV) não consegue contemplar todos os aspectos das aplicações no mundo práticas. Assim extensões ou modificações nos modelos são necessárias, como a abordagem dinâmica do PRV.

Psaraftis (1988) aborda o conceito de pedido imediato: que um cliente solicita serviço sempre quer ser atendido o mais cedo possível, demandando replanejamento imediato da rota do veículo em execução. Além disso, define o PRV como estático se as entradas do problema não mudam durante o processo de solução ou durante a execução das rotas. O PRV é definido como dinâmico quando as entradas do problema, sejam elas determinísticas ou probabilísticas, são conhecidas ou atualizadas em parte ou em sua totalidade durante o processo de solução ou durante a execução das rotas.

Uma das razões dessa necessidade de um modelo matemático para o PRSI Dinâmico é o fato da flexibilidade e dinamismo serem muito importantes para as empresas de petróleo, tendo em vista que à produção dos poços de alta

produtividade podem decair repentinamente, ocorrer atrasos nas manutenções, quebras de sondas, mudanças climáticas ou mesmo mudanças de prioridades; e nestes casos pode ser preferível revisar imediatamente o plano das rotas das sondas a fim de evitar perdas elevadas (RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS; VIDAL; VIEIRA, 2014). O trabalho de Bassi, Ferreira Filho, Bahiense (2012) também aponta para a necessidade de estender o modelo do PRSI estático para uma abordagem dinâmica.

Psaraftis (1988) diz que uma das características que a versão dinâmica do Problema de Roteamento de Veículos se difere de sua versão estática na importância da dimensão do tempo para a versão dinâmica. Considerando isto utilizamos o modelo matemático do PRSI estático proposto por Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012) onde foi mostrado que o tempo de atendimento aos poços tem papel fundamental para o processo de solução, além de considerar um horizonte de planejamento.

Para Pillac, Gendreau, Guéret e Medaglia (2013) em contraste com a clássica definição do problema de roteamento de veículos, as aplicações no mundo real frequentemente incluem duas importantes dimensões: evolução e qualidade da informação. A evolução da informação é relativa ao fato de em alguns problemas a informação disponível para o planejador pode mudar durante a execução das rotas, por exemplo, com a chegada de novos pedidos de clientes. Já a qualidade da informação reflete a incerteza da informação disponível, por exemplo, quando a demanda para um cliente é somente conhecida como uma faixa estimada da sua real demanda. Dessa forma dependendo do problema e da tecnologia disponível, as rotas dos veículos podem ser planejadas estaticamente ou dinamicamente.

Em uma perspectiva dinâmica, o problema consiste em planejar rotas dos veículos de uma forma online, e através da comunicação online é possível atender o cliente, o mais breve possível, assim que veículo estiver disponível, ou postergar seu atendimento para momento mais conveniente.

Segundo classificação de Pillac, Gendreau, Guéret e Medaglia (2013) o PRSI dinâmico, proposto nesta dissertação, está na categoria dos problemas dinâmicos e determinísticos; sendo parte ou todos os dados de entrada são desconhecidos e revelados dinamicamente durante o planejamento ou execução das rotas. Para estes problemas, as rotas dos veículos são redefinidas em tempo real, requerendo suporte de tecnologias de comunicação em tempo-real entre os veículos e os

tomadores de decisão (exemplo, telefone celular e sistemas de posicionamento global). Esta classe de problemas é também referenciada como online ou tempo-real.

O avanço das tecnologias tem viabilizado diversas aplicações de roteamento em tempo real onde, por exemplo, as rotas são replanejadas após mudanças nos dados de entrada ao longo da execução das mesmas. A introdução em 1996 do Global Positioning System (GPS), a evolução e difusão dos telefones celulares e smartphone, associado a maior exatidão dos sistemas de informação geográficas, permitem que nos dias atuais as organizações possam acompanhar e gerenciar suas frotas em tempo real e eficientemente, conforme Pillac et al. (2013).

O PRSI dinâmico é um caso especial do Problema Dinâmico de Roteamento de Veículos (PDRV) que em função do avanço das tecnologias de comunicação, localização e processamento computacional tem aumentado o número de trabalhos acadêmicos sobre o PDRV de forma considerável após os anos 2000 (PSARAFTIS; WEN; KONTOVAS, 2016). Os processos de roteamento estático de veículos ocorrem em duas etapas, ou seja, o planejamento e a execução; contudo pelos motivos já citados, é possível fazer o roteamento de veículos dinamicamente, assim introduzindo grandes oportunidades de redução de custos operacionais, melhorar o nível de serviços ao cliente e reduzir impactos ambientais.

Entre os trabalhos que mais se aproximam ao PRSI Dinâmico são os que estudam a distribuição de solicitações ao longo de um horizonte de tempo multi-período de Wen, Cordeau, Laporte, Larsen (2010), nomeado problema dinâmico multi-período de roteamento de veículos (PDMRV), que foi utilizado no processo de desenvolvimento do modelo matemático proposto neste trabalho.

Considerando o exposto, no próximo capítulo é abordado o PRSI-DP, objeto de estudo desta dissertação, é descrito o comportamento do problema assim como é proposto formulação matemática para contemplar suas características dinâmicas, assim como o atendimento aos poços em intervalo viável.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PRSI DINÂMICO

4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E ANÁLISE DO PRSI DINÂMICO

O propósito desta dissertação é modelar e resolver o problema de roteamento de sondas de intervenção a poços de petróleo terrestres revelados dinamicamente com período de atendimento viável (PRSI-DP), PRSI dinâmico. O estudo é motivado pelo caso de uma multinacional brasileira produtora de petróleo, Petrobras, mas a contribuição é de aplicação geral.

No PRSI-DP, clientes (poços) solicitam pedidos de atendimento dinamicamente ao longo de um horizonte de planejamento constituído por vários períodos de tempo. Cada pedido especifica a localização do poço, o tipo de serviço, a duração do serviço, sua produtividade e período de atendimento viável.

Campos de petróleo terrestres podem conter um grande número de poços distribuídos em uma grande região, mais de 1000 poços em certos casos. Quando a produtividade dos poços decrescem em razão de mal funcionamento, pedidos de manutenção são revelados dinamicamente ao longo de um horizonte de planejamento. Estes pedidos especificam a taxa da perda de produção, a localização do poço, o tipo de serviço de manutenção (tal como limpeza, restabelecimento ou estimulação) e período de tempo viável para atendimento (janela de tempo) requeridos para restaurar a completa produtividade de cada poço. Para a manutenção de um poço, um veículo especialmente equipado, nomeado sonda de intervenção (ou sonda, para simplificar), deve ser enviado. Em razão das sondas disponíveis não possuírem os mesmos equipamentos, uma pedido somente pode ser atendido apenas por um subconjunto das sondas. Os pedidos de manutenção revelam-se dinamicamente, e as rotas das sondas (sequência dos poços para atendimento) podem ser (re)planejadas periodicamente a cada t instante de tempo ao longo de um horizonte de planejamento $T = \{1, 2, 3, \dots, r\}$, onde r é o limite superior do horizonte de planejamento. Quando uma seção de planejamento é programada, isto é, atualizado o horizonte de planejamento T' no instante t , esta é representada como $T' = \{t, t + 1, t + 2, \dots, r\}$, baseado na proposta do modelo de Wen, Cordeau, Laporte, Larsen (2010) para a necessidade de reprogramação, ou seja, (re)planejamento, das rotas ao longo do horizonte de planejamento em função da possibilidade de novos pedidos de atendimentos aos poços ou mesmo a alteração dos atributos dos poços que já pediram atendimento como, por exemplo, a taxa de perda de produção, período de atendimento viável ou tempo para realização do serviço no poço.

O horizonte de planejamento é finito, composto de até r unidades de tempo, onde $r \geq t$. Ao longo do horizonte de planejamento é considerado como possíveis candidatos, a entrar na reprogramação das rotas para atendimento, os pedidos revelados (novos poços ou alterações em atributos de poços existentes) que são conhecidos até o instante t , exceto este, aqui é usado o mesmo conceito utilizado para o PRSI estático onde os poços que entram na programação devem ser revelados antes do início da seção de planejamento, segundo Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012). Contudo no PRSI dinâmico é possível atualizar diversas vezes a seção de planejamento, T' ao longo do horizonte de planejamento, ao contrário do PRSI estático. Em especial, esses pedidos incluem a parte das rotas previamente planejadas que não iniciaram atendimento (é considerado que um poço que inicia atendimento não pode ser interrompido) antes do início da seção de planejamento a ser programada, além dos possíveis novos pedidos (e possíveis alterações de atributos dos pedidos já conhecidos dos poços) que foram revelados até o instante de tempo t . Em função do número limitado de sondas disponíveis, período de tempo viável para atendimento (janela de tempo), a dinâmica (frequência e quantidade) que novos pedidos são revelados e a finitude do horizonte de planejamento, pode ser impossível planejar o atendimento de todos os pedidos de manutenção dentro da seção de planejamento ou mesmo horizonte de planejamento. Assim os pedidos não atendidos são postergados para a próxima seção de planejamento junto com os possíveis novos pedidos revelados até o instante t antes do início da seção de planejamento a ser atualizada, para aumentar as chances de atendimento comparado ao PRSI estático.

Similar ao comentado por Wen, Cordeau, Laporte, Larsen (2010) este problema é considerado dinâmico no sentido que os pedidos são revelados ao longo do horizonte de planejamento. As rotas programadas ou reprogramadas no instante t devem determinar qual pedido de manutenção deve ser atendido, quando e a sequência que as sondas devem atender aos poços. Estas decisões são tomadas sem saber nada sobre os pedidos futuros. Assim o problema se resume a definir qual poço deve ser atendido em determinado dia e qual poço deve ter seu atendimento postergado, pois é possível postergar o atendimento ao poço e com isto conseguir minimizar perdas de produção ao aguardar condições mais favoráveis, ao invés de atender aos poços o mais breve possível, correndo risco de não conseguir tais

condições mais favoráveis ao serem revelados novos pedidos para atendimento, como mostra Angelelli, Bianchessi, Mansini, Speranza (2009).

Dado um conjunto de poços com pedidos de manutenção e janelas de tempo viáveis de atendimento dinamicamente revelados ao longo do tempo, e uma frota heterogênea de sondas, cada uma com equipamentos específicos e posição inicial, o PRSI-DP consiste em determinar rotas viáveis para as sondas tal que o total de perda de produção dos poços revelados dinamicamente ao longo dos próximos t instantes de tempo, ou seja, horizonte de planejamento T , seja minimizado. Uma rota é viável para uma sonda se esta parte de sua posição inicial, sua duração (incluindo tempo de serviço no poço) não deve exceder r unidades de tempo, um poço é atendimento somente com a sonda com equipamentos adequados, os poços são revelados dinamicamente ao longo do horizonte de tempo e devem ser atendidos dentro de suas respectivas janelas de tempo. Uma rota termina na localização do último poço visitado.

Para ilustrar o comportamento dinâmico do PRSI e período de tempo para atendimento viável aos poços; utilizaremos os exemplos abaixo considerando a instância (A) e a instância (B).

Considere que a sonda “k” leva 1 dia para chegar a qualquer poço partindo de sua origem, e 1 dia para se deslocar entre dois poços qualquer que seja. E cada poço demanda 1 dia de serviço após início de seu atendimento. Considere que cada poço conhecido antes do dia “1” tenha taxa de perda de 2 m³/dia, e que o poço “3” revelado ao longo do horizonte de planejamento tenha taxa de perda de 20 m³/dia. A única diferença entre a instância (A) e a instância (B), é que na instância (A) o poço “1” pode ser atendido até o dia “6”, já na instância (B) o limite de atendimento ao poço “1” e até o dia “5”.

Analisando o comportamento do PRSI dinâmico com a instância (A), a seguir, o fato do poço “1” ter limite de atendimento até o dia 6, e a taxa de produção do poço revelado no dia “1”, fez toda a diferença na sequencia do atendimento. A estrutura detalhada das instância esta na seção 5.1 para maiores esclarecimentos.

Na Figura 2, antes do dia “1” são revelados os pedidos para atendimento ao poços “2” com limite de atendimento até o dia “3”, e para o poço “1” com limite de atendimento até o dia “6”.



Figura 2: Pedidos revelados antes do dia 1

Na Figura 3, é calculada a rota com as informações disponíveis até o dia “1”, ou seja, a rota foi programada para $t=1$.



Figura 3 : Rota Planejada para o dia 1, ou seja, $t=1$

Na Figura 4 enquanto a sonda “k”, no dia “1”, esta se deslocando para o poço “2” é revelado um pedido de manutenção para o poço “3” cujo limite de atendimento é até o dia “6” e a taxa de perda desse poço é $20 \text{ m}^3/\text{dia}$.

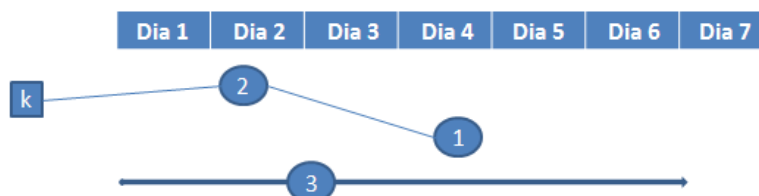


Figura 4: Durante a execução da rota é revelado ordem de pedido para o poço “3”. Considerando o novo cenário com a chegada do pedido de manutenção para o poço “3” é feita uma reprogramação da rota no dia 2, ou $t=2$, onde o poço “3” é planejado para iniciar atendimento no dia “4” e o início do atendimento para o poço “1” é

postergado para o dia “6”. Considerou-se neste critério a alta taxa de perda de produção do poço “3” e a possibilidade de ao postergar o atendimento do poço “6” ainda estaria dentro do limite viável de atendimento. O segmento da rota já realizado é representado por linha tracejada.

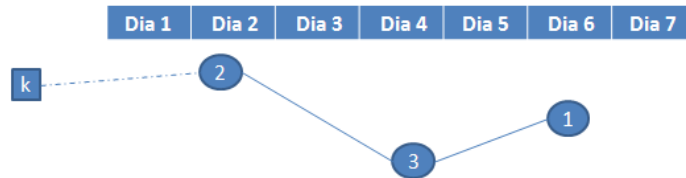


Figura 5: Rota Reprogramada no dia 2, ou $t=2$, considerando o poço “3” revelado

Analisando o comportamento do PRSI dinâmico com a instância (B), a seguir, o fato do poço “1” ter limite de atendimento até o dia “5” (ao contrário da instância (A) que é até o dia “6”), e apesar da taxa de produção do poço “3” revelado durante a execução da rota no dia “1”, a prioridade de atendimento foi mantido para o poço “1” em detrimento do poço “3” revelado ao longo do horizonte de planejamento.

Na Figura 6, antes do dia “1” são revelados os pedidos para atendimento ao poços “2” com limite de atendimento até o dia “3”, e para o poço “1” com limite de atendimento até o dia “5”.



Figura 6: Pedidos revelados antes do dia 1

Na Figura 7, é calculada a rota com as informações disponíveis até o dia “1”, ou seja, a rota foi programada para $t=1$.



Figura 7 : Rota Planejada para o dia 1, ou seja, $t=1$

Na Figura 8 enquanto a sonda “k”, no dia “1”, esta se deslocando para o poço “2” é revelado um pedido de manutenção para o poço “3” cujo limite de atendimento é até o dia “6” e a taxa de perda desse poço é $20 \text{ m}^3/\text{dia}$

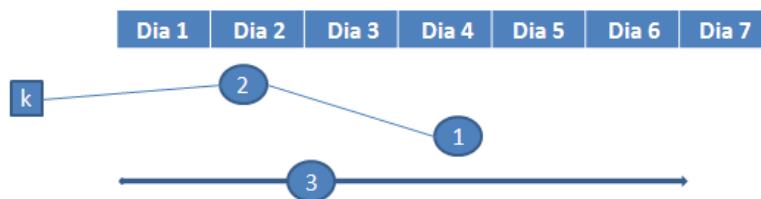


Figura 8: Durante a execução da rota é revelado ordem de pedido para o poço “3”.

Considerando o novo cenário com a chegada do pedido de manutenção para o poço “3” é feita uma reprogramação da rota no dia 2, ou $t=2$, onde o poço “3” é planejado para iniciar atendimento no dia “6” e o início do atendimento para o poço “1” é mantido para o dia “4”. Considerou-se neste critério, apesar da alta taxa de perda de produção do poço “3”, o limite de atendimento viável para o poço “1”. O segmento da rota já realizado é representado por linha tracejada.



Figura 9: Rota Reprogramada no dia 2, ou $t=2$, considerando o poço “3” revelado.

4.2 MODELO MATEMÁTICO PARA O PRSI DINÂMICO

Nesta seção foi criado um modelo matemático para o PRSI Dinâmico inspirado no modelo proposta por Ribeiro, Desaulniers e Desrosiers (2012), que evidencia a importância do tempo para a solução do problema PRSI, e de Wen, Cordeau, Laporte, Larsen (2010) que faz abordagem dinâmica do problema de roteamento de veículos multiperíodo com janela de tempo. De forma a contribuir junto à tomadores de decisão, ao possibilitar avaliar quando é mais eficiente (respeitando momentos de atendimento viável) manter rota de atendimento aos poços conhecidos, antes da execução da rota, ou fazer modificações nestas para atender novos poços relevados dinamicamente considerando que estes possuem janela de tempo para atendimento viável.

No PRSI Estático abordado por Ribeiro, Desaulniers, e Desrosiers (2012), os poços que não revelados antes do início do horizonte de planejamento, não são atendidos pelas sondas em sua seção de planejamento ao longo do horizonte de planejamento. No PRSI Dinâmico proposto neste trabalho, como a seção de planejamento é atualizada ao longo do horizonte de planejamento, é possível que um poço que não estava programado para ser atendido antes do início do horizonte de planejamento possa ser incluído nas rotas de atendimento com o menor impacto possível em termos de perdas de produção e atendimento a janelas de atendimento dos poços.

Analisou-se uma das funções objetivo e restrições apresentadas por Wen, Cordeau, Laporte, Larsen (2010); e também o modelo matemático para o PRSI estático proposto por Ribeiro, Desaulniers, e Desrosiers (2012); sendo criado o modelo matemático proposto para o PRSI Dinâmico, ou seja, o PRSI-DP.

No modelo matemático proposto para o PRSI Dinâmico, seja K o conjunto de sondas, frota, disponível. E sendo o grafo, rede, $G_k^t = (N_k^t, A_k^t)$ associado a cada sonda $k \in K$ em determinado instante de tempo de programação t . Onde N_k^t representa o conjunto de nós revelados até o instante de tempo de programação t , e A_k^t representa o conjunto de arcos da rede formada por estes nós até o instante de tempo de programação t .

O conjunto N_k^t 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 último nó, poço, visitado por determinada sonda k até o final de sua rota programada, no caso do PRSI Dinâmico não necessariamente é o final do horizonte de planejamento como no caso do PRSI Estático de Ribeiro, Desaulniers, e Desrosiers (2012). 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 tarefas, poços que demandam manutenção, revelados até o instante de programação t é denotado por W^t , enquanto o subconjunto dos nós-tarefas revelados até o instante de tempo de programação t , que pode ser atendidos por uma sonda k , é denotado $W_k^t \subseteq W^t$. Portanto, $N_k^t = \{o(k), d(k)\} \cup W_k^t$.

O conjunto A_k^t é o conjunto de arcos, formados pelos poços revelados até o instante de tempo de programação t a serem atendidos pela sonda “ k ”, contém quatro tipos de arcos: vazio, início, fim e entre-tarefas. Ou seja, A_k^t é conjunto de arcos entre todas as localizações, poços e posições inicial e final das sondas. 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 $j \in W_k^t$ 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 $i \in W_k^t$ 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 $i, j \in W_k^t$ representa o movimento de uma sonda k a partir de um poço i para um poço j , seguido do serviço em j . Portanto, $A_k^t = \{o(k), d(k)\} \cup (o(k) \times W_k^t) \cup (W_k^t \times d(k)) \cup (W_k^t \times W_k^t)$.

O horizonte de planejamento no modelo PRSI dinâmico é nomeado por T que representa o conjunto composto por sequência de unidades de tempo, ou seja, $T = \{1, 2, 3, 4, \dots, r\}$ onde r é o último elemento da sequência que representa o último momento do horizonte de planejamento T . Denotamos o horizonte de planejamento atualizado para o instante de programação t por $T' = \{t, t + 1, \dots, r\}$, também nomeado por seção de planejamento. A cada arco $(i, j) \in A_k^t$ associa-se o parâmetro não-negativo t_{ij} que especifica o tempo de viagem mais o tempo de atendimento ao nó j referente ao serviço de manutenção, caso haja algum. Assume-se que t_{ij} é o número de períodos de tempo não-negativo e que os parâmetros t_{ij} , $(i, j) \in A_k^t$, satisfazem a desigualdade triangular, isto é, a matriz de distância é euclidiana e simétrica. Note que qualquer arco (i, j) tal que $t_{ij} > r$ pode ser excluído do conjunto

de arcos. E para cada nó $i \in W_k^t$ define-se o parâmetro positivo p_i que indica a taxa de perda de produção por período de tempo no nó i .

Com base no modelo matemático de Wen, Cordeau, Laporte, Larsen (2010), definiu-se a janela de tempo original com o conjunto dos instantes de tempo viáveis para início do atendimento ao poço i , e é representada por $\{a_i \dots b_i\}$, onde a_i é o limite inferior original para início do atendimento ao poço i e b_i é o limite superior para atendimento e liberação do poço i . Note que o primeiro instante de atendimento viável deve ser ajustado para $a_i' = \max\{t, a_i\}$ quando programado para o instante t , e que l é o instante de tempo viável para início do atendimento ao poço i , sendo $l \in \{a_i' \dots b_i\}$.

Assim como o modelo matemático de Ribeiro, Desaulniers, e Desrosiers (2012) é baseado no conceito fluxo em rede que possui dois tipos principais de variáveis, para PRSI dinâmico utilizamos semelhante estratégia, a citar: para cada arco $(i, j) \in A_k^t, k \in K$, define-se a variável binária de fluxo de arco X_{ijkl}^t que representa a decisão tomada no instante de tempo de programação t . É igual a 1, se e somente se, a sonda k partir do nó i e chegar ao nó j no instante de tempo viável de início de atendimento l , ou seja, o arco (i, j) é usado pela sonda k e chegar ao nó j no instante de tempo viável de início de atendimento l e esta decisão foi programada no instante de tempo de programação t , sendo igual a zero em outras condições. Para cada nó $i \in W_k^t \cup \{o(k)\}, k \in K$, define-se ainda a variável de tempo $T_{ik}^t \in [0, r]$ que indica o período de tempo que a sonda k leva de sua posição inicial $o(k)$ até o atendimento e liberação do poço i , e este valor foi calculado no instante de tempo de programação t , caso o serviço tenha sido realizado. Por definição, considera-se $T_{ik}^t = 0$ se $i = o(k)$ ou se $i \in W_k^t$ e o poço i não é atendido pela sonda k . É importante frisar que nenhuma variável de tempo $T_{d(k)k}^t, k \in K$ 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 $T_{ik}^t > 0$, o poço i retorna a sua capacidade total de produção no período $T_{ik}^t + 1$, então a perda de produção para esse poço é dado por $P_i^t(T_{ik}^t - t_i)$, onde t_i é o momento ao longo do horizonte de planejamento que o poço i é revelado, P_i^t representa a perda de produção média até

o início de atendimento ao poço i . Sendo $P_i^t = \sum_{t' \in \{1..t\}} \left[\frac{p_i^{t'}}{(l-t_i)} \right]$ a média do conjunto de taxas de perda de produção do poço i até o início de seu atendimento, $p_i^{t'}$ é a taxa de perda de produção do poço i no instante t' , e tem seu atendimento iniciado em l . Por outro lado, se o poço i não é atendido por nenhuma sonda dentro do horizonte de planejamento, $T_{ik}^t = 0$ para todo $k \in K$, a perda de produção é igual a $P_i^t (r - t_i)$. Para facilitar a apresentação do modelo proposto para o PRSI dinâmico, semelhante ao usado por Ribeiro; Desaulniers; Desrosiers (2012), são introduzidos dois tipos de variáveis auxiliares: para cada nó $i \in W_k^t$, $k \in K$, $l \in \{a_i^t .. b_i\}$ existe a variável binária $X_{ikl}^t = \sum_{j:(j,i) \in A_k^t} X_{jikl}^t$ que representa uma decisão tomada no instante de tempo de programação t , sendo igual a 1, se e somente se, a sonda k chega ao nó i no instante de tempo viável de início de atendimento l e 0, caso contrário; e define-se também a variável não negativa de simplificação S_{ikl}^t que é a perda de produção economizada, ou seja, a produção que deixou de perder, no poço i , se este inicia seu atendimento pela sonda k no instante de tempo viável de início de atendimento l e esta decisão de atendimento foi tomada no instante de tempo de programação t . Desta forma, são ainda impostas as seguintes restrições sobre as variáveis de tempo:

$$0 \leq T_{ik}^t \leq \sum_{l \in \{a_i^t .. b_i\}} b_i X_{ikl}^t, \quad \forall k \in K, i \in W_k^t \quad (1)$$

Com isso, é possível expressar as variáveis de simplificação da seguinte forma:

$$S_{ikl}^t = P_i^t X_{ikl}^t (r - t_i) - P_i^t X_{ikl}^t (T_{ik}^t - t_i), \quad \forall k \in K, i \in W_k^t \quad (2)$$

O termo $P_i^t X_{ikl}^t (r - t_i)$, nomeado P_{ir}^t , representa as perdas do poço atendido desde o momento que foi revelado até o final do seu horizonte de planejamento. Já

$P_i^t X_{ikl}^t (T_{ik}^t - t_i)$, nomeado P_{il}^t , representa as perdas do poço desde o momento que ele foi revelado até seu atendimento e liberação.

Note que $S_{ikl}^t = 0$ se a sonda k não atende o poço i , isto é, $X_{ikl}^t = 0$. Para poupar variáveis, a taxa total de perda de produção ao longo do horizonte de planejamento para determinado instante de programação t é dada por:

$$\sum_{i \in W^t} P_i^t (r - t_i) - \sum_{k \in K} \sum_{i \in W_k^t} \sum_{l \in \{a_i' \dots b_i\}} S_{ikl}^t \quad (3)$$

Onde o primeiro termo corresponde a máxima perda de produção, $P_{it}^t = P_i^t (r - t_i)$, e o segundo a economia total de perda de produção realizada pelas sondas, que está associada ao atendimento dos poços, cuja decisão de atendimento foi tomada no instante de tempo de programação t , ou seja, $S_{ikl}^t = P_{ir}^t - P_{il}^t$.

A seguir é apresentada a modelagem matemática criada pelo autor, exclusivamente para este trabalho, que representa a programação das rotas do PRSI-DP, abordagem dinâmica, para o instante de tempo t , sendo $t \in T$, onde $T = \{1, 2, 3, \dots, r\}$ representa o horizonte de planejamento. E a atualização do horizonte de planejamento, reprogramação, para o instante de tempo t é $T' = \{t, t + 1, t + 2, \dots, r\}$, poços que demandam manutenção, revelados até o instante de programação t é denotado por W^t , enquanto o subconjunto dos nós-tarefas revelados até o instante de tempo de programação t , que pode ser atendidos por uma sonda k , é denotado $W_k^t \subseteq W^t$. Portanto, $N_k^t = \{o(k), d(k)\} \cup W_k^t$. Assim a função objetivo, $f(t)$, e restrições para o instante de programação t são:

Minimizar

$$\sum_{i \in W^t} [(r - t_i) P_i^t] - \sum_{k \in K} \sum_{i \in W_k^t} \sum_{l \in \{a_i' \dots b_i\}} \{ P_i^t X_{ikl}^t (r - t_i) - P_i^t X_{ikl}^t (T_{ik}^t - t_i) \} \quad (14)$$

Sujeito a:

$$\sum_{l \in \{a_i' \dots b_j\}} \sum_{k \in K} \sum_{i: (i, j) \in A_k^t} X_{ijkl}^t \leq 1, \quad \forall j \in W^t, i \neq j, j \neq d(k), \quad (15)$$

$$\sum_{j: (o(k), j) \in A_k^t} \sum_{l \in \{a_j' \dots b_j\}} X_{o(k), jkl}^t = 1, \quad \forall k \in K, j \neq d(k), \quad (16)$$

$$\sum_{i:(i,d(k)) \in A_k^t} \sum_{l \in \{a'_i \dots b_i\}} X_{i,d(k)kl}^t = 1, \quad \forall k \in K, \quad (17)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A_k^t} \sum_{l \in \{a'_j \dots b_j\}} X_{ijkla}^t - \quad \forall k \in K, i \in W_k^t, l \in \{a'_i \dots b_i\}, l_a \geq l, \quad (18)$$

$$\sum_{j:(j,i) \in A_k^t} X_{jikl}^t = 0,$$

$$(T_{ik}^t + t_{ij} - T_{jk}^t) \sum_{l \in \{a'_i \dots b_j\}} X_{ijkl}^t \leq 0, \quad \forall k \in K, (i,j) \in A_k^t, j \neq d(k), \quad (19)$$

$$0 \leq T_{ik}^t \leq \sum_{l \in \{a'_i \dots b_i\}} b_i X_{ikl}^t, \quad \forall k \in K, i \in W_k^t, \quad (20)$$

$$T_{o(k)k}^t = 0, \quad \forall k \in K, \quad (21)$$

$$X_{ijkl}^t \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, (i,j) \in A_k^t, l \in \{a'_j \dots b_j\}, \quad (22)$$

$$X_{ikl}^t = \sum_{j:(j,i) \in A_k^t} X_{jikl}^t, \quad \forall k \in K, i \in W_k^t, l \in \{a'_i \dots b_i\}, \quad (23)$$

$$t > t_i, \quad t_i \in \{0, 1, \dots, (r-1)\}, \quad (24)$$

Função objetivo:

A equação (14) é a função objetivo e visa minimizar as perdas nos poços de petróleo das rotas programadas em cada instante de tempo $t \in T'$ até o limite do horizonte de planejamento r .

$$\sum_{i \in W^t} [(r - t_i) P_i^t] - \sum_{k \in K} \sum_{i \in W_k^t} \sum_{l \in \{a'_i \dots b_i\}} \{ P_i^t X_{ikl}^t (r - t_i) - P_i^t X_{ikl}^t (T_{ik}^t - t_i) \} \quad (14a)$$

$$\sum_{i \in W^t} [(r - t_i) P_i^t] - \sum_{k \in K} \sum_{i \in W_k^t} \sum_{l \in \{a'_i \dots b_i\}} \{ P_i^t X_{ikl}^t [(r - t_i) - (T_{ik}^t - t_i)] \} \quad (14b)$$

O objetivo é minimizar as perdas nos poços de petróleo das rotas programadas em cada instante de tempo $t \in T'$ até o limite do horizonte de tempo r . E t_i é o momento ao longo do horizonte de planejamento que o poço i é revelado para entrar na programação do roteamento. A primeira somatória representa a máxima produção perdida, caso nenhum poço revelado fosse atendido, do instante t_i até o limite r do

horizonte de tempo. A segunda somatória representa a produção de petróleo que foi economizada nos poços, atendidos pelas sondas, desde o instante t_i que foram revelados até seu atendimento e liberação. A primeira parte da mesma representa a produção dos poços atendidos, caso estes estivessem em pleno funcionamento, do instante t_i que foram revelados até r , menos a produção perdida até o atendimento e liberação dos poços para produção, que é a segunda parte da segunda somatória. Vale lembrar que quando os poços são revelados no instante t_i estes já não estão mais produzindo petróleo.

A Figura 10 facilita a compreensão da função objetivo ao evidenciar o impacto de T_{ik}^t na equação que foi manipulada de (14a) para (14b).

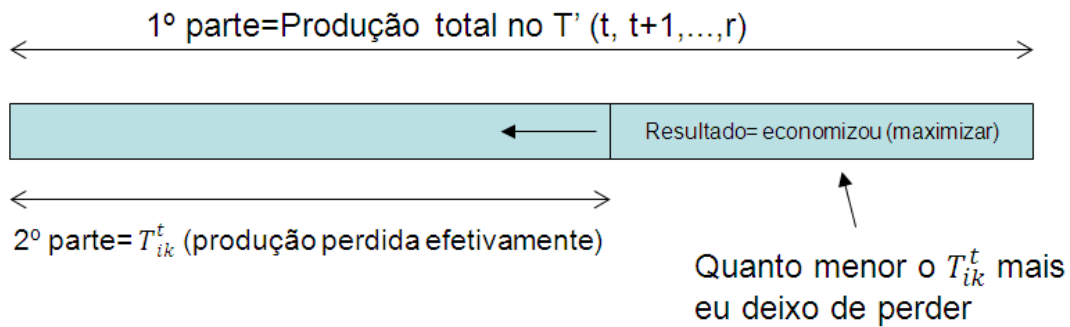


Figura 10: 2º termo da função objetivo representa a economia conseguida.

Restrição de atendimento:

$$\sum_{l \in \{a'_j \dots b_j\}} \sum_{k \in K} \sum_{i: (i,j) \in A_k^t} X_{ijkl}^t \leq 1, \quad \forall j \in W^t, i \neq j, j \neq d(k), \quad (15)$$

A Restrição (15) garante que cada poço j é visitado no máximo uma vez por determina sonda k , em sua respectiva rota, com início do atendimento no instante de tempo viável l , e esta decisão foi programada no instante de tempo t . Ou seja, a sonda k chegou ao nó j no instante de tempo l para início do atendimento, no máximo uma vez, partindo do nó i e esta decisão foi programada no instante de tempo t .

Início da rota, origem da sonda:

$$\sum_{j:(o(k),j) \in A_k^t} \sum_{l \in \{a'_j \dots b_j\}} X_{o(k),jkl}^t = 1, \quad \forall k \in K, j \neq d(k), \quad (16)$$

Faz parte das restrições clássicas de fluxo em rede, e diz que toda sonda inicia sua rota no nó de origem $o(k)$. Assim para a Restrição (16), no instante de tempo t foi programado que qualquer rota, percorrida pela sonda k , começa com sua origem no nó $o(k)$ e chega ao poço j no instante de tempo viável l para início do atendimento ao poço.

Fim da rota, destino da sonda:

$$\sum_{i:(i,d(k)) \in A_k^t} \sum_{l \in \{a'_i \dots b_i\}} X_{i,d(k)kl}^t = 1, \quad \forall k \in K, \quad (17)$$

Faz parte das restrições clássicas de fluxo em rede, e diz que toda sonda finaliza sua rota no nó destino $d(k)$. A restrição (17) indica que no instante de tempo t foi programado que qualquer rota percorrida pela sonda k termina no nó i no instante de tempo de atendimento viável l . Ou seja, a sonda k parte de i e chega em $d(k)$ no momento de atendimento viável l , como este é um arco do tipo fim, significa que a sonda k finaliza sua rota em i quando inicia atendimento neste poço no momento de atendimento viável l .

Chega ao nó “i” se sai do nó “i”:

$$\sum_{j:(i,j) \in A_k^t} \sum_{l_a \in \{a'_j \dots b_j\}} X_{ijkla}^t - \sum_{h:(h,i) \in A_k^t} X_{hikl}^t = 0, \quad \forall k \in \forall k \in K, i \in W_k^t, l \in \{a'_i \dots b_i\}, l_a \geq l, \text{ se } j = d(k) \text{ faça } a'_j = a'_i \text{ e } b_j = b_i \quad (18)$$

A restrição (18) também corresponde a clássica restrição que determina a conservação do fluxo na rota k , significa que se após a tomada de decisão no instante t a sonda k ocupar o arco entre os nós i e j , chegando em j no momento l_a , implica que o arco entre h e i também será ocupado. De forma que chega em i no momento l . Ou seja, deixa o nó i se e somente se entra no nó i . Lembrando que ainda na restrição (18) se $j = d(k)$ faça $a'_j = a'_i$ e $b_j = b_i$.

Compatibilidade entre os arcos da rota e as variáveis de tempo:

$$(T_{ik}^t + t_{ij} - T_{jk}^t) \sum_{l \in \{a'_j \dots b_j\}} X_{ijkl}^t \leq 0, \quad \forall k \in K, (i, j) \in A_k^t, j \neq d(k), \quad (19)$$

A restrição não-linear (19) expressa a compatibilidade requerida entre os arcos da rota e as variáveis de tempo, além de garantir a eliminação de sub-rotas. O tempo de viagem mais o tempo de atendimento ao nó j referente ao serviço de manutenção, caso haja algum, no arco (i, j) é $t_{ij} = c_{ij} + d_j$ onde c_{ij} é o tempo de deslocamento entre cada nó e d_j é o tempo de serviço no nó j .

Determina a máxima duração da rota:

$$0 \leq T_{ik}^t \leq \sum_{l \in \{a'_i \dots b_i\}} b_l X_{ikl}^t, \quad \forall k \in K, i \in W_k^t, \quad (20)$$

A Restrição (20) impõe a máxima duração da rota k . Também determina que a variável de tempo é zero quando o correspondente poço não é atendido pela correspondente sonda. Ou seja, considerou-se que o poço i deve ser atendido e liberado até b_i .

Determina tempo de início das rotas:

$$T_{o(k)k}^t = 0, \quad \forall k \in K, \quad (21)$$

As Restrições (21) indica que tempo de início de todas as rotas é zero.

Valores binários para variáveis:

$$X_{ijkl}^t \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, (i, j) \in A_k^t, l \in \{a'_j \dots b_j\}, \quad (22)$$

As Restrições (22) impõem valores binários para as variáveis de fluxo em arco.

Variável auxiliar:

$$X_{ikl}^t = \sum_{j: (j,i) \in A_k^t} X_{jikl}^t, \quad \forall k \in K, i \in W_k^t, l \in \{a'_i \dots b_i\}, \quad (23)$$

Finalmente, as variáveis auxiliares são definidas em (23). Elas podem facilmente ser removidas do modelo substituindo-as em (14) e (20).

Momento que o poço é revelado:

$$t > t_i, \quad t_i \in \{0, 1, \dots, (r - 1)\}, \quad (24)$$

A variável t_i é o momento ao longo do horizonte de planejamento que o poço i é revelado para entrar na programação do roteamento. E o poço para ter chances de ser incluídos nas rotas de programação para atendimento deve ser revelando antes do instante de programação t .

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 Dinâmico é *NP-Hard* também.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como o PRSI Dinâmico é uma variação do PRSI Estático, ele também é *NP-Hard*. Assim, embora o PRSI Dinâmico 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. Para efeitos de validação do modelo proposto para o PRSI Dinâmico utilizaremos método exato com o CPLEX, que será abordado no próximo capítulo.

5 ALGORITMO ESTRUTURAL PARA SOLUÇÃO DO PRSI DINÂMICO

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. Contudo para efeitos de validação do modelo proposto para o PRSI Dinâmico utilizaremos método exato com o CPLEX em funções no algoritmo estrutural.

Para resolver o PRSI dinâmico é necessário utilizar instância de poços e instância de sondas que podem ser atualizados ao longo do horizonte de planejamento, através do algoritmo estrutural, Algoritmo 1, e outros que são chamados por este.

Para alcançar o objetivo de resolver o PRSI Dinâmico, após criado o modelo matemático, e testá-lo com instâncias, a metodologia foi dividida conforme abaixo:

- Definição das informações necessárias dos poços;
- Definição das informações necessárias das sondas;
- Definição de cenários de simulação para alternativas de solução do problema;
- Definição de pseudocódigo estrutural a ser executado ao longo do horizonte de planejamento; e
- Implementação de modelo matemático proposto para o PRSI Dinâmico a ser executado no CPLEX sendo chamado pelo pseudocódigo.

5.1 INSTÂNCIA DE POÇOS E SONDAS

Os parâmetros são carregados no algoritmo estrutural com formato de arquivo semelhante a Figura 11 e Figura 12 conforme Apêndice 1.

```

[NPOCOS]
2

[r]
7

[ID]  [Poco]  [Coord_X]  [Coord_Y]  [Perda]  [Tservico]  [ti]  [ai]  [bi]  [Nivel]
1      2      0          10         2         1          0     1     3     1
2      1      0          20         2         1          0     1     6     1
  
```

Figura 11: Exemplo de Instância com Dados dos Poços para Instante “t”

Como usar o arquivo da Figura 11:

- [NPOCOS] Número de poços. Deve ser um valor inteiro e pode mudar ao longo do horizonte de planejamento.
- [r] Horizonte de planejamento. Valor inteiro que delimita o tempo de planejamento.
- [ID] Identificador do pedido de intervenção ao poço.
- [Poco] Identificação do poço.
- [Coord_X] Define a posição do poço em relação ao eixo cartesiano X.
- [Coord_Y] Define a posição do poço em relação ao eixo cartesiano Y.
- [Perda] Perda de vazão. Indica para cada poço “i” sua perda de vazão “pi”, na unidade mais conveniente. Pode ser alterado ao longo do horizonte de tempo, pois é um dos objetivos do modelo proposto para o PRSI Dinâmico.
- [Tservico] Tempo de serviço no poço. Valor inteiro e indica para cada poço “i” seu tempo de intervenção “di” na unidade que convier. Pode ser alterado ao longo do horizonte de tempo, pois é um dos objetivos do modelo proposto para o PRSI Dinâmico.

- [ti] Define o instante que o poço é revelado, ao longo do horizonte de planejamento, para entrar na programação das sondas. Este parâmetro é exclusivo do modelo PRSI Dinâmico.
- [ai] Momento no horizonte de planejamento que o poço esta liberado para início da intervenção. Valor inteiro e usar mesma unidade de “di”. Caso não existe considerar igual a 1.
- [bi] Momento no horizonte de planejamento que o poço deve obrigatoriamente terminar sua intervenção. Valor inteiro e usar mesma unidade de “di”. Caso não existe considerar igual a “r”.
- [Nível] Define o tipo de serviço que o poço demanda e em função disse será escolhida determinada sonda. Por exemplo, um poço com nível “2” somente pode ser atendido por uma sonda do nível “2” ou superior.

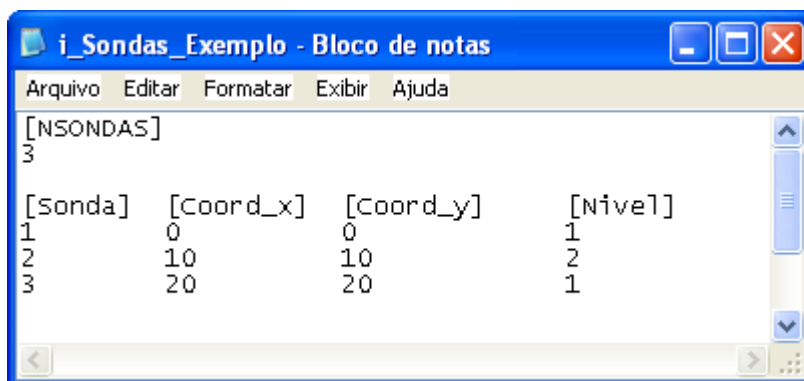


Figura 12: Exemplo de Instância com Dados das Sondas

Como usar o arquivo da Figura 12:

- [NSONDAS] Número de sondas. Deve ser um valor inteiro e não pode mudar ao longo do horizonte de planejamento.
- [Sonda] Identificação da sonda.
- [Coord_X] Define a posição da sonda em relação ao eixo cartesiano X.
- [Coord_Y] Define a posição da sonda em relação ao eixo cartesiano Y.
- [Nível] Define o tipo de serviço que a sonda pode atender determinado poço. Por exemplo, um poço com nível “2” somente pode ser atendido por uma sonda do nível “2” ou superior.

5.2 ALGORITMO ESTRUTURAL AO LONGO DO HORIZONTE

O algoritmo estrutural, a ser executado ao longo do horizonte de planejamento T , é composto pelas etapas abaixo:

- 1- Selecionar poços relevados que necessitam de atendimento, até o instante de tempo t . Onde é utilizado o modelo matemático proposto para o PRSI-DP para encontrar os poços relevados até o instante de tempo t , que possibilite menor perda de produção dentro das restrições como período viável de atendimento;
- 2- Com os poços escolhidos traçar rotas para serem executadas pelas sondas;
- 3- Executar as sondas com as respectivas sondas;
- 4- Verificar se novos pedidos para atendimento a poços chegarão em t ;
- 5- Determinar perda acumulada dos poços atendidos até t para registro do total acumulado de perdas nos poços ao longo do horizonte de planejamento;
- 6- Excluir, da respectiva instância, os poços já atendidos;
- 7- Atualizar as coordenadas das sondas para saber sua última localização; e
- 8- Repetir procedimento retornando para do item “1” até o final do horizonte de planejamento.

O algoritmo estrutural, Algoritmo1, chama outros 4 algoritmos que possuem funções específicas. A citar:

O Algoritmo 2 cria as primeiras rotas para o instante de tempo “ t ”. Para tanto o procedimento “Rotas_PRSI-DP_o(W^t, K)” lineariza o modelo matemático criado para o PRSI Dinâmico, pois na função objetivo (14) há uma variável não-linear assim como na restrição (19). Em seguir expande o modelo matemático utilizando as instâncias dos poços e das sondas no instante “ t ”. Com o modelo expandido usa-se o CPLEX configurado para resolver problema de programação linear inteira-mista, determinando assim as variáveis de decisão e valor da função objetivo.

Analisando o Algoritmo 5, que possui o procedimento $(F_{\text{plan}}^t, X_{ikl}^t, X_{ijkl}^t, T_{ik}^t, R^t) \leftarrow \text{ReprogramarRotas}(W^t, K, \text{Vetor}(X_{ikt}^t = 1))$, é semelhante ao procedimento relatado

no Algoritmo 2 com o diferencial de incluir nas equações de restrição o Vetor ($X^{t_{ikt}} = 1$)).

Os demais algoritmos são comentados para facilitar compreensão.

Algoritmo 1. Estrutural ao Longo do Horizonte de Planejamento

```

1: Input: o conjunto K de sondas
2: Output: Rotas programadas para t e T; Ftotal sendo total de perdas de produção
3:  $W^0 \leftarrow \{\Phi\}$ 
4: for t=1 to |T| do
5: Input: o conjunto  $W^t$  de poços e seus respectivos atributos revelados em t e T
6:  $S^0 = 0$ ; // sem nenhuma programação a economia é zero //
7: if t == 1 then // Primeira Programação //
8: ( $F_{plan}^t, X^{t_{ikl}}, X^{t_{ijkl}}, T^{t_{ik}}$ )  $\leftarrow$  PrimeiraProgramaçãodasRotas( $W^t, K$ )
// Fase I : Criar as primeiras rotas visando minimizar perdas de produção //
9: end-if
10: if t > 1 then // Verificar a situação do poço: Visitado, Em visita //
11:  $F^{(t-1)} = 0$ 
// Total de perdas de produção com programação das rotas feitas em "t-1"//
12: ( $W^{et}, k(x,y), P_t^{(t-1)}, S^{(t-1)}$ )  $\leftarrow$  VerificarPoçosVisitados( $W^t, K, X^{(t-1)_{ikl}}, T^{(t-1)_{ik}}$ )
// Fase II //
13:  $F^{(t-1)} = P_t^{(t-1)} - S^{(t-1)}$ 
14: ( $k(x,y), X^{t_{ikt}}$ )  $\leftarrow$  VerificarPoçosemAtendimento( $W^t, K, X^{(t-1)_{ikl}}, T^{(t-1)_{ik}}$ ) // Fase III //
15:  $W^t \leftarrow W^t \setminus \{i: i \in W^{et}\}$  // Remover os poços atendidos, da instância de poços
relevados em "t" //
16: ( $F_{plan}^t, X^{t_{ikl}}, X^{t_{ijkl}}, T^{t_{ik}}, R^t$ )  $\leftarrow$  ReprogramarRotas( $W^t, K, \text{Vetor}(X^{t_{ikt}} = 1)$ )
// Fase IV //
17: if t=r then
18:  $F[t] = F_{plan}^t$ ;
19: Else

```

```

20:     F[t-1]=F(t-1)
21: end-if
22: end-if
23: end-for
24: for t=1 to | T | do
25:   Ftotal= Ftotal + F[t]
26: end-for

```

Algoritmo 2: Fase I : Criar as primeiras rotas

$(F_{\text{plan}}^t, X_{ikl}^t, X_{ijkl}^t, T_{ik}^t) \leftarrow \text{PrimeiraProgramaçãodasRotas}(W^t, K)$ // Fase I

```

1: Input: o conjunto  $W^t$  de poços e K sondas
2: Output:  $X_{ikl}^t, X_{ijkl}^t, T_{ik}^t, F_{\text{plan}}^t$ 
3:    $F[t], X[t][i][k][l], T[t][i][k] \leftarrow \text{Rotas\_PRSI-DP\_o}(W^t, K)$  // Fase I : cálculo para
   o mínimo de perdas programada para o instante t=1, linha de base 1, LB inicial //
4:    $F^t = F[t]$  ;
5:   for i=1 to |  $W^t$  | // BL inicial: Carregar vetores X,T com as variáveis de
   decisão //
6:     for l=t to | T |
7:       for k=1 to | K |
8:         if  $X[t][i][k][l] == 1$  then
9:            $X_{ikl}^t \leftarrow X[t][i][k][l]$ 
10:           $T_{ik}^t \leftarrow T[t][i][k]$ 
11:         end-if
12:       end-for
13:     end-for
14: end-for

```

Algoritmo 3: Fase II : Verificar poços visitados e prepará-los para exclusão da instância W^t

$(W^{\text{et}}, k(x,y), P_t^{(t-1)}, S^{(t-1)}) \leftarrow \text{VerificarPoçosVisitados}(W^t, K, X^{(t-1)}_{ikl}, T^{(t-1)}_{ik})$ // Fase II

```

1: Input: o conjunto  $W^t$  de poços, K sondas e os vetores  $X^{(t-1)}_{ikl}, T^{(t-1)}_{ik}$  calculados
   na Fase I
2: Output:  $W^{\text{et}}, k(x,y), P_t^{(t-1)}, S^{(t-1)}$ 

```

```

3:   $W^{et} = 0$  // Conjunto de poços que podem ser excluídos do conjunto de poços
    revelados até t, pois já foram visitados //
4:   $P_l^{(t-1)} = 0$  // Perda de Produção dos poços atendidos e liberados desde que
    foram revelados programação das rotas feitas em "t-1" //
5:   $P_r^{(t-1)} = 0$  // Máxima economia possível dos poços atendidos e liberados
    desde que foram revelados até o final do horizonte de planejamento com
    programação das rotas feitas em "t-1" //
6:   $P_t^{(t-1)} = 0$  // Perda de Produção de todos os poços, atendidos ou não, desde o
    momento que foram revelados até o final do horizonte de planejamento com
    programação das rotas feitas em "t-1" //
7:   $S^{(t-1)} = 0$  // Economia conseguida nos poços desde o momento que foram
    relevados até seus respectivos atendimento com programação das rotas feitas em
    "t-1"//
8:  for i= 1 to |  $W^t$  | // Sit. A: Verificar se poço com rota programada em (t-1)
    que foi visitado //
9:       $P_t^{(t-1)} = P_t^{(t-1)} + p_i^{(t-1)} * (r - t_i)$ 
10:     for l= t to r
11:         for k=1 to | K |
12:             if [( t >= l) & ( t >=  $T_{ik}^{(t-1)}$ ) & ( $X_{ikl}^{(t-1)}=1$ )] then
13:                  $W^{et} \leftarrow W^{et} \cup \{ i \}$ ;
14:                  $k(x,y) \leftarrow i(x,y)$ ; //Faz a localização de k igual a de i //
15:                  $P_l^{(t-1)} = P_l^{(t-1)} + p_i^{(t-1)} * (T_{ik}^{(t-1)} - t_i)$ 
16:                  $P_r^{(t-1)} = P_r^{(t-1)} + p_i^{(t-1)} * (r - t_i)$ 
17:                  $S^{(t-1)} = S^{(t-1)} + (P_r^{(t-1)} - P_l^{(t-1)})$ 
18:             end-if
19:         end-for
20:     end-for
21: end-for

```

Algoritmo 4: Fase III: Verificar poços em atendimento

$(k(x,y), X_{ikt}^t) \leftarrow \text{VerificarPoçoSemAtendimento}(W^t, K, X_{ikl}^{(t-1)}, T_{ik}^{(t-1)})$ // Fase III

1: Input: o conjunto W^t de poços, K sondas e os vetores $X_{ikl}^{(t-1)}, T_{ik}^{(t-1)}$ calculados em Fase I


```

2: Output:  $k(x,y)$ ,  $X_{ikt}^t$ 
3:   for  $i=1$  to  $|W^t|$  // Sit. B: Verificar se poço esta em atendimento //
4:     for  $l=t$  to  $r$ 
5:       for  $k=1$  to  $|K|$ 
6:         if  $[(l < t < T_{ik}^{(t-1)}) \& (X_{ikl}^{(t-1)}=1)]$  then
7:            $X_{ikt}^t=1$  // para que na programação "t", a ser criada
rotas, após verificar as possíveis situações, garantir que K não abandone o poço
antes de completar o serviço e fazer  $l=t$  //
8:            $k(x,y) \leftarrow i(x,y)$  //Faz a localização de k igual a de i //
9:            $d_i = d_i - 1$  // decrementar o tempo de serviço no poço
 $d_i$  na instância de poços  $W^t$  ou aumentar manualmente se o usuário desejar //
10:        end-if
11:      end-for
12:    end-for
13:  end-for

```

Algoritmo 5: Fase IV : Reprogramar rotas com poços disponíveis

$(F_{plan}^t, X_{ikl}^t, X_{ijkl}^t, T_{ik}^t, R^t) \leftarrow \text{ReprogramarRotas}(W^t, K, \text{Vetor}(X_{ikt}^t = 1))$ // Fase IV

1: Input: o conjunto W^t de poços, K sondas e $\text{Vetor}(X_{ikt}^t = 1)$

2: Output: $F_{plan}^t, X_{ikl}^t, X_{ijkl}^t, T_{ik}^t, R^t$

3: $F_{plan}^t, X_{ikl}^t, T_{ik}^t, X_{ijkl}^t, R^t \leftarrow \text{Rotas_PRSI-DP}(W^t, K, \text{Vetor}(X_{ikt}^t = 1))$ // Fase IV

: reprogramar rotas com poços disponíveis visando minimizar perdas //

4: for $i=1$ to $|W^t|$ // BL: Carregar vetores X,T com as variáveis de decisão //

5: for $l=t$ to $|T|$

6: for $k=1$ to $|K|$

7: if $X_{ikl}^t == 1$ then

8: $X[t][i][k][l] \leftarrow X_{ikl}^t$

9: $T[t][i][k] \leftarrow T_{ik}^t$

10: end-if

11: end-for

12: end-for

13: end-for

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi criado o algoritmo estrutural, a ser executado ao longo do horizonte de planejamento T e metodologia para executar a solução do modelo matemático do PRSI Dinâmico. O algoritmo estrutural é fundamental para resolver questões como se uma sonda estiver atendendo um poço ela deve manter o atendimento mesmo caso seja revelado um poço com maior quantidade de perda de taxa de produção. Outro ponto relevante é, se um poço já foi atendido ele deve ser removido da instância de poços, assim, como ser contabilizado as perdas realizada até o atendimento desde poço, e detectar se o poço esta em atendimento não permitindo que a sonda abandone atendimento ao poço que esta em andamento antes que seja concluído seu atendimento.

No próximo capítulo são realizados testes computacionais considerando exclusivamente mudança do tempo de intervenção durante o horizonte de planejamento.

6 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Após revisão bibliográfica não foram encontradas publicações disponíveis com instâncias para o PRSI dinâmico. Assim será usada instância fictícia para ilustrar os resultados computacionais conseguidos ao utilizar o modelo proposto do PRSI dinâmico nomeado PRSI-DP. Essa instância fornece a localização dos poços, taxa da perda de produção dos poços, tempo de serviço nos poços e a localização inicial da sonda. Também serão usadas instâncias artificiais utilizadas na dissertação de Costa (2005) geradas a partir do comportamento da distribuição de probabilidade de dados de reais de instâncias conseguidas na Petrobras, UN-ES, em São Mateus, Norte do Espírito Santo.

Durantes os testes foi utilizado o solver IBM ILOG CPLEX Interactive Optimizer 12.5.0.0, com computador Intel Atom, CPU D525, 1,8GHz, 1,99 GB de RAM e sistema operacional Microsoft Windows XP Professional Versão 2002.

6.1 INSTÂNCIAS FICTÍCIAS

Como forma de ilustração didática, são consideradas instâncias fictícias para apresentar as possibilidades do modelo matemático proposto. Considere as instâncias (A) e (B), conforme as Figuras 2 até Figura 9, e sendo uma instância simples com 3 poços (instância A), sendo 1 revelado dinamicamente, ao longo do horizonte de planejamento conforme Figura 4 e limite do horizonte de planejamento sendo $r=7$ dias.

No que tange os resultados computacionais, comparamos o PRSI dinâmico com o PRSI estático. Para efeito de comparação consideramos uma das práticas que muitos planejadores e programadores fazem ao ser relevado um novo poço quando a sonda já esta executando suas rotas, que é esperar a sonda terminar a rota para somente depois atender o novo poço revelado. Cada instância é associada com um identificador, por exemplo, 3w_1s_r7_A indica a instância "A" possui 3 poços, uma sonda, limite de horizonte de planejamento $r=7$ dias.

A contribuição do modelo PRSI dinâmico permite avaliar em tempo real a possibilidade de atender novos poços revelados ao longo do horizonte de planejamento e criar rotas de atendimento que minimizem as perdas de produção. No caso da instância “A” o custo de oportunidade, por adiar o atendimento do poço $i = 1$, foi de 2 m³, que valeu a pena considerando a oportunidade de economia conseguida com o PRSI dinâmico apresentado na Tabela 0 ao diminuir as perdas no atendimento.

É fundamental fazer o registro das perdas acumuladas após atendimento de cada poço para ter o histórico das perdas ao longo do horizonte de planejamento, uma vez que ao contrário da abordagem estática cujas as perdas planejadas antes do início das rotas não mudam, no PRSI dinâmico a expectativa de economia muda a medida que novos poços são revelados. Assim é necessário registrar após o atendimento de cada poço as perdas minimizadas.

Outro ponto é avaliar o custo de oportunidade, ao postergar o atendimento aos poços, comparado com as oportunidades de economia ao atender novos poços revelados, quando esta em análise apenas a questão das perdas e não o limite de atendimento aos poços.

Já a instância (B) caso seja utilizado a abordagem do PRSI estático, onde alguns técnicos de planejamento e programação, utilizam como critério atender o poço com maior taxa de perda assim que aparece, esta opção pode colocar em risco o funcionamento permanente do poço “1” uma vez que possui limite de atendimento. Com o modelo do PRSI dinâmico proposto, este limite de atendimento é levando em conta.

Conforme Costa (2005) não será considerado a distância entre os poços e sondas e poços, os poços podem se atendidos desde o momento que foram revelados até o final do horizonte de planejamento e os poços possuem mesma localização. Considera-se perda de produção uniforme dos poços de 2 m³/dia. Considerando que todas unidades de distância são em dias. O cenário de dinamicidade e na metade do horizonte de planejamento é acrescido mais 50% no número de poços com o dobro da perda de produção, ou seja, 4 m³/dia.

Abordagem Estática para Resolver o Problema da Dinamicidade:

Na instância 10w_1s_20r_A supondo que as rotas de atendimentos a estes poços estejam sendo executadas quando na metade do horizonte de planejamento 5 novos poços são revelados para atendimento. A forma tradicional para este atendimento é esperar o final do horizonte de planejamento e em seguida atender aos poços. Contudo isto leva a uma perda de no mínimo $4 \times 5 (\text{m}^3/\text{dia})$, ou seja, $20 \text{ m}^3/\text{dia}$, comparado a possibilidade de utilizar abordagem dinâmica e priorizar os poços revelados de maior taxa de perda de produção, ficando uma perda no mínimo de $2 \times 5 (\text{m}^3/\text{dia})$, ou seja, $10 \text{ m}^3/\text{dia}$.

TABELA 0 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS : ABORDAGEM ESTÁTICA PARA RESOLVER PROBLEMA DE DINAMICIDADE COMPARADO COM ABORDAGEM DINÂMICA

Instâncias	Perdas mínimas	
	PRSI Estático (m^3)	PRSI Dinâmico (m^3)
10w_1s_20r_A +5w_revelados	20	10
20w_2s_20r_A +10w_revelados	40	20
40w_4s_20r_A +10w_revelados	80	40

6.2 INSTÂNCIAS ARTIFICIAIS

Como objetivo de validar o modelo matemático proposto, utilizou-se nesta dissertação instâncias artificiais para o PRSI, com base em Costa (2005), onde considerou critérios que permitem que os valores gerados aleatoriamente fossem próximos da realidade. E para inserir as características dinâmicas, para efeito desta dissertação, foram consideradas variações nos tempos de intervenção que serão detalhadas a continuação.

6.2.1 Valores de Produção e Tempo de Intervenção

Assim, Costa (2005) levantou o comportamento da distribuição de probabilidade, analisando dados reais de instâncias da Petrobras, UN-ES, considerando tempos de intervenções em poços e potencial de produção. Na Figura 13 apresenta um histograma do Sistema de Informações de Poços (SIP) da bacia de São Mateus, no norte do ES.

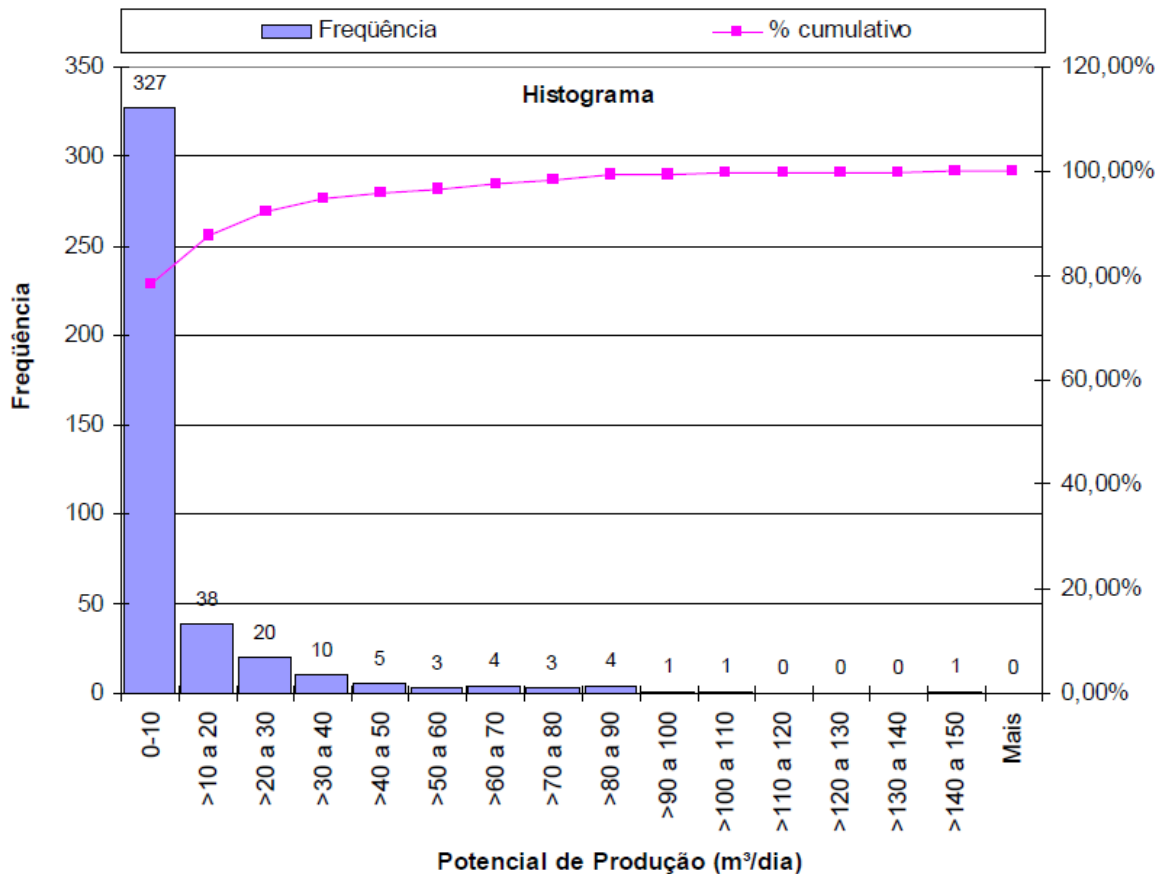


Figura 13 – Histograma de Frequências dos Potenciais de Produção (m³/dia) dos Poços de São Mateus-ES

Fonte: Costa (2005, p.50).

No que tange aos tempos de intervenção, Costa (2005) diz que é um problema desafiador no planejamento dos itinerários das sondas, pois possui característica de incertezas, o que torna difícil precisar a duração de uma intervenção, e uma oportunidade de evidenciar como o modelo matemático criado para o PRSI Dinâmico pode contribuir. Segundo Costa (2005), o bom-senso do programador é de extrema importância neste processo, por exemplo, alguns tipos particulares de serviços de intervenção, como as “pescarias”, quase sempre destoam em relação ao estimado. O fato da previsão do tempo de intervenção depender muito do perfil do programador é um risco para as empresas contratadas e contratantes, uma vez que diminuem suas chances de aperfeiçoar a gestão do conhecimento em suas organizações.

Na Figura 14 é apresentado o histograma de frequência dos tempos de intervenções (dia) dos 100 valores-amostra extraídos de alguns relatórios da UN-ES (São Mateus) no ano de 2004.

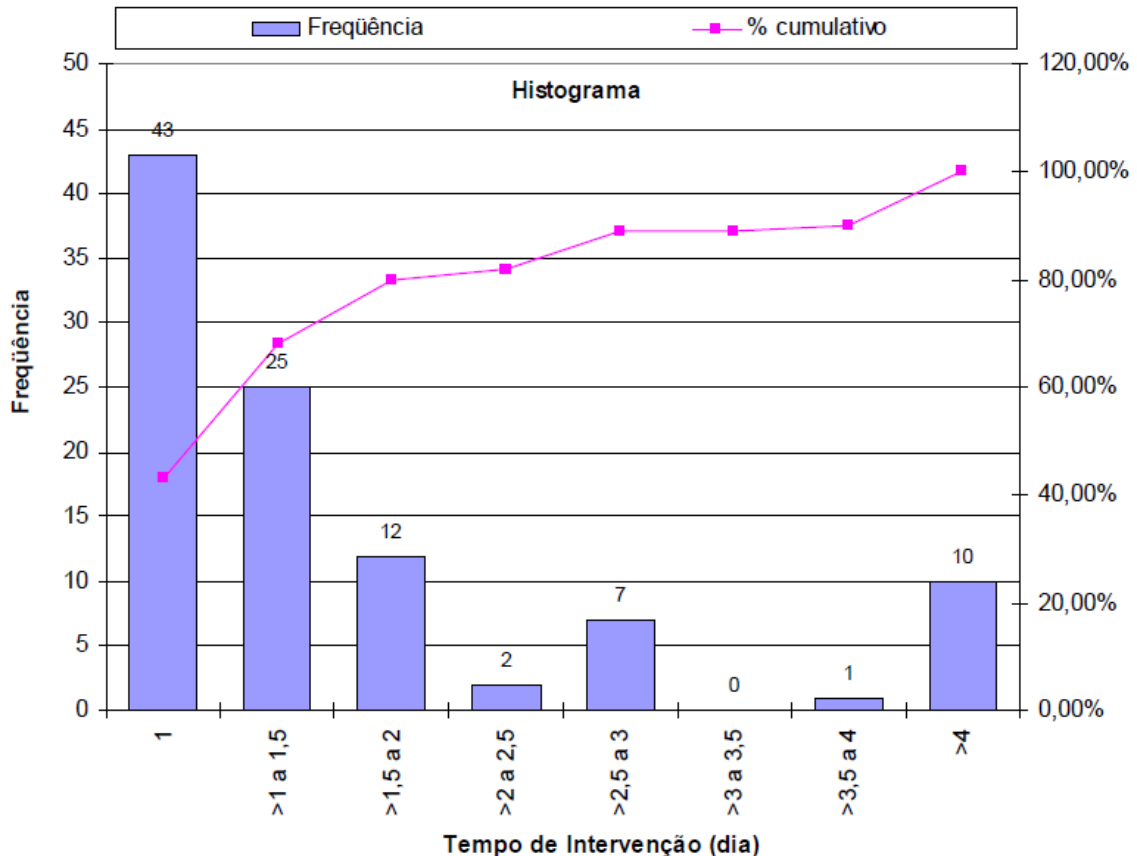


Figura 14 – Histograma de Frequências dos Tempos de Intervenção (dia)

Fonte: Costa (2005, p.52).

6.2.2 Instâncias Geradas

Na dissertação de Costa (2005) são apresentados 5 grupos de instâncias geradas artificialmente com 25, 50, 75, 100 e 125 poços demandando intervenção. Como o CPLEX executa em tempo viável até 25 poços, foi escolhido para efeito de comparação instâncias do grupo de 25 poços.

As instâncias artificiais, conforme exemplo na Figura 12, foram geradas por Costa (2005) a partir da função de distribuição que descreve os valores potenciais de produção e a função de distribuição dos tempos de intervenção através de software gerador de números aleatórios, conforme Apêndice 1 Tabela 2. Os exemplos de problema foram nomeados como PNX, onde N é a quantidade de poços, X é a letra do exemplo variando de A até D. Por exemplo, grupo 25 possui os problemas P25A, P25B, P25C e P25D.

Na Figura 15 [DELTA] é o tempo de intervenção, [NMAQ] é a quantidade de sondas, [HP] o horizonte de planejamento, [NPOCOS] o número de poços, [P] perda de

produção do poço, [Di] data de início de liberação para atendimento ao poço e [Df] data final para atendimento ao poço.

```

P25B - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
[NMAQ]
3
[HP]
109
[NPOCOS]
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
[P]
21 224 2 3 207 141 14 182 21 76 11 43 26 36 90 4 12 74 18 135 20 16 36 82 6
[DELT]
4 7 1 13 7 2 2 2 6 5 2 7 6 1 5 5 4 2 7 2 6 3 3 4 2
[Di]
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
[Df]
-1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1

```

Figura 15 : Instância PRSI Estático

Fonte: Costa (2005)

Quanto às janelas de tempo, Costa (2015), considerou que não havia restrições de início e término de atendimento, esta hipótese prejudicou a análise do desempenho do PRSI Dinâmico, no que tange ao tempo de atendimento viável, dessa forma na instância da Figura 13 [ai] e [bi], respectivamente, limite inferior para atendimento ao poço e superior para seu atendimento e liberação, foram definidos como “1” e “r”, sendo este o limite superior do horizonte de planejamento.

Cada uma das instâncias, geradas artificialmente, será resolvida pela metodologia de solução, incluindo algoritmo estrutural, do PRSI Dinâmico e comparado com a solução do Cplex para o PRSI Estático, conforme apresentada por Costa (2005). Cada instância do modelo estático pode ser renomeada da seguinte forma: PN_X-M, onde N é a quantidade de poços e X é a letra do exemplo variando de A até D, e M é a quantidade de sondas SPT (1, 2, 4, 6, 8 ou 10). Por exemplo, P25C-4 é o terceiro (C) exemplo do problema com 25 poços e 4 sondas.

As Figuras 16 e 17 são exemplos de instâncias de poços e sondas respectivamente, que foram usadas para resolver o modelo matemático proposto para PRSI Dinâmico.

[NPOCOS]
25

[r]
109

[ID]	[Poco]	[Coord_X]	[Coord_Y]	[Perda]	[Tservico]	[ti]	[ai]	[bi]	[Nivel]
1	1	10	10	21	4	0	1	109	1
2	2	10	10	224	7	0	1	109	1
3	3	10	10	2	1	0	1	109	1
4	4	10	10	3	13	0	1	109	1
5	5	10	10	207	7	0	1	109	1
6	6	10	10	141	2	0	1	109	1
7	7	10	10	14	2	0	1	109	1
8	8	10	10	182	2	0	1	109	1
9	9	10	10	21	6	0	1	109	1
10	10	10	10	76	5	0	1	109	1
11	11	10	10	11	2	0	1	109	1
12	12	10	10	43	7	0	1	109	1
13	13	10	10	26	6	0	1	109	1
14	14	10	10	36	1	0	1	109	1
15	15	10	10	90	5	0	1	109	1
16	16	10	10	4	5	0	1	109	1
17	17	10	10	12	4	0	1	109	1
18	18	10	10	74	2	0	1	109	1
19	19	10	10	18	7	0	1	109	1
20	20	10	10	135	2	0	1	109	1
21	21	10	10	20	6	0	1	109	1
22	22	10	10	16	3	0	1	109	1
23	23	10	10	36	3	0	1	109	1
24	24	10	10	82	4	0	1	109	1
25	25	10	10	6	2	0	1	109	1

Figura 16 : Instância de Poços para o PRSI Dinâmico revelado até $t < 1$

[NSONDAS]
3

[sonda]	[Coord_x]	[Coord_y]	[Nivel]
1	10	10	1
2	10	10	1
3	10	10	1

Figura 17 : Instância de Sondas para o PRSI Dinâmico

As instâncias do modelo do PRSI dinâmico as Figuras 16 e 17, possuem os mesmos dados das instâncias do modelo estático de Costa (2005), além de informações específicas para a abordagem dinâmica. Análogo ao modelo estático acrescentando

apenas o termo “_Ta”, o nome da instância dinâmica de poços é PNX-M_Ta, sendo que “a” é o último instante em que os dados da instância foram atualizados e/ou revelados. Sendo [NPocos] o número de poços revelados para atendimento até o instante “a”, [r] é o limite superior do horizonte de planejamento, [ID] é a identificação do pedido de intervenção, [Poco] é a identificação do poço, [Coord_X] e [Coord_Y] são as coordenadas de localização de cada poço e que, para este caso, arbitramos a mesma localização para todos os poços e sondas, (10,10), para facilitar a comparação com o PRSI estático de Costa (2005), uma vez que este não considera a distância entre os poços e as sondas. O parâmetro [Perda] significa a perda potencial de produção, [Tservico] é o tempo de serviço no poço, [ti] é o instante de tempo que a solicitação do poço foi relevada e/ou atualizada, [ai] é o limite inferior para atendimento ao poço, [bi] é o limite superior para atendimento e liberação do poço e [Nivel] é o nível de serviço do poço, para efeitos de testes computacionais considerou-se sondas homogêneas, onde [Nivel]=1. Um exemplo de instância das sondas para o PRSI Dinâmico é mostrado na Figura 14, sendo [NSONDAS] a quantidade total de sondas, [Sonda] é a identificação da sonda, [Coord_x] é a localização da sonda no eixo “x” considerado “10”, [Coord_y] é a localização da sonda no eixo “y” considerado “10” e [Nivel] é o nível de serviço da sonda. Para efeitos de testes computacionais, considerou-se sondas homogêneas fazendo [Nivel] igual a “1”.

Considerações de unidades, valores de [HP] e cenários dinâmicos

Em Costa (2005), no PRSI Estático, o autor informa que fez ajustes em suas instâncias para tratar a taxa de perda de vazão de poços como números inteiros, e para isto multiplicou por 10 os valores de entradas antes de carregar em seu software. Algo semelhante ocorreu com os valores dos tempos de intervenção que para tornarem-se inteiros antes de serem carregados no software de Costa (2005) foram multiplicando por 2, uma vez que os dados reais de tempo de intervenção utilizados pela Petrobras em São Mateus são múltiplos de 0,5 dias. Logo o resultado de sua função objetivo deve ser dividido por 20 para ter-se o valor real. Estes ajustes também foram feitos nos dados de entrada antes de serem carregados no algoritmo estrutural para resolver o modelo matemático do PRSI Dinâmico, de forma a facilitar a comparação dos resultados do PRSI Dinâmico e os resultados gerados por Costa

(2005). Assim o resultado da função objetivo do PRSI Dinâmico também deve ser dividido por 20 para ter-se o valor real.

No modelo de Costa (2005) o tamanho do horizonte de tempo depende da quantidade de sondas, para efeito de validação do modelo do PRSI Dinâmico proposto, considerou-se “HP” como sendo 110, 55, 40, 30 e 20 unidades de tempo para as respectivas quantidades de sondas sendo “1”, “4”, “6”, “8” e “10” conforme Tabelas 3 até 8 do Apêndice 1.

Os valores de $[Di]$ estão iguais à zero, uma vez que a data de início de serviço em todos os poços é imediata. O valor -1 em $[Df]$ é entendido como HP no software de Costa (2005), deixando o tempo de término o mais aberto possível.

Uma vez que os autores não tem acesso às instâncias dinâmicas para o PRSI ou mesmo dados estatísticos de seu comportamento, para efeitos de simulação e validação do modelo considera-se que no instante aproximado de 10% do $[HP]$ de cada uma das 24 instâncias os dados do tempo de serviço de cada instância é diminuído em aproximadamente 50% do seu valor original, antes de $t < 1$, a partir do pedido de intervenção número 16, conforme Figura 15.

[NPocos]
25

[r]
109

[ID]	[Poco]	[Coord_X]	[Coord_Y]	[Perda]	[Tservico]	[ti]	[ai]	[bi]	[Nivel]
1	1	10	10	21	4	0	1	109	1
2	2	10	10	224	7	0	1	109	1
3	3	10	10	2	1	0	1	109	1
4	4	10	10	3	13	0	1	109	1
5	5	10	10	207	7	0	1	109	1
6	6	10	10	141	2	0	1	109	1
7	7	10	10	14	2	0	1	109	1
8	8	10	10	182	2	0	1	109	1
9	9	10	10	21	6	0	1	109	1
10	10	10	10	76	5	0	1	109	1
11	11	10	10	11	2	0	1	109	1
12	12	10	10	43	7	0	1	109	1
13	13	10	10	26	6	0	1	109	1
14	14	10	10	36	1	0	1	109	1
15	15	10	10	90	5	0	1	109	1
16	16	10	10	4	3	10	1	109	1
17	17	10	10	12	2	10	1	109	1
18	18	10	10	74	1	10	1	109	1
19	19	10	10	18	3	10	1	109	1
20	20	10	10	135	1	10	1	109	1
21	21	10	10	20	3	10	1	109	1
22	22	10	10	16	2	10	1	109	1
23	23	10	10	36	2	10	1	109	1
24	24	10	10	82	2	10	1	109	1
25	25	10	10	6	1	10	1	109	1

Figura 18 : Instância de Poços para o PRSI Dinâmico Revelado até 10% de [HP]

6.3 RESULTADOS DOS DADOS ARTIFICIAIS

Cada uma das 24 instâncias geradas conforme mostrado na seção 6.2 foram resolvidas pelo algoritmo estrutural proposto para solução do PRSI Dinâmico e os resultados agrupados em tabelas localizadas no Apêndice I das Tabelas 2 até 7.

O algoritmo estrutural foi executado três vezes para cada uma das 24 instâncias. No primeiro momento a instância de poços foi atualizada uma vez ao longo do horizonte de planejamento, considerando “ t_i ”= 10% de [HP], este cenário foi relevante para avaliar o valor das perdas de óleo quando tem-se as informações atualizadas tão logo o horizonte de planejamento é iniciado. O segundo cenário a instância de poços foi atualizada uma única vez ao longo do horizonte de planejamento considerando “ t_i ”= 50% de [HP]. E finalmente o terceiro cenário considera a instância de poços atualiza uma única vez ao longo do horizonte de planejamento em “ t_i ”= 90% de [HP]. Em todos os momentos as informações atualizadas foram a partir dos pedidos 16

até 25 onde se fez o tempo de intervenção diminuir para aproximadamente 50% do valor original.

As soluções encontradas na FO (Função Objetivo) em $m^3/20$. Por exemplo, nas tabelas de resultados, um valor de FP igual a 1000 representa uma perda de produção de $50m^3$ ($1000/20$).

Os resultados da aplicação do PRSI Dinâmico, mostrados nas tabelas 2 até 7 do Apêndice I, quando comparados com o PRSI Estático, evidenciam que o PRSI Dinâmico proporciona uma maior economia quando as instâncias são atualizadas em um menor tempo possível, ou seja, quando “ti” é igual a 10% do [HP].

A medida que “ti” aumenta, por exemplo, quando “ti” é igual a 90% do [HP], os valores se aproximam ao do PRSI estático. Este comportamento era esperado, pois a medida que o PRSI Dinâmico consegue capturar mudanças de informações dos poços o mais breve possível ao longo do horizonte de planejamento, como perda de produção e tempo de intervenção, as rotas podem ser rapidamente readequadas possibilitando menor perda de produção.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O problema abordado nesse trabalho de dissertação de mestrado foi o de otimizar o uso de equipamentos do tipo “Sondas” durante a etapa de manutenção de poços de petróleo terrestres. Tais equipamentos são extremamente caros e exigem mão de obra especializada, sendo, portanto, necessário seu uso eficiente.

A abordagem deste problema é conhecida na literatura científica como o Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção (PRSI).

Dessa forma, o presente trabalho propôs um modelo matemático dinâmico para o PRSI de modo a contribuir com o processo de tomada de decisão do roteamento de sondas, considerando que é comum surgirem mudanças no cenário de roteamento quando as sondas já estão executando suas rotas. Por exemplo, os aspectos dinâmicos surgem quando certas características se alteram durante a execução das rotas das sondas. Por exemplo, podem ocorrer alterações das: a) taxas de perda de produção, b) do tempo de serviço no poço e c) novos poços que demandam intervenção podem surgir.

Após revisão bibliográfica foi verificado que os modelos matemáticos para o PRSI existentes são exclusivamente estáticos, ou seja, não consideram que novos poços ou informações de poços já revelados sejam atualizados ao longo do horizonte de planejamento. Assim, neste trabalho, propôs-se um modelo matemático para o PRSI Dinâmico de forma a melhor capturar as necessidades práticas do problema.

Para a solução desse modelo foi proposto um algoritmo estrutural, o qual foi executado ao longo do horizonte de planejamento, usando como suporte o CPLEX. No modelo proposto para o PRSI Dinâmico é possível que novos poços sejam revelados ao longo do horizonte de planejamento, assim como alterações nos tempos de intervenção e taxa de produção. Outras características relevantes incluem: a) o atendimento em períodos viáveis de atendimento, b) a consideração das distâncias entres os poços e as sondas, e c) a possibilidade de se ter frotas heterogêneas de sondas para atender poços com diferentes tipos de serviços.

Para validar o modelo foram executadas 24 instâncias estáticas do PRSI modelado por Costa (2005), onde foi considerado que informações dessas instâncias pudessem se alterar ao longo do horizonte de planejamento. Assim, foram simulados 3 cenários para cada uma das 24 instâncias, onde as informações de tempos de intervenção alteram-se dinamicamente em cada instância, obedecendo à seguinte regra: a) uma alteração ocorre a cada instante de tempo “ t_i ” equivalente a 10% do Horizonte de Planejamento [HP], b) “ t_i ” igual a 50% de [HP] e c) “ t_i ” igual a 90% de [HP].

Durante os testes de validação do modelo verificou-se que quanto menor o tempo de atualização dos poços (“ t_i ” igual a 10% de [HP]) maiores são as chances de economia quando comparado com os cenários de alterações próximas ao final do horizonte de planejamento (“ t_i ” igual a 90% de [HP]).

Considerando o modelo proposto e os resultados apresentados para o PRSI Dinâmico, e comparando com os resultados apresentados pelo modelo PRSI Estático, o método de solução apresentado mostra-se como uma possibilidade real para a minimização de perdas de produção em poços de petróleo terrestres.

Como trabalho futuro, deverão ser propostas novas instâncias artificiais para o PRSI Dinâmico de maneira que seja possível avaliar os resultados do modelo com a variação da taxa de produção e do número de poços revelados. Tais características já são tratadas pelo modelo matemático proposto para o PRSI Dinâmico apresentado neste trabalho, bem como o algoritmo estrutural necessário para resolvê-los. Além disso, sugere-se que sejam propostas heurísticas e meta-heurísticas para solução do PRSI Dinâmico com número de poços maior que 25, em virtude da limitação imposta pelo CPLEX para rodar instâncias maiores que estas.

Com um gerador de instâncias artificiais para o PRSI Dinâmico será possível realizar testes no modelo matemático proposto para o PRSI Dinâmico de forma a contribuir com planejadores destas rotas a dependerem menos do seu bom-senso e munirem-se de ferramentas assertivas para responder questões, a citar: Como devem reagir quando um poço de grande produção parar de funcionar? O programador deve aguardar a liberação da próxima sonda e esta desviar-se de sua rota, já planejada, para o atendimento a este novo poço? Qual o impacto desta decisão em termos de

perdas de produção comparada à possibilidade de manter a rota já programada? Qual o impacto desta decisão em caso do poço seguinte a ser atendido na rota já planejada tivesse uma janela de atendimento viável e o não atendimento desta pudesse aumentar o risco de inviabilizar investimento no ativo? E se a taxa da perda de produção dos poços mudasse? Ou deve-se aguardar a conclusão da rota pela sonda e em seguida atender ao poço que fora revelado ao longo da execução das rotas? Estas são algumas perguntas que um modelo matemático dinâmico do PRSI pode ajudar a responder em trabalhos futuros, e para isto um gerador de instâncias artificiais para o PRSI Dinâmico é fundamental.

REFERÊNCIAS

ANGELELLI, E.; BIANCHESSI, N.; MANSINI, R.; SPERANZA M.G.; (2009). Short Term Strategies for a Dynamic Multi-Period Routing Problem. **Transportation Research Part C**, n. 17, p. 106-119

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.

BISSOLI, D. C. **Uma Abordagem Heurística para o Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção Bi-Objetivo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, Brasil, 2014. <http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_8062_DayandeCastroBissoli.pdf >

BISSOLI, D. C.; CHAVES, G.L.D.; RIBEIRO, G.M.; (2016). Drivers to the workover rig problem. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, n. 139, p. 13-22

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**.

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.

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.

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.

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.

HVATTUM, L.M.; LØKKETANGEN, A.; LAPORTE, G.; (2006). Solving a dynamic and stochastic vehicle routing problem with a sample scenario hedging heuristic. **Transportation Science**, 40 (4), 421–438.

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.

PAIVA, R. O. **Otimização do Itinerário de Sondas de Intervenção com Quantificação de Perdas através de Simuladores de Reservatórios**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1997.
<<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000134238&fd=y>>

PSARAFTIS, H.N., 1988. **Dynamic vehicle routing problems**. In: Golden, B.L., Assad, A.A. (Eds.), *Vehicle Routing: Methods and Studies*. Elsevier, North-Holland, pp. 223–248.

PSARAFTIS, HARILAOS N. ; WEN, MIN ; KONTOVAS, CHRISTOS A.; (2016). Dynamic vehicle routing problems: Three decades and counting. **Networks**, 67(1), p.3-31.

PILLAC, V.; GENDREAU, M.; GUÉRET, C.; MEDAGLIA, A.L.; (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**, n. 225, p. 1–11.

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., DESAULNIERS, G., DESROSIERS, J., VIDAL, T., VIEIRA, B.S. (2014). Efficient heuristics for the workover rig routing problem with a heterogeneous fleet and a finite horizon. **J. Heuristics** 20, 677–708.

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

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-Rosemblatt_PRH21_UFRJ_G.pdf. Acesso em: 15/03/2016.

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>>.

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

TRINDADE, V.A. **Desenvolvimento e análise experimental da metaheurística GRASP para um problema de planejamento de sondas de manutenção**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, 2005.

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

WEN, M.; CORDEAU, J.F.; LAPORTE, G.; LARSEN, J.; (2010). The dynamic multi-period vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, n. 37, p. 1615–1623.

APÊNDICE I

Segue layout das instâncias propostas para melhor compreensão das características dinâmica do PRSI para novas instâncias ilustradas no capítulo 4.

TABELA1 – LAYOUT DOS ARQUIVOS DAS NOVAS INSTÂNCIAS

Arquivo	Geral	X	Y
i_rigX-Y	<p>Representa os dados das sondas, sendo a primeira linha do arquivo o número de sondas, e as demais possuem 4 informações, separadas por espaço:</p> <p>Índice, coordenada x e y e nível de serviço.</p>	Nº de poços	Nº de sondas
i_wellX-Y	<p>Representa os dados dos poços, sendo a primeira linha do arquivo o número de poços, e as demais possuem 5 informações, separadas por espaço:</p> <p>Identificação do Pedido, Identificação do Poço, Posição X da localização do cliente que demanda o pedido, Posição Y da localização do cliente que demanda o pedido, taxa de perda de produção, tempo de serviço, dia em que novos pedidos chegaram, Primeiro dia viável para atendimento ao pedido, fim do prazo do serviço e nível de serviço requerido.</p>	Nº de poços	Nº de sondas

TABELA 2 – RESULTADOS PARA GRUPO 25 POÇOS – 1 SONDA – HP = 110

Instâncias	PRSI Estática	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica
		ti= 10% HP	ti= 50% HP	ti= 90% HP
P25A-1	28911	19903	24302	28023
P25B-1	34275	22312	29890	33890
P25C-1	37910	25613	32781	37324
P25D-1	65526	46365	57814	64956

TABELA 3 – RESULTADOS PARA GRUPO 25 POÇOS – 2 SONDAS – HP = 110

Instâncias	PRSI Estática	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica
		ti= 10% HP	ti= 50% HP	ti= 90% HP
P25A-2	16329	11762	13087	16903
P25B-2	18880	13424	17316	18561
P25C-2	20883	15387	18452	20403
P25D-2	40789	28426	34823	40678

TABELA 4 – RESULTADOS PARA GRUPO 25 POÇOS – 4 SONDAS – HP = 55

Instâncias	PRSI Estática	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica
		ti= 10% HP	ti= 50% HP	ti= 90% HP
P25A-4	10312	5831	7563	9897
P25B-4	11338	6545	7947	10984
P25C-4	12577	7732	9746	12420
P25D-4	30922	19281	25834	30453

TABELA 5 – RESULTADOS PARA GRUPO 25 POÇOS – 6 SONDAS – HP = 40

Instâncias	PRSI Estática	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica
		ti= 10% HP	ti= 50% HP	ti= 90% HP
P25A-6	8497	4748	6239	8235
P25B-6	8913	5123	6734	8902
P25C-6	10022	6523	8341	9978
P25D-6	28091	17832	25451	27923

TABELA 6 – RESULTADOS PARA GRUPO 25 POÇOS – 8 POÇOS – HP = 30

Instâncias	PRSI Estática	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica
		ti= 10% HP	ti= 50% HP	ti= 90% HP
P25A-8	7733	4164	5715	7692
P25B-8	7901	4362	6023	7867
P25C-8	8768	5473	6978	8703
P25D-8	26817	16487	24784	26767

TABELA 7 – RESULTADOS PARA GRUPO 25 POÇOS – 10 POÇOS – HP = 20

Instâncias	PRSI Estática	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica	PSRI Dinâmica
		ti= 10% HP	ti= 50% HP	ti= 90% HP
P25A-10	7322	3903	5437	7267
P25B-10	7308	3840	5402	7284
P25C-10	8071	4742	6231	7936
P25D-10	26120	16114	24192	26021