



ISSN: 2447-5580

Disponível em: <http://periodicos.ufes.br/BJPE/index>



Brazilian Journal of
Production Engineering

BJPE - Revista Brasileira de Engenharia de Produção



Campus São Mateus

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ARTIGO ORIGINAL

OPEN ACCESS

ROTEAMENTO DINÂMICO DE SONDAS DE INTERVENÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO: UM MODELO MATEMÁTICO PARA O PRSI DINÂMICO

DYNAMIC SCHEDULING WORKOVER RIGS FOR ON SHORE OIL PRODUCTION: A MATHEMATICAL MODEL FOR DYNAMIC WRRP

Flavio Tongo da Silva¹; Roney Pignaton da Silva^{2*}

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES, campus Vitória, ES. E-mail: ftongo@bitavel.com

² Departamento de Computação e Eletrônica do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo. *roney.silva@ufes.br

ARTIGO INFO.

Recebido em: 11/09/2018

Aprovado em: 04/10/2018

Disponibilizado em: 10/10/2018

PALAVRAS-CHAVE:

Poços de Petróleo, Modelo Matemático, Sondas de Intervenção, Otimização.

KEYWORDS:

Onshore Oil wells, mathematical model, workover rigs, optimization;

Copyright © 2018, Silva & Silva. Esta obra está sob uma Licença Creative Commons Atribuição-Uso.

*Autor Correspondente: Roney P. da Silva

RESUMO

Sondas de intervenção são equipamentos de alto custo de operação e aquisição e são utilizados para a manutenção de poços de petróleo terrestres. Em quantidade insuficiente, quando comparada a quantidade de poços, ocorre a geração de filas de poços aguardando atendimento. A espera por atendimento em um poço gera perda de produção e, conseqüentemente, perda de receita. Assim, minimizar a perda de produção através da geração de rotas de atendimento aos diferentes poços com as escassas sondas existentes é um grande desafio de gestão. Na literatura, esse problema é conhecido como Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção (PRSI). Este artigo propõe um modelo matemático com abordagem dinâmica para o PRSI que minimiza a perda total de produção em cenários onde as demandas de manutenção são reveladas em

tempo real, ao longo de um horizonte de planejamento, o que é conhecido como PRSI Dinâmico. Para o correto entendimento do modelo, são apresentados resultados computacionais obtidos considerando instâncias fictícias simples, com objetivo de serem didáticas. A partir da análise dos resultados, conclui-se que o modelo proposto se aproxima do contexto operacional do problema, impactando no processo de definição das rotas e agendamento dos atendimentos e melhorando a produtividade quando comparado à programação gerada por um modelo estático.

ABSTRACT

Workover rigs are maintenance resources of the very expensive oil production chain and its acquisition and use should be optimized. In insufficient quantity when compared to the quantity of wells, rows of wells awaiting service can be generated. This leads to the need to generate service routes to the different wells with the scarce existing workover rigs, a challenge known as Workover Rig Routing Problem (WRRP). This article proposes a mathematical model with a dynamic approach to the WRRP that minimizes the total loss of production of wells revealed along a planning horizon, which is known as Dynamic WRRP (D-WRRP). The computational results were obtained considering fictitious didactic instances, with which it is concluded that the proposed model approaches the operational context of the problem, impacting the process of defining the routes and scheduling of this service.

Citação (APA): SILVA, F. T. da; SILVA, R. P. da; (2018). Roteamento dinâmico de sondas de intervenção para otimização da produção de poços de petróleo: um modelo matemático para o PRSI dinâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 4(3), 169-183.

INTRODUÇÃO

Poços de petróleo terrestres são importantes ativos cujo funcionamento 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 em seus equipamentos (Bassi; Ferreira Filho; Bahiense, 2012). Essas intervenções são realizadas por equipamentos muito caros, denominados *sondas*, e seu quantitativo deve ser dimensionado de maneira a equilibrar seu custo de aquisição e operação com os custos de eventuais perdas de produção.

Esse problema é conhecido na literatura como Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção (PRSI), no qual, a partir do conhecimento prévio dos poços a serem atendidos, o denominado PRSI Estático, se estabelecem rotas de atendimento para cada sonda que permitam reestabelecer o funcionamento dos poços, com o objetivo de minimizar as perdas de produção de petróleo.

Este artigo apresenta uma 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.

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; Desrosiers, 2012). Esta abordagem pode não atender situações como, por exemplo, quando o poço revelado possui grande taxa de produção e atendê-lo antes do final do horizonte de planejamento gera economia justificável. Uma das pesquisas que mais se aproximam ao PRSI Dinâmico são as 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). A proposta apresentada neste artigo conjuga as soluções propostas nestes dois últimos trabalhos referenciados.

CARACTERIZAÇÃO DO PRSI DINÂMICO (PRSI-D)

Quando a produtividade dos poços decresce em razão de mau 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 seu atendimento (janela de tempo) e 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, um 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 , este é representado por $T' = \{t, t + 1, t + 2, \dots, r\}$, conforme propõe Wen, Cordeau, Laporte, Larsen (2010) para a necessidade de reprogramação das rotas.

O horizonte de planejamento é finito, composto de até r unidades de tempo, onde $r \geq t$. Ao longo do horizonte de planejamento são considerados como possíveis candidatos a entrar na reprogramação das rotas para atendimentos pedidos revelados (novos poços ou alterações em atributos de poços existentes) que são conhecidos até o instante t , sendo possível atualizar diversas vezes a seção de planejamento T' . Esses pedidos incluem a parte das rotas previamente planejadas que não iniciaram atendimento antes do início da seção de planejamento a ser programada, além dos possíveis novos pedidos ou alterações em atributos de poços que foram revelados até o instante de tempo t .

As rotas programadas ou reprogramadas no instante t devem determinar qual pedido de manutenção deve ser atendido 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, buscando minimizar perdas de produção ao aguardar condições mais favoráveis. Essa solução contrapõe-se à proposta de atender aos poços o mais breve possível, com o risco de não conseguir as condições mais favoráveis ao serem revelados novos pedidos para atendimento, como mostra Angelelli, Bianchessi, Mansini, Speranza (2009).

Assim, dado um conjunto de poços com pedidos de manutenção e janelas de tempo viáveis de atendimento dinamicamente revelados ao longo do tempo, e dada uma frota heterogênea de sondas, cada uma com equipamentos específicos e posição inicial, o PRSI-D 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 atendido 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 a seguir (Figuras de 1 a 4) onde se consideram as instâncias (A) e (B) do problema proposto. Assim, considere a existência de uma sonda ke que essa sonda leva 1 dia para chegar a qualquer poço partindo de sua origem, e 1 dia para se deslocar entre dois poços quaisquer. Ademais, cada poço demanda 1 dia de serviço após o início de seu atendimento. Considere que cada poço conhecido antes do dia 1 tenha taxa de perda de $2 \text{ m}^3/\text{dia}$, e que o poço 3, revelado ao longo do horizonte de planejamento, tenha taxa de perda de $20 \text{ m}^3/\text{dia}$. Nas Figuras de 1 a 4, o círculo numerado apresenta um poço e sua identificação, o quadrado numerado representa uma sonda e sua identificação e a linha contínua representa o deslocamento da sonda até um poço para manutenção. O segmento da rota já realizado até o momento em que uma nova programação é definida está representado por uma linha tracejada.

Na instância (A), antes do dia 1, são revelados os pedidos para atendimento aos poços 1 e 2, com limites de atendimento até os dias 6 e 3, respectivamente. Na Figura 1, é calculada a rota com as informações disponíveis até o dia 1.

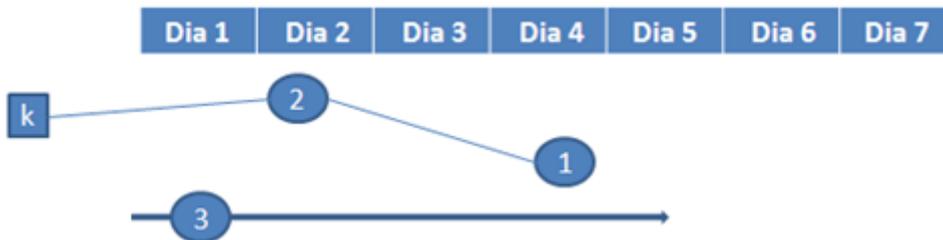
Figura 1 – Rota planejada no dia 1 ($t=1$) para o horizonte de planejamento de 7 dias ($T=7$), resultando em uma perda total de produção de 12 m^3 .



Fonte – Elaborado pelos autores, 2018.

Na Figura 2, enquanto a sonda k , no dia 3, está se deslocando para o poço 1, 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 de $20 \text{ m}^3/\text{dia}$.

Figura 2 – Revelada ordem de pedido para o poço 3 no dia 1 ($t=1$).



Fonte – Elaborado pelos autores, 2018.

Considerando o novo cenário, conforme Figura 3, com a chegada do pedido de manutenção para o poço 3, é feita uma reprogramação da rota no dia 1, ou $t=1$, 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.

Figura 3 – Rota reprogramada no dia 2 ($t=2$) e com perda total de produção de 96 m^3 e considerando o poço 3 revelado no dia 1 ($t=1$), 2018.



Fonte – Elaborado pelos autores.

Considerou-se neste critério a alta taxa de perda de produção do poço 3 e a possibilidade de postergar o atendimento do poço 1 pois ainda estaria dentro do seu limite viável de atendimento.

Na instância (B), antes do dia 1, são revelados os pedidos para atendimento aos poços 1 e 2, com limites de atendimento até os dias 5 e 3, respectivamente. A rota calculada é a mesma apresentada na Figura 1. Durante a execução desse planejamento, enquanto a sonda k , no dia 1, está 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 $20 \text{ m}^3/\text{dia}$. Com a chegada do pedido de manutenção para o poço 3, é feita uma reprogramação da rota no dia 2, ou $t=2$, quando 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, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Rota reprogramada no dia 2 ($t=2$), com perda total de produção de 132 m^3 e considerando o poço 3 revelado no dia 1 ($t=1$).



Fonte – Elaborado pelos autores, 2018

Analisando o comportamento do PRSI dinâmico com a instância (B), o fato do poço 1 ter limite de atendimento até o dia 5, e apesar da taxa de produção do poço 3, a prioridade de atendimento foi mantida para o poço 1 em detrimento do poço 3.

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

No modelo matemático proposto para o PRSI-D, 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 é o conjunto de arcos, formados pelos poços revelados até o instante de tempo de programação t a serem atendidos pela sonda K .

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 $d(k)$ representa 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 contém quatro tipos de arcos: vazio, início, fim e entre-tarefas. 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, $A_k^t = \{o(k), d(k)\} \cup (o(k) \times W_k^t) \cup (W_k^t \times d(k)) \cup (W_k^t \times W_k^t)$.

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 .

A janela de tempo original com o conjunto dos instantes de tempo viáveis para início do atendimento ao poço i 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 $l \in \{a_i' \dots b_i\}$.

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 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 $i \in W_k^t$, $k \in K$, $l \in \{a_i'..b_i\}$ 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 se 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 e programação t . Desta forma, são ainda impostas as seguintes restrições sobre as variáveis de tempo:

$$0 \leq T_{ik}^t \leq \sum_{l \in \{a_i'..b_i\}} b_l X_{ikl}^t, \quad \forall k \in K, i \in W_k^t \quad (1)$$

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, ou seja, $S_{ikl}^t = P_{ir}^t - P_{il}^t$.

Assim, a função objetivo, $f(t)$, é descrita conforme segue:

Minimizar

$$\sum_{i \in W^t} [P_i^t (r - t_i)] - \sum_{k \in K} \sum_{i \in W_k^t} \sum_{l \in \{a'_i \dots b_i\}} \{P_i^t X_{ikl}^t [(r - t_i) - (T_{ik}^t - t_i)]\} \quad (4)$$

A equação (4) é a *função objetivo* cujo 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 , sendo t_i 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 r . A segunda somatória representa a produção de petróleo que foi economizada nos poços atendidos pelas sondas desde o instante t_i em 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, no 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.

A função $f(t)$ está sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_{l \in \{a'_i \dots b_j\}} \sum_{k \in K} \sum_{i: (i,j) \in A_k^t} X_{ijkl}^t \leq 1, \quad \forall j \in W^t, ij, j \neq d(k), \quad (5)$$

A Restrição (5) garante que cada poço j é visitado no máximo uma vez por determina sonda k , em sua respectiva rota.

$$\sum_{j:(o(k),j) \in A_k^t} \sum_{l \in \{a'_j \dots b_j\}} X_{o(k),jkl}^t = 1, \quad \forall k \in K, j \neq d(k), \quad (6)$$

A Restrição (6) pertence ao conjunto de restrições clássicas de fluxo em rede, e diz que toda sonda inicia sua rota no nó de origem $o(k)$.

$$\sum_{i:(i,d(k)) \in A_k^t} \sum_{l \in \{a'_i \dots b_i\}} X_{i,d(k)kl}^t = 1, \quad \forall k \in K, \quad (7)$$

A Restrição (7) pertence ao conjunto de restrições clássicas de fluxo em rede, e diz que toda sonda finaliza sua rota no nó destino $d(k)$.

$$\sum_{j:(i,j) \in A_k^t} \sum_{l \in \{a'_j \dots b_j\}} X_{ijkla}^t - \sum_{j:(j,i) \in A_k^t} X_{jikl}^t = 0, \quad \forall k \in K, i \in W_k^t, l \in \{a'_i \dots b_i\}, l_a \geq l, \quad (8)$$

A restrição (8) também corresponde a clássica restrição que determina a conservação do fluxo na rota k , e 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 h e i também será ocupado.

$$(T_{ik}^t + t_{ij} - T_{jk}^t) \sum_{l \in \{a'_j \dots b_j\}} X_{ijkl}^t \leq 0, \quad \forall k \in K, (i,j) \in A_k^t, j \neq d(k), \quad (9)$$

A restrição não linear (9) 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 .

$$0 \leq T_{ik}^t \leq \sum_{l \in \{a'_i \dots b_i\}} b_l X_{ikl}^t, \quad \forall k \in K, i \in W_k^t, \quad (10)$$

A Restrição (10) 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.

$$T_{o(k)k}^t = 0, \quad \forall k \in K, \quad (11)$$

A Restrição (11) indica que tempo de início de todas as rotas é zero.

$$X_{ijkl}^t \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, (i,j) \in A_k^t, l \in \{a'_j \dots b_j\}, \quad (12)$$

A Restrição (12) impõem valores binários para as variáveis de fluxo em arco.

$$X_{ikl}^t = \sum_{j:(j,l) \in A_k^t} X_{jikl}^t, \quad \forall k \in K, i \in W_k^t, l \in \{a'_i \dots b_i\}, \quad (13)$$

Finalmente, as variáveis auxiliares são definidas em (13). Elas podem facilmente ser removidas do modelo substituindo-as em (4) e (10).

$$t > t_i, \quad t_i \in \{0,1, \dots, (r-1)\}, \quad (14)$$

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 incluído nas rotas de programação para atendimento, deve ser revelando antes do instante de programação t .

O PRSI contém o problema do reparador viajante (*traveling repair man 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.

METODOLOGIA PARA A SOLUÇÃO DO PRSI DINÂMICO

Uma vez definido o modelo matemático para o PRSI Dinâmico, a metodologia de solução do problema baseou-se nas seguintes etapas:

- 1) Caracterização dos poços produtivos: definição dos parâmetros que caracterizam os poços de produção, como, por exemplo: número de poços, horizonte de planejamento, identificação do poço, perda de vazão, localização cartesiana do poço, tempo de serviço do poço e janela de atendimento.
- 2) Caracterização das sondas de intervenção: definição dos parâmetros que caracterizam as sondas de intervenção, como, por exemplo: número de sondas, tipo da sonda e coordenadas de localização cartesiana da sonda.
- 3) Definição de cenários de simulação: definição de cenários de simulação fictícios que representam cenários reais para teste de modelo proposto.
- 4) Definição do algoritmo estrutural a ser executado ao longo do horizonte de planejamento. Sua principal função é ser a interface com uma ferramenta CPLEX para execução do modelo matemático para os cenários propostos (Silva, 2016).

5) Implementação de modelo matemático proposto para o PRSI Dinâmico na ferramenta do CPLEX disponível.

A aplicação dos passos da metodologia proposta permitiu o teste de vários cenários de simulação. Na próxima seção, apresentam-se os resultados de alguns desses cenários.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O PRSI é uma instância do *traveling repair man problem* (Tsitsiklis, 1992), no caso especial da presença de uma única sonda com um horizonte de planejamento muito grande. Esse problema é classificado como *NP-Hard* por Sahni e Gonzalez (1976) e, portanto, o PRSI Dinâmico é *NP-Hard* também. 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 utilizou-se o método exato com o CPLEX (Silva, 2016).

Durante a execução do presente trabalho, não foram encontradas publicações disponíveis com instâncias para o PRSI dinâmico. Assim, foram utilizadas instâncias fictícias definidas em Costa (2015) para ilustrar os resultados computacionais do modelo proposto.

Durante os testes, foi utilizado o solver IBM ILOG CPLEX InteractiveOptimizer 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.

No que tange os resultados computacionais, comparou-se o PRSI dinâmico com o PRSI estático. Para efeito de comparação foi considerada uma das práticas que muitos planejadores e programadores fazem ao ser relevado um novo poço quando a sonda já está executando suas rotas, que é esperar a sonda terminar a rota para somente depois atender o novo poço revelado.

O 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. 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 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 está em análise apenas a questão das perdas e não o limite de atendimento aos poços.

Na 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 de poços com limite de atendimento pré-definido. Com o modelo do PRSI dinâmico proposto, este limite de atendimento é levando em conta.

Conforme Costa (2005), não são consideradas as distâncias entre os poços e entre sondas e poços. Os poços podem ser atendidos desde o momento que foram revelados até o final do horizonte de planejamento e os poços possuem mesma localização em cada rodada de simulação. Além disso, as sondas são homogêneas, ou seja, realizam o mesmo tipo de serviço. A Tabela 1 apresenta os resultados para uma das instâncias simuladas, a qual possui 25 poços de petróleo a serem atendidos por 2 sondas de intervenção. O planejamento considera um horizonte de planejamento de 110 unidades de tempo e diferentes tempos de atualização (t_a), os quais representam o momento em que se executa o replanejamento em virtude da chegada de novas demandas. As instâncias são nomeadas no padrão PNX-M, onde N é a quantidade de poços, M é a quantidade de sondas e X é a letra do exemplo. X varia de A a D e, para cada exemplo, altera-se, de maneira crescente, o número de sondas reveladas no instante t_a . Como resultado dessa lógica, observa-se um aumento na perda da produção para cada um dos exemplos da Tabela 1.

Tabela 1 – Perda total de produção (em m³) para o cenário com grupo de 25 Poços – 2 Sondas e Horizonte de Planejamento (HP) =110

| Instâncias | PRSI Estática | PSRI-D | | |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | $t_a= 10\% \text{ HP}$ | $t_a= 50\% \text{ HP}$ | $t_a= 90\% \text{ HP}$ |
| P25A-2 | 16329 | 11762 | 13087 | 16903 |
| P25B-2 | 18880 | 13424 | 17316 | 18561 |
| P25C-2 | 20883 | 15387 | 18452 | 20403 |
| P25D-2 | 40789 | 28426 | 34823 | 40678 |

Fonte – Elaborado pelos autores, 2018

O algoritmo estrutural foi executado três vezes para cada instância proposta. No primeiro momento, a instância de poços foi atualizada uma única vez ao longo do horizonte de planejamento, no instante de tempo $t_a = 10\%$ do HP. Este cenário foi relevante para avaliar o valor das perdas de óleo quando as informações são atualizadas tão logo o horizonte de planejamento é iniciado. No segundo cenário, a instância de poços foi atualizada uma única vez ao longo do horizonte de planejamento, no instante de tempo $t_a = 50\%$ do HP. No terceiro cenário, a instância de poços foi atualizada uma única vez ao longo do horizonte de planejamento, no instante de tempo $t_a = 90\%$ do HP.

Os resultados da aplicação do PRSI Dinâmico, mostrados na tabela 1, 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 t_a é igual a 10% do HP. A medida que t_a aumenta, por exemplo, quando t_a 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.

CONCLUSÃO

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. O modelo matemático para o PRSI Dinâmico melhora a captura das 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 (Silva, 2016). 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 entre 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 criadas instâncias fictícias onde foi verificado menor perda de petróleo com o modelo proposto do PRSI Dinâmico, comparado a abordagem tradicional de

adaptar o PRSI Estático para atender características dinâmicas do problema. 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.

REFERÊNCIAS

- ANGELELLI, E.; BIANCHETTI, N.; MANSINI, R.; SPERANZA M.G. Short Term Strategies for a Dynamic Multi-Period Routing Problem. *Transportation Research*, v. 17, n. 2, p. 106-119, Abril 2009.
- BASSI, H. V.; FERREIRA FILHO, V.J.M.; BAHENSE, L. Planning and scheduling a fleet of rigs using simulation-optimization. *Computers & Industrial Engineering*, NY, Dezembro 2012, v. 63, n. 4, 1074-1088.
- BISSOLI, D. C.; CHAVES, G.L.D.; RIBEIRO, G.M. *Drivers to the workover rig problem*. Journal of Petroleum Science and Engineering, n. 139, p. 13-22, 2016.
- 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.
- 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, 2001. Fortaleza, CE.
- PSARAFTIS, HARILAOS N. ; WEN, MIN ; KONTOVAS, CHRISTOS A. Dynamic vehicle routing problems: Three decades and counting. *Networks*, Jan 2016, v. 67, n. 1, p.3-31.
- RIBEIRO, G. M.; DESAULNIERS, G.; DESROSIERS, J. A branch-price-and-cut algorithm for the workover rig routing problem. *Computers & Operations Research*, Dez. 2012, v. 39, n. 12, p. 3305-3315.
- SAHNI, S.; GONZALEZ, T. P-complete approximation problems. *Journal of the ACM*, Jul. 1976, v. 23, n. 3, p. 555-565.
- SILVA, F. T. *Proposta de Modelo Matemático para o Problema de Roteamento de Sondas de Intervenção a Poços de Petróleo Terrestre Revelados Dinamicamente com Período de Atendimento Viável*. Dissertação de Mestrado, Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo. São Mateus, ES, 2016.
- TSITSIKLIS, J.N. Special cases of traveling salesman and repairman problems with time Windows. *Networks*, Maio 1992, v. 22, n. 3, p. 263-282.
- WEN, M.; CORDEAU, J.F.; LAPORTE, G.; LARSEN, J.; The dynamic multi-period vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, Set. 2010, v. 37, n. 9, p. 1615–1623.