

UM ESTUDO ALGORITMICO DO PROBLEMA DA PROGRAMAÇÃO DE SONDAS DE PRODUÇÃO

Gustavo de Araujo Sabry

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN
guga_sabry@hotmail.com

Marco César Goldbarg

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN
gold@dimap.ufrn.br

Elizabeth Ferreira Gouvêa Goldbarg

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN
beth@dimap.ufrn.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta um modelo para a formulação do Problema da Programação de Sondas de Produção em campos de petróleo e apresenta dois algoritmos experimentais para a solução desse modelo proposto. Os algoritmos desenvolvidos são validados através de um experimento computacional. Ao final são tecidas conclusões sobre os resultados alcançados tanto em relação ao modelo, quanto em relação ao desempenho dos algoritmos propostos.

Palavras-chave: Problema de programação das sondas de produção, Algoritmo Memético, GRASP.

ABSTRACT

This paper presents a formulation model for the Workover Rigs Schedule Problem in oil fields and presents two experimental algorithms to solve the proposed model. The developed algorithms are validated with a computational experiment. Finally, conclusions are drawn on the results achieved concerning both the model and the performance of the proposed algorithms.

Keywords: Scheduling workover rigs problem, Memetic Algorithm, GRASP.

1. Introdução

As Sondas de Produção Terrestre (SPT) são equipamentos com diferentes características físicas e de aparelhamento objetivando a realização de operações de completação e *workover*. Estas operações são fundamentais para colocar os poços em serviço, realizar a manutenção da produção nos poços e até mesmo otimizá-la. Ao término da perfuração de um poço, é necessário deixá-lo em condições de operar de forma segura e econômica. Ao conjunto de operações destinadas a equipar o poço para produzir óleo ou gás (ou ainda injetar fluidos nos reservatórios) denomina-se completação. Considerando que a completação influencia em toda a vida produtiva do poço e envolve altos custos, faz-se necessário um planejamento criterioso das operações e uma análise econômica para evitar perdas dos investimentos (Thomas, 2001).

Após a fase completação, inicia-se a de produção onde o óleo/gás pode vir à superfície espontaneamente, impelido pela pressão interna dos gases. Nesses casos, temos os chamados poços surgentes e instala-se um conjunto de válvulas conhecido como árvore-de-natal para controlar a produção. Quando isso não ocorre, é preciso usar equipamentos para promover a elevação artificial dos fluidos. O bombeio mecânico é feito por meio do cavalo-de-pau, montado na cabeça do poço, que aciona uma bomba colocada no seu interior. Existem ainda os bombeios hidráulicos, centrífugos e a injeção de gás, com o mesmo objetivo.

Ao longo da vida produtiva do poço, é necessário realizar operações que visam manter a produtividade do poço ou até mesmo melhorá-la, sendo denominadas de *workover*. Uma série possível destas operações pode ser realizada por cabo. Também há necessidade de intervenção com as SPT para realizar certas operações quando não se pode utilizar cabo.

As SPT realizam intervenções para: restaurar danos mecânicos devido a falhas na coluna de produção ou revestimento; limpar o revestimento do poço; estimular a produção através de alguma técnica específica; reduzir a produção excessiva de água ou gás.

As intervenções de *workover* costumam ser classificadas como: avaliação, recompletação, restauração, estimulação e mudança do método de elevação e abandono do poço.

1.1 A Importância do Planejamento da Programação das Sondas de Produção

As sondas são equipamentos muito caros de forma que, normalmente, atendem a um grande conjunto de poços. Em um processo normal há sempre poços que aguardam o atendimento. Assim é comum, em certas situações, que sondas sejam alugadas para dar vazão a uma demanda que as sondas de propriedade da empresa permissionária do campo eventualmente não consigam atender.

O problema de planejar de forma ótima o atendimento dos poços pelas sondas em um campo de petróleo é extremamente importante. Os custos envolvidos na paralisação da produção de um poço e pela mobilização, deslocamento e emprego da sonda são significativos. Por outro lado não menos importantes são os riscos ambientais decorrentes da demora de atendimento ou por falhas na manutenção preventiva. Outros fatores de riscos presentes na atividade de sondagem são a possível perda de um poço devido a danos na estrutura interna provocadas pelo tempo, pelo desgaste ou por outros fatores que podem ser evitados ou minimizados através de um bom planejamento de intervenções preventivas.

1.2 O Objetivo Geral da Presente Pesquisa

O Problema da Programação de Sondas de Produção é extremamente complexo em seu escopo geral, todavia o presente trabalho abordará uma situação mais simples em que as demandas dos poços são conhecidas dentro de um dado intervalo de tempo e, neste intervalo, os poços podem ser agendados com segurança para a data marcada. Para atender a demanda nos poços estarão disponíveis sondas dedicadas e sondas que podem ser alugadas. São dois os objetivos gerais da presente pesquisa: Primeiramente sugerir uma formulação para o problema com o objetivo de minimizar a composição de perda de petróleo e custo do processo obtido no seqüenciamento de atividades proposto como solução, atendendo-se as restrições de rota e de seqüenciamento de trabalho nas sondas. Em segundo lugar propor e validar dois algoritmos experimentais para a solução do modelo proposto.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado da seguinte forma: o item 2 aborda o Problema das Sondas de Produção e sua formulação matemática; o item 3 descreve o Algoritmo Memético implementado para solucionar o problema em questão; o item 4 define o Algoritmo GRASP que foi desenvolvido para resolver o problema abordado; o item 5 detalha como se foi dada a experimentação computacional; e o item 6 tece as considerações finais acerca dos resultados obtidos.

2. O Problema das Sondas de Produção

O Problema de Programação das Sondas de Produção (PPSP) desenvolve-se, basicamente, em um campo de petróleo em atividade, ou seja, em uma área que reúne vários poços extraído petróleo e novos poços sendo ativados. Em um campo de petróleo, tanto novos poços devem ser colocados em produção (completação), quanto é necessário dar manutenção aos poços em produção (*workover*). Tendo isto em vista, considera-se para o caso que toda demanda é previamente conhecida e disponível ao início do planejamento.

Como hipótese do modelo, considera-se a existência de um conjunto de sondas dedicadas integralmente ao atendimento das necessidades dos poços. Um segundo conjunto de sondas pode ser eventualmente mobilizado e desmobilizado através de contratos de aluguel. No caso do aluguel existe um custo associado à mobilização do equipamento e um custo devido ao tempo de operação. As intervenções nos poços devem ser concluídas dentro de um conhecido horizonte de tempo. No problema todos os poços devem ser atendidos dentro do horizonte de planejamento. Os tempos necessários ao deslocamento, preparação das sondas para a operação e desmobilização podem ser significativos, de forma que o problema pode ser modelado como um problema de roteamento com tarefas como proposto no item 2.1. No item 2.2 é feita uma breve revisão da literatura para o problema.

2.1 Formulação do Problema da Programação das Sondas de Produção

Neste problema considera-se: um conjunto P com p poços $\{P_1, P_2, \dots, P_p\}$, um conjunto SD de sondas dedicadas com sd sondas $\{SD_1, SD_2, \dots, SD_{sd}\}$ e um conjunto SA de sondas alugadas com sa sondas $\{SA_1, SA_2, \dots, SA_{sa}\}$. O propósito é alocar as sondas para atenderem às demandas dos poços de modo não preemptivo, ou seja, uma vez que uma sonda esteja alocada em um poço, deverá permanecer até o término da intervenção, sem interrupções. Cada poço é atendido por uma única sonda. Uma sonda pode atender mais de um poço. Levando em consideração o objetivo de minimizar o custo operacional e a perda de óleo nos intervalos entre o momento em que o poço aguarda pela manutenção e o término da intervenção realizada pela sonda neste poço, para cada poço estão associados:

Q_i – momento na escala de horas em que o poço i necessita de manutenção;
 V_i – vazão de produção de petróleo (por hora) de um poço i ;
 D_i – duração da manutenção de uma sonda realizada no poço i .

Para cada sonda estão associados:

CA_j – custo de aluguel da sonda j ;
 CO_j – custo de operação (por hora) da sonda j ;
 TO_j – tempo total de operação da sonda j ;
 TS_j – tipo da sonda j (dedicada ou alugada).

As variáveis CA_j e CO_j são associadas a TS_j , ou seja, vão ter valores diferentes de acordo com o tipo da sonda: dedicada ou alugada.

Caso as sondas já tenham terminado o serviço em um poço e estejam disponíveis, poderão ser alocadas para atender outros poços. Desta forma, temos que a é o número máximo de atendimentos que uma sonda poderá efetuar, ou seja, para cada sonda existe um conjunto de atendimentos $A = \{A_1, A_2, \dots, A_a\}$. As seguintes variáveis binárias são definidas no problema:

► Variável binária de decisão para sondas dedicadas

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{se o poço } i \text{ é atendido no } k\text{-ésimo trabalho da sonda } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\forall i \in P, j \in SD \text{ e } k \in A$$

► Variável binária de decisão para sondas alugadas

$$y_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{se o poço } i \text{ é atendido no } k\text{-ésimo trabalho da sonda } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\forall i \in P, j \in SD \text{ e } k \in A$$

► Variável que indica o tempo de início da sondagem

$$t_{ij}^k = \text{Tempo de início do trabalho no poço } i \text{ no } k\text{-ésimo atendimento da sonda } j$$

$$\forall i \in P, j \in SD, j \in SA \text{ e } k \in A.$$

► Variável que indica a distância entre os poços

$$d_{ij} = \text{tempo de deslocamento entre os poços } i \text{ e } j$$

► Variável que contabiliza a perda de óleo em um poço i no k -ésimo atendimento da sonda j

$$p_{ij}^k = \begin{cases} (t_{ij}^k - Q_i) V_i & \text{se } t_{ij}^k > Q_i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\forall i \in P, j \in SD \cup SA \text{ e } k \in A.$$

Com base nas variáveis anteriores o PPSP pode ser formulado da seguinte forma:

$$\text{Min} \sum_{i \in P} \sum_{j \in SD} \sum_{k \in A} x_{ij}^k p_{ij}^k + \sum_{i \in P} \sum_{w \in SD} \sum_{k \in A} y_{iw}^k p_{iw}^k + \sum_{j \in SD} (TO_j CO_j) + \sum_{w \in SA} CA_w + \sum_{w \in SA} (TO_w CO_w)$$

$$\forall i \in P, j \in SD, w \in SA \text{ e } k \in A$$

$$TO_j = \sum \sum (x_{ij}^k D_i) \quad \forall j \in SD \cup SA, \forall i \in P, k \in A \quad (01)$$

$$t_{wj}^{k+1} = \begin{cases} (t_{ij}^k + D_i) + (x_{wj}^{k+1} d_{iw}) & \text{se } j \in SD \text{ e } k \in A \\ \text{onde } i \neq w, \forall i, w \in P \\ (t_{ij}^k + D_i) + (y_{wj}^{k+1} d_{iw}) & \text{se } j \in SA \text{ e } k \in A \\ \text{onde } i \neq w, \forall i, w \in P \end{cases} \quad (02)$$

$$(03)$$

$$\sum_{j \in SD} \sum_{k \in A} x_{ij}^k + \sum_{w \in SA} \sum_{k \in A} y_{iw}^k = 1 \quad \forall i \in P \quad (04)$$

$$\sum_{i \in P} x_{ij}^k \leq sd \quad \forall j \in SD \text{ e } k \in A \quad (05)$$

$$\sum_{i \in P} x_{ij}^k (t_{ij}^k + D_i) \leq Tempo \quad \forall j \in SD \text{ e } k \in A \quad (06)$$

$$\sum_{i \in P} y_{iw}^k (t_{iw}^k + D_i) \leq Tempo \quad \forall j \in SA \text{ e } k \in A \quad (07)$$

$$t_{ij}^k \geq Q_i \quad \forall i \in P, j \in SD \cup SA \text{ e } k \in A \quad (08)$$

$$Q_i \geq 0; D_i \geq 0 \quad \forall i \in P \quad (09)$$

$$t_{ij}^k \geq 1_i \quad \forall i \in P, j \in SD \cup SA \text{ e } k \in A \quad (10)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in P, j \in SD \text{ e } k \in A \quad (11)$$

$$y_{iw}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in P, w \in SA \text{ e } k \in A \quad (12)$$

O conjunto 01 de restrições mensura o tempo total de operação realizado pela sonda j . As restrições 02 e 03 calculam o tempo de início das atividades das sondas e garantem que uma sonda não atenda mais de um poço simultaneamente. As restrições 04 garantem que cada poço seja atendido uma única vez e que todos os poços sofram intervenção. As restrições 05 definem a quantidade de sondas disponíveis para o atendimento dos poços. As restrições 06 e 07 garantem que todas as atividades terminam no horizonte de tempo *Tempo*. As restrições 08 asseguram que as sondas somente poderão trabalhar no poço i quando ele estiver liberado para ser visitado por uma sonda. As restrições 09 garantem a existência de demanda para manutenção em cada poço e que cada atendimento irá demandar um tempo de duração para ser concluído. As restrições 10 firmam a não-negatividade do tempo de início das atividades de uma sonda. As restrições 11 e 12 determinam a integridade das variáveis de decisão.

2.2 Revisão da Literatura para o Problema da Programação das Sondas de Produção

Borchardt (2002) aborda o PPSP utilizando algoritmos evolucionários, tendo desenvolvido um Algoritmo Genético e um Algoritmo Transgenético. O problema é abordado desprezando a distância entre os poços, se tornando similar a um problema de *Job Scheduling*. Utiliza instâncias criadas aleatoriamente e tem por objetivo maximizar a produção de petróleo.

Neves (2007) realizou uma abordagem para o PPSP propondo um algoritmo GRASP tradicional, uma Busca Tabu, um GRASP + MA (Memória Adaptativa) e uma *Iterated Local Search* (ILS), obtendo os melhores resultados nos dois últimos. O problema abordado não permite o aluguel de novas sondas. Foram utilizadas 10 instâncias geradas pelo próprio autor.

Ribeiro *et al.* (2012) trabalha com um problema similar ao PPSP que utiliza janela de tempo, onde o objetivo do problema é minimizar a perda de óleo. Para seu trabalho não é permitido o aluguel de novas sondas. O autor propõe o uso de três técnicas: *Iterated Local Search* (ILS), *Clustering Search* (CS) e *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS), sendo esta última a que obteve melhores resultados.

3. Algoritmo Memético Aplicado ao Problema da Programação das Sondas de Produção

Para o trabalho foi implementado um Algoritmo Memético clássico como descrito no trabalho de Radcliffe & Surry (1994). Nesta seção serão mostrados maiores detalhes da

implementação do algoritmo proposto para solucionar o problema abordado. Organiza-se da seguinte maneira: o item 3.1 define a forma como é representado um indivíduo; o item 3.2 explica como é realizada a avaliação da *fitness* de um indivíduo; o item 3.3 detalha como é o processo de criação dos indivíduos iniciais da população; o item 3.4 sintetiza a ideia da reprodução que foi utilizada; o item 3.5 trata sobre o processo de substituição dos indivíduos de uma população; o item 3.6 aborda o processo de mutação de um indivíduo; e o item 3.7 explica a busca local utilizada.

3.1 Representação de um Indivíduo

Um indivíduo é composto por uma lista contendo todas as sondas e cada uma destas sondas possui uma lista de poços a serem atendidos. Ou seja, o cromossomo não tem tamanho fixo, uma vez que o número de sondas de um problema é variável, já que existe a possibilidade de se alugarem novas sondas. Cada sonda é iniciada em um poço; caso seja uma sonda dedicada, este poço é definido na instância, caso esta sonda seja alugada, a posição inicial é o poço onde a mesma foi locada. Observa-se que cada poço só pode ser atendido exclusivamente por uma sonda, ou seja, não pode haver repetições. A Figura 1 exemplifica a estrutura de um indivíduo.

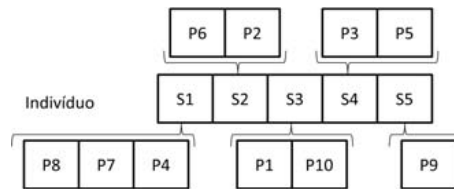


Figura 1 – Representação de um indivíduo

O indivíduo mostrado na Figura 1 pode ser lido da seguinte maneira: S1 P8 P7 P4 S2 P6 P2 S3 P1 P10 S4 P3 P5 S5 P9. Isto significa que a Sonda 1 (S1) atenderá os Poços 8, 7 e 4 (P8, P7 e P4) nesta ordem, assim é possível entender quais serão as atividades realizadas pelas demais sondas.

3.2 Avaliação da *Fitness* de um Indivíduo

A avaliação da *fitness* (também chamada de grau de aptidão) de um indivíduo é dada pela análise da perda de óleo de cada poço somada ao custo associado ao trabalho da sonda responsável por dar manutenção a este poço.

A perda de óleo de um poço pode ser calculada pela equação mostrada no item 2.1 e depende das variáveis: vazão de óleo do poço, momento em que um poço necessita de sondagem e momento em que se inicia a sondagem neste poço. Já o custo do atendimento de uma sonda, cuja equação também é mostrada no item 2.1, necessita das variáveis: custo de operação (por hora) da sonda e a duração da intervenção da sonda no poço (em horas).

Desta forma, para cada poço atendido por uma sonda, temos uma perda de óleo e um custo operacional para o atendimento do poço. A Figura 2 mostra um exemplo de como é avaliada a *fitness* de um indivíduo.

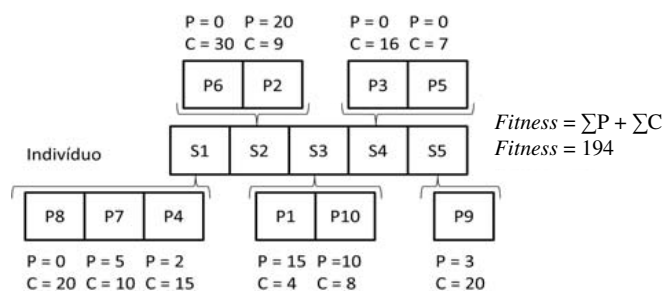


Figura 2 - *Fitness* de um indivíduo

Na Figura 2, considera-se que P é a variável responsável por armazenar a perda de óleo de um poço e a letra C o custo do atendimento realizado pela sonda àquele poço. Então, a aptidão de um indivíduo nada mais é do que o somatório de todas estas perdas e custos.

3.3 Geração do Indivíduo Inicial

Esta etapa utiliza-se de um processo semi-guloso para a criação do indivíduo. O processo de distribuição dos poços a serem atendidos pelas sondas dedicadas é mostrado na Figura 3.

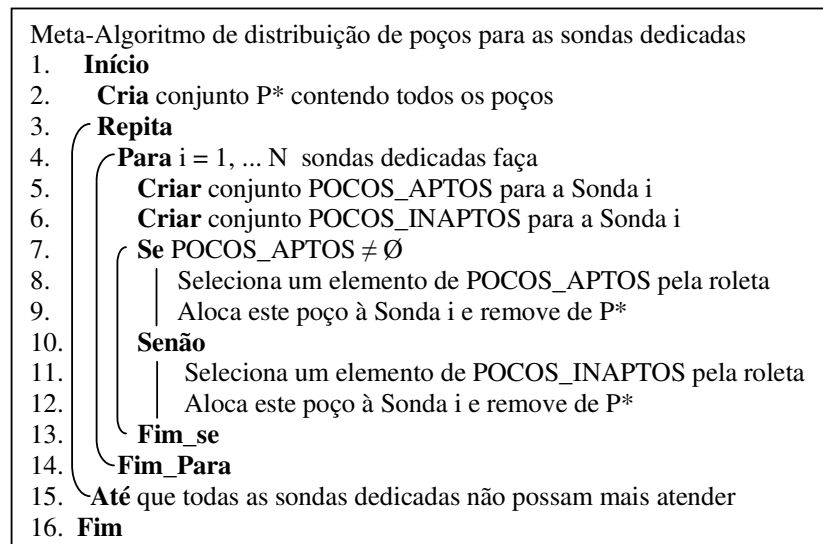


Figura 3 - Meta-Algoritmo de distribuição de poços para as sondas dedicadas

Dada a situação onde as sondas dedicadas não podem mais atender devido a restrição imposta pelo horizonte de tempo. Então existiria a necessidade do aluguel de sondas, aluguel este que tem um custo envolvido. O processo de aquisição de sondas alugadas é mostrado na Figura 4.

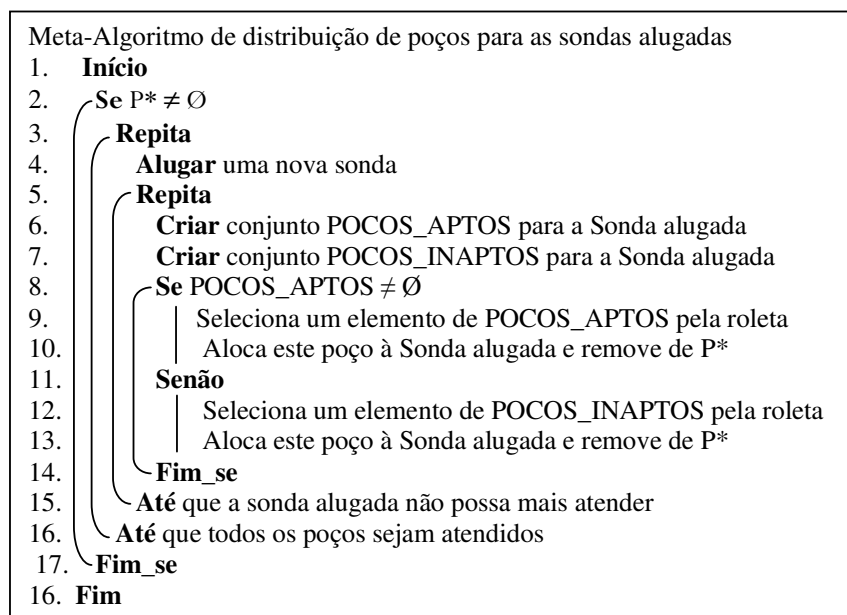


Figura 4 – Meta-Algoritmo de distribuição de poços para as sondas alugadas

É importante ressaltar que o conjunto *POCOS_APTOS* é composto de poços que podem ser atendidos, ou seja, será composto de poços em que após o deslocamento da sonda até o poço, o mesmo já esteja precisando de manutenção. Já o conjunto *POCOS_INAPTOS* possuirá os poços que não se enquadraram no conjunto *POCOS_APTOS*, ou seja, irá conter todos os poços que ainda não estão necessitando de manutenção.

3.4 Reprodução dos Indivíduos

A reprodução é uma das etapas do algoritmo de maior importância, pois nesta fase é que são misturados os materiais genéticos de cada cromossomo, ou seja, há a combinação de trechos de duas soluções, onde essas soluções que se combinam são denominadas de pais. As seleções dos pais *PaiA* e *PaiB* são feitas através do método da roleta, que dará maior probabilidade para a escolha de indivíduos que possuam o melhor valor de *fitness*, ou seja, mais aptos. A partir daí são sorteadas uma sonda de cada um dos pais (*PaiA* e *PaiB*), também a partir do método da roleta, mas neste caso a roleta dará prioridade para as sondas com maior perda de óleo e custos associados.

Como já citado anteriormente, cada sonda é responsável por dar atendimento a um grupo de poços, em seguida, então, é a etapa onde haverá a reconfiguração da ordem de atendimento dos poços em cada sonda. Este processo consiste, basicamente, em unir todos os poços em um único grupo, que será ordenado a partir da informação que define o momento em que os poços devem ser atendidos. A partir daí, os poços são realocados para as sondas em ordem sequencial. Ou seja, para o conjunto ordenado, os poços de índices ímpares serão atendidos pela sonda do *PaiA*, enquanto os de índice pares serão atendidos pela sonda do *PaiB*.

Após a realocação do atendimento das sondas aos poços, é necessário atualizar os valores das variáveis relativas às sondas (perda, custo, tempo, etc.), uma vez que existe a relação de dependência das informações de acordo com a ordem dos poços que foram atendidos, e esta ordem foi alterada.

O produto final da reprodução é a criação de dois novos filhos (*FilhoA* e *FilhoB*), onde o *FilhoA* possui basicamente a mesma estrutura que o *PaiA*, mudando apenas a ordem de atendimento dos poços da sonda selecionada e o *FilhoB* seria uma cópia do *PaiB*, mudando também apenas a sequência de poços da sonda.

Vale ressaltar que o método de reprodução proposto também verifica casos em que os indivíduos que foram gerados possuem repetições e ausências de poços. Nesse caso, são mantidos os poços adquiridos na reprodução e substituídos aqueles que já estavam na solução.

3.5 Substituição

Cada filho gerado é comparado com todos os outros indivíduos da população, a partir daí é criado um conjunto com todos os indivíduos que tenham um grau de aptidão pior do que o filho criado. Em seguida, é sorteado um indivíduo pelo método da roleta, priorizando os indivíduos com maior aptidão. Feito isto, então, este filho é integrado à população e o indivíduo sorteado é descartado da mesma.

3.6 Mutação

Seleciona-se um indivíduo da população utilizando o método da roleta, que dá mais chance aos indivíduos com pior grau de aptidão, na tentativa de melhorá-los. A partir daí, seleciona-se também pelo método da roleta uma sonda deste indivíduo. Vale ressaltar que as sondas com maior perda de óleo e custos de operação têm maior probabilidade de ser sorteadas.

Então, o processo de mutação é realizado analisando todas as possíveis combinações na ordem de atendimento dos poços desta sonda, feitas todas essas recombinações seleciona-se a melhor configuração encontrada, que se tornará o novo indivíduo gerado.

3.7 Busca Local

A busca local *3-swap* é uma etapa de intensificação proposta no trabalho que funciona da seguinte forma: um indivíduo é selecionado a partir do método da roleta, funcionando de forma a dar prioridade a indivíduos com pior aptidão.

Em seguida, são selecionadas três sondas *SONDA_1*, *SONDA_2* e *SONDA_3*, do indivíduo selecionado, a partir do método da roleta que dá mais chances a sondas com maior perda de óleo e custos associados.

O processo de busca local *3-swap* nada mais é do que a recombinação de todos os poços do indivíduo sorteado que estão sendo atendidos pelas sondas *SONDA_1*, *SONDA_2* e *SONDA_3*, guardando sempre a melhor configuração encontrada, como mostrado na Figura 5.

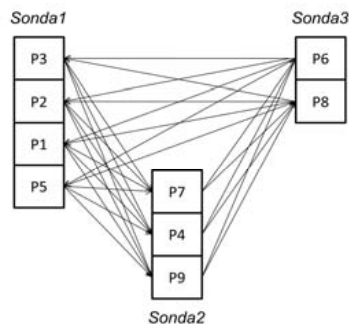


Figura 5 – Recombinações da busca local

4. Algoritmo GRASP Aplicado ao Problema da Programação das Sondas de Produção

Para o trabalho foi implementado um Algoritmo GRASP similar ao clássico apresentado por Feo & Resende (1995), com a diferença de que armazena-se um conjunto de soluções, ao invés de apenas a melhor solução de todas. Nesta seção serão mostrados maiores detalhes da implementação do algoritmo proposto para solucionar o problema em questão. Organiza-se da seguinte forma: o item 4.1 define como é feita a geração da solução inicial; e o item 4.2 explica a busca local utilizada.

4.1 Geração da Solução Inicial

O algoritmo de geração da solução inicial utilizado no GRASP proposto neste trabalho utiliza um processo similar ao que é usado na geração do indivíduo inicial para o Algoritmo Memético (ver item 3.3). A grande diferença, porém, está no tamanho dos conjuntos *POCOS_APTOS* e *POCOS_INAPTOS*, pois se utilizou a ideia da Lista Restrita de Candidatos (LRC). Ou seja, estes conjuntos possuirão tamanhos limitados a partir do número de elementos definidos por esta LRC.

A criação da LRC aplicada a este trabalho foi baseada na estratégia onde o número de elementos que irão compor os conjuntos *POCOS_APTOS* e *POCOS_INAPTOS* vai ser definido pela seguinte fórmula $p = 1 + \alpha (\lambda - 1)$, em que p é o número de elementos, λ é o número total de candidatos e α é um parâmetro que tem valores definidos no intervalo $[0, 1]$. Vale salientar que, se $\alpha = 0$, o algoritmo será totalmente guloso e se $\alpha = 1$, o algoritmo será completamente aleatório.

4.2 Busca Local

O método de busca local utilizado foi o *Path Relinking* que consiste em analisar todas as soluções intermediárias entre duas soluções de boa qualidade, procurando, com isso, encontrar uma terceira que seja melhor que as soluções base e alvo (Glover *et al.*, 2000). Seleciona-se, no conjunto de soluções, a melhor dentre elas, que será chamada de solução alvo. Então, o *Path Relinking* será aplicado sobre as demais soluções do conjunto, uma de cada vez, onde estas serão consideradas solução base. A busca local, que é efetuada para cada indivíduo é melhor observada na Figura 6.

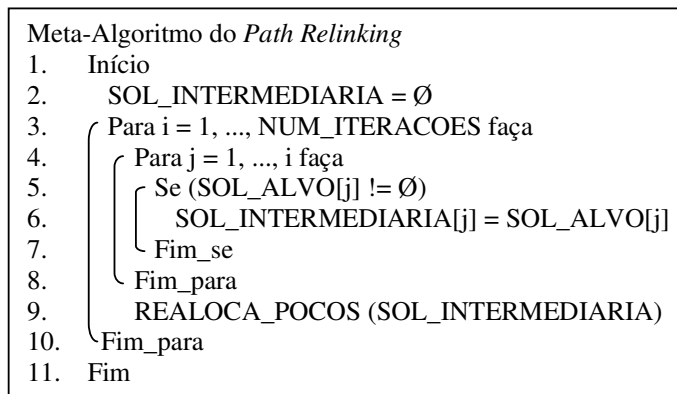


Figura 6 - Meta-Algoritmo do *Path Relinking*

Caso alguma das soluções intermediárias encontradas seja melhor que a solução alvo, então, depois de encerrado o processo de *Path Relinking*, esta solução se tornará a nova solução alvo para as próximas utilizações desta busca local.

5. Experimento Computacional

Todos os experimentos computacionais utilizaram máquinas com processador i3 Core 2ª geração (2.10 GHz), com 4 GB de memória, as implementações foram feitas em C++, o compilador foi o Dev-C++ e o sistema operacional foi o Windows 7 (64 bits). Nesta seção serão mostrados maiores detalhes dos experimentos, que se organiza da seguinte forma: o item 5.1 define como foram geradas as instâncias para o problema; e o item 5.2 mostra os resultados obtidos pelos Algoritmos Memético e GRASP, tal como os resultados obtidos pelo Algoritmo Memético quando submetido ao tempo computacional do GRASP e vice-versa.

5.1 Instâncias

Para a realização dos experimentos computacionais foram geradas 30 instâncias, cujo processo de criação não é completamente aleatório, uma vez que os dados utilizados são baseados em valores que apenas se aproximam dos que são aplicados à realidade do problema. O nome das instâncias se dá da seguinte forma, dada a instância S10P60T1, temos 10 sondas dedicadas, 60 poços para serem atendidos e o padrão usado para a distribuição dos tempos em que os poços necessitam de atendimento é de tipo 1. Além destes, outros parâmetros também variam nas instâncias, são eles: distância entre os poços, vazão dos poços e duração da intervenção nos poços. Considera-se que um barril possui 160 litros de óleo, o horizonte de tempo é de 4.320 horas, o custo operacional de uma sonda dedicada é de 1.100 unidades de custo por hora, o custo do aluguel de uma sonda é de 40.000 unidades de custo e o custo operacional de uma sonda alugada é de 800 unidades de custo por hora.

5.2 Resultados obtidos pelos Algoritmos Memético e GRASP

Nesta etapa experimental os algoritmos foram executados dez vezes para cada instância, obtendo uma média do desempenho dos mesmos. Houve uma etapa de ajuste de parâmetros bastante rigorosa para definir quais seriam os parâmetros usados por cada metaheurística.

Para o Algoritmo Memético foram usados os seguintes parâmetros: Número de iterações = 100 (condição de parada do algoritmo); Tamanho da população = 100 (quantidade de soluções que serão armazenadas); Taxa de reprodução = 0,3 (quantidade de indivíduos que irão reproduzir a cada iteração); Taxa de mutação = 0,1 (a probabilidade que um indivíduo tem de sofrer uma mutação); Taxa de busca local = 0,1 (esta taxa foi introduzida devido ao fato de que se as buscas locais fossem feitas em todos os indivíduos seria um processo muito custoso, então, esta taxa indica quantos indivíduos irão sofrer a intervenção de uma busca local a cada iteração).

Já para o GRASP foram usados os seguintes parâmetros: Número de iterações = 200 (condição de parada do algoritmo); Alfa (α) = 0,2 (indica o quão gulosas ou aleatórias serão as soluções geradas).

Além das execuções normais dos algoritmos, foram analisados dois casos: Caso 1 – Executar o GRASP com o tempo do Algoritmo Memético; e Caso 2 – Executar o Algoritmo Memético com o tempo do GRASP. Os resultados são mostrados na Tabela 1.

Instância	Caso 1			Caso 2		
	Alg. Memético		GRASP	Alg. Memético		GRASP
	Aptidão	Tempo (s)	Aptidão	Aptidão	Tempo (s)	Aptidão
S5P30T1	22108601	327,69	22574103	23299564	49,51	22654368
S5P30T2	20110228	324,05	20488792	20353986	100,44	20151980
S5P30T3	23098505	357,53	24108850	24387681	42,62	23993844
S10P60T1	42443230	1436,12	43668063	45048504	241,18	43650515
S10P60T2	41671180	1549,42	42452668	42533426	388,77	42661670
S10P60T3	50096224	1495,24	51730450	53970101	135,97	51722240
S15P90T1	65036356	3472,53	66657034	67836372	827,83	66754022
S15P90T2	64306041	3559,58	65510548	67305169	653,73	65426840
S15P90T3	64414773	3457,09	65688030	68189233	575,68	65599910
S20P120T1	79210028	6303,94	87336965	82357788	2624,58	80545380
S20P120T2	83641164	6632,78	84975645	85489692	2142,89	84876985
S20P120T3	88856368	6119,0	89321038	91613005	1619,47	90289526
S25P150T1	105332425	9337,76	105343596	108062571	3544,04	107098165
S25P150T2	114483440	8835,72	115672290	118584808	3113,97	115334494
S25P150T3	103664996	9459,57	114379292	107151896	3101,14	103737187
S30P180T1	132369066	12457,74	133541310	143781603	2596,99	133451256
S30P180T2	135938502	12413,37	135546071	144216086	3261,09	135317160
S30P180T3	138668795	11905,16	140044542	149647209	2357,76	140259348
S35P210T1	149361149	17140,19	149595358	151985690	10936,52	150553110
S35P210T2	155748953	16637,39	155001848	168529296	3486,45	155967896
S35P210T3	156206018	16663,42	157648891	166819031	4121,23	157606431
S40P240T1	164545169	21553,01	164603071	169872633	11365,09	181386800
S40P240T2	181507311	21400,43	181147168	195021612	5342,71	178730049
S40P240T3	178066960	21569,6	177291578	192184155	5295,99	177928880
S45P270T1	188712214	26651,45	191950866	197983529	12856,08	189473556
S45P270T2	208296122	25626,87	208001730	225592369	6690,55	208358190
S45P270T3	200084501	26076,27	234120386	203107088	15849,88	198769698
S50P300T1	208734303	33435,17	208921220	212856326	20945,95	223310094
S50P300T2	223786098	34056,27	222450694	233511915	14047,42	223691499
S50P300T3	219400442	33204,73	241566269	225069127	18319,66	220292921

Tabela 1 – Resultados obtidos pelos algoritmos

Para tentar analisar o quão uma solução é melhor que a outra, utilizou-se o teste estatístico de Mann-Whitney (1947). O teste estatístico de Mann-Whitney (U-teste) é utilizado para verificar a significância estatística dos resultados (CONOVER, 1999).

Para o Caso 1 foram obtidos 18 p -valores inferiores a 0,05, o que indica que o Algoritmo Memético obteve soluções de melhor qualidade em no mínimo 60% das instâncias. Já para o Caso 2 foram obtidos 23 p -valores inferiores a 0,05, o que indica que o GRASP obteve soluções de melhor qualidade em no mínimo 76,67% das instâncias.

6. Conclusões

O presente trabalho abordou a formulação e solução do Problema de Programação das Sondas de Produção (PPSP), um importante problema de aplicação à área do petróleo e gás. O objetivo da pesquisa foi desenvolver um modelo de formulação para o PPPS e realizar uma análise algorítmica de dois algoritmos experimentais elaborados para a solução desse modelo. Nesse sentido desenvolveu-se um experimento computacional sobre 30 diferentes instâncias e constituídas conforme descrito no item 5.1 e utilizando um algoritmo do tipo GRASP e um algoritmo Memético. Para tornar a comparação do desempenho dos algoritmos a mais justa possível, os algoritmos foram executados segundo o tempo de seu melhor desempenho e segundo o tempo associado ao melhor desempenho do algoritmo de comparação. Os resultados qualitativos não permitiram concluir, com segurança estatística, que o Algoritmo Memético ou o algoritmo GRASP possui desempenho significativamente superior. Verifica-se, todavia, que o algoritmo GRASP alcança boas soluções em tempos menores que os necessários ao algoritmo Memético. Todavia o algoritmo Memético obtém um melhor desempenho qualitativo quando é disponível um maior tempo de processamento.

Agradecimentos

A pesquisa relatada neste trabalho foi parcialmente suportada pelo programa PRH-ANP 22, Programa de Formação em Geologia, Geofísica e Informática no Setor Petróleo & Gás na UFRN e também pelo CNPq através dos projetos 302819/2011-8 e 300778/2010-4.

Referências Bibliográficas

- Borhcardt, M.** (2002), Algoritmos Evolucionários na Solução do Problema da Programação de Sondas de Produção, Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- Conover, W. J.** (1999), *Practical nonparametric statistics*, Third Edition, New York: John Wiley & Sons.
- Feo, T. A. & Resende, M. G. C.** (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, 6:109-133.
- Glover, F., Laguna, M., & Marti, R.** (2000). Fundamentals of scatter search and path-relinking. *Control and Cybernetics*, 29:653-684.
- Mann, H. B., & Whitney, D. R.** (1947), *On a test of Whether one of two random variable is stochastically larger than the other. Annals of Mathematical Statistics* 18.
- Neves, T. A.** (2007), Heurísticas com Memória Adaptativa Aplicadas ao Problema de Roteamento e Scheduling de Sondas de Manutenção, Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói/RJ.
- Radcliffe, N., & Surry, P.D.** (1994) Formal memetic algorithms, in: Selected Papers from AISB Workshop on Evolutionary Computing: 1-16.
- Ribeiro, G. M., Laporte, G., & Mauri, G. R.** (2012), *Comparison of threemetaheuristics for the workover rig routing problem. European Journal of Operational Research*, 220(1): 28-36.
- Thomas, J. E.** (2001), Fundamentos de Engenharia de Petróleo, Editora Interciência: Rio de Janeiro/RJ.