



OTIMIZAÇÃO DAS INTERVENÇÕES EM POÇOS DE PETRÓLEO POR SONDAS DE PRODUÇÃO TERRESTRE: BUSCA TABU

Rosierly da Silva Maia

DIMAP, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN),
Natal, RN 59072-970, Brasil
rosierly@dimap.ufrn.br

Cynthia Samara de Medeiros Gonzaga

DIMAP, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN),
Natal, RN 59072-970, Brasil
cynthia@engcomp.ufrn.br

Francisco Chagas de Lima Júnior

DME, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, (UERN),
Mossoró, RN 59633-010, Brasil
limajr@dimap.ufrn.br

Valnaide Gomes Bittencourt

DIMAP, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN),
Natal, RN 59072-970, Brasil
valnaide@engcomp.ufrn.br

Resumo:

É comum em campos petrolíferos terrestres existir um vasto número de poços requerendo o uso de mecanismos de elevação artificial. Conseqüentemente, serviços de manutenção realizados por sondas, como limpeza, restauração e estimulação, são indispensáveis aos poços a fim de mantê-los em atividade. Devido ao elevado custo operacional das sondas, o número destas é muito pequeno em relação ao de poços que solicitam intervenção. Sendo assim, é muito importante otimizar o gerenciamento das intervenções, definindo a melhor alocação “sonda – intervenção” objetivando maximizar a produção com menor custo. Portanto, é proposto neste trabalho métodos para solucionar este problema usando uma estratégia metaheurística baseada no modelo de otimização por Busca Tabu, que vem se mostrando bastante promissor quando aplicada em problemas nas mais variadas áreas.

Palavras-Chave: Intervenção em poços, Otimização Combinatória, Busca Tabu.

Abstract:

It is usual in terrestrial petroleum fields exist a vast number of wells requiring the use of artificial lift methods. Consequently, maintenance services accomplished by terrestrial production drills, such as cleaning, restoration and stimulation, are indispensable to wells to keep them in activity. Due to the high operational cost of these equipments, they are found in small numbers when compared to the amount of wells in need for their requests. As a result, it is very important to optimize the management of the interventions by defining the better allocation “drill-intervention” in order to maximize the production with lowest cost. Therefore, it is proposed in this paper, methods to solve this problem by using a metaheuristic strategy based on the optimization model by Tabu Search, which has proven to be very successful when applied in problems in many different fields.

Key- words: Intervention in wells, Combinatorial Optimization, Tabu Search



1. Introdução

O petróleo é a principal fonte primária de energia utilizada pelo homem contemporâneo. Portanto, é fundamental e estratégico o investimento em tecnologia com o intuito de racionalizar recursos e otimizar o desempenho das empresas produtoras de petróleo, aumentando sua produção de petróleo, visto que se trata de um recurso não renovável e com um tempo limitado para se exaurir da natureza.

A Bacia Potiguar de petróleo e gás, abrange aproximadamente 4.000 poços e tem participação de 10% em toda a produção nacional (ver [1]). Convém ressaltar que a exploração terrestre é composta na sua quase totalidade por poços não surgentes (98 % do total), isto é, poços que necessitam de alguma técnica artificial de elevação dos fluidos, tais como o bombeio mecânico (cavalo de pau), o bombeio por cavidades progressivas, o gás lift, dentre outros. Em consequência disso, serviços de manutenção nos poços com esses mecanismos tornam-se indispensáveis. Estes serviços são realizados por certas unidades móveis, denominadas Sondas de Produção Terrestre – SPT, que se deslocam no campo de petróleo fazendo as intervenções, quando necessárias, nos poços que necessitem de seus serviços. As SPT são acopladas em caminhões carretas especiais, atingindo em média uma velocidade de 60Km/h em asfalto e 30Km/h em estradas de barro.

Os poços, para poderem começar a funcionar, precisam de serviços de *Completação* (operação que deixa o poço pronto para produzir) e, ao longo do tempo, necessitam de intervenções, como por exemplo, limpeza, restauração, estimulação e avaliação. Esses serviços são realizados com o intuito de solucionar diferentes problemas operacionais que afetam a produção normal dos poços.

No entanto, nem sempre é possível o imediato atendimento aos poços petrolíferos da bacia potiguar terrestre o que pode ocasionar atrasos no cronograma de produção da reserva, e principalmente muitos desperdícios na produção de óleo. Sendo as sondas terceirizadas e possuindo um elevado custo operacional, dispõem-se apenas de um número limitado e reduzido de sondas, quando comparado à elevada quantidade de poços que necessitam de seu atendimento.

A decisão de qual sonda encaminhar a uma determinada solicitação de serviço depende de fatores, como por exemplo: o potencial produtivo do poço (vazão m^3/dia), a localização geográfica da sonda em relação ao poço, o tempo de intervenção no poço, as questões de risco ambiental e segurança e principalmente a limitação técnica das sondas em relação a profundidade dos poços, visto que a frota de sondas é não homogeneia.

Deste modo, respeitando os fatores citados acima, o que se tem é uma fila de poços solicitantes de manutenção e um pessoal esperando por um planejamento de utilização e requisição das sondas de tal forma que seja economicamente viável a relação custo/produção de petróleo nesta bacia.

Devido a fatores econômicos, o planejamento das intervenções em poços pelas Sondas de Produção Terrestre deve ser elaborado eficiente e racionalmente, de modo que os custos não justifiquem economicamente a não exploração de reservas e também sejam capazes de garantir a utilização em potencial dos equipamentos e uma escala de atendimento que melhor se ajuste aos interesses da empresa petrolífera, neste caso, a Petrobrás.

Tal problema pode ser visto como uma generalização do clássico *k-servos*, sendo, portanto, classificado como um problema NP-árduo, limitando com isso, a utilização de métodos exatos. Desse modo, para tentar solucionar este problema, ou seja, visando encontrar o melhor itinerário para a frota de sondas disponíveis de forma a minimizar o custo de atendimento das solicitações, e conseqüentemente, maximizar a produção média diária da bacia petrolífera, outros componentes do nosso grupo de pesquisa vem desenvolvendo algoritmos metaheurísticos, já que estes são estratégias aproximativas que fornecem bons resultados com um menor esforço computacional.

Bons resultados já foram alcançados, com implementações eficientes e sofisticadas, a partir da utilização das metaheurísticas GRASP, Colônia de Formiga e Algoritmos Genéticos (descritas em [3]). Recentemente, iniciamos o desenvolvimento de um algoritmo utilizando a Busca Tabu, para resolver este mesmo problema.



Inicialmente, fizemos a utilização de seus conceitos básicos e incorporamos a utilização de diferentes operações com vizinhanças para uma solução inicial (ver [2]). Para uma melhor compreensão das idéias utilizadas, organizou-se este paper da seguinte forma: A seção 2 descreve com detalhes o problema do gerenciamento das Sondas de Produção Terrestre e a seção 3 apresenta sua formulação matemática. Na seção 4, apresentamos o algoritmo da Busca Tabu proposto e na seção 5, mostramos os resultados computacionais, onde comparamos seu desempenho com outras metaheurísticas (ver [3]) desenvolvidas por outros componentes do nosso grupo de pesquisa. No fim deste paper, mostramos as referências bibliográficas.

Testes foram efetuados com instâncias geradas aleatoriamente, porém com dados baseados em valores reais do campo petrolífero. Com o intuito de avaliar o desempenho da implementação inicial desta metaheurística, é realizada uma comparação com algoritmos comprovadamente eficientes para o problema apresentado, baseado nas seguintes metaheurísticas: GRASP, Colônia de Formiga e Algoritmo Genético (ver [3]).

2. O problema do Gerenciamento das Sondas de Produção Terrestre

O problema de gerenciamento das SPT consiste em definir quais os poços, dentre aqueles que requerem intervenção, deverão preferencialmente ser atendidos, bem como fazer a melhor designação de sondas para tais atendimentos. Portanto, o resultado do nosso algoritmo deve fornecer m rotas, onde m é o número de sondas, uma para cada sonda disponível para operação.

Para tal implementação, nos são fornecidos: I) a matriz de distância mínima entre todos os poços da bacia petrolífera; II) a capacidade de produção de óleo de cada poço; III) a profundidade do poço; IV) a profundidade da sonda.

O algoritmo deve considerar que existem alguns poços que não podem ser atendidos por todas as sondas em decorrência de sua profundidade e que todos os poços que necessitam de atendimento devem estar presentes em apenas uma das rotas pertencentes a cada sonda.

Portanto, o objetivo é gerar uma rota de atendimento para cada sonda, a fim de minimizar o custo pelo atendimento das solicitações e, conseqüentemente, maximizar a produção média diária da bacia petrolífera, respeitando as presentes restrições.

O problema pode ser descrito na estrutura de um grafo não direcionado $G = G(N, E, C)$, onde N representa o conjunto de vértices (poços que requerem atendimento); E representa o conjunto das arestas $\{i, j\}$ conectando dois poços (uma estrada ligando dois poços); e C está associado aos custos de ir de um poço i para j ou vice-versa.

2.1. SPT e Literatura

O problema das Sondas de Produção Terrestre pode ser visto com similaridade em relação aos Problemas de Localização Competitiva. Neles, problemas de localização englobam um aspecto de operação dinâmica, aproximando-se de modelos de roteamento. Dentro dessa classe de problemas, destacamos o PKS (Problema dos K-Servos). Tal como no caso das SPT, existe um certo número de servos distribuídos sobre vértices sujeitos a um vetor de demanda. Deve-se, pois, planejar o deslocamento desses servos sobre os vértices de modo a atender á demanda e demais possíveis restrições, maximizando/minimizando uma determinada função. Difere-se dos problemas de roteamento por não caracterizarem rotas fechadas no grafo e permanecerem ocupando o último vértice visitado.

Com mais especificação, as diferentes abordagens para o PKS, como a de Múltiplos Servos (diferentes tipos de servos) e a dos K-Servos Ponderados (clientes necessitam de atendimentos com um dado tempo), identificam-se ainda mais com as SPT.



3. Formulação Matemática

Com o objetivo de avaliar a metaheurística proposta neste trabalho, apresentamos uma formulação matemática para o problema das Sondas de Produção Terrestre descrita em [4], onde se leva em consideração o relacionamento entre três entidades envolvidas no processo de intervenção em poços: Sonda (S_i), Intervenção (I_j) e a Ordem de atendimento (O_k) em que as sondas atende as solicitações de intervenção, de forma que uma solução viável do problema seja composta por n ternas do tipo $T=(S_i, I_j, O_k$



A restrição (2) garante que toda solicitação deve ser atendida e que não haverá duas ou mais configurações (ternas de atendimento do tipo $T=(S_i, I_j, O_k)$,) iguais. A restrição (3) por sua vez, determina que uma sonda só pode atender uma solicitação por vez. Perceba-se que existe uma disciplina na ordem de atendimento dos n poços pelas m sondas criando uma hierarquia de atendimento que determina que a alocação na posição k é prioritária, ou seja, a posição k precede $k+1$ na ordem de atendimento (restrição 4)



otimizar, tem associada uma vizinhança $N(x) \subset X$ e é através de um movimento que cada solução $x' \in N(x)$ é alcançada a partir de x (ver [6]).

Da mesma forma que a palavra tabu sugere algo proibido, ou pelo menos inibido, a Busca Tabu irá empregar estes significados ao classificar como proibidos os movimentos mais recentes no processo de busca, através de atributos, e armazená-los na lista tabu durante um certo tempo. Dessa forma, conduz-se a busca para regiões ainda não analisadas no espaço de busca, tendendo a evitar convergências da solução para um máximo/mínimo local. Para torná-la mais flexível, são empregados critérios de aspiração que são utilizados para decidir quando movimentos classificados como tabu podem ser executados.

Uma importante consideração na Busca Tabu é a diferenciação entre memória de curto e longo prazo. Cada tipo de memória é acompanhado pelas suas próprias estratégias (ver [5]). Entretanto, ambos os tipos de memórias podem ser analisados como modificadores da vizinhança $N(x)$ de uma corrente solução x .

A memória de curto prazo define a escolha dos atributos e a regra de ativação tabu, assim como o critério de aspiração. Já a memória de longo prazo utiliza as idéias de intensificação e diversificação na procura de soluções mais otimizadas. A intensificação encoraja a busca em regiões que parecem ter maiores chances de apresentar soluções de qualidade. A diversificação, por sua vez, encoraja a busca em regiões ainda inexploradas ou pouco exploradas.

Com base nessas idéias foi implementado um algoritmo onde para cada execução, estes conceitos são empregados em diversas soluções fornecidas pela heurística construtiva, o resultado final irá corresponder ao conjunto de rotas que fornecerem uma maior produtividade.

4.3. Memória de Curto Prazo

O aspecto mais comum da memória de curto prazo consiste em classificar como proibido ou tabu, os atributos que ocorrem em soluções recentemente visitadas durante a busca (ver [6]). No algoritmo desenvolvido, faz-se uso desta memória em dois momentos, na diversificação e na intensificação. Em ambos os casos, utilizou-se o critério de aspiração para dar uma maior flexibilidade a busca, que consistiu em desconsiderar a condição tabu sempre que os atributos proibidos conduzissem a uma solução melhor que a solução mais vantajosa até o momento.

4.5. Memória de Longo Prazo

Para implementar a memória de longo prazo, fez-se uso das idéias de diversificação e intensificação. A diversificação é realizada na fase da heurística construtiva através da utilização dos coeficientes α e β , gerados aleatoriamente com valores entre zero e um. Estes são aplicados na função de produtividade, cujos parâmetros são a vazão e o tempo, na seguinte forma:

$$\frac{\text{vazão}^\alpha}{\text{tempo}^\beta}.$$

A cada início de ciclo, valores para α e β são gerados randomicamente e verificados se pertencem à Lista Tabu. Caso eles não pertençam, passarão a integrá-la por um tempo pré-determinado em função da quantidade total dos ciclos do programa. Esta etapa permite que a busca parta para regiões ainda inexploradas no processo de busca.

Após a heurística construtiva fornecer uma solução inicial (já diversificada), inicia-se a intensificação que pode ser descrita em três etapas:

1. Busca por rotas vizinhas;
2. Permutação de poços entre sondas próximas;
3. Inserção e remoção entre sondas próximas.



Na primeira etapa, para cada rota pertencente as m sondas, é determinada sua vizinhança, que é gerada a partir de movimentos SWAP entre poços adjacentes. Uma vez escolhido para cada rota o vizinho que apresenta um menor custo, percebe-se que nessa etapa é utilizada uma memória de curto prazo cujos atributos consistem nos vértices correspondentes aos poços permutados, inicia-se a etapa 2 onde são realizados novamente movimentos SWAP entre as diversas rotas pertencentes a sondas próximas. Após determinar para cada, a rota que apresentar um melhor resultado, inicia-se a etapa 3, onde movimentos do tipo ADD e DROP são efetuados entre as rotas pertencentes a sondas vizinhas, com posterior escolha das rotas que apresentarem um melhor resultado.

5. Resultados Computacionais

São apresentados neste artigo resultados para instâncias com 100 e 299 poços. Todas as instâncias foram criadas seguindo critérios reais para a geração de dados, sendo a primeira proveniente de [1] e a segunda adaptada da TSPLIB (pr299). Para cada uma delas, 4 configurações distintas foram geradas, escolhendo-se aleatoriamente os poços a estarem presentes nas listas de solicitações de 20, 40 e 60% do universo total de poços, totalizando $2 \times 4 \times 3 = 24$ listas de solicitações com esses percentuais. A busca tabu proposta seguiu o mesmo período de tempo de execução (720s) das demais metaheurísticas apresentadas na Tabela 1. Cada uma das instâncias foi executada 10 vezes numa plataforma Pentium IV 1.2 GHz.

Adicionalmente, para GRASP e os algoritmos ACO utilizou-se um módulo de *path-relinking*. Esta estratégia de intensificação explora trajetórias entre soluções elite obtidas pelos algoritmos.

Tabela 1: Comparação dos resultados computacionais obtidos

Inst. 100	Metaheurística	60 %		40 %		20 %	
		Média	Tempo	Média	Tempo	Média	Tempo
02 Sondas	GRASP	1121.814	573.3	414.027	193.15	126.203	0
	GRASP Path relinking	1120.865	534.5	-	290.25	-	2.35
	Colônia_1	1121.211	390.3	414.428	120	126.470	0
	Colônia_1-Path relinking	1120.625	158.15	414.428	3.9	126.470	0
	Colônia_2	1121.274	282.3	413.649	47.4	126.203	0.15
	Colônia_2-Path relinking	1120.467	330.15	413.647	4.4	126.203	0
	Algoritmo Genético	1124.464	457.6	413.943	298.75	126.203	0
	Busca Tabu	1138.675	591	421,6983	206.95	127,8821	0
Inst. 299	Metaheurística	60 %		40 %		20 %	
		Média	Tempo	Média	Tempo	Média	Tempo
02 Sondas	GRASP	13610.535	529.2	6465.123	525.35	1598.931	506.15
	GRASP Path relinking	13608.115	442.55	6464.149	581.15	1598.505	459.2
	Colônia_1	13604.030	348.9	6463.004	347.65	1599.239	323
	Colônia_1-Path relinking	13594.640	666.95	6458.545	477.55	1599.100	177.3
	Colônia_2	13600.875	381.55	6462.189	393.05	1598.389	359.45
	Colônia_2-Path relinking	13598.520	651.9	6459.844	515.6	1598.193	192.65
	Algoritmo Genético	13626.320	432.95	6469.953	520.85	1599.232	435.3
	Busca Tabu	13695.7	658.9	6519.749	420.65	1610.273	454.4



Os parâmetros utilizados para o algoritmo de busca tabu são um tempo tabu estático de tamanho 50 na fase de diversificação, um tempo tabu estático de tamanho 3 na fase de intensificação e listas candidatas para cada uma das rotas, cujo tamanho consiste de seu número de poços menos 1. Vale ressaltar que a razão de se escolher um tamanho da lista tabu tão grande na fase de diversificação, deve-se ao fato de se desejar nessa fase escolher sempre diferentes soluções.

5.1. Análise dos Resultados

Os resultados destacados na tabela 1 mostram os melhores valores médios.

Apesar de a Busca Tabu não ter apresentado melhores resultados nos testes realizados, é possível comprovar-se a eficiência da mesma, uma vez que estamos comparando uma implementação bastante simples da Busca Tabu (sem a utilização de toda sua potencialidade) com outros algoritmos já muito trabalhados e testados, inclusive utilizando estratégias de *path-relinking*.

Teste com instâncias reais, de maior porte e com diferentes números de sondas estão sendo realizados juntamente com um aperfeiçoamento do algoritmo Tabu.

6. Agradecimentos

Agradecemos a todos os componentes do Laboratório de Programação Metaheurística (POMETH – Natal/RN) e ao FINEP/CTPETRO/Brasil, financiador desta pesquisa.

7. Referências

- [1] D. J. Aloise, C. A. Barros, J. A. Neves, L.S. Moura, B. W. Assmann and M. Souza, “A GRASP for a Oil Retrieval System” (ORS) (In Portuguese), Proc. Of the XXXII SBPO, Santos, São Paulo, Brazil, 2000.
- [2] A. T. Gómez, “Modelo para Sequenciamento de partes e ferramentas em um sistema de manufatura flexível com restrições às datas de vencimento e a capacidade do magazine”, 1996.
- [3] Lima Jr, F. C., Aloise, D. J., Maia, R. S., “Otimização do gerenciamento das intervenções de sondas de produção terrestre em poços de petróleo: uma abordagem por metaheurísticas”, Texto não publicado, 2002.
- [4] Lima Jr, F.C. “Otimização das intervenções em poços de petróleo por Sondas de Produção Terrestre: uma abordagem metaheurística”, Texto não publicado, 2002.
- [5] Glover, F. and M. Laguna (1997) *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [6] Laguna, M., *Tabu Search Tutorial*, II Escuela de Verano Latino-Americana de Investigación Operativa.