



SPOLM 2007

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 08 e 09 novembro de 2007.

ITERATED LOCAL SEARCH APLICADO AO PROBLEMA DE CONEXÃO E LOCALIZAÇÃO DE POÇOS, MANIFOLDS E PLATAFORMAS

Matheus de Souza A. Silva, Silas Sallaume, Marcio Tadayuki Mine, Luiz Satoru Ochi

Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156 – Bloco E – 3º Andar
24.210-240 – Niterói, Rio de Janeiro, Brasil
{[msalves](mailto:msalves@ic.uff.br), [ssallaume](mailto:ssallaume@ic.uff.br), [mmine](mailto:mmine@ic.uff.br), [satoru](mailto:satoru@ic.uff.br)}@ic.uff.br

Marcone Jamilson Freitas Souza

Universidade Federal de Ouro Preto
Campus Universitário – Morro do Cruzeiro
35.400.000 – Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil
marcone@iceb.ufop.br

Resumo

Este trabalho aborda o Problema de Conexão e Localização de Poços, *Manifolds* e Plataformas no processo de extração de petróleo em águas profundas. O objetivo principal é minimizar o número de *manifolds* e plataformas utilizadas para atender aos poços, além de minimizar o custo dos dutos utilizados na conexão de poços, *manifolds* e plataformas. Neste trabalho, o problema é abordado pela metaheurística *Iterated Local Search*, usando-se dois tipos de movimentos para explorar o espaço de soluções viáveis do problema. Testes computacionais empíricos mostram que a metodologia proposta é capaz de gerar soluções viáveis de boa qualidade para o problema, utilizando um conjunto reduzido de *manifolds* e plataformas para atender os poços.

Palavras-Chaves: Problema de localização e Alocação, *Iterated Local Search*, Otimização Combinatória, Metaheurísticas.

Abstract

This work approaches the Problem of Connection and Localization of Wells, Manifolds and Platforms in the process of extraction of oil in deep waters. The aim is to minimize the number of manifolds and platforms to support the wells, beyond minimize the cost of the ducts used in the connection of wells, manifolds and platforms. In this work, the problem is boarded by a metaheuristic, called *Iterated Local Search*, using two types of movements to explore the space of feasible solutions of the problem. Empirical computational tests show that the proposed methodology is able to generate feasible solutions of good quality for the problem, using a reduced set of manifolds and platforms to support the wells.

Keywords: Location and Assignment Problem, *Iterated Local Search*, Combinatorial Optimization, Metaheuristics.

1. INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo foi um dos pilares do desenvolvimento capitalista no século XX e a importância econômica do petróleo e seus derivados para as matrizes energéticas dos países, tornou a indústria do petróleo uma peça chave para as políticas de desenvolvimento econômico. Ainda hoje, as empresas de petróleo se situam entre as maiores empresas do mundo em termos de faturamento e as estatais de países com grandes reservas, aproveitando de monopólios institucionais e de aporte financeiro do Estado, ingressaram neste seleto rol. Os produtos originários do petróleo são utilizados no setor produtivo, transportes, residências, são insumos na indústria química, petroquímica e de fertilizantes, além de movimentar um conjunto de empresas acima na cadeia produtiva [6].

O petróleo é um recurso natural abundante, porém não renovável e sua pesquisa e extração envolvem elevados custos e complexidade de estudos. Para extrair o petróleo do fundo do mar é necessário um conjunto de equipamentos modernos e extremamente onerosos que são responsáveis por uma parcela significativa dos custos envolvidos nesse processo. O processo de extração do petróleo consiste em retirá-lo dos poços submarinos ou subterrâneos e transportá-lo por meio de dutos até os locais de armazenamento, denominados de plataformas. Dessas plataformas, a matéria-prima é transportada para as refinarias onde se transforma no produto final.

Neste tipo de poços anteriormente, o transporte era feito diretamente entre os poços e a plataforma, isto é, os dutos iniciavam nos poços e chegavam diretamente às plataformas. Contudo esse tipo de transporte possui alguns problemas, como por exemplo, o custo de construção de dutos para poços distantes das plataformas. Como o número de plataformas é muito inferior ao número de poços, vários poços podem se localizar longe das plataformas. O custo da construção desses dutos é alto, pois eles precisam suportar os impactos e as pressões submarinas. Por esse motivo, pode se tornar inviável extrair petróleo de um poço que esteja muito distante da plataforma, devido aos custos operacionais envolvidos.

Outro problema de se conectar os poços diretamente às plataformas diz respeito à capacidade das plataformas. Cada plataforma possui um número máximo de vias para os dutos vindos dos poços. Neste contexto, como o número de poços é muito superior ao número de plataformas na alternativa de conectar cada poço diretamente a uma plataforma, torna-se necessário a construção de várias plataformas para conseguir atender a todos os poços. O grande problema de se construir várias plataformas está no elevado valor de sua construção.

Atualmente existem alguns equipamentos intermediários, denominados de *manifolds* que permitem a conexão de vários poços a eles, sendo que apenas um duto sai de cada *manifold* para se conectar às plataformas. Com a utilização dos *manifolds*, pode-se reduzir significativamente a quantidade de plataformas utilizadas. A utilização de *manifolds* é recomendada quando se reúnem diversos poços em uma mesma região e longe da plataforma de processo, ganhando com a redução do número de dutos submarino. Sua vantagem é reduzir o custo do sistema, pois, ao invés de diversos dutos ligando os poços individualmente à plataforma, teremos apenas um duto coletor, reduzindo também as cargas na plataforma [7].

De acordo com a explicação anterior, vários aspectos importantes devem ser levados em consideração quando se trata do processo de extração do petróleo. O primeiro aspecto diz respeito à quantidade de *manifolds* que são necessários para interligar os poços às plataformas. Devido ao custo da construção ser elevado, para que seja vantajosa a utilização de um *manifold*, é necessário que ele tenha sua utilização máxima, isto é, que a maioria de suas entradas para os dutos vindos dos poços estejam sendo utilizadas.

O segundo ponto a ser levado em consideração é sobre a localização desses *manifolds* em relação aos poços e às plataformas. É necessário encontrar um bom posicionamento para o *manifolds* que leve em consideração tanto a distância deles para os poços que estão se conectando a eles quanto a distância deles para a plataforma que eles se conectam, pois o custo do duto que o liga à plataforma é maior que o custo do duto que liga os poços a ele.

O terceiro aspecto é em relação à quantidade de plataformas que serão utilizadas para atender a certa quantidade de *manifolds* e poços. Sabe-se que o custo de construção de uma plataforma é aproximadamente duas vezes o custo de construção de um *manifold*. Da mesma maneira que os *manifolds*, é necessário que a utilização das plataformas seja maximizada, isto é, que todas as suas entradas sejam utilizadas por dutos vindos de *manifolds* ou de poços.

E por último, é necessário também determinar a melhor localização para as plataformas de modo que se possa minimizar a extensão dos dutos vindos dos poços e dos *manifolds* que chegam a ela.

Esta flexibilidade na localização de plataformas e *manifolds* bem como o difícil problema da forma de conectar poços a *manifolds* ou plataformas caracterizam este problema como uma extensão de problemas clássicos da área de otimização combinatória tais como: O Problema de Localização e Alocação; Problema do Caixeiro Viajante com Distancias Variáveis entre outros. Como estes problemas estão classificados como NP-Completo ou NP-Difícil, o problema aqui abordado também faz parte desta classe de problemas.

A sociedade atual ou sociedade da informação é extremamente dependente da utilização de petróleo para o seu desenvolvimento. Como se trata de um combustível fóssil e, portanto, de uma fonte de energia não-renovável, suas reservas estão sendo esgotadas gradativamente. Apesar dos sérios impactos causados ao meio ambiente, sua alta viabilidade econômica faz com que ele continue sendo explorado.

Sendo assim, os problemas de alocação de poços aos *manifolds* e plataformas e de localização de *manifolds* e plataformas são importantes para que se possa tirar o máximo proveito, devido ao alto custo dos equipamentos. Não existe nenhum trabalho na literatura de nosso conhecimento que trate desses problemas. Portanto, a sua resolução torna-se desafiadora uma vez que o problema ainda não foi explorado, mas por outro lado, abre-se um enorme leque para trabalhos de pesquisa.

Este trabalho apresenta uma metodologia utilizando conceitos de metaheurísticas e otimização em grafos para resolver o problema de conexão e localização de poços, *manifolds* e plataformas. O método consiste em gerar uma solução inicial por um procedimento híbrido composto de duas fases. Na primeira fase, determina-se a quantidade e a localização dos *manifolds* e plataformas. Na segunda fase, aplica-se uma modelagem de programação linear, baseado no clássico problema de transporte, para determinar qual plataforma ou *manifold* cada poço irá se conectar. A seguir, a solução inicial é refinada pela metaheurística *Iterated Local Search* a qual considera para exploração do espaço de soluções, dois tipos diferentes de movimentos.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ABORDADO

Este trabalho aborda o *Problema de Conexão e Localização de Poços, Manifolds e Plataformas (PCL-PMP)*, que pode ser definido da seguinte forma:

Seja $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ um conjunto de n poços, $M = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}$ um conjunto de m locais possíveis a serem instalados os *manifolds* e $T = \{t_1, t_2, \dots, t_w\}$ um conjunto de w locais possíveis a serem instaladas as plataformas. O principal objetivo desse problema é a de estabelecer uma conexão otimizada entre os poços, plataformas e *manifolds* determinando simultaneamente a localização ideal e quantidades ótimas de *manifolds* e plataformas de forma a minimizar tanto os custos de conexão (dutos) quanto os custos de instalação.

Este problema possui as seguintes características:

- um poço encontra-se em uma coordenada (x, y) de um espaço bidimensional, onde $x, y \geq 0$;
- um *manifold* pode ser instalado em uma coordenada $m_i = (x_i, y_i) \in M$;
- uma plataforma pode ser instalada em uma coordenada $t_i = (x_i, y_i) \in T$;
- cada *manifold* e plataforma possui um custo de instalação CM e CT respectivamente;

- existem dois tipos de dutos α e β . O duto α conecta um poço à um manifold e possui um custo $cd_\alpha > 0$ por km e o duto β conecta um poço ou manifold à uma plataforma e possui um custo $cd_\beta > cd_\alpha$ por km;
- cada manifold e cada plataforma possuem um número máximo de entradas de dutos, denotados por nem e net , respectivamente;
- um manifold possui uma única saída para a plataforma.

No PCL-PMP é necessário satisfazer às seguintes restrições descritas a seguir. Nessas restrições, a expressão “a origem conecta-se ao destino”, significa que existe um duto que está conectado na saída de uma *origem* (poço/manifold) e em uma entrada de um *destino* (manifold/plataforma).

- um poço conecta-se a somente um manifold ou a uma plataforma;
- um manifold conecta-se a somente uma plataforma;
- o número máximo de poços que conectam-se a um mesmo manifold não pode ser superior ao número máximo de entradas desse manifold (nem);
- o número máximo de poços ou manifolds que conectam-se a uma mesma plataforma não pode ser superior ao número máximo de entradas dessa plataforma (net);
- não é permitido interseções entre os dutos;
- os dutos não podem atravessar poços, manifolds ou plataformas;
- e um poço, manifold ou plataforma não podem estar localizados em uma mesma coordenada.

3. METODOLOGIA

Nesta sessão, apresentamos uma proposta de solução aproximada do PCL-PMP utilizando conceitos de metaheurísticas e otimização em grafos.

3.1. REPRESENTAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO

Uma solução é representada por um grafo não direcionado $g=(v,a)$, onde v representa o conjunto dos poços, *manifolds* e plataformas (vértices) e A representa o conjunto de dutos (arestas) que conectam os poços, plataformas e *manifolds* entre si. Cada vértice é constituído de uma coordenada (x,y) de um espaço bidimensional. A aresta que conecta um poço a um *manifold* representa um duto do tipo α e as arestas que conectam a uma plataforma representam dutos do tipo β .

A Figura 1 exemplifica uma solução para um problema envolvendo 9 poços.

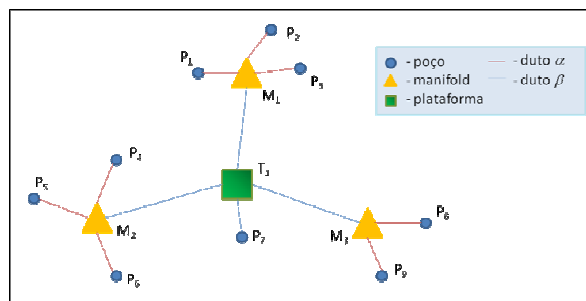


Figura 1: Exemplo de uma solução.

De acordo com a Figura 1, foram utilizados 3 *manifolds* e 1 plataforma. Os poços P1, P2 e P3 estão ligados ao *manifold* M1, os poços P4, P5 e P6 estão ligados ao *manifold* M2, os poços P8 e P9 estão ligados ao *manifold* M3 e o poço P7 está ligado diretamente à plataforma T1 assim como os *manifolds* M1, M2 e M3. A localização de cada objeto é uma informação

contida em cada vértice e o tipo de duto utilizado pelas ligações pode ser facilmente identificado analisando-se o tipo dos vértices que estão sendo ligados.

3.2. FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO

Uma solução do PCL-PMP é avaliada pela função f apresentada pela fórmula (1):

$$f(s) = q^M \times CM + q^T \times CT + \sum_{p \in D^\alpha} cd_\alpha \times custo(duto_p) + \sum_{q \in D^\beta} cd_\beta \times custo(duto_q) + \sum_{r \in C} \omega_r \times inv_r \quad (1)$$

em que: $f(s)$: função de avaliação;
 q^M : quantidade de Manifolds utilizados;
 q^T : quantidade de plataformas utilizadas;
 D^α : conjunto de dutos do tipo α utilizados;
 D^β : conjunto de dutos do tipo β utilizados;
 $custo(duto_j)$: comprimento do duto $j \in D^\alpha \cup D^\beta$;
 C : conjunto de restrições descritas na Seção 2;
 ω_r : penalidade por desrespeitar a restrição $r \in C$;
 inv_r : número de vezes que a restrição $r \in C$ está sendo desrespeitada.

3.3. GERAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO INICIAL

Para construir uma solução inicial para o PCL-PMP, propõe-se um procedimento de duas etapas. A primeira etapa, descrita na Seção 3.3.1, consiste em determinar a localização e a quantidade de *manifolds* e plataformas e a segunda, apresentada na Seção 3.3.2, consiste em efetuar a conexão dos dutos através de uma modelagem de programação linear, baseada no Problema de Transporte (PT). Essa metodologia, no entanto, não garante a geração de uma solução factível, pois esta pode conter interseções entre dutos. Esse problema é corrigido posteriormente através da heurística de refinamento proposta na Seção 3.5.

3.3.1. Determinação da Localização e Quantidade dos *Manifolds* e Plataformas

Para determinar a localização e a quantidade dos *manifolds* e das plataformas, propõe-se um método que consiste em particionar a área onde se localiza os poços em subáreas retangulares de mesmo tamanho contendo no máximo v poços, sendo $v \leq \lceil \pi \times nem \rceil$, onde π refere-se a uma porcentagem adicional de poços que as subáreas podem ter. O processo de divisão das subáreas só termina quando cada região possuir no máximo v poços. A cada partição, alterna-se o tipo de divisão, sendo a divisão ora vertical e ora horizontal. Em cada uma dessas subáreas será instalado um *manifold* no centróide dos poços pertencentes à subárea. Para determinar a quantidade e localização das plataformas, percorre-se toda a grande área onde se encontra os poços e *manifolds* e a cada k *manifolds* encontrados, instala-se uma plataforma no centróide desses *manifolds*, sendo $k = \lceil \lambda \times net \rceil$ e λ refere-se a uma porcentagem do número de entradas de uma plataforma.

Para exemplificar a primeira etapa do procedimento, considere um exemplo envolvendo dez poços. Considere, nesse exemplo, que $nem = 3$ e $net = 4$. A Figura 2 mostra a área onde se localizam os poços:

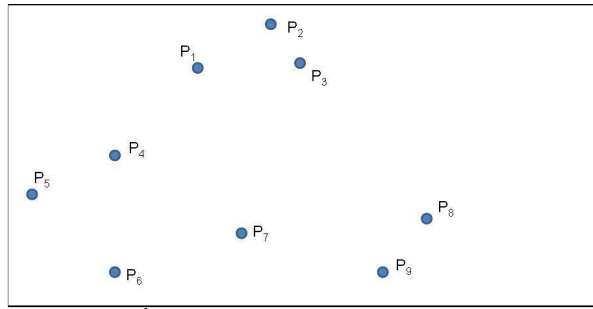


Figura 2: Área inicial onde se localizam os poços.

De acordo com a Figura 2, verifica-se que a área apresentada possui uma quantidade de poços superior à quantidade de entradas de um *manifold*. Portanto, será preciso dividir essa área em duas subáreas, dividida verticalmente. A Figura 3 exemplifica essa divisão.

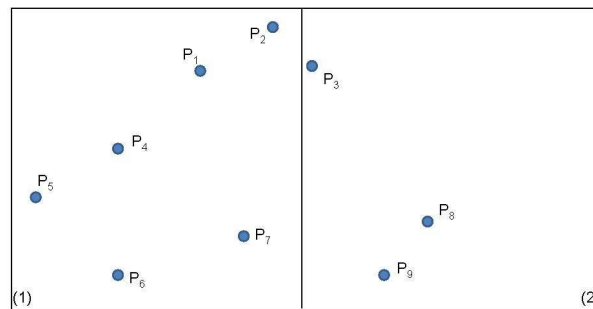


Figura 3: Divisão da área inicial.

De acordo com a Figura 3, como a subárea (1) possui um número superior de poços em relação ao número de entradas de um *manifold*, ela será dividida horizontalmente. Já a subárea (2) possui um número de poços igual ao número de entradas de um *manifold* e, portanto, não será necessário dividi-la. A Figura 4 mostra a nova divisão da subárea (1).

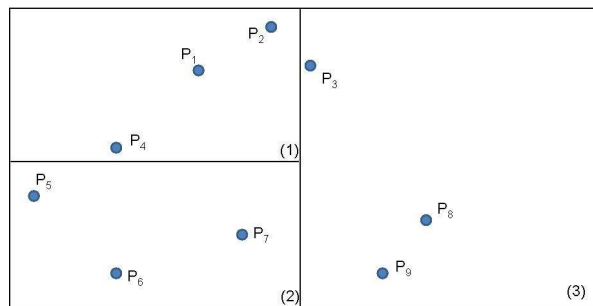


Figura 4: Divisão da subárea (1) da Figura 3.

Em relação à Figura 4, pode-se verificar que o número de poços de cada subárea (1) e (2) é menor ou igual ao número de entradas do *manifold*. Dessa forma, não será necessário realizar mais divisões. O próximo passo é determinar a localização dos *manifolds* em cada subárea. Como dito anteriormente, os *manifolds* são posicionados no centróide dos poços pertencentes à subárea. A Figura 5 mostra os *manifolds* já posicionados nas subáreas.

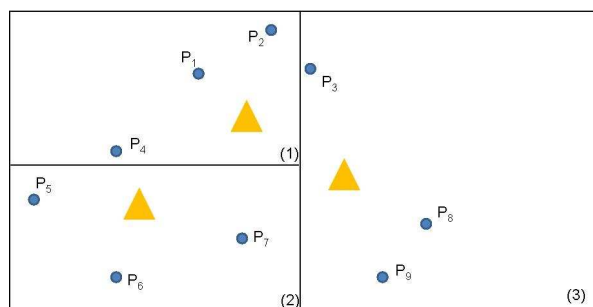


Figura 5: Posicionamento dos *manifolds*

Por fim, para determinar a posição e a quantidade de plataformas que serão utilizadas para atender aos poços e *manifolds*, ordena-se, em ordem não decrescente, o conjunto de *manifolds* de acordo com uma orientação (eixo das abscissas, ordenadas ou ambos). Em seguida, realiza-se o seguinte procedimento: selecionam-se os k primeiros elementos desse conjunto, onde $k = \lceil \lambda \times net \rceil$ e $\lambda \in (0,1]$ é relativo à porcentagem do número de entradas de uma plataforma (*net*). Assim, adiciona-se uma plataforma no centróide desses k *manifolds* e repete-se esse procedimento até não haver mais *manifolds* a serem selecionados. Nesse exemplo, considera-se que o parâmetro $\lambda = 0.75$ e, portanto, $k = 3$. Como só foram adicionados três *manifolds*, então será necessário apenas uma plataforma. A Figura 6 ilustra a plataforma posicionada (quadrado em verde).

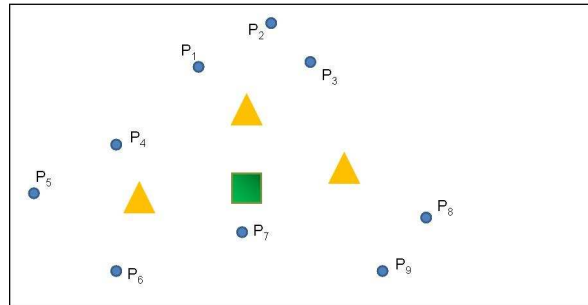


Figura 6: Posicionamento da plataforma

3.3.2. O Problema de Transporte

Na geração de uma solução inicial, a conexão dos dutos é resolvida através de um modelo baseado no Problema de Transporte (PT) [1]. O PT é um problema clássico de programação linear e consiste em planejar a distribuição de um *produto*, disponível em quantidades limitadas e em determinados locais (*origens*), para sumidouros (*destinos*), de forma a minimizar os custos envolvidos com o transporte desses produtos.

Considera-se, no PT, que existem μ origens, nos quais são disponibilizados os produtos em quantidades fixas $a_i > 0$ (oferta) com $i = 1, \dots, \mu$ e η destinos, os quais necessitam desse produto em quantidades fixas $b_j > 0$ (demanda) com $j = 1, \dots, \eta$. Cada produto possui um custo unitário de transporte c_{ij} e as demandas devem ser totalmente satisfeitas e as ofertas devem ser completamente consumidas, ou seja, o total das ofertas deve ser igual ao total das demandas. Formalmente, pode-se definir o PT da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & \sum_{i=1}^{\mu} \sum_{j=1}^{\eta} c_{ij} x_{ij} \\ \text{Sujeito a} \quad & \sum_{j=1}^{\eta} x_{ij} = a_i \quad \forall i = 1, \dots, \mu && \text{(restrições de oferta)} \\ & \sum_{i=1}^{\mu} x_{ij} = b_j \quad \forall j = 1, \dots, \eta && \text{(restrições de demanda)} \\ & x_{ij} > 0 \quad \forall i = 1, \dots, \mu \wedge \forall j = 1, \dots, \eta && \text{(restrições de integralidade)} \end{aligned}$$

No PCL-PMP, os dutos são conectados através de um procedimento de duas fases. A primeira consiste em conectar os poços aos *manifolds* ou plataformas e a segunda consiste em conectar os *manifolds* às plataformas. Ambas as fases utilizam a modelagem do PT.

Na primeira fase, as origens do PT são os poços e os destinos são os *manifolds* e as plataformas (se existir conexão direta). A oferta de cada poço é de uma unidade e as demandas dos *manifolds* e das plataformas são iguais ao número de entradas disponíveis (*net*)

e *net*, respectivamente). Os custos das arestas que ligam as origens e os destinos são:

$$c_{ij} = \begin{cases} dist_{ij}cd_{\alpha} & \text{caso o destino } j \text{ seja um } manifold \\ dist_{ij}cd_{\beta} & \text{caso o destino } j \text{ seja uma plataforma} \end{cases}$$

onde $dist_{ij}$ é a distância euclidiana entre a origem e o destino.

Como, geralmente, o total de entradas (TE) dos *manifolds* e das plataformas são superiores ao número de poços, deve-se criar uma origem artificial, que se conecta com todos os *manifolds* e as plataformas e cuja demanda seja a diferença entre o total de entradas dos *manifolds* e plataformas e o número de poços. Na segunda fase, as origens são os *manifolds* e os destinos são as plataformas. A oferta de cada *manifold* é de uma unidade e a demanda de uma plataforma é o seu número de entradas disponíveis. Caso não existam entradas disponíveis para uma plataforma, essa deve ser removida. O custo de transporte será $c_{ij} = dist_{ij}cd_{\beta}$, onde $dist_{ij}$ é a distância do *manifold* i à plataforma j . A Figura 7 ilustra o resultado final da execução do método de geração da solução inicial para o exemplo apresentado na Seção 3.3.1.

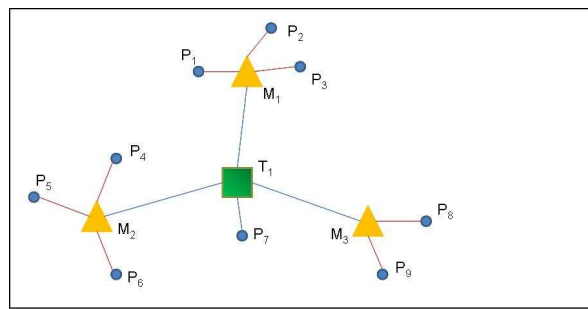


Figura 7: Solução Inicial gerado pelo PT

Na Figura 7, os poços P_1 , P_2 e P_3 estão ligados ao *manifold* M_1 , os poços P_4 , P_5 e P_6 estão ligados ao *manifold* M_2 , os poços P_8 e P_9 estão ligados ao *manifold* M_3 e o poço P_7 está ligado diretamente à plataforma T_1 . Os *manifolds* M_1 , M_2 e M_3 estão ligados à plataforma T_1 .

3.4. ESTRUTURAS DE VIZINHANÇA

Para resolver o PCL-PMP foram desenvolvidas duas estruturas de vizinhança que possuem a capacidade de reduzir a presença de interseções entre os dutos. A primeira estrutura de vizinhança, N^1 , gera soluções vizinhas através do movimento de realocação. A segunda estrutura de vizinhança, N^2 , é constituída pelo movimento de deslocamento.

O movimento realocação consiste em substituir uma conexão existente entre objetos i e j , por uma que conecte o objeto i não mais com j , e sim com o objeto $k \neq j$, de modo a gerar uma solução vizinha da original. Para que a substituição de uma conexão seja realizada, dado um objeto i , elimina-se sua conexão com o objeto j o qual ele está ligado e um novo objeto k é escolhido para ocupar o lugar de j . Dessa forma, constitui-se então, uma conexão entre i e k . Este movimento pode ser utilizado nos três diferentes tipos de conexões, substituindo-as conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Substituição de conexões pelo movimento de realocação.

Tipo da Conexão	Tipo da Nova Conexão
Poço → <i>Manifold</i>	Poço → <i>Manifold</i> ou Poço → Plataforma
Poço → Plataforma	Poço → Plataforma ou Poço → <i>Manifold</i>
<i>Manifold</i> → Plataforma	<i>Manifold</i> → Plataforma

A Figura 8 ilustra a aplicação do movimento de realocação na solução apresentada na Figura 7 para a conexão referente ao poço P_7 com a plataforma T_1 .

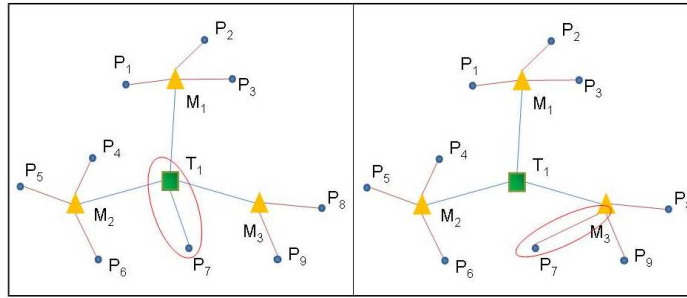


Figura 8: Aplicação do movimento de realocação.

No exemplo mostrado na Figura 8, o movimento de realocação substituiu a conexão do tipo Poço→Plataforma, entre o poço P_7 e a plataforma T_1 , pela nova conexão do tipo Poço→Manifold, entre o poço P_7 e o manifold M_3 .

O movimento de deslocamento por seu turno, consiste em deslocar espacialmente um manifold ou uma plataforma em $kdist$ unidades em uma determinada direção. A Figura 9 mostra a aplicação do movimento de deslocamento do manifold M_2 para a direita na solução apresentada na Figura 7. Nesse caso, a aplicação desse movimento resultou no deslocamento do manifold M_3 para a direita.

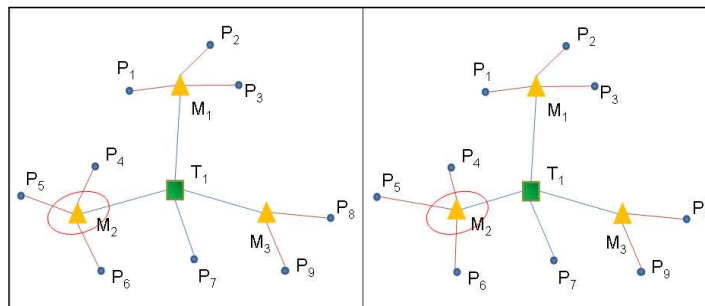


Figura 9: Aplicação do movimento de deslocamento.

3.5. REFINAMENTO DA SOLUÇÃO

Para refinar a solução inicial utiliza-se o método híbrido, *ILS-MRD*, proposto por [10], composto pela metaheurística *Iterated Local Search (ILS)* [6] e pelo Método Randômico de Descida (*MRD*), sendo este usado como um método de busca local para o *ILS*. O pseudocódigo do algoritmo *ILS-MRD* adaptado ao PPJE é apresentado na Figura 10.

```

Procedimento ILS-MRD
 $s_0 \leftarrow \text{SolucaoInicialAleatoria}$ 
 $s \leftarrow \text{MRD}(s_0, \text{IterMRD})$ 
 $kp \leftarrow kp_0$ 
 $iter \leftarrow 0$ 
enquanto ( $kp < kp_{max}$ )
  enquanto ( $iter \leftarrow \text{melhorIter} < iter_{max}$ )
     $iter \leftarrow iter + 1$ 
     $s' \leftarrow \text{perturbacao}(s, kp)$ 
     $s'' \leftarrow \text{MRD}(s', \text{IterMRD})$ 
    se ( $f(s'') < f(s)$ ) faça
       $s \leftarrow s''$ ;  $\text{melhorIter} \leftarrow iter$ ;  $kp \leftarrow kp_0$ 
    fim-se
  fim-enquanto
   $kp \leftarrow kp + \text{delta}$ 
fim-enquanto
retorne  $s$ 

```

Figura 10: Algoritmo *ILS-MRD*

O algoritmo ILS-MRD inicia-se com uma solução aleatória, s_0 , gerada pelo método descrito na Seção 3.3. Em seguida, aplica-se um procedimento de busca local, o MRD. Nesse método escolhe-se aleatoriamente um tipo de movimento (dentre os apresentados na Seção 3.4) e, a partir dele, é gerado um vizinho aleatório. No caso do movimento de deslocamento, é definido uma probabilidade p_{Manifold} e $p_{\text{Plataforma}}$ para que seja escolhido o tipo de objeto a ser deslocado (*manifold* ou plataforma) e a direção que esse objeto será deslocado é aleatória. Se o vizinho gerado melhorar a solução corrente, ele passa a ser a nova solução corrente; caso contrário, outro vizinho é gerado. O método MRD pára quando um número máximo de iterações sem melhora (*IterMRD*) for atingido. A cada iteração do método ILS gera-se uma perturbação na solução corrente. Essa perturbação consiste em realizar k movimentos em uma estrutura de vizinhança, sendo k um número arbitrário entre 1 e kp . A essa nova solução vizinha s' aplica-se o MRD, gerando uma solução vizinha ótima local, s'' . Se a solução s'' for melhor que a solução s corrente, então s'' é aceita como a nova solução corrente e reinicia-se kp . Essa repetição é executada até que $iter_{max}$ iterações sem melhora sejam realizadas. Quando isso ocorre, incrementa-se kp , em um fator *delta*, até que este atinja seu valor máximo (kp_{max}).

4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

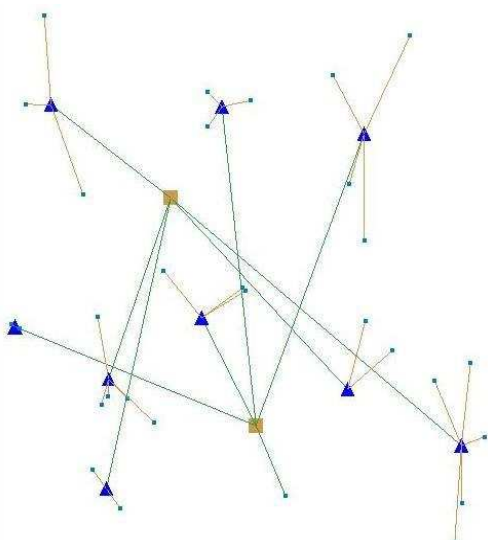
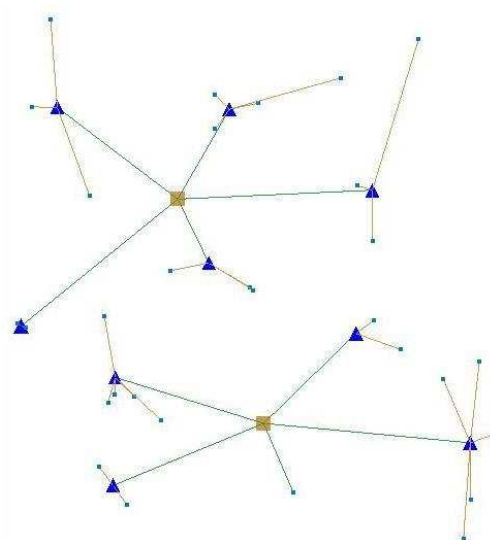
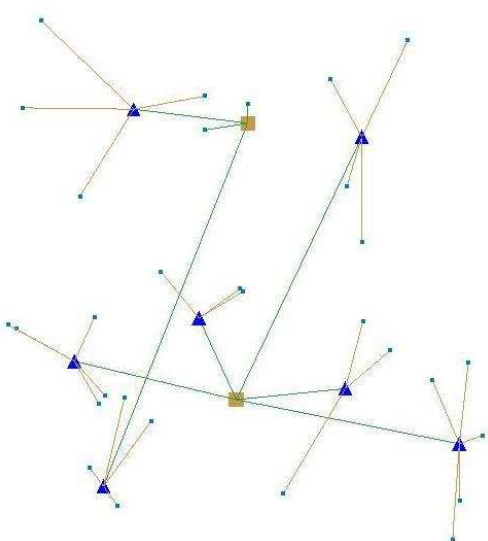
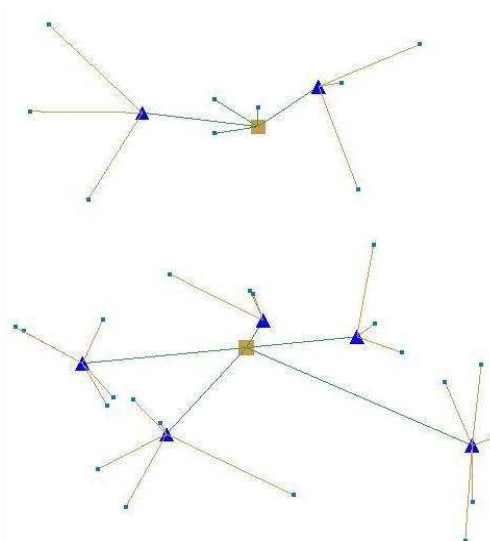
Apresentam-se, nessa seção, os resultados obtidos na geração da solução inicial, através do método baseado no *Problema de Transporte* e aplicando-se a heurística de refinamento *ILS-MRD* (*Iterated Local Search* e Método Randômico de Descida) para resolver o PCL-PMP. Para validar os métodos, devido a inexistência de bibliotecas de instâncias para este problema, foram elaboradas três problemas-testes geradas aleatoriamente, considerando 30, 50 e 100 poços. A Tabela 2 apresenta os dados desses problemas-teste, considerando um espaço de dimensão (100,100). Nessa tabela, PCL30, PCL50 e PCL100 referem-se aos problemas-teste com 30, 50 e 100 poços respectivamente.

Tabela 2: Dados dos problemas-teste

Dados do problema-teste	PCL30	PCL50	PCL100
Número de poços (n)	30	50	100
Custo do <i>Manifold</i> (CM)	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00
Custo da Plataforma (CT)	5.000.000,00	5.000.000,00	5.000.000,00
Custo do duto α (cd_α)	0,30	0,30	0,30
Custo do duto β (cd_β)	0,50	0,50	0,50
Número de entradas do <i>Manifold</i> (nem)	5	7	8
Número de entradas da Plataforma (net)	5	7	8

Neste trabalho, ressalta-se a dificuldade em se avaliar e comparar soluções desse problema, uma vez que não existem, na literatura, nenhum trabalho que abordem o PCL-PMP. Diante disso, optou-se por mostrar os resultados de forma visual, para uma melhor avaliação dos impactos da heurística na resolução do problema como, por exemplo, a redução das interseções entre dutos.

Apresenta-se, a seguir, os resultados da aplicação do método de geração da solução inicial e do *ILS-MRD*. Para os problemas-teste PCL30 e PCL50, foram realizados dois testes (PCL30-I/PCL30-II e PCL50-I/PCL50-II) e para o problema-teste PCL100, foi realizada somente uma execução.

**Figura 11:** Solução Inicial PCL30-I**Figura 12:** Solução refinada PCL30-I**Figura 13:** Solução Inicial PCL30-II**Figura 14:** Solução refinada PCL30-II

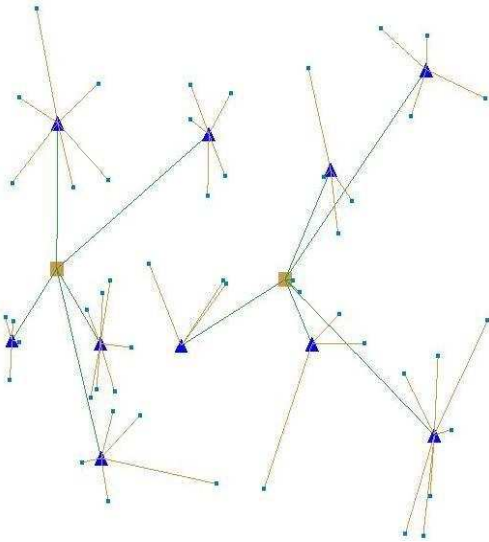


Figura 15: Solução Inicial PCL50-I

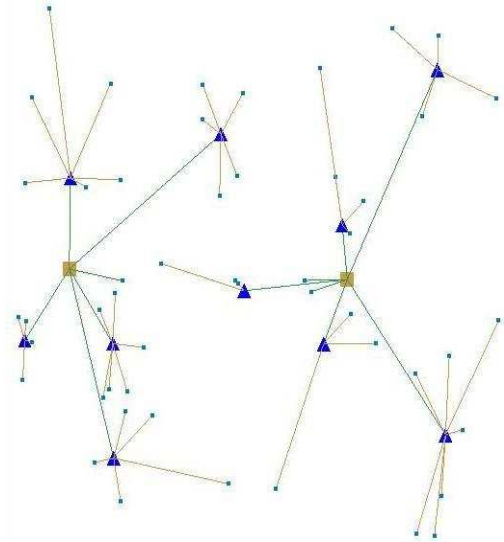


Figura 16: Solução refinada PCL50-I

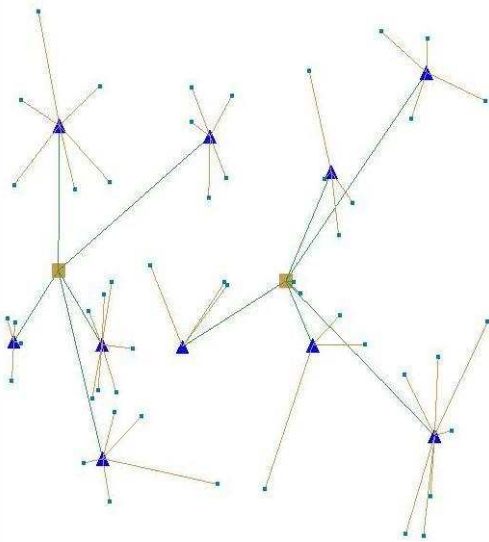


Figura 17: Solução Inicial PCL50-II

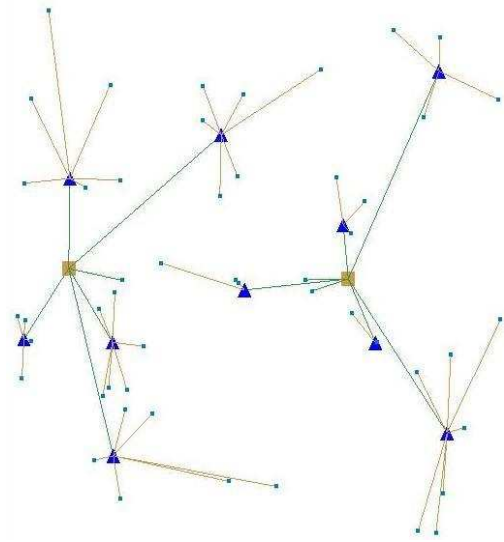


Figura 18: Solução refinada PCL50-II

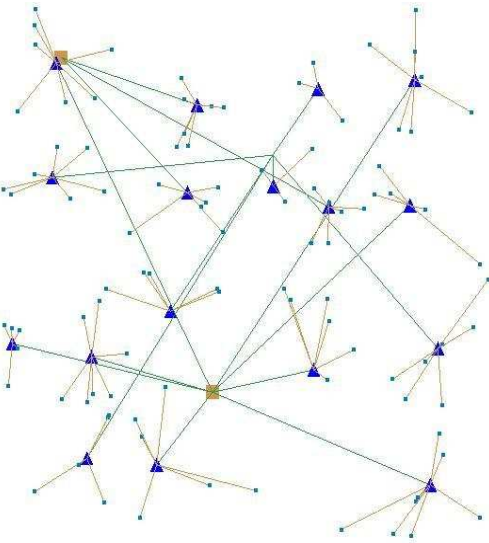


Figura 19: Solução Inicial PCL100

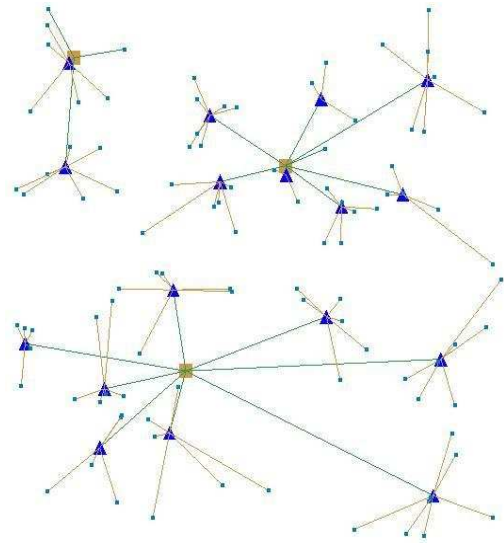


Figura 20: Solução refinada PCL100

As Tabelas 3, 4 e 5 mostram os resultados obtidos com o método de geração da solução inicial e do refinamento com o *ILS-MRD*. Nessas tabelas, “Número de conexões

inválidas” refere-se ao número de vezes que as restrições (c) e (d) estão sendo desrespeitadas e “Número de interseções entre dutos” e “Número de sobreposições de objetos” referem-se, respectivamente, ao número de vezes que a restrição (e) e (g) está sendo violada.

Tabela 3: Resultados computacionais – PCL30

Resultados	PCL30-I		PCL30-II	
	Sol. inicial	ILS-MRD	Sol.inicial	ILS-MRD
Número de <i>manifolds</i> utilizados	9	9	7	7
Número de plataformas utilizadas	2	2	2	2
Custo total dos <i>manifolds</i> utilizados	9.000.000,00	9.000.000,00	7.000.000,00	7.000.000,00
Custo total das plataformas utilizadas	10.000.000,00	10.000.000,00	10.000.000,00	10.000.000,00
Custo total dos dutos utilizados	68.700.000,00	50.800.000,00	61.700.000,00	51.000.000,00
Número de conexões inválidas	0	0	0	0
Número de interseções entre dutos	13	0	3	0
Número de sobreposições de objetos	0	0	0	0

Tabela 4: Resultados computacionais – PCL50

Resultados	PCL30-I		PCL30-II	
	Sol. inicial	ILS-MRD	Sol.inicial	ILS-MRD
Número de <i>manifolds</i> utilizados	10	10	10	10
Número de plataformas utilizadas	2	2	2	2
Custo total dos <i>manifolds</i> utilizados	10.000.000,00	10.000.000,00	10.000.000,00	10.000.000,00
Custo total das plataformas utilizadas	10.000.000,00	10.000.000,00	10.000.000,00	10.000.000,00
Custo total dos dutos utilizados	78.300.000,00	74.600.000,00	78.300.000,00	73.400.000,00
Número de conexões inválidas	0	0	0	0
Número de interseções entre dutos	4	0	4	0
Número de sobreposições de objetos	0	0	0	0

Tabela 5: Resultados computacionais – PCL100

Resultados	PCL100	
	Solução inicial	ILS-MRD
Número de <i>manifolds</i> utilizados	17	17
Número de plataformas utilizadas	3	3
Custo total dos <i>manifolds</i> utilizados	17.000.000,00	17.000.000,00
Custo total das plataformas utilizadas	15.000.000,00	15.000.000,00
Custo total dos dutos utilizados	145.400.000,00	109.200.000,00
Número de conexões inválidas	0	0
Número de interseções entre dutos	41	5
Número de sobreposições de objetos	0	0

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 11 a 20 e nas Tabelas 3, 4 e 5, verifica-se que a metodologia *ILS-MRD* é capaz de gerar soluções viáveis, considerando os problemas envolvendo 30 e 50 poços, além de reduzir significativamente o número de interseções de dutos para problemas-teste maiores. Para problemas-teste com um número de poços relativamente grande (por exemplo, 100 poços), percebe-se a necessidade de desenvolver estruturas de vizinhança inteligentes, capazes de gerar desvios nos dutos e, dessa forma, possibilitar o atendimento das restrições do problema.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta uma abordagem através de metaheurísticas para a resolução do Problema de Conexão e Localização de Poços, *Manifolds* e Plataformas (PCL-PMP).

A geração de uma solução inicial pode ser dividida em duas fases, na primeira é utilizada uma heurística que posiciona e estima a quantidade *manifolds* e plataformas que deverão ser utilizados para resolver o problema. Posteriormente, na segunda fase, através do Problema de Transporte são criadas as conexões entre os poços, *manifolds* e plataformas já fixados. A heurística utilizada na primeira fase, por conter componentes aleatórios, gera uma solução de forma não-determinística para o problema.

Para refinar uma solução foi utilizada a metaheurística híbrida ILS-MRD, proposto por [10], composta pelas técnicas *Iterated Local Search* (ILS) [6], que explora um subespaço de soluções ótimas locais através do Método Randômico de Descida (MRD). Esse método explora o espaço de soluções utilizando as estruturas de vizinhança descritas na Seção 3.4. Essa heurística possui um mecanismo que consiste em aumentar o grau de perturbação de forma sistemática sempre que não haja melhora na solução corrente em um determinado número de iterações, retornando-se ao grau mínimo de perturbação quando ocorre alguma melhora. Esse mecanismo utiliza-se das estratégias de intensificação e diversificação. A intensificação da busca ocorre quando o grau de perturbação é relativamente baixo e a diversificação ocorre quando esse grau é relativamente alto. Dessa forma, esse mecanismo é importante na melhoria da qualidade da solução final.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o ILS-MRD é uma alternativa promissora para a resolução do PCL. Como não foi encontrada nenhuma publicação sobre o PCL-PMP na literatura, não há como comparar os resultados produzidos.

Destaca-se também a dificuldade de elaborar um modelo matemático adequado para o problema, bem como a da formulação de uma função de avaliação adequada.

Como maior contribuição deste trabalho para a literatura, ressalta-se a definição do PCL-PMP e uma proposta para solucioná-lo, uma vez que nada foi encontrado a respeito desse problema na literatura. Para trabalhos futuros, pode-se desenvolver um novo método para geração da solução inicial que aumente a diversidade, cuja finalidade seria a ampliação do espaço de soluções.

Além disso, podem ser desenvolvidas estruturas de vizinhança mais inteligentes, capazes de remover as interseções entre as conexões de forma mais eficiente. Um proposta seria gerar desvios nos dutos onde ocorrem interseções. Uma ilustração da idéia da estrutura de remoção de interseções é apresentada na Figura 11.

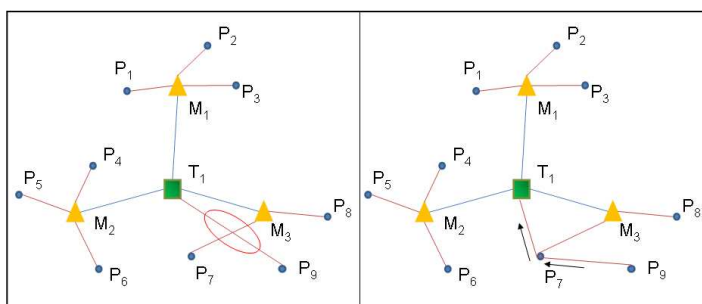


Figura 11: Desvio de conexões.

Outra estrutura interessante para o problema é uma que possibilite a adição de *manifolds* e plataformas na solução. A ilustração dessa estrutura é apresentada na Figura 12.

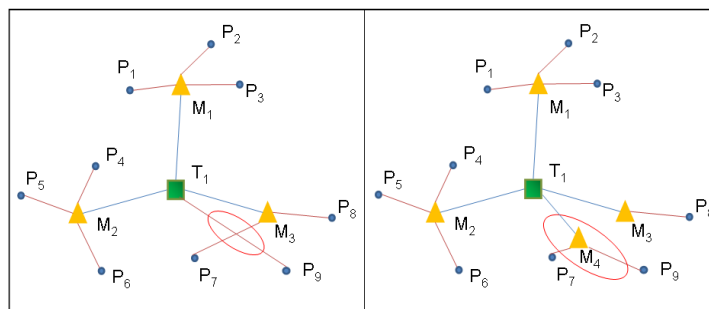


Figura 12: Criação de *manifolds* e plataformas.

Por fim, outra proposta promissora seria a utilização das metaheurísticas híbridas [4, 8, 9] ou Busca Tabu [3, 4 e 9], GRASP [1] e Reconexão por Caminhos [4, 9] que tem tido muito sucesso na solução de diferentes problemas de elevada complexidade computacional. Essas heurísticas baseadas em conceitos de memória adaptativa tem se mostrado promissoras especialmente em problemas altamente combinatórios como é o caso do PCL-PMP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B. (1995). Network Flows: Theory, Algorithms and Applications. Pearson education Asia limited. China Machine Press.
- [2] FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures, *Journal of Global Optimization*, v. 6, p. 109-133.
- [3] GLOVER, F. (1986). "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", *Computers and Operations Research*, v. 13, p. 533-549.
- [4] GLOVER, F.; LAGUNA, M. (1997). Tabu Search. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- [5] LAPLANE, M. F. (2004). Boletim NEIT. Núcleo da Economia Industrial e da Tecnologia. Número 5, Agosto de 2004, pp 1-12. Disponível em http://www.eco.unicamp.br/Neit/download/boletim/boletim_neit_05.pdf. Acesso em julho de 2007.
- [6] LOURENÇO, H. R., MARTIN, O., STÜTZLE, T. (2003) Iterated Local Search. In F. Glover and G. Kochenberger (eds), *Handbook of Metaheuristics*, p. 321 - 353, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- [7] PETROBRAS (2001). Desafios Tecnológicos nas Profundezas do Mar. Informe Publicitário. Disponível em http://super.abril.com.br/pordentodatecnologia/docs/info2001_7.pdf. Acesso em julho de 2007.
- [8] SANTOS, H. G., OCHI, L. S., MARINHO, E. H., DRUMMOND, L. M. A. (2006) Combining an Evolutionary Algorithm with Data Mining to solve a Vehicle Routing Problem. *NEUROCOMPUTING Journal - ELSEVIER*, volume 70 (1-3), pp. 70-77.
- [9] SANTOS, H. G., OCHI, L. S., SOUZA, M. J. F. (2007) A Tabu heuristic with efficient diversification strategies for the Class/Teacher timetabling problem. Status: To appear in *ACM Journal of Experimental Algorithmics (JEA)*, volume 10 (2).
- [10] SILVA, M. S. A.; MINE, M. T.; SOUZA, M. J. F.; SILVA, G. P.; OCHI, L. S. (2006). Busca Local Iterada aplicada à resolução do Problema de Programação de Jogos do Campeonato Brasileiro de Futebol realizado em dois turnos espelhados. In: XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Goiânia/GO. Anais do XXXVIII SBPO, p. 1-8.