

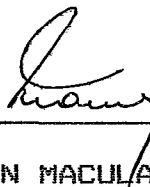
O PROBLEMA DE RECOBRIMENTO: ESTUDO E APLICAÇÃO AO
PROBLEMA DE CONFIGURAÇÃO DE EXPLOTAÇÃO DE CAMPOS
SUBMARINOS DE PETRÓLEO

POR

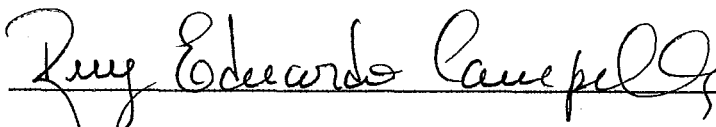
MARCIA HELENA COSTA FANFA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

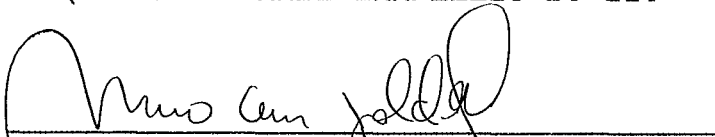
Aprovada por:



Prof. NELSON MACULAN FILHO. D. Habil.



Prof. RUY EDUARDO CAMPELLO. D. Sc.



Major MARCO CÉSAR GOLDBERG. D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ

AGOSTO DE 1992

Ao Marcus, a Nathalie
e ao Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Desejo, inicialmente, expressar os meus agradecimentos ao apoio e dedicação de meus pais, tão imprescindíveis ao término deste trabalho. Agradeço-os ainda pelo exemplo de sucesso e realização conquistados através de esforço e honestidade.

Ao professor Dr. Nelson Maculan Filho por ter aceito orientar-me neste trabalho, pela confiança e atenção prestadas durante todo o desenvolvimento da tese, bem como pela indicação de fontes bibliográficas de interesse.

Ao professor Dr. Marco Cesar Goldberg pela grande atenção dedicada, apoio, incentivo e consideração pelo trabalho realizado. Agradeço-o também pela apresentação de alternativas que tanto enriqueceram a tese.

Ao professor Dr. Ruy Eduardo Campello pela atenção e participação na banca examinadora.

A professora Dr.^o Nair Maria Maya de Abreu por facilitar o acesso a fontes de dados do ILTC e da PETROBRÁS, proporcionando-me a oportunidade de prosseguir e concluir o presente trabalho.

Ao professor Dr. Luiz Satoru Ochi pelo auxílio prestado.

Ao Engenheiro Mecânico Marcus Rodrigues Fampa pela elaboração das ilustrações apresentadas.

RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

O PROBLEMA DE RECOBRIMENTO: ESTUDO E APLICAÇÃO AO
PROBLEMA DE CONFIGURAÇÃO DE EXPLOTAÇÃO DE CAMPOS
SUBMARINOS DE PETRÓLEO

ORIENTADOR: NELSON MACULAN FILHO

PROGRAMA DE ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO

O Problema de Recobrimento (PR) é um dos problemas mais estudados em Programação Matemática devido a sua vasta aplicação.

O trabalho desenvolvido apresenta, inicialmente, um estudo do PR reunindo seus principais métodos de resolução. Em seguida, o modelo de recobrimento é utilizado na elaboração de uma nova heurística para solucionar o Problema de Configuração de Exploração de Campos Submarinos de Petróleo.

Finalmente, numa última fase do trabalho, testes ilustram a aplicação de métodos de resolução do PR como também comprovam a eficiência da heurística desenvolvida.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL FULFILLMENT
OF REQUIREMENTS FOR DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (M. Sc.)

THE SET COVERING PROBLEM: SURVEY AND APPLICATION TO THE
OIL'S SUBMARINE FIELD CONFIGURATION PROBLEM

CHAIRMAN: NELSON MACULAN FILHO

DEPARTMENT OF SYSTEMS AND COMPUTING ENGINEERING

The Set Covering Problem (SCP) is one of the most distinguished in Mathematical Programming, because of its vast application.

The research developed introduces initially, a survey of the SCP, collecting the main resolution techniques.

Next, the Set Covering model is used on the development of a new heuristic for the Oil's Submarine Field Configuration Problem.

Finally, on the research's last stage, tests illustrate the SCP's resolution techniques application, as well as confirm the efficiency of the developed heuristic.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	
1.1 - Motivação	1
1.2 - Descrição dos capítulos	3
CAPÍTULO 2: O PROBLEMA DE RECOBRIMENTO (PR)	
2.1 - Introdução	4
2.2 - Definição e Formulação do Modelo Matemático	5
2.3 - Problemas Relacionados com o PR	7
2.3.1 - Casos Particulares do PR	7
2.3.2 - Variações do PR	8
2.4 - Correspondência entre o PR, o PP e o PPK	9
2.5 - Métodos para solucionar o PR	12
2.5.1 - Métodos e Algoritmos Exatos	12
2.5.2 - Métodos e Algoritmos Heurísticos	15
CAPÍTULO 3: O PROBLEMA DE CONFIGURAR A EXPLOTAÇÃO DE UM CAMPO SUBMARINO DE PETRÓLEO (PCCS)	
3.1 - Introdução	19
3.2 - Descrição do Problema	20

CAPÍTULO 4: MÉTODOS DE RESOLUÇÃO PARA O PCCS

4.1 - Introdução	24
4.2- Método Heurístico apresentado pela PETROBRÁS/ILTC	26
4.3 - Método Heurístico Proposto - Uma aplicação do PR gerando os problemas PCCS1 e PCCS2	30

CAPÍTULO 5: GERAÇÃO DA MATRIZ DE COEFICIENTES TECNOLÓGICOS PARA O PCCS1

5.1 - Introdução	41
5.2 - Método de discretização da região viável do PCCS1	42
5.3 - Técnicas de Redução	45

CAPÍTULO 6: IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO DE RESOLUÇÃO DO PCCS:

6.1 - Introdução	49
6.2 - Algoritmo para obtenção da Matriz de Coeficientes Tecnológicos (A) do PCCS1	50
6.3 - Algoritmo para resolução do PCCS1	51
6.3.1 - Algoritmo de Vasko e Wilson	52
6.3.2 - Algoritmo de Baker	54
6.3.3 - Algoritmo de Balas	57
6.4 - Algoritmo para resolução do PCCS2	62

CAPÍTULO 7: RESULTADOS COMPUTACIONAIS	
7.1 - Introdução	64
7.2 - Considerações gerais sobre o PCCS1	65
7.3 - Considerações gerais sobre o PCCS2	66
7.4 - Exemplos Numéricos	69
CAPÍTULO 8: CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES	78
BIBLIOGRAFIA	108

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 1	82
TABELA 2.1 - CARACTERÍSTICAS DOS MANIFOLDS - EXEMPLO 1	83
TABELA 3.1 - SOLUÇÃO (CUSTOS) - EXEMPLO 1	84
TABELA 4.1 - SOLUÇÃO (MANIFOLDS) - EXEMPLO 1	84
TABELA 5.1 - SOLUÇÃO (POÇOS) - EXEMPLO 1	85
TABELA 6.1 - SOLUÇÃO SICCS (CUSTOS) - EXEMPLO 1	87
TABELA 7.1 - SOLUÇÃO SICCS (MANIFOLDS) - EXEMPLO 1	87
TABELA 8.1 - SOLUÇÃO SICCS (POÇOS) - EXEMPLO 1	88
TABELA 1.2 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 2	90
TABELA 2.2 - CARACTERÍSTICAS DOS MANIFOLDS - EXEMPLO 2	93
TABELA 3.2 - SOLUÇÃO (CUSTOS) - EXEMPLO 2	94
TABELA 4.2 - SOLUÇÃO (MANIFOLDS) - EXEMPLO 2	94
TABELA 5.2 - SOLUÇÃO (POÇOS) - EXEMPLO 2	95
TABELA 6.2 - SOLUÇÃO SICCS (CUSTOS) - EXEMPLO 2	98
TABELA 7.2 - SOLUÇÃO SICCS (MANIFOLDS) - EXEMPLO 2	98
TABELA 8.2 - SOLUÇÃO SICCS (POÇOS) - EXEMPLO 2	99
TABELA 1.3 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 3	102
TABELA 2.3 - CARACTERÍSTICAS DOS MANIFOLDS - EXEMPLO 3	103
TABELA 3.3 - SOLUÇÃO (CUSTOS) - EXEMPLO 3	104
TABELA 4.3 - SOLUÇÃO (MANIFOLDS) - EXEMPLO 3	104
TABELA 5.3 - SOLUÇÃO (POÇOS) - EXEMPLO 3	105
TABELA 6.3 - SOLUÇÃO SICCS (CUSTOS) - EXEMPLO 3	106
TABELA 7.3 - SOLUÇÃO SICCS (MANIFOLDS) - EXEMPLO 3	106
TABELA 8.3 - SOLUÇÃO SICCS (POÇOS) - EXEMPLO 3	107

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - VISTA EM PERFIL DE UM CAMPO SUBMARINO	23
FIGURA 2 - PLANTA ESQUEMÁTICA DE UM CAMPO SUBMARINO	23
FIGURA 3 - POÇOS A ATENDER	35
FIGURA 4 - REGIÃO VIÁVEL PARA ALOCAÇÃO DAS CABEÇAS DOS POÇOS	37
FIGURA 5 - PONTOS VIÁVEIS PARA ALOCAÇÃO DOS MANIFOLDS	44
FIGURA 6 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO ALGORITMO DE BALAS	61
FIGURA 7 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÉTODO DE SOLUÇÃO ADOPTADO	68
FIGURA 8 - EXEMPLO 1 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO MÉTODO PROPOSTO	72
FIGURA 9 - EXEMPLO 1 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO SICCS	73
FIGURA 10 - EXEMPLO 2 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO MÉTODO PROPOSTO	74
FIGURA 11 - EXEMPLO 2 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO SICCS	75
FIGURA 12 - EXEMPLO 3 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO MÉTODO PROPOSTO	76
FIGURA 13 - EXEMPLO 3 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO SICCS	77

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - MOTIVAÇÃO:

Com o grande avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, é notório o crescente interesse do homem pela Otimização de Sistemas, na constante procura da melhor solução possível para uma imensa variedade de problemas.

Sobretudo quando vivencia-se uma realidade capitalista, onde o sucesso está diretamente relacionado à capacidade de atuação perante a concorrência e a competição, faz-se bastante natural em qualquer tipo de investimento, a busca do procedimento associado à obtenção de maior lucro e/ou à maior economia de recursos empregados.

Sob este enfoque, o trabalho do Engenheiro de Sistemas divide-se em duas etapas. A etapa inicial visa transformar problemas reais, com todas as suas características particulares, num modelo matemático perfeitamente definido que se comporte o mais próximo possível da realidade.

Tendo-se então formulado matematicamente o problema, numa segunda etapa de trabalho cabe ao engenheiro, dispor-se de todo recurso científico necessário à elaboração de técnicas para solucioná-lo, de forma a associar eficientemente a obtenção de uma

boa solução com um esforço de cálculo aceitável.

Com o aparecimento do computador, a capacidade de solução de problemas complexos aumentou significativamente. O incentivo criado pela possível aplicação a problemas reais, de procedimentos até então só considerados sob o aspecto teórico, levou a um crescente enriquecimento no estudo de técnicas de Otimização.

Um dos assuntos mais abordados na literatura de interesse, é o Problema de Recobrimento (PR). A razão pela intensa pesquisa relacionada ao problema deve ser atribuída em primeira instância à sua enorme aplicação prática. Posteriormente, serão enumeradas uma série de problemas reais que adequam-se perfeitamente ao modelo de recobrimento.

Todavia, se por um lado o modelo tem tão boa aplicação, infelizmente o outro motivo atribuído ao estudo não é igualmente satisfatório. O PR é um problema NP-árduo, e portanto ainda não se conhece até nenhum algoritmo polinomial que possa resolvê-lo.

O objetivo do tema: O Problema de Recobrimento - Estudo e Aplicação ao Problema de Configuração de Exploração de Campos Submarinos abrange duas facetas.

Numa primeira abordagem visa-se a apresentação do "survey" de todo estudo realizado sobre o PR e técnicas de cobertura. Em seguida, com o intuito de ilustrar sua aplicação, o complexo problema de configurar campos submarinos de petróleo é considerado sob uma ótica bastante original, onde se emprega o modelo de recobrimento e discute-se o embasamento teórico adquirido. Finalizando-se o estudo, alguns testes associados à aplicação são realizados, esclarecendo-se a eficiência do método de solução.

adotado na obtenção de boas soluções.

1.2 - DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS:

O trabalho desenvolvido no decorrer da tese divide-se em quatro etapas, estabelecidas a seguir.

A primeira etapa, abordada no capítulo 2, apresenta a revisão bibliográfica considerada, bem como um estudo sobre o Problema de Recobrimento que abrange desde sua definição e modelagem matemática até às técnicas mais modernas de recobrimento.

A segunda fase do estudo, introduz o Problema de Configuração de Exploração de Campos Submarinos sob o escopo de ilustrar a aplicação do modelo de recobrimento e dos métodos de resolução encontrados na literatura. Nos capítulos 3 e 4 onde o problema é descrito com detalhes e formulações matemáticas são apresentadas.

Na terceira etapa em que a tese divide-se, representada pelos capítulos 5 e 6, definem-se os métodos e algoritmos utilizados tanto para gerar a matriz de coeficientes tecnológicos do problema quanto para resolvê-lo.

Finalmente, na última fase do trabalho, os capítulos 7 e 8 demonstram o bom desempenho do método de resolução utilizado, através de resultados numéricos obtidos com alguns exemplos testados. Em seguida são também tecidas algumas considerações gerais a respeito do estudo realizado.

CAPÍTULO 2

O PROBLEMA DE RECOBRIMENTO (PR)

2.1 INTRODUÇÃO:

O problema de recobrimento é um problema de otimização combinatória NP-árduo, conforme demonstrado por Karp [27], o que significa que até hoje não se encontrou nenhum algoritmo para resolvê-lo com um número de passos limitado por uma função polinomial no tamanho da entrada do problema. Por haver uma série de aplicações práticas para o problema, tais como em "scheduling", "marketing", investimento de capital, percurso de caminhos de entrega, recuperação de informações, planejamento de estocagem e localização de plataformas e outras facilidades, existe um esforço muito grande em se encontrar métodos exatos e heurísticos eficientes que gerem uma boa solução (ótima ou perto da ótima) para o problema, num tempo razoável de computação. Uma bibliografia sobre aplicações para este modelo foi apresentada por Balas e Padberg [2].

Neste capítulo iremos estudar o Problema de Recobrimento, definindo-o e apresentando os diversos métodos de solução encontrados na literatura. No próximo item será apresentada a definição e a formulação do problema por Programação Inteira.

Em continuidade são definidos casos particulares e algumas variações do PR, todos problemas com muitas aplicações práticas. No tópico seguinte, será mostrada a relação entre o Problema de Recobrimento e suas variações e finalmente serão expostos os métodos exatos e as heurísticas de melhores resultados para solucionar o problema.

2.2 - DEFINIÇÃO E FORMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO:

Considere o conjunto $F=\{1,2,3,\dots,m\}$ e o conjunto $P=\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$, onde cada P_j é um subconjunto de F . Um subconjunto P^* de P , é chamado cobertura de F se a união dos subconjuntos P_j contidos em P^* é igual ao conjunto F .

Seja J^* o conjunto dos índices de P^* , logo:

$$P^* = \bigcup_{j \in J^*} P_j = F$$

Se associarmos um custo C_j a cada subconjunto P_j de P , o Problema de Recobrimento determina a cobertura de menor custo do conjunto F .

Na literatura, encontramos vários Modelos Matemáticos para o Problema de Recobrimento, tais como por Programação Inteira [17], por Teoria de Grafos [22], Formulação Booleana [26] e Formulação Probabilística [22]. A formulação apresentada neste tópico, utilizada em todo o trabalho, é a mais básica e usual, sendo encontrada em praticamente todos os artigos sobre o tema.

Formulação por Programação Inteira:

Considerando os conjuntos F e P , e o custo C_j introduzidos no item anterior, defina:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o elemento } i \text{ de } F \text{ é também um elemento de } P_j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$X_j = \begin{cases} 1, & \text{se } P_j \text{ pertence à cobertura} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O Modelo Matemático para o Problema de Recobrimento, pode ser formulado da seguinte maneira:

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (2.1)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j=1}^n A_{ij} X_j \geq 1 \quad i=1,2,3,\dots,m \quad (2.2)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (2.3)$$

A restrição (2.2) garante que todos os elementos i de F estejam na cobertura, e (2.3) é a restrição de integralidade da variável X_j .

2.3 - PROBLEMAS RELACIONADOS COM O PR:

2.3.1 - CASOS PARTICULARES DO PR:

-O Problema de Recobrimento de Mínima Cardinalidade (PRMC):

No PRMC o custo C_j associado a cada subconjunto P_j de P é o mesmo para todo $j=1, \dots, n$. Usualmente é atribuído o valor unitário a estes custos. O PRMC, determina então, a cobertura do conjunto F que necessita do menor número possível de subconjuntos P^* de P . No modelo, a Função Objetivo (2.1) poderia ser reescrita como:

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^n x_j \quad (2.4)$$

-O Problema de Particionamento (PP):

O PP é o caso particular do PR mais conhecido e estudado devido às inúmeras aplicações práticas existentes para o problema [2]. No PP, cada elemento do conjunto F deve pertencer a exatamente um subconjunto P_j da cobertura P^* . De forma que a interseção de cada dois subconjuntos P_j pertencentes a P^* deve ser vazia:

$$P_k \cap P_l = \phi \quad , \quad \text{para todo } l, k \in J^*, \quad l \neq k$$

onde J^* é o conjunto de índices de P^* .

Neste caso P^* é chamado uma partição do conjunto F .

O Modelo Matemático apresentado para o PR, sofreria então uma mudança na restrição (2.2), que ficaria:

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} X_j = 1 \quad i=1,2,3,\dots,m \quad (2.5)$$

2.3.2 - VARIACÕES DO PR:

-O Problema de "Packing" (PPK):

No PPK, cada elemento do conjunto F deve pertencer a no máximo um subconjunto P_j de P^* , significando que alguns elementos de F podem não ser cobertos. O objetivo do problema é encontrar o subconjunto P^* de máximo custo.

Matematicamente, o problema pode ser escrito como:

$$\text{Max} \quad \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (2.6)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j=1}^n A_{ij} X_j \leq 1 \quad i=1,2,3,\dots,m \quad (2.7)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad (2.8)$$

-O Problema de Localização de Máxima Cobertura (PLMC):

O objetivo do PLMC é encontrar o subconjunto P^* de P que contenha o maior subconjunto de F possível.

Neste caso, entretanto, há um limite máximo k , para o número de subconjuntos P_j de P que compõem P^* . Na prática, o PLMC procura os locais aonde devem se situar as, no máximo, k facilidades disponíveis para atender ao maior número de pontos de demanda possível. O Modelo Matemático para este problema pode ser escrito da seguinte forma:

$$\text{Max} \quad \sum_{i=1}^m \max_j A_{i,j} X_j \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (2.9)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j=1}^n X_j \leq k \quad (2.10)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad (2.11)$$

2.4 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE O PR, O PP E O PPK:

Neste tópico será mostrado como os problemas PP e PPK podem ser transformados no PR através de algumas manipulações simples. Estas manipulações são muito úteis já que com elas um algoritmo que resolve o PR pode ser utilizado para resolver o PP e o PPK.

-Transformação do PP em PR:

Como será mostrado a seguir, o PP pode ser transformado no PR através de uma simples mudança no vetor custo $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$ do problema.

Seja o PP definido por (2.1)-(2.5)-(2.3).

Defina:

$$Y = \{Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m\} > 0$$

$$B \gg \sum_{j=1}^n |C_j|$$

e = vetor coluna, cujos m elementos são 1's

e^t = transposto de e

O PP pode então ser formulado como:

$$\text{Min} \quad C X + B e^t Y \quad (2.12)$$

$$\text{s.a.} \quad A X - Y = e \quad (2.13)$$

$$X \in \{0,1\}^n \quad (2.14)$$

$$Y \geq 0 \quad (2.15)$$

O custo da variável Y , $B e^t$, deve ser suficientemente grande para que na solução tenhamos $Y = 0$.

Substituindo $Y = A X - e$ em (2.12) e sabendo-se que $Y \geq 0$, o PP pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\text{Min} \quad C' X - B m \quad (2.16)$$

$$\text{s.a.} \quad A X \geq e \quad (2.17)$$

$$X \in \{0,1\}^n \quad (2.18)$$

onde: $C' = C + B e^t A$

Como $B m$ é uma constante, o problema (2.16)-(2.17)-(2.18) é um PR.

É importante notar que sempre que este PR tiver solução, ele terá o mesmo conjunto de soluções ótimas que o PP definido por (2.1)-(2.5)-(2.3), já que definimos B grande o suficiente para termos $Y=0$ na solução ótica [26].

-Transformação do PPK em PP:

O PPK (2.6)-(2.7)-(2.8) pode ser transformado num PP através da introdução da variável de folga $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_m\} \in \{0,1\}$, tal que $A X + S = e$. O custo da variável de folga S é nulo, de forma que se a linha i da matriz A é coberta por uma solução do PPK, teremos $S_i = 0$, caso contrário, teremos $S_i = 1$.

Assim sendo, o PPK pode ser formulado alternativamente como:

$$\text{Min} \quad - C X \quad (2.19)$$

$$\text{s.a.} \quad A X + S = e \quad (2.20)$$

$$X \in \{0,1\}^n \quad (2.21)$$

$$S \in \{0,1\}^m \quad (2.22)$$

O problema (2.19)-(2.20)-(2.21)-(2.22) é um PP onde as variáveis X_j , $j=1, \dots, n$ e S_i , $i=1, \dots, m$ tem custo $-C_j$ e zero respectivamente.

Usando agora, o procedimento definido acima podemos transformar o PP obtido também num PR.

2.5- MÉTODOS PARA SOLUCIONAR O PR:

Os métodos usados para solucionar o PR se dividem nos métodos exatos e nos métodos heurísticos.

2.5.1 - MÉTODOS E ALGORITMOS EXATOS:

Os métodos exatos encontrados na literatura envolvem basicamente as técnicas de "Branch-and-Bound", Enumeração Implícita e Planos de Corte.

Na técnica de "Branch-and-Bound", o problema é dividido em subproblemas distintos que devem ser mais facilmente solucionados.

Na técnica de Enumeração Implícita todas as possíveis soluções do problema são enumeradas, sendo que apenas um subconjunto delas é considerado ou enumerado explicitamente. O restante das soluções são ditas implicitamente enumeradas.

Para o bom funcionamento de algoritmos baseados nas técnicas de "Branch-and-Bound" e Enumeração Implícita, é muito importante a obtenção de limites inferiores razoáveis.

Com esta finalidade, ultimamente tem-se dado ênfase a busca de limites pela relaxação Lagrangeana do problema ou, mais raramente, pela resolução do problema linear relaxado através do método Simplex.

A técnica de Planos de Corte, foi muito bem aplicada por Balas [3] ao Problema de Recobrimento. O procedimento de Balas baseia-se na obtenção de limites inferiores condicionais gerados a partir de inequações também chamadas condicionais que simplificam o problema. Se um limite inferior condicional exceder algum limite superior conhecido, então toda solução melhor do que a solução associada ao limite superior viola pelo menos uma das inequações condicionais. Este fato gera uma disjunção válida, que pode ser usada para dividir o espaço de soluções viáveis ou para gerar uma família de Planos de Corte válidos. No caso do PR, estes Planos de Corte são do mesmo tipo que as restrições do problema. A família de inequações válidas geradas, contém ainda como caso particular as inequações de Bellmore-Ratliff geradas por bases envolventes [19], sendo até mais ricas e contendo inequações mais fortes do que estas, onde a força de uma inequação é medida pelo número de coeficientes positivos.

Apesar do algoritmo de Balas buscar a solução ótima do PR, ele pode ser chamado de algoritmo híbrido, já que limites superiores são encontrados através de heurísticas que geram soluções para o problema, e limites inferiores são gerados através de heurísticas que geram soluções para o dual do problema linear relaxado.

Além das heurísticas, a relaxação Lagrangeana e o Método do Subgradiente também são usados para melhorar o limite inferior obtido. O Método de "Branch-and-Bound" é também utilizado sempre que a convergência do algoritmo é muito lenta.

Este algoritmo foi testado por Balas e Ho [4], mostrando bons resultados para problemas com matrizes de até 200 restrições, 2000 variáveis e baixa densidade.

Outros algoritmos exatos que podem ser encontrados na literatura são os algoritmos de Etcheberry [16], que usa técnicas de Enumeração Implícita, Beasley [7] e Paixão [34], além dos estudos sobre tais métodos apresentados por Balas e Padberg [2], Garfinkel e Nemhauser [20] e Christofides e Korman [13]. Erlenkotter [15] resolve o problema como um caso particular do UFLP ("Uncapacitated Facility Location Problem").

Estudos mais recentes tem sido feito por Rushmeir e Nemhauser [32 e 33] envolvendo técnicas modernas de computação paralela.

Inicialmente, em 1989, eles estudaram a eficiência de algoritmos de busca paralela para o PR, baseados no Método de "Branch-and-Bound". Neste caso existem duas maneiras distintas de dividir tarefas entre os processadores paralelos. A primeira, chamada busca paralela, atribui todo o trabalho de um problema localizado em um nó da árvore a um determinado processador. A segunda, chamada decomposição paralela, divide as tarefas entre os processadores paralelos de forma a ter todos eles trabalhando num mesmo problema ao mesmo tempo.

Posteriormente, em 1990, eles apresentaram um algoritmo que decompõe o problema. A decomposição define um caso particular de relaxação Lagrangeana chamada de "cost splitting". Cada subproblema gerado é atribuído a um processador paralelo. Os processadores trabalham com um Método do Subgradiente Paralelo, produzindo limites e soluções viáveis para o problema.

2.5.2 - MÉTODOS E ALGORITMOS HEURÍSTICOS:

Conforme já mencionado, o Problema de Recobrimento tem inúmeras aplicações práticas. Entretanto, infelizmente o PR é um problema NP-árduo, e apesar de existir um grande número de algoritmos exatos para sua resolução, como visto no item acima, estes algoritmos têm um custo computacional considerável, principalmente para problemas de muito grande porte. Sendo assim, existe um grande esforço em se desenvolver métodos heurísticos eficientes para solucionar o problema de forma mais rápida, precisa e sob o menor esforço de cálculo possível gerando uma solução razoavelmente próxima à ótima.

Muitos métodos heurísticos para a solução do PR podem ser encontrados na literatura, e a maioria deles pode, em termos gerais, ser classificado como uma variação do seguinte procedimento guloso:

(1) Seja S o conjunto de colunas escolhidas para pertencerem a solução do PR (inicialmente S é vazio).

(2) Una a S , a coluna j que minimize a função $f(j, C_j, S)$ e repita este procedimento até que S seja uma solução para o PR.

(3) Melhore a solução S da seguinte maneira:

(a) retirando colunas que são redundantes, e

(b) intercalando colunas em S com colunas fora de S .

Trabalhos e algoritmos utilizando o método acima foram apresentados por:

-Roth [36], em 1968, onde a escolha da coluna j no passo (2) é aleatória. Alguns resultados computacionais foram também apresentados.

-Balas e Ho [4], em 1980, apresentaram uma série de algoritmos heurísticos utilizados para gerar limites para o PR no contexto da busca da solução ótima do problema através de técnicas de Planos de Corte. Uma dessas heurísticas corresponde ao procedimento acima, onde o passo (3b) é excluído e cinco diferentes funções $f(j, C_j, S)$ são utilizadas.

-Baker [5], em 1981, apresenta um algoritmo também correspondente ao procedimento acima e mostra que sua implementação precisa de no máximo $O(m^3 N)$ cálculos. A motivação do estudo de Baker é o problema de planejamento da tripulação de aviões, ao qual ele, junto com Fisher [6], também em 1981, aplicam o algoritmo.

-Vasko e Wilson [41 e 43], em 1984 e 1986, apresentaram uma heurística, SCHEURI, correspondente ao procedimento, onde sete diferentes funções $f(j, C_j, S)$ são utilizadas. Apresentaram também a heurística SCFUNC1T07 envolvendo as mesmas sete funções, sendo que onde a função a ser usada a cada vez que uma coluna j vai ser escolhida no passo (2) do procedimento, é gerada de forma aleatória.

-Thomas Feo e Maurício Resende [17], em 1989, apresentam uma heurística para PRMC (Problema de Recobrimento de Mínima Cardinalidade) com bases probabilísticas. Trata-se de uma variação não determinística do procedimento acima, onde, no passo (2), a coluna a entrar na solução é escolhida de forma aleatória entre o conjunto de colunas $j=1, \dots, n$ com cardinalidade $|M_j|$ pelo menos igual a $\alpha \times \max \{|M_j|, 1 \leq j \leq n\}$, onde $0 \leq \alpha \leq 1$ e M_j é o conjunto de linhas da matriz de coeficientes do problema que assumem valor 1 na coluna j .

Em 1979, Chvátal [14] apresentou uma análise do pior caso da solução produzida pelo passo (2) do procedimento quando a função $f(j, C_j, S) = C_j / (\text{número de linhas cobertas pela coluna } j \text{ que ainda não estão sendo cobertas por } S)$. Chvátal demonstrou que sendo Z_{opt} , o valor ótimo do PR e Z_{heu} , o valor da solução encontrada pelo procedimento, temos a razão de performance:

$$Z_{heu} / Z_{opt} \leq \sum_{j=1}^d \frac{1}{j}$$

onde: $d = \max_{j \in N} |M_j|$, sendo M_j o conjunto de linhas i da matriz A , tal que $A_{ij}=1$.

Entretanto, esta análise indica um comportamento muito pobre para o algoritmo no que diz respeito a análise do pior caso. E, conforme mostrado por Ho [25], esta razão de performance é a melhor possível para toda classe de heurísticas primais.

Assim sendo, Balas e Ho [4] sugeriram ainda em 1979, como uma prática correção contra este mal comportamento, o uso intermitente de várias funções ao invés de apenas uma. Esta idéia foi implementada e testada com resultados bastante razoáveis.

Outras heurísticas para o PR que podem ser encontradas na literatura são as seguintes:

-Baker [5], em 1981, realiza o merge de duas soluções distintas para o problema, gerando a partir delas, uma terceira solução de custo reduzido, sempre que possível.

-Vasko e Wilson [42], em 1984, apresentam um método para solucionar o PR como um caso particular do Problema de Localização de Facilidades.

-Beasley [8], em 1988, baseia-se em relaxação Lagrangeana e no Método de Subgradiente para construir uma nova heurística. São apresentados também resultados computacionais envolvendo problemas com até 1000 restrições e 10000 variáveis.

CAPÍTULO 3

O PROBLEMA DE CONFIGURAR A EXPLOTAÇÃO DE UM CAMPO SUBMARINO DE PETRÓLEO (PCCS)

3.1 - INTRODUÇÃO:

O problema de configurar a exploração de um campo de petróleo tem por objetivo definir o "lay-out" de exploração do campo que conduza a um custo mínimo de investimento.

A contribuição dos campos marítimos para a produção de óleo e gás, aumentou bastante a partir de 1977, com o desenvolvimento da Bacia de Campos.

As reservas hoje existentes e o crescente avanço tecnológico que permitirá a exploração de campos situados em lâmina d'água profunda aumentam ainda mais a importância da obtenção de uma técnica eficiente para solucionar o problema. A utilização de técnicas de Pesquisa Operacional se torna particularmente adequada considerando-se que o problema é de difícil solução e encontra uma grande probabilidade de explosão combinatória a medida que o número de poços do campo aumenta.

No presente capítulo, o problema será detalhadamente descrito, de maneira a bem esclarecer o que será necessário, em termos de técnicas de Pesquisa Operacional para sua modelagem e solução.

3.2 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA:

Num campo submarino de petróleo, a exploração do óleo é feita através de poços perfurados no solo. Na perfuração de tais poços existe a opção de fazê-la de forma perpendicular ou oblíqua ao solo. No primeiro caso o poço recebe a denominação de poço vertical e no segundo, poço direcional.

O local do solo submarino onde a perfuração é iniciada chama-se cabeça do poço, e o local de maior profundidade, no qual a exploração é propriamente realizada recebe o nome de objetivo.

O alcance do poço é definido como a distância entre as projeções da cabeça e do objetivo no plano xy. Quando o poço é vertical o alcance é nulo podendo ser desconsiderado, porém para poços direcionais o alcance é uma medida relevante devido a necessidade de atender-se a um padrão de comprimento máximo para o alcance de um poço.

Todo óleo extraído dos poços é enviado para a Unidade Estacionária de Produção (UEP). Neste ponto faz-se importante observar a existência de um número máximo permitido de ligações feitas a UEP. Para contornar tal limitação é necessário, portanto, a criação de manifolds submarinos que funcionam como concentradores de óleo, recebendo-o da extração de alguns poços e enviando-o a UEP. Os manifolds, por sua vez, também são limitados por um número máximo e um número mínimo de interligações com os poços. Neste caso, enquanto o limite máximo tem caráter técnico, o limite mínimo está relacionado ao grau de utilização do manifold pretendido no projeto.

Para melhor esclarecer, é conveniente notar que nem todos os poços interligam-se necessariamente com manifolds, podendo ainda estarem diretamente ligados a UEP. Ressalte-se, todavia, que a interligação poço - UEP não é comum, fato facilmente explicado pelo desperdício da utilização de receptor de grande vazão na UEP por um cabo de vazão relativamente pequeno oriundo do poço.

As interligações entre poços e manifolds, manifolds e UEP e poços e UEP dá-se o nome de "bundles".

Outro fator de importância na configuração do campo é o perfil de sua lâmina d'água ou a distância entre a superfície marítima e o solo submarino. O perfil é, obviamente, função de cada ponto do solo do campo e tem influência em sua configuração na escolha e localização da plataforma utilizada na UEP. Cada tipo de plataforma tem a si associada uma lâmina d'água máxima permitida. Os manifolds, por sua vez, também estão sujeitos a uma lâmina d'água máxima, restringindo-se assim os pontos viáveis para suas localizações.

Cabe neste ponto, destacar então, os fatores acima relacionados que contribuem de forma direta para a configuração do campo:

- Coordenadas dos objetivos dos poços e suas profundidades
- Perfil de lâmina d'água do campo
- Número máximo de poços que cada manifold submarino suporta
- Número mínimo de poços por manifold, que corresponde ao grau de utilização de cada manifold pretendido no projeto
- Tipos de plataformas disponíveis e suas lâminas d'água

máximas

- Número máximo de interligações provenientes de manifolds ou poços ("bundles"), que podem ser interligados à Unidade Estacionária de Produção
- Alcance máximo permitido para poços direcionais
- Ordem dos custos de equipamentos e serviços:
 - . perfuração (US\$ x 10³/m)
 - . manifold submarino (US\$ x 10⁶)
 - . "bundle" de ligação entre manifold e plataforma (US\$ x 10³/m)
 - . "bundle" de ligação poço a manifold ou plataforma (US\$ x 10³/m)

Com posse dos dados acima, a configuração de exploração do campo submarino de petróleo fica, então precisamente definida pela posição exata da cabeça dos poços, pela posição exata dos manifolds com o conjunto de poços a eles interligados e, finalmente, pela posição exata da Unidade Estacionária de Produção com o tipo de plataforma nela utilizada. As figuras 1 e 2 ilustram com uma vista em perfil e uma planta esquemática, um campo submarino. A solução do problema consiste, portanto, em se determinar:

- . Coordenadas do posicionamento da UEP e plataforma utilizada
- . Coordenadas do posicionamento do(s) manifold(s) submarino(s), com os poços a ele(s) associados
- . Coordenadas das cabeças dos poços
- . Custos relativos a todos os investimentos necessários à configuração do campo

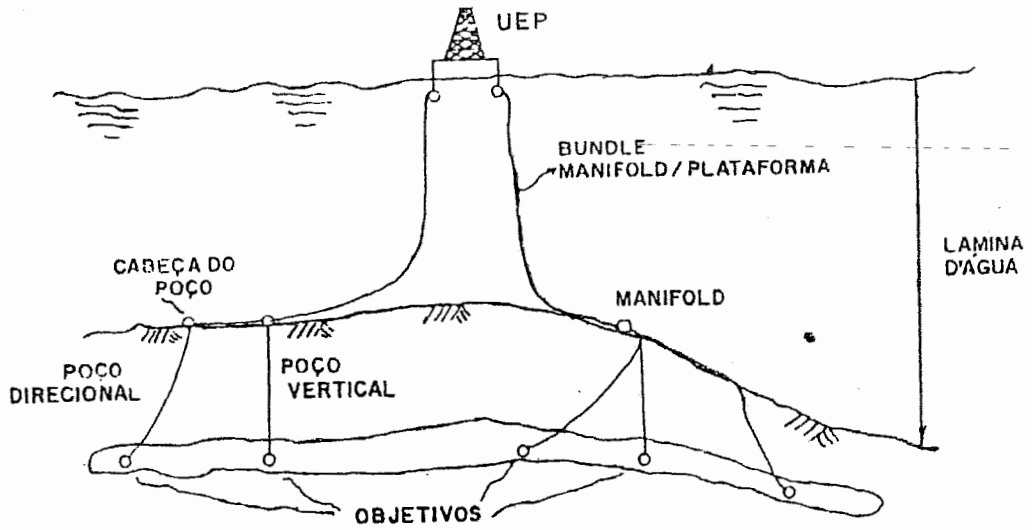


figura 1: VISTA EM PERFIL DE UM CAMPO SUBMARINO

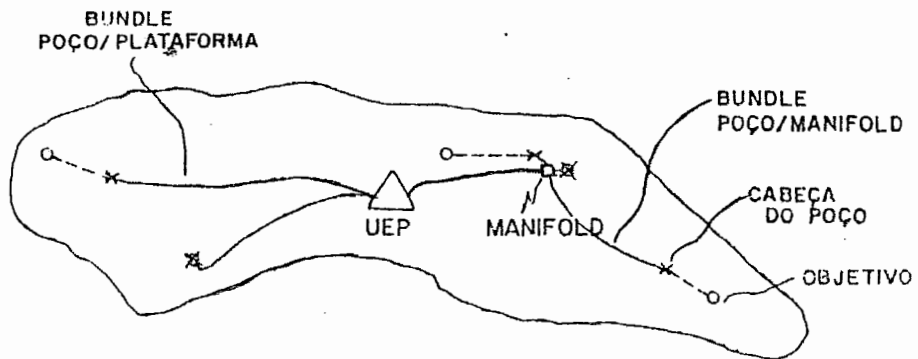


figura 2: PLANTA ESQUEMÁTICA DE UM CAMPO SUBMARINO

CAPÍTULO 4

MÉTODOS DE RESOLUÇÃO PARA O PCCS

4.1 - INTRODUÇÃO:

Tendo descrito detalhadamente o Problema de Explorar Campos Submarinos de Petróleo, veremos neste capítulo dois diferentes métodos de resolução para o problema.

A configuração de um campo submarino, é influenciada por muitos fatores, tais como a topologia e o tipo de terreno que compõe o solo submarino, a correntesa marítima, a lâmina d'água e a dificuldade de acesso a determinadas regiões. O elevado número de considerações a fazer une-se ainda às infinitas posições viáveis para a alocação das cabeças dos poços, dos manifolds e da UEP, levando à impossibilidade na prática da obtenção da solução ótima do PCCS.

De fato, pensando-se apenas na alocação de manifolds em um campo composto por m poços, mesmo que restrinja-se as possíveis localizações à n pontos, o número de soluções viáveis para o problema seria igual a n^m , crescendo exponencialmente a medida que o número de poços aumenta. Se ainda no mesmo problema considera-se todas as possíveis localizações para as cabeças dos poços bem como para a UEP, evidencia-se uma impreterível explosão combinatória.

Sob este enfoque, fica clara a inviabilidade de um método exato que procure a solução ótima do problema, face a sua complexidade. Assim sendo, o caminho mais eficiente para a obtenção de uma boa solução para o PCCS é o desenvolvimento de uma heurística eficaz para resolver o problema. Neste ítem dois métodos heurísticos são apresentados.

O primeiro método, abordado no ítem 4.2, foi desenvolvido pela PETROBRÁS e o ILTC em dezembro de 1990, sendo parte integrante do Sistema Inteligente para Configuração de Exploração de campos Submarinos (SICCS) [44].

Em seguida, no ítem 4.3, será desenvolvido um método heurístico que divide o problema em três etapas. A primeira e principal etapa de resolução será formulada como um Problema de Recobrimento, fazendo-se cumprir o objetivo de exemplificar a aplicação do modelo matemático e de técnicas de resolução do PR.

Excelentes resultados computacionais foram obtidos com o método, como será visto em capítulos posteriores.

As vantagens e desvantagens das formulações colocadas serão comentadas propiciando um posicionamento do estudo por recobrimento face à formulação anterior.

4.2 - MÉTODO HEURÍSTICO APRESENTADO PELA PETROBRÁS/ILTC:

Até dezembro de 1990, a PETROBRÁS não possuía nenhuma ferramenta informatizada para configurar a exploração de um campo submarino de petróleo, fazendo-se valer apenas da experiência e bom senso de um pequeno grupo de especialistas para escolher uma dentre várias alternativas de configuração. Unindo-se, então, ao ILTC, desenvolveu um Sistema Inteligente para Configuração de Campos Submarinos (SICCS), utilizando técnicas de inteligência artificial. O modelo matemático adotado para formular o problema será a seguir apresentado.

Para a formulação, algumas definições e convenções se fazem necessárias:

Sendo X,Y,Z coordenadas espaciais, a posição dos componentes do campo será representada pelas seguintes triplas de coordenadas:

- .Posição do objetivo do poço i: (X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi}) , $i=1, \dots, p$
- .Posição da cabeça do poço i: (X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}) , $i=1, \dots, p$
- .Posição do manifold j: (X_{mj}, Y_{mj}, Z_{mj})
- .Posição da plataforma (UEP): (X_p, Y_p, Z_p)

O perfil de lâmina d'água, será representado pela função f tal que: $Z = f(X, Y)$

Desta forma, o comprimento perfurado de um poço i será calculado pela expressão:

$$L_{\text{perf}(i)} = \sqrt{(X_{oi} - X_{ci})^2 + (Y_{oi} - Y_{ci})^2 + (Z_{oi} - Z_{ci})^2}$$

Analogamente, a distância da cabeça do poço i ao manifold j

será calculada por:

$$L_{\text{poço}(i)/\text{man}(j)} = \sqrt{(X_{ci} - X_{mj})^2 + (Y_{ci} - Y_{mj})^2 + (Z_{ci} - Z_{mj})^2}$$

E a distância entre o poço i e a UEP será calculada por:

$$L_{\text{poço}(i)/\text{plat}} = \sqrt{(X_{ci} - X_p)^2 + (Y_{ci} - Y_p)^2 + (Z_{ci} - Z_p)^2} + f(X_p, Y_p)$$

Finalmente, a distância entre o manifold j e a UEP será dada por:

$$L_{\text{man}(j)/\text{plat}} = \sqrt{(X_{mj} - X_p)^2 + (Y_{mj} - Y_p)^2 + (Z_{mj} - Z_p)^2} + f(X_p, Y_p)$$

O alcance do poço i será calculado pela expressão:

$$\text{Alcance}(i) = \sqrt{(X_{oi} - X_{ci})^2 + (Y_{oi} - Y_{ci})^2}$$

Definindo agora as variáveis discretas que compõem o modelo, temos:

$$K_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o poço } i \text{ está ligado ao manifold } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$K_{ip} = \begin{cases} 1, & \text{se o poço } i \text{ está ligado à plataforma} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Por último serão apresentadas as convenções adotadas no modelo:

• Alcancemax = alcance máximo para os poços direcionais

• LAmáx/plat = lâmina d'água máxima na qual a plataforma pode

ser posicionada

.L_{max/man} = lâmina d'água máxima para uso dos manifolds

.lim_{plat} = número máximo de ligações que a plataforma suporta

.lim_{max/man} = número máximo de ligações que os manifolds suportam

.lim_{min/man} = número mínimo de ligações que se deseja por manifold

.C_{perf} = Custo unitário de perfuração

.C_{bundle/poço} = custo unitário de bundle de linhas para ligação de poços

.C_{bundle/man} = Custo unitário do bundle de ligação dos manifolds

Assim sendo, o PCCS poderia ser escrito da seguinte maneira:

Conhecendo-se:

X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi}, a função $Z = f(x, y)$, lim_{plat}, lim_{max/man}, lim_{min/man}, L_{max/man}, C_{perf}, C_{bundle/poço}, C_{bundle/man}

Determinar:

X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}, X_{mj}, Y_{mj}, Z_{mj}, X_p, Y_p, Z_p, K_{ij}, K_{ip}

de forma a minimizar a seguinte função:

$$\begin{aligned} \text{CUSTO} = & \sum_{i=1}^p C_{\text{perf}} \times L_{\text{perf}(i)} + \sum_{i=1}^p C_{\text{bundle/poco}} \times \sum_{j=1}^n K_{ij} \times L_{\text{poco/man}(j)} \\ & + \sum_{i=1}^p C_{\text{bundle/poco}} \times K_{ip} \times L_{\text{poco}(i)/\text{plat}} \\ & + \sum_{j=1}^n C_{\text{bundle/man}} \times L_{\text{man}(j)/\text{plat}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Obedecendo as seguintes restrições:

- 1) $Z_{ci} = f(X_{ci}, Y_{ci})$ A cabeça do poço está no solo marinho
- 2) $Z_{mj} = f(X_{mj}, Y_{mj})$ O manifold está assentado no solo marinho
- 3) $Z_p = 0$ O nível do mar é tomado como referência para as medidas de Z
- 4) $Z_{mj} \leq LA_{max/man}$ Os manifolds não podem estar localizados em local de profundidade superior a sua profundidade máxima de uso
- 5) $f(X_p, Y_p) \leq LA_{max/plat}$ A plataforma deve estar localizada em local de lâmina d'água inferior ao seu limite
- 6) $\sum_{j=1}^P K_{ij} + K_{ip} = 1$ Cada poço só pode ser ligado a manifold ou à plataforma
- 7) $\sum_{i=1}^P K_{ij} \leq lim_{max/man}$ Cada manifold deve estar ligado a um número máximo de poços
- 8) $\sum_{i=1}^P K_{ij} \geq lim_{min/man}$ Cada manifold deve ter um número mínimo de poços a ele ligados
- 9) $\sum_{i=1}^P K_{ij} + m \leq lim_{plat}$ A plataforma deve ter o número máximo de ligações
- 10) $Alcance(\omega) \leq Alcance_{max}$ Os poços direcionais devem ter o alcance máximo

Para solucionar o problema acima formulado, técnicas de inteligência artificial foram utilizadas pela PETROBRÁS e o ILTC. A ambição inicial do grupo era a obtenção da solução ótima do problema, porém a memória do computador utilizado, se tornava insuficiente sempre que o número de poços ultrapassava 20. Assim sendo, a utilização de conceitos de busca em grafos de estado foi adotada. Inicialmente uma heurística definiu a localização dos manifolds atribuídos ao campo. A seguir, a partir do nó inicial do grafo, foi gerado o primeiro nível de filhos que representavam a interligação de cada poço do sistema ao primeiro manifold. Foi escolhido então, o melhor nó baseado em uma função heurística local e, a partir dele foram gerados os filhos que representavam a interligação de cada um dos poços restantes do sistema ao segundo manifold. O processo repetiu-se até que todos os manifolds fossem utilizados.

4.3- MÉTODO HEURÍSTICO PROPOSTO - UMA APLICAÇÃO DO PR GERANDO OS PROBLEMAS PCCS1 E PCCS2:

Neste tópico, o Problema de Configurar a Exploração de Campos Submarinos será abordado sob uma nova ótica e um método heurístico será desenvolvido para sua resolução.

O método apresentado divide o problema em três etapas definidas a seguir:

A primeira etapa objetiva estabelecer o número de manifolds que existirão no campo, suas localidades e o conjunto de poços a eles interligados.

Já na segunda fase de resolução, tendo-se posse da localização exata dos objetivos dos poços e suas profundidades, acrescido da localização exata dos manifolds aos quais interligam-se, busca-se o melhor posicionamento para as cabeças dos poços e por conseguinte, o alcance e a região a ser perfurada correspondente a cada um deles.

Finalmente, na terceira e última etapa, o melhor local para posicionar a Unidade Estacionária de Produção será definido com exatidão.

As fases do problema solucionadas nesta tese serão a primeira e a segunda. A obtenção da solução da terceira fase, apesar de não implicar em grande esforço adicional, ficará em aberto por distanciar-se do propósito de exemplificar a resolução de um Problema de Recobrimento, perdendo portanto o interesse para o trabalho desenvolvido.

A seguir será apresentado o desenvolvimento da primeira fase de resolução do PCCS.

Em 1984, A. Mehrez e A. Stulman [29] publicaram um artigo onde apresentaram uma interessante formulação para a obtenção da cobertura maximal contínua do problema de alocação de facilidades.

Supondo-se que seja dado um conjunto de pontos em R^2 de coordenadas $x_i, y_i, i=1, \dots, n$, o problema define a melhor localização de p facilidades de forma a atender ao maior número de pontos de demanda possível.

No artigo, Mehrez e Stulman desenvolveram o conceito de alcance efetivo que traduz-se pela existência de uma distância máxima permitida entre o ponto de demanda e a facilidade que o atende. Assim sendo, se a distância Euclidiana entre um determinado ponto de demanda e uma facilidade é menor ou igual ao raio efetivo de operação, ele poderá ser atendido pela facilidade.

Posteriormente, Goldberg [22], aprimorou a idéia introduzida por Mehrez e Stulman, atribuindo um diferente alcance para cada ponto de demanda, na resolução exata do Problema de Alocação de Radares, formulando-o também como um Problema de Recobrimento. A idéia foi ainda trabalhada por Goldberg em 1989, na formulação do Problema de localização de saídas de estações de Metrô, que também admite a resolução do problema em três fases. Recentemente, Goldberg e Claudio (1992), baseiam-se novamente no estudo para formular o Problema de localização de redes de comunicação.

Com base nos estudos realizados por Goldberg, aceitando-se como válida a existência dos alcances efetivos e aplicando-os ao PCCS, cada poço só poderá interligar-se à um manifold se a distância entre ambos for menor ou igual que o raio efetivo de operação do poço.

Desta forma, o problema será inicialmente resolvido no plano xy . Em seguida, com posse das coordenadas x e y dos pontos de localização dos manifolds, a coordenada z poderá ser obtida através da função f que representa a lâmina d'água, tal que $z = f(x,y)$. Com isto será imposta ao problema a restrição de assentamento dos manifolds no solo submarino.

Neste ponto, é interessante notar que a introdução da idéia de alcance efetivo ao PCCS, não leva a perda de generalidade da solução do problema, já que o raio efetivo de operação do poço pode ser estabelecido tão grande quanto se queira.

Ainda nesta fase de resolução, duas hipóteses serão feitas sobre o problema, descritas a seguir:

. Em princípio, considera-se todos os poços verticais, de forma a obter-se a localização de suas cabeças a partir da localização dos objetivos e suas profundidades.

. Considera-se ainda que todos os poços devem interligar-se a um manifold, não existindo portanto, interligações diretas entre poços e UEP.

Faz-se importante, todavia, ressaltar que tais hipóteses só serão admitidas durante a formulação desta primeira fase de resolução. Posteriormente será visto que elas também não comprometem a eficiência do método, sendo relaxadas na segunda fase de resolução e na geração da matriz de coeficientes tecnológicos do problema, respectivamente.

A primeira etapa de resolução do PCCS poderá então ser escrita da seguinte forma:

Sejam:

$M = \{1, 2, \dots, m\}$ o conjunto de poços do campo submarino

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ o conjunto de posições viáveis para a alocação dos manifolds

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ o vetor custo onde C_j , $j=1, \dots, n$, representa o custo de alocar um manifold em j acrescido do custo de interligá-lo a todos os poços que podem ser por ele atendidos.

$A = (a_{ij})$ e $a_{ij} \in \{0,1\}$ a matriz dos coeficientes tecnológicos, tal que:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o poço } i \text{ pode interligar-se a um} \\ & \text{manifold alocado em } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, onde $X_j \in \{0,1\}$, $j=1, \dots, n$, a variável que assume o determinado valor:

$$X_j = \begin{cases} 1, & \text{se um manifold é alocado em } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A alocação de um manifold em um ponto j produzirá um subconjunto de poços que poderão interligar-se a ele notado por M_j . Esses poços serão aqueles tais que sua distância Euclidiana até o manifold é menor ou igual ao seu raio efetivo de operação R_i . Com esse enfoque em vista caberá agora determinar a quantidade e a localização exata dos manifolds atribuídos ao campo submarino de forma a atender a todos os poços com um custo de investimento razoável.

O problema, denotado por PCCS1, será então, escrito como:

$$(PCCS1) \quad \text{Min} \quad \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (4.2)$$

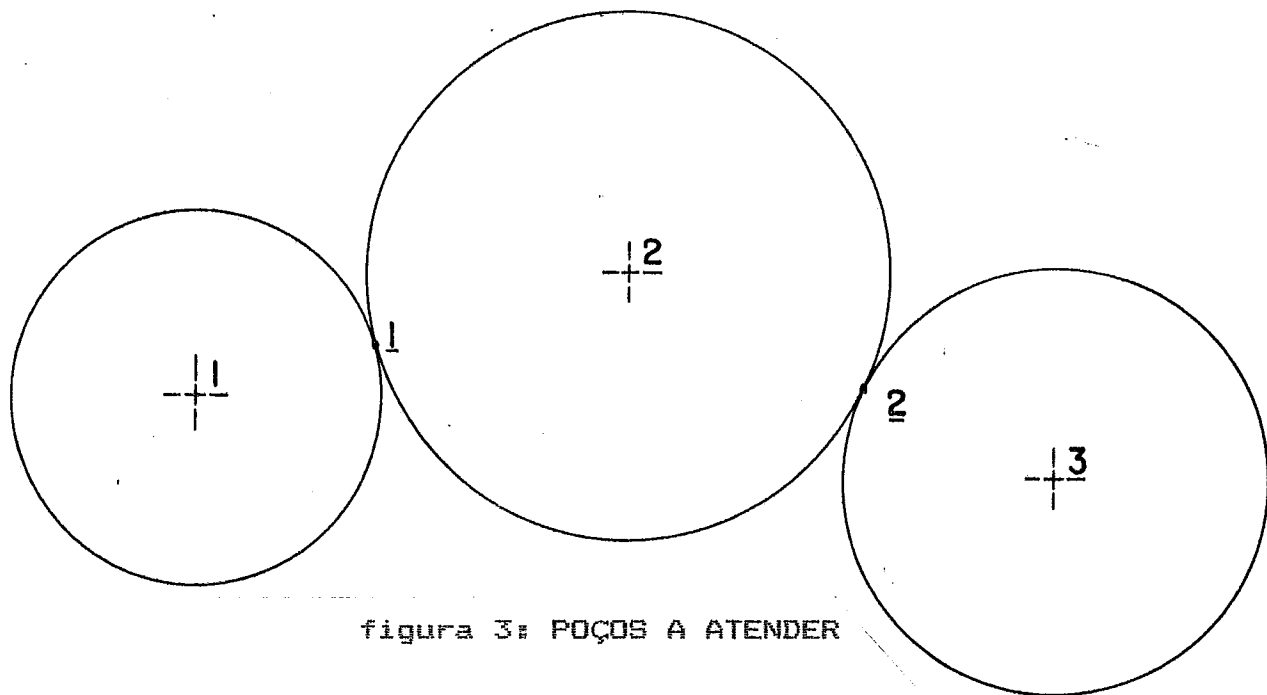
$$\text{s.a.} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq 1 \quad i=1,2,3,\dots,m \quad (4.3)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (4.4)$$

As demais restrições impostas ao problema, descritas no capítulo anterior, serão tratadas na geração de colunas da matriz de coeficientes tecnológicos, assunto este abordado no capítulo seguinte. Desta forma, trabalharemos com a solução de um Problema de Recobrimento sem nenhuma restrição adicional, podendo assim fazer uso dos métodos heurísticos e/ou exatos encontrados na literatura (capítulo 2).

A restrição (4.3) garante que todos os poços sejam ligados a pelo menos um manifold.

Neste ponto, é natural que se questione o uso do modelo de recobrimento para formular o problema quando comparado ao modelo de particionamento. Este último pode parecer mais adequado tendo em vista que sua solução interliga cada poço a exatamente um manifold. Entretanto, como pode ser visto no exemplo geométrico dado a seguir (figura 3), a formulação do problema como um Problema de Particionamento pode frequentemente levar a soluções inviáveis.



Seja $M=\{1,2,3\}$, o conjunto de poços do campo submarino, R_i a máxima distância euclidiana entre o poço i e o manifold ao qual é ligado, e $\underline{1}$ e $\underline{2}$ as possíveis localizações dos manifolds que atenderão a estes três poços. Verifica-se facilmente que manifolds devem ser alocados tanto em $\underline{1}$ quanto em $\underline{2}$ para que os poços 1 e 3 sejam atendidos. Com isto, no entanto, a solução do problema terá o poço 2 ligado aos dois manifolds, já que ambos distanciam-se de 2 de uma distância menor ou igual a R_2 . Desta forma, caso o problema tivesse sido formulado como um PP, sua solução seria inviável.

Esclarece-se assim a opção pelo modelo de recobrimento face ao modelo de particionamento, ficando ainda a lembrança da necessidade de uma análise do resultado do problema objetivando o encontro de poços ligados a mais de um manifold, caso existam. A solução deverá então ser revista, estabelecendo-se apenas a ligação mais barata entre tais poços e os manifolds com uma consequente diminuição no custo relativa às ligações desnecessárias.

Com a solução da primeira etapa do método proposto, a localização dos manifolds do campo estará definida, bem como o conjunto de poços à eles interligados.

Partindo-se agora para o desenvolvimento da segunda etapa de resolução, objetiva-se estabelecer o melhor posicionamento para as cabeças dos poços. Nesta fase relaxa-se a hipótese feita na fase anterior que estabelecia todos os poços como poços verticais, admitindo-se então a existência de poços direcionais, tais que suas cabeças localizam-se em cima da linha que une o objetivo do

poço e o manifold ao qual se interliga, logicamente respeitando o limite imposto pelo alcance máximo permitido (figura 4).

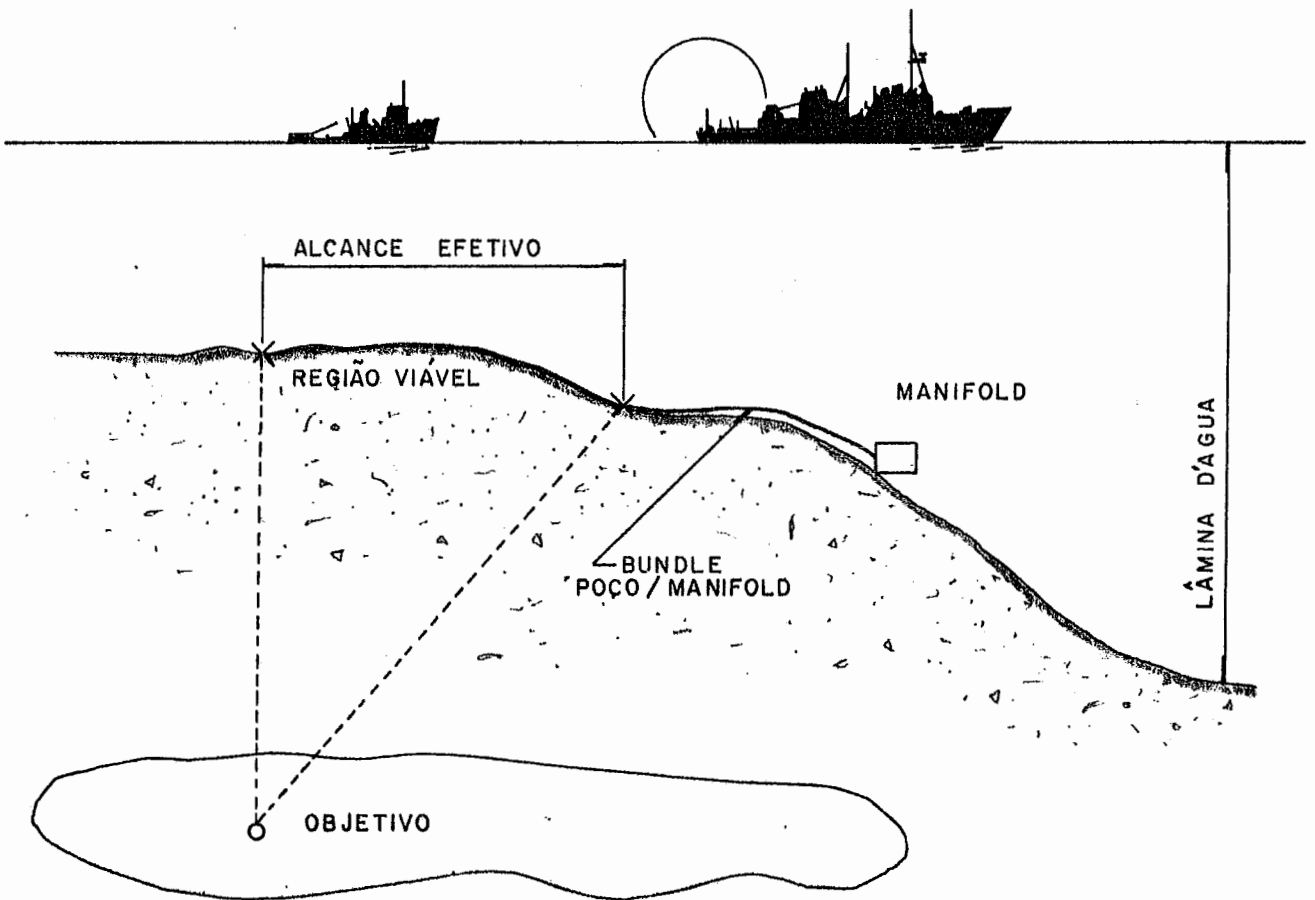


figura 4: REGIÃO VIÁVEL PARA ALOCAÇÃO DAS CABEÇAS DOS POÇOS

Evidencia-se que tal admissão é bastante razoável, já que localizando-se a cabeça do poço fora da linha citada, o custo de operação envolvido certamente cresceria.

Assim sendo, o pretendido agora é determinar dentre os pontos viáveis de alocação da cabeça dos poços, aquele que implica num menor custo de investimento, representado pelo custo de perfuração do terreno acrescido do custo do "bundle" de ligação poço a manifold.

Representando como no ítem anterior a posição dos componentes do campo pelas triplas de coordenadas espaciais X, Y, Z , teremos:

.Posição do objetivo do poço i : (X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi}) , $i=1, \dots, m$

.Posição da cabeça do poço i : (X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}) , $i=1, \dots, m$

.Posição do manifold j : (X_{mj}, Y_{mj}, Z_{mj}) , $j=1, \dots, p$

onde p é o número de manifolds atribuídos ao campo estabelecido pela resolução da primeira etapa do método.

O comprimento perfurado de um poço i será, como antes, calculado pela expressão:

$$L_{\text{perf}(i)} = \sqrt{(X_{oi} - X_{ci})^2 + (Y_{oi} - Y_{ci})^2 + (Z_{oi} - Z_{ci})^2}$$

E a distância da cabeça do poço i ao manifold j será calculada por:

$$L_{\text{poço}(i)/\text{man}(j)} = \sqrt{(X_{ci} - X_{mj})^2 + (Y_{ci} - Y_{mj})^2 + (Z_{ci} - Z_{mj})^2}$$

O alcance do poço i será também calculado pela expressão:

$$\text{Alcance}(i) = \sqrt{(X_{oi} - X_{ci})^2 + (Y_{oi} - Y_{ci})^2}$$

Considerando-se ainda:

$$K_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o poço } i \text{ está ligado ao manifold } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

.Alcancemax = alcance máximo para os poços direcionais

.Cperf = Custo unitário de perfuração

.Cbundle/poço = custo unitário de bundle de linhas para ligação de poços

A segunda fase de resolução do PCCS traduz-se, então num problema de minimização unidimensional denotado por PCCS2, podendo ser escrita da seguinte maneira:

Conhecendo-se:

$X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi}, X_{mj}, Y_{mj}, Z_{mj}, K_{ij}, i=1, \dots, m, j=1, \dots, p, C_{perf}$ e

$C_{bundle/poço}$

Determinar:

$X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}, i=1, \dots, m$

de forma a minimizar a seguinte função:

$$CUSTO = \sum_{i=1}^m C_{perf} \times L_{perf(i)} + \sum_{i=1}^m C_{bundle/poço} \times \sum_{j=1}^p K_{ij} \times L_{poco(i)/man(j)}$$

obedecendo às restrições:

1) $Alcance(i) \leq Alcancemax$ Os poços direcionais devem respeitar o alcance máximo

2) $Z_{ci} = f(X_{ci}, Y_{ci})$ A cabeça do poço está no solo submarino

A principal vantagem do método proposto em relação ao método apresentado pela PETROBRÁS e o ILTC é sem dúvida o tratamento quantitativo dado a um problema face ao tratamento qualitativo dado pelo SICCS, tendo-se em vista a notória natureza combinatória dos dados de entrada.

Na abordagem feita pelo método proposto, um número bem maior de possibilidades para a configuração do campo pode ser considerado sem que para isto seja necessária nenhuma análise prévia de especialistas, como por exemplo uma busca de locais mais adequados para a localização de manifolds.

CAPÍTULO 5

GERAÇÃO DA MATRIZ DE COEFICIENTES TECNOLÓGICOS PARA O PCCS1

5.1 - INTRODUÇÃO:

No capítulo anterior foi apresentada uma formulação para a primeira etapa de resolução do PCCS (PCCS1), que permite abordar o problema como um PR. Apesar da grande complexidade ainda envolvida, a formulação é conveniente pois estende ao caso o uso de técnicas de resolução até certo ponto bem eficientes.

Permanece, todavia, a dificuldade intrínseca de obter-se a matriz de coeficientes tecnológicos (A) do problema. Nota-se facilmente que o número de pontos viáveis para a alocação dos manifolds no campo é infinito.

Assim sendo, impõe-se de imediato a obtenção de um critério de redução e discretização da região viável de alocação, sem que se perca, entretanto, a capacidade de determinação de uma boa solução.

Como providenciar o sugerido conjunto finito de alocações candidatas, será o tema deste capítulo.

No item 5.2 o método utilizado na discretização será apresentado e no item 5.3, técnicas de redução de colunas para o PR e em particular para o PCCS serão discutidas.

5.2 - MÉTODO DE DISCRETIZAÇÃO DA REGIÃO VIÁVEL DO PCCS1:

Para o bom funcionamento do método de resolução do PCCS desenvolvido no capítulo anterior, está perfeitamente claro o papel fundamental que tem o critério utilizado para discretizar e limitar o número de pontos viáveis para alocação de manifolds num campo submarino de petróleo.

Em primeira instância, o critério deve reunir dentro do conjunto de pontos viáveis estabelecido por sua aplicação, o maior número de "bons candidatos" para a instalação de manifolds, de forma a assegurar a possibilidade de determinação de uma boa solução. Por outro lado, ele deve ser suficientemente simples para não acarretar um custo computacional insustentável. Sem considerar essas premissas a resolução do PCCS1, como foi formulado, seria inviável na prática.

Visando justamente viabilizar a resolução do problema, o conceito de alcance efetivo, introduzido por Mehrez e Stulman, foi considerado. Sob esta abordagem, um raio de operação R é associado a cada poço, de forma que o mesmo só poderá interligar-se a um manifold caso a distância entre ambos seja menor ou igual ao referido raio. Assim sendo, os manifolds capacitados a atender a um determinado poço deverão estar localizados em qualquer ponto no interior ou na superfície de um círculo de raio R , centrado no poço. Na medida que estes círculos se interceptam pontos e áreas comuns vão sendo definidos de maneira a, caso utilizados para a alocação, atenderem a dois ou mais poços.

Ainda no mesmo artigo, Mehrez e Stulman demonstraram uma

Ainda no mesmo artigo, Mehrez e Stulman demonstraram uma proposição que determina a existência de uma solução ótima para a obtenção da cobertura maximal do problema de alocação de facilidades, no conjunto finito de pontos determinados pelas interseções dos círculos assim traçados.

Na obtenção da cobertura maximal do problema de alocação de facilidades, o número de facilidades é previamente determinado e suas localizações buscam o atendimento do maior número de pontos de demanda. Esta abordagem aproxima-se muito do PCCS1 ao considerarmos que a sua solução de mínimo custo, evidentemente corresponderá àquela que contiver o menor número de manifolds alocados de forma a atender a todos os poços do campo.

Sob este enfoque, é bastante razoável fazer uso da proposição demonstrada por Mehrez e Stulman na elaboração do critério de discretização da região viável do PCCS1, ficando clara a obtenção de bons pontos candidatos a alocação de manifolds num campo submarino, no conjunto finito de pontos determinados pelas interseções dos círculos centrados nos poços, com raio igual ao raio de atuação do poço.

A figura 5 ilustra a obtenção de posições viáveis para a alocação dos manifolds pela aplicação do critério apresentado, representada pelo conjunto $N=\{1,2,3,\dots,20\}$. O campo é composto pelo conjunto de poços $M=\{1,2,\dots,9\}$.

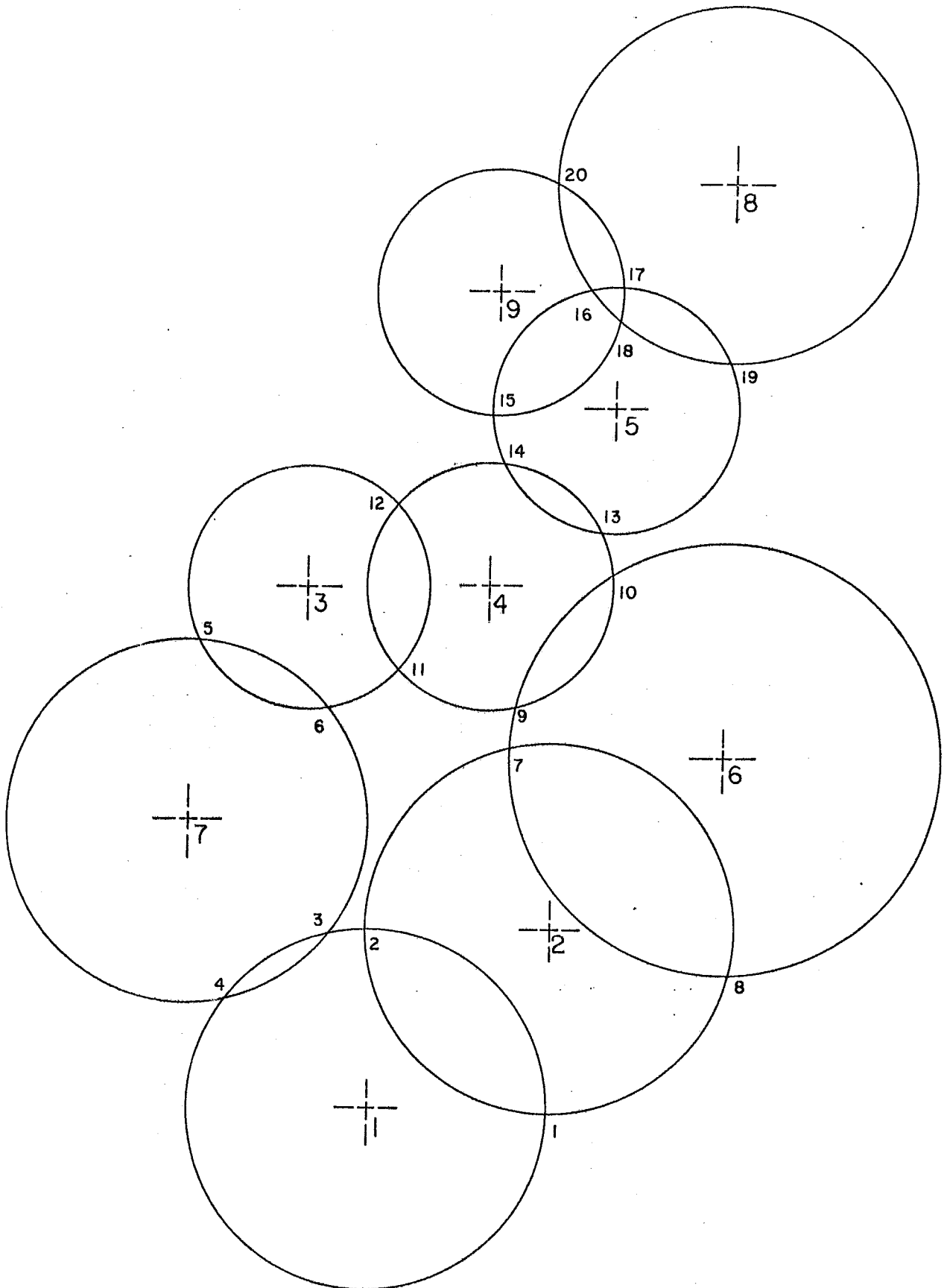


figura 5: PONTOS VIÁVEIS PARA ALOCAÇÃO DE MANIFOLDS

5.3 - TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE COLUNAS:

Com o critério de discretização da região viável do PCCS1 desenvolvido no item anterior, passamos de infinitos pontos candidatos a alocação de manifolds num campo submarino, a um conjunto finito e enumerável de pontos bem determinado.

Todavia, para um campo com um número de poços elevado e com raios de operação tais que as interseções entre círculos aconteçam com frequência, pode-se chegar ainda a um conjunto de posições viáveis para a alocação dos manifolds grande o suficiente para comprometer a eficácia do método de resolução do problema.

Neste ponto faz-se importante, então, a utilização de técnicas de redução de linhas e colunas da matriz de coeficientes tecnológicos (A), de modo a reduzir o tamanho do problema facilitando a tarefa da procura de uma boa solução.

Em primeira instância serão abordadas reduções lógicas associadas exclusivamente ao PCCS1. A aplicação dessas reduções faz-se não somente interessante, como também necessária ao atendimento de todas as restrições impostas ao problema. Em seguida, será feita a apresentação de regras de eliminação de linhas e colunas válidas para o PR e aplicadas ao caso.

Quando o PCCS1 foi formulado como um PR sem nenhuma restrição adicional, ganhou-se muito com o poder de utilização de técnicas de resolução já conhecidas, entretanto estabeleceu-se o compromisso de tratar as restrições pendentes na geração da matriz A. Mais uma vez ganha-se com esta abordagem já que a imposição das restrições nesta fase de resolução, vem reduzir o problema,

simplificando-o.

As restrições relativas ao uso de manifolds no campo submarino correspondem a lâmina d'água máxima para a sua utilização, bem como os limites mínimo e máximo no número de poços a eles interligados.

Com respeito a primeira restrição, as colunas da matriz correspondentes a pontos onde a lâmina d'água é superior ao limite máximo admissível, serão eliminadas.

No tratamento do número mínimo de poços ligados aos manifolds, procura-se inicialmente colunas que cubram uma quantidade de linhas menor que este limite. Cada uma dessas colunas passará então a cobrir também as linhas correspondentes aos poços mais próximos do manifold, até que a restrição seja satisfeita.

Finalmente, busca-se na matriz colunas cobrindo um número de linhas maior que o limite superior de ligações feitas aos manifolds. Essas colunas então passarão a não cobrir as linhas correspondentes aos poços mais distantes do manifold, até que este limite seja também alcançado.

É importante verificar que com as rearranjos feitas nas colunas da matriz, o vetor custo deve em consequência ser adequadamente ajustado.

Além das reduções lógicas apresentadas, existem ainda várias regras de eliminação de linhas e colunas de um PR [19]. Entretanto, a utilização dessas regras envolvem, evidentemente, um esforço computacional adicional. Assim sendo, com o objetivo de associar um custo computacional admissível com uma razoável simplificação do problema, duas regras de redução serão aplicadas

à matriz.

Seja a^i a i -ésima linha e a_j a j -ésima coluna da matriz $A=(a_{ij})$, $M=\{1,2,3,\dots,m\}$ o conjunto de linhas e $N=\{1,2,3,\dots,n\}$ o conjunto de colunas. As reduções realizadas sobre a matriz, serão as seguintes:

1) Considerando M_j o conjunto de linhas cobertas pela coluna j , ou seja, $M_j = \{i \in M \mid a_{ij} = 1\}$, $j \in N$, temos:

Se $M_k \subseteq M_l$ e $C_k \geq C_l$, a coluna k pode ser eliminada.

Diz-se, neste caso, que a coluna k é dominada pela coluna l , já que esta última cobre pelo menos os mesmos poços que a coluna k a um custo menor ou igual.

Para um melhor esclarecimento desta técnica de redução seja o exemplo numérico dado a seguir:

$$\begin{aligned} M &= \{ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \} \\ C &= \{ 10, 8, 7, 11, 9, 8, 6 \} \\ A &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & & \\ 1 & & & 1 & 1 & 1 & \\ & 1 & 1 & & & 1 & \\ 1 & & & 1 & & & 1 \\ 1 & 1 & & & 1 & & \\ 1 & & 1 & 1 & 1 & & \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Observando-se as colunas 1 e 4 da matriz A , verifica-se que a primeira cobre as linhas 1, 2, 4, 6 e 7, possuindo um custo associado de 10, enquanto a segunda cobre apenas as linhas 1, 2, 4 e 7 possuindo um custo maior, igual a 11. Fica claro, então que a coluna 4 nunca participará da solução ótima do problema, podendo portanto ser eliminada.

2) Se a^i é um vetor nulo para qualquer i , não existe solução desde que a i -ésima restrição não pode ser satisfeita.

No PCCS1, esta segunda regra traduz-se pela possível existência de poços, cujos círculos neles centrados e com raio igual aos seus raios de operação, não se interceptam com nenhum outro círculo traçado no campo.

No tratamento dado ao caso, procura-se os k pontos viáveis para a alocação de manifolds mais próximos do poço. Estende-se, então, o raio de operação do poço de maneira a possibilitar a sua ligação a todos aqueles dentre os k pontos, que não estejam já saturados atendendo a um número de poços equivalente ao limite máximo de ligações que os manifolds suportam. Desta forma, teremos $a_{ij}=1$, onde j equivale às colunas correspondentes. Todavia, resta ainda a possibilidade das k colunas estarem saturadas. Neste caso, a linha a^i é eliminada da matriz e o poço é diretamente ligado à UEP. Com esta abordagem relaxa-se a segunda hipótese feita no desenvolvimento da formulação do PCCS1, que não admitia "bundles" de ligação poço a UEP. É interessante notar que tal enfoque é bastante coerente no sentido em que as interligações poço a UEP são realizadas justamente por aqueles poços que estão mais distantes dos manifolds disponíveis no campo.

Cabe neste ponto ressaltar a importante lembrança de que as reduções lógicas devem ser aplicadas a matriz antes das regras válidas ao PR. Caso contrário corre-se o risco de eliminar colunas por dominância, e mais tarde verificar que a coluna dominante não atende às restrições impostas ao problema sendo por isto eliminada ou mesmo modificada.

CAPÍTULO 6

IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO DE RESOLUÇÃO DO PCCS

6.1 - INTRODUÇÃO:

No método de resolução do PCCS apresentado, pode-se distinguir três aspectos: um primeiro estudo visando estabelecer os pontos viáveis para a alocação de manifolds, de forma a elaborar a matriz de coeficientes tecnológicos (A) do PCCS1. Em uma segunda etapa, técnicas de resolução do PR serão utilizadas na busca de uma boa solução para o posicionamento dos manifolds no campo. Finalmente, para a completa solução do problema proposto, a localização da cabeça dos poços será definida através da resolução do PCCS2.

Neste capítulo todos os algoritmos utilizados para solucionar cada uma das etapas, serão apresentados. No item que se segue será inicialmente exposto o algoritmo que gera a matriz dos coeficientes (A). Em seguida serão apresentados e discutidos os algoritmos escolhidos para resolver o PCCS1, bem como o motivo da escolha. E finalmente, no tópico 6.4, será elaborado o algoritmo que procura uma boa solução para o problema de programação não-linear PCCS2.

6.2 - ALGORITMO PARA OBTENÇÃO DA MATRIZ DE COEFICIENTES TECNOLÓGICOS (A) DO PCCS1:

No capítulo 5 apresentou-se o método de obtenção da matriz de coeficientes tecnológicos do PCCS1 em duas etapas.

Na primeira etapa definem-se as posições viáveis para os manifolds, nos pontos onde interceptam-se os círculos centrados nos poços e com raios iguais aos seus raios efetivos de operação.

De posse desses pontos de interseção as colunas da matriz são facilmente organizadas verificando-se para cada ponto j candidato, os poços a atender que estão a uma distância menor ou igual ao seu raio de operação. Caso o poço i esteja nesta situação faz-se $a_{ij} = 1$, caso contrário $a_{ij} = 0$.

O algoritmo que resolve a primeira etapa do método foi apresentado e utilizado por Goldberg [22], em 1987, na sua tese de mestrado.

Na segunda fase são aplicadas as reduções lógicas e reduções válidas para o PR à matriz encontrada. O algoritmo que resolve a segunda etapa do método foi então desenvolvido, de forma a percorrer inicialmente todas as colunas da matriz em busca de alguma coluna que não atenda as restrições de lâmina d'água máxima para uso de manifolds e números mínimo e máximo de ligações feitas entre poços e manifolds. O tratamento dado pelo algoritmo a estas colunas está colocado no item 5.3 do capítulo 5.

Em seguida, para cada coluna j , percorre-se todas as outras colunas da matriz na procura de algumas por ela dominada. Caso exista então, colunas dominadas pela coluna j , o algoritmo opera

de vista computacional, tendo complexidade de $O(p^2)$, onde p é o número de colunas da matriz tratada. Apesar do esforço computacional envolvido, as reduções de colunas por dominância são bastante válidas por obterem simplificações significativas nos problemas.

6.3 - ALGORITMO PARA RESOLUÇÃO DO PCCS1:

Tendo sido o PCCS1 formulado como um PR, pode-se fazer uso dos diversos métodos apresentados na literatura para solucioná-lo.

Com o objetivo de fazer comparações a respeito do desempenho alcançado pelos métodos, mais de uma técnica de resolução foi implementada e testada.

Levando-se em conta os recursos disponíveis para a execução do algoritmo bem como o tipo de problema considerado, foram escolhidos dois métodos heurísticos e um método exato para solucionar alguns casos propostos.

Antes de aplicar os métodos aos principais exemplos apresentados no capítulo 7, alguns exemplos menores encontrados na literatura [4,18 e 37] (cujas soluções ótimas são previamente conhecidas) e outros gerados aleatoriamente, foram resolvidos com o intuito de estabelecer-se o(s) melhor(es) algoritmo(s) a ser(em) utilizado(s).

Os algoritmos testados serão então descritos a seguir.

Assim sendo, considere-se as definições abaixo colocadas:

a^i é a i -ésima linha da matriz A

a_j é a j -ésima coluna da matriz A

$$M = \{1, 2, \dots, m\}$$

$$N = \{1, 2, \dots, n\}$$

$$M_j = \{i \in M \mid a_{ij} = 1\}, j \in N$$

$$N_i = \{j \in N \mid a_{ij} = 1\}, i \in M$$

$X \in \{0, 1\}^n$, tal que $A X \geq e$ é uma cobertura do problema.

$K_j = |M_j \cap R|$, $j \in M$, onde R é o conjunto de linhas não cobertas em determinada iteração. Assim sendo, K_j representa o número de linhas que serão cobertas com a introdução de X_j na solução.

$S(x) = \{j \in N \mid X_j = 1\}$ é o suporte da cobertura. Uma cobertura cujo suporte é mínimo não podendo-se portanto retirar nenhuma variável dela sem perder sua viabilidade é denominada cobertura "prime".

6.3.1 - Algoritmo de Vasko e Wilson:

O algoritmo de Vasko e Wilson [41], (1984) trata de um método heurístico que constrói uma cobertura a partir de uma sequência de passos, cada um deles consistindo da seleção de uma variável X_j que minimiza uma certa função f .

O tipo de algoritmo apresentado é bastante comum na literatura sendo denotado por "guloso".

A opção por este método heurístico baseou-se no fato dele ser um dos mais eficientes dentre os de mesmo tipo. O método é específico para o Problema de Recobrimento ponderado, valendo-se

dos diferentes custos associados a cada coluna.

O primeiro passo do algoritmo inicializa todo $X_j=0$. A seguir, um índice j é determinado de modo a minimizar a função f , fazendo-se $X_j = 1$. O mesmo critério é utilizado repetidamente até que uma solução viável seja obtida. No próximo passo uma cobertura "prime" é alcançada através da remoção de elementos redundantes.

O procedimento descrito é formalmente colocado a seguir:

PASSO 0: Faça $R = M$, $S = \phi$, $t = 1$, vá para o passo 1.

PASSO 1: Se $R = \phi$, vá para o passo 2.

Caso contrário, faça:

$$K_j = |M_j \cap R|,$$

$$\text{Escolha } j(t) \text{ tal que } f(C_{j(t)}, K_{j(t)}) = \min_{K_j > 0} f(C_j, K_j)$$

$R = R \setminus M_{j(t)}$, $S = S \cup \{j(t)\}$, $t = t + 1$, vá para o passo 1.

PASSO 2: Organize os elementos de S em ordem decrescente de C_j . Considere os elementos $i \in S$ em ordem, e se $S \setminus \{i\}$ é uma cobertura viável, faça $S = S \setminus \{i\}$. Quando todo $i \in S$ tiver sido considerado, S define uma cobertura "prime".

Vasko e Wilson consideraram o uso das sete seguintes funções $f(C_j, K_j)$:

(1) C_j

(2) C_j / K_j

(3) $C_j / \log_2 K_j$

(4) $C_j / K_j \log_2 K_j$

(5) $C_j / K_j \ln K_j$

(6) C_j / K_j^2

(7) $(C_j)^{1/2} / K_j^2$

As funções acima relacionadas diferem entre si quanto ao peso que é dado ao número K_j de linhas cobertas, em relação ao peso que é dado ao custo C_j .

Todavia, como foi visto no capítulo 2, apesar da variedade de funções consideradas, Ho [25] mostrou que as funções (1) a (7) tem todas um comportamento muito pobre quando utilizadas separadamente, no que diz respeito a análise do pior caso.

Para contornar este fato, Balas e Ho [4], sugeriram o uso intermitente de várias funções no passo 2 do algoritmo, obtendo dessa forma bons resultados.

Assim sendo, o algoritmo de Vasko e Wilson determina aleatoriamente a função f a ser utilizada, cada vez que uma variável entra na solução.

Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo foram bons, podendo-se observar que a solução encontrada aproximava-se bastante da solução ótima do problema, sempre que esta era conhecida.

6.3.2 - Algoritmo de Baker:

Uma vez encontrados na literatura diversos métodos heurísticos de resolução do PR, a idéia do algoritmo heurístico proposto por Baker [5], em 1981 é a de combinar duas soluções estabelecidas em uma terceira de menor custo. De posse das soluções candidatas, o algoritmo identifica conjuntos de colunas que cobrem conjuntos de linhas de forma mutuamente exclusiva.

Quando todas as colunas são atribuídas a algum conjunto, os custos dos conjuntos correspondentes a cada solução são comparados e os conjuntos de mínimo custo são utilizados na composição da nova solução.

Colocando agora mais formalmente, considere-se:

$P^1 = \{P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1n}\}$ e $P^2 = \{P_{21}, P_{22}, P_{2t}\}$ as duas soluções candidatas para o problema.

R_i é o conjunto de linhas cobertas pelo conjunto de colunas i

K_i^j é o conjunto de colunas da solução j que cobrem as linhas do conjunto R_i .

Z_{ij} é o custo do conjunto de colunas K_i^j

O algoritmo pode então ser escrito como:

PASSO 1: $i = 0$, $R_i = \phi$, $Z_{ij} = 0$, para todo i e j

PASSO 2: Encontre uma coluna j^* da solução 1 tal que

$$P_{1j} \cap R_i = \phi, \text{ para todo } i$$

Caso exista a coluna j^* , faça:

$$i = i + 1$$

$$R_i = \{i \mid i \in P_{1j^*}\}$$

$$K_i^1 = \{P_{1j^*}\}$$

$$Z_{i1} = C_{1j^*}$$

Caso contrário, vá para o passo 6.

PASSO 3: Encontre uma coluna j^* da solução 2 tal que

$$P_{2j} \cap R_i \neq \phi$$

Caso exista a coluna j^* , faça:

$$R_i = \{i \mid i \in P_{2j^*}\}$$

$$K_i^2 = K_i^2 \cup \{P_{2j^*}\}$$

$$Z_{i2} = Z_{i2} + C_{2j^*}$$

PASSO 4: Encontre uma coluna j^* da solução $\tilde{1}$ tal que

$$P_{1j} \cap R_i \neq \emptyset$$

Caso exista a coluna j^* , faça:

$$i = i + 1$$

$$R_i = R_i \cup \{i \mid i \in P_{1j^*}\}$$

$$K_i^1 = K_i^1 \cup \{P_{1j^*}\}$$

$$Z_{i1} = Z_{i1} + C_{1j^*}$$

Passo 5: Repita os passos 3 e 4 até que nenhuma coluna j^* seja encontrada em nenhum dos dois passos. A seguir vá para o passo 2.

PASSO 6: Faça CUSTO = 0 e SOLUÇÃO = \emptyset

Para cada conjunto R_i , faça:

Se $Z_{i1} \leq Z_{i2}$, então

$$\text{CUSTO} = \text{CUSTO} + Z_{i1}$$

$$\text{SOLUÇÃO} = \text{SOLUÇÃO} \cup \{K_i^1\}$$

Caso contrário,

$$\text{CUSTO} = \text{CUSTO} + Z_{i2}$$

$$\text{SOLUÇÃO} = \text{SOLUÇÃO} \cup \{K_i^2\}$$

O algoritmo de Baker, que é de complexidade $O(m^2)$, pode também ser aplicado ao Problema de Particionamento, diferindo, entretanto na análise do pior caso. Nos testes realizados com o algoritmo, não foi obtido sucesso. Uma vez que, tendo-se gerado duas diferentes soluções pelo algoritmo de Vasko e Wilson como candidatas iniciais, o algoritmo de Baker não obteve melhora na solução em nenhum dos casos.

6.3.3 - Algoritmo de Balas:

O algoritmo exato de Balas [3] baseia-se numa família de planos de corte gerada a partir de limites condicionais como foi explicado no capítulo 2. O procedimento utiliza um conjunto de heurísticas na busca de coberturas "primes" e um outro conjunto de heurística para obter soluções viáveis para o problema dual linear, necessárias à geração dos cortes. O método do subgradiente é também utilizado na obtenção de limites inferiores, bem como técnicas de enumeração implícita associadas à regras de branch-and-bound. A união de todas estas técnicas de resolução gera um algoritmo testado por Balas e Ho [4] com bons resultados para problemas com até 200 restrições e 2000 variáveis e matrizes de baixa densidade. A escolha deste método para resolver o FCCS se deu por sua maior adequação ao problema face aos demais métodos exatos apresentados.

Para melhor esclarecer o procedimento, considere-se as seguintes definições:

Z_l - melhor limite inferior obtido

Z_u - melhor limite superior obtido

u - solução do problema dual linear,

$$s = c - uA$$

$$T(x) = \{i \in M \mid a^i x = 1\}$$

A teoria em que se baseia a família de cortes gerada a partir de limites condicionais pode ser resumida como se segue:

Seja u uma solução do problema dual linear que satisfaça a seguinte restrição:

$$\sum_{j \in S} s_j \geq z_u - u\epsilon \quad (6.1)$$

para algum $S \subseteq N$.

Seja $S = \{j(1), j(2), \dots, j(p)\}$ e $Q_i, i=1, \dots, p$, um conjunto de índices de N que satisfaça a:

$$\sum_{i/j \in Q_i} s_{j(i)} \leq s_j, \quad j \in N. \quad (6.2)$$

Assim sendo, toda cobertura X tal que $CX < Z_u$, satisfaz a disjunção:

$$\bigvee_{i=1}^p (X_j = 0, j \in Q_i) \quad (6.3)$$

Consequentemente, para qualquer escolha de índices $h(i) \in M, i=1, \dots, p$, a disjunção (6.3) implica na inequação:

$$\sum_{j \in W} X_j \geq 1 \quad (6.4)$$

$$\text{onde } W = \bigcup_{i=1}^p (N_{j(i)} \setminus Q_i)$$

Finalmente, se $j(i) \in Q_i, i=1, \dots, p$, e se \bar{X} é uma cobertura tal que $S \subseteq S(\bar{x})$ e $h(i) \in T(\bar{x}) \cap M_{j(i)}, i = 1, \dots, p$, então a inequação (6.4) corta \bar{X} e define a faceta:

$$P^* = \text{conv} \{x \in R^n \mid Ax \geq e, \sum_{j \in W} x_j \geq 1, x \geq 0, x_j \text{ inteiro}, j \in N\}$$

Utilizando-se os resultados acima expostos, pode-se gerar uma sequencia de diferentes planos de corte através da obtenção de coberturas e soluções viáveis para o problema dual linear. A cobertura gera um limite superior e a solução dual, um limite inferior para o PR. Como cada inequação obtida corta a cobertura que satisfaz as demais inequações previamente geradas, e o número de coberturas distintas é limitado, o procedimento terminará num número finito de operações com a cobertura ótima.

O algoritmo de Balas, intercala-se então entre dois conjuntos de heurísticas. O primeiro busca uma cobertura "prime" para o problema em questão, como também uma possível melhora no limite superior, enquanto o segundo procura uma solução para o problema dual linear que satisfaça a inequação (6.1) para $S = S(x)$. Dos resultados obtidos, um corte é gerado e sempre que a disjunção (6.3) for obtida para $p = 1$, todas as variáveis indexadas por Q_i são zeradas.

O diagrama de blocos da figura 6 esquematiza o algoritmo.

PRIMAL e DUAL representam as heurísticas utilizadas na obtenção das coberturas e das soluções dos problemas duais lineares.

TESTE é o procedimento que zera variáveis sempre que possível.

CORTE gera o plano de corte.

SGRAD representa o método do subgradiente.

BRANCH equivale ao procedimento de "branch-and-bound", executado sempre que o problema demora muito a convergir.

SELEÇÃO seleciona um dos subproblemas gerados por BRANCH a

ser solucionado.

Os quatro blocos de decisão encontrados são abaixo descritos:

(1) Se $Z_l \geq Z_u$, o problema está resolvido (1.1).

Se $Z_l < Z_u$ e alguma variável pertencente à última cobertura foi zerada, uma nova cobertura deve ser encontrada (1.2).

Caso contrário, um corte é gerado (1.3).

(2) Caso a iteração seja um múltiplo de α , o método do subgradiente é aplicado com o intuito de melhorar o limite inferior (2.2). Caso contrário uma cobertura será encontrada para o novo problema obtido com a obtenção do corte. Balas e Ho sugerem o uso de $|M| / 20 \leq \alpha \leq |M| / 10$.

(3) Se $Z_l \geq Z_u$, o problema está resolvido (3.1).

Se $Z_l < Z_u$, e a diferença $Z_u - Z_l$ decresceu de pelo menos $\varepsilon > 0$, nas últimas β iterações, continua-se o processo iterativo (3.2).

Caso contrário o método de "branch-and-bound" é aplicado (3.3).

Neste caso é sugerido o uso de $\varepsilon = 0.5$ e $\beta = 4 \alpha$, onde α foi definido em (2).

(4) Caso não haja mais nenhum subproblema a considerar, o problema está resolvido, sendo Z_u o custo ótimo (4.1).

Caso contrário, o procedimento iterativo é aplicado ao subproblema selecionado (4.2).

Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de Balas aos casos propostos não distanciaram-se do que era previsto. Por tratar-se de problemas relativamente pequenos, a solução ótima

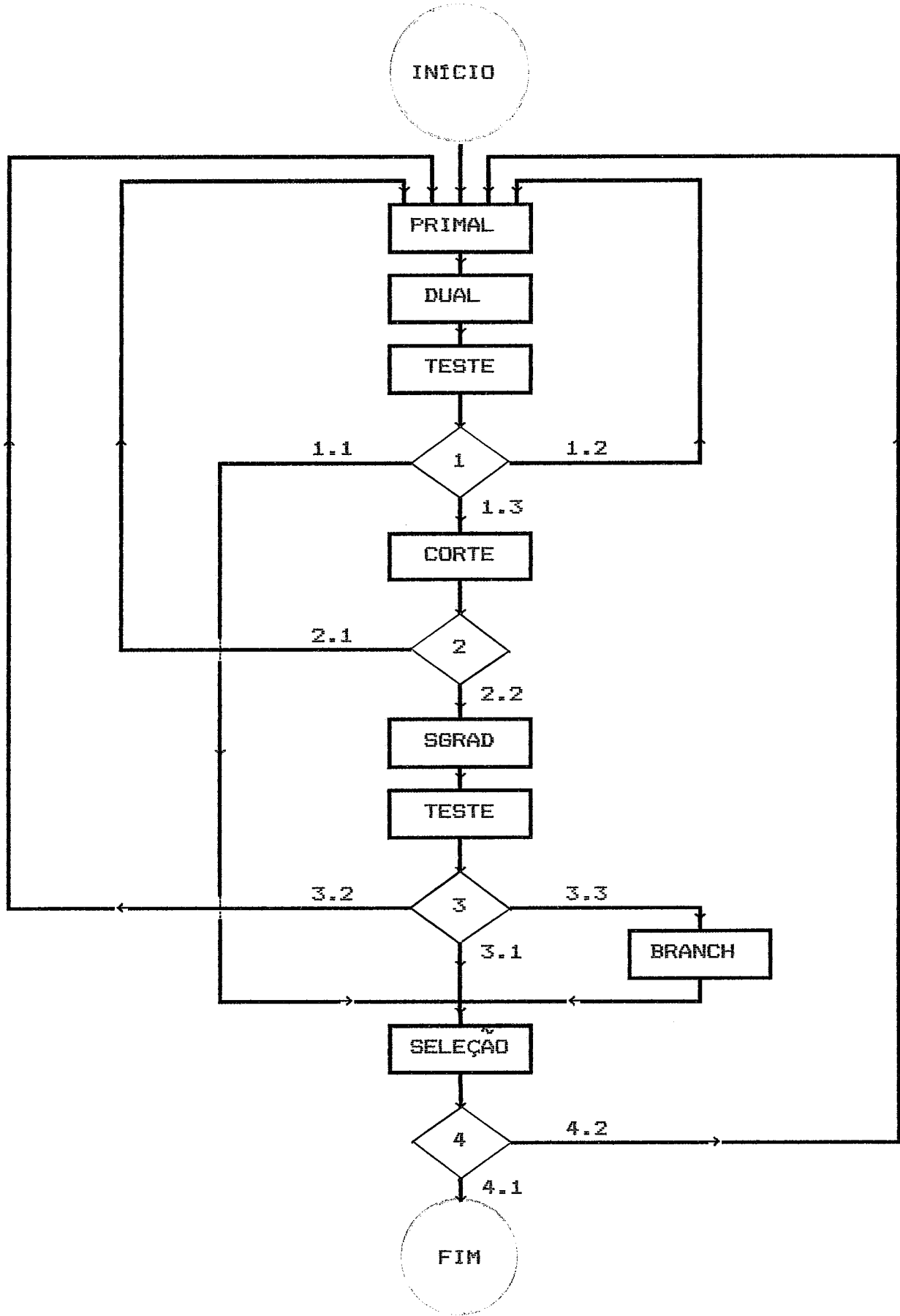


figura 6: DIAGRAMA DE BLOCOS DO ALGORITMO DE BALAS

foi encontrada em todos os casos, ressaltando-se que conforme a densidade da matriz do problema aumentava, a execução do método se tornava mais lenta, principalmente devido à aplicação do método do subgradiente, imprescindível para a convergência do algoritmo.

6.4 - ALGORITMO PARA RESOLUÇÃO DO PCCS2:

O PCCS2 é um problema de programação não-linear unidimensional que busca a melhor localização para as cabeças dos poços do campo submarino, de forma a minimizar o custo de perfuração do solo e do "bundle" de ligação poço a manifold.

Cabe neste ponto notar que a solução obtida para um poço independe dos demais, podendo-se então resolver o problema separadamente para cada poço do campo.

A região viável para a alocação da cabeça do poço compreende a linha que parte da projeção do seu objetivo no solo em direção ao manifold que o atende, sempre acompanhando a topologia do terreno. O término da linha que representa os pontos candidatos ao posicionamento da cabeça será então, estabelecido pelo alcance máximo para poços direcionais (figura 4).

O algoritmo desenvolvido para solucionar o PCCS2 reflete um método heurístico que divide a região viável de alocação em k partes iguais. O custo do problema é então calculado posicionando-se a cabeça do poço em cada uma das extremidades dos intervalos, de modo a se obter a localização mais barata.

Conclui-se facilmente que a precisão da solução obtida pela heurística será definida pela constante k , que deverá ser estabelecida de forma a conciliar o encontro de uma boa solução à rapidez do algoritmo.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS COMPUTACIONAIS

7.1 - INTRODUÇÃO:

Este capítulo tem como objetivo a apresentação dos resultados computacionais obtidos com a implementação do método desenvolvido para solucionar o PCCS.

Nos itens 7.2 e 7.3 considerações a respeito da implementação dos algoritmos que resolvem o PCCS1 e o PCCS2 serão tecidas. E, finalmente no item 7.4 os resultados numéricos de três exemplos considerados serão expostos e comparados aos melhores resultados encontrados até então, obtidos pela aplicação do Sistema Inteligente para Configuração de Exploração de Campos Submarinos (SICCS) [44].

O diagrama de blocos do método utilizado para resolver o PCCS, considerando inclusive os procedimentos discutidos neste capítulo está ilustrado na figura 7.

7.2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O PCCS1:

Os algoritmos utilizados para resolver o PCCS1 foram implementados em FORTRAN da Microsoft e executados num microcomputador modelo 286 com 4 M bytes de memória.

O primeiro algoritmo executado gerou a matriz de coeficientes tecnológicos do problema, já tratada pelas técnicas de redução de colunas. Neste ponto cabe notar que por falta de informação a respeito da topologia do solo submarino nos campos abordados nos exemplos vistos, considerou-se o solo plano e a lâmina d'água constante e menor que o limite aceitável para a localização de um manifold. Assim sendo, nenhuma coluna da matriz foi eliminada por não atender ao limite imposto sobre a máxima profundidade de uso do manifold. Ressalta-se, todavia, que o modelo é bastante flexível, podendo tratar, sem restrições, quaisquer topologias estabelecidas.

Tendo-se então, a matriz de coeficientes tecnológicos do problema, o algoritmo de Vasko foi executado gerando soluções iniciais razoáveis.

Todavia, o mérito dos ótimos resultados obtidos, deve ser atribuído ao algoritmo exato de Balas, que funcionou bem, alcançando sempre, a solução ótima para os raios de operação propostos. Cabe notar que em alguns testes realizados, a elevada densidade da matriz do problema levou a um tempo considerável de execução do algoritmo. Porém, mesmo nestes casos, sua aplicação foi logo recompensada por uma imediata melhora na solução, quando comparada à solução obtida pelo algoritmo de Vasko.

Em busca de uma melhora ainda maior na solução encontrada, cada exemplo abordado foi resolvido duas ou três vezes variando-se em cada uma delas os raios de operação atribuídos aos poços. Num primeiro teste os raios foram estabelecidos suficientemente grandes, de forma a obter-se o menor número possível de manifolds para o campo. Em seguida, com uma rápida análise do resultado obtido, os raios puderam ser reduzidos com o intuito de aproximar os manifolds aos poços que atendiam. Dessa forma, deu-se origem a um procedimento iterativo para o método, onde em cada iteração procura-se uma maior aproximação do ótimo global do problema.

7.3 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O PCCS2:

O algoritmo que resolve o PCCS2 também foi implementado em FORTRAN da Microsoft e executado num microcomputador modelo 286 com 4 M bytes de memória.

Mais uma vez, por desconhecer a topologia do solo submarino, a função $Z = f(X, Y)$ que representa a lâmina d'água no campo, foi considerada constante. Assim sendo, a mesma profundidade foi estabelecida para todos os poços. Novamente é ressaltada a flexibilidade do algoritmo que permite sua aplicação a qualquer topologia proposta.

A seguir, com o escopo de obter-se a melhor localização para a cabeça de cada poço, o alcance máximo foi dividido em 100 intervalos iguais. O custo de perfuração do solo e do "bundle" de ligação poço ao manifold que o atende foi então calculado,

localizando-se a cabeça do poço na extremidade de cada um destes intervalos.

A atribuição do valor 100 à constante k do algoritmo levou a uma boa precisão no resultado obtido, sob um pequeno custo computacional.

Nos casos em que a distância entre o manifold e o poço por ele atendido era menor que o alcance máximo estabelecido, atribuiu-se a referida distância ao alcance máximo do poço. Desta forma, garantiu-se a localização da cabeça do poço entre o seu objetivo e o manifold que o atende. Nestes mesmos casos, o melhor alcance para alguns poços foi estabelecido como o máximo possível, sendo portanto, a cabeça do poço localizada no mesmo local onde posiciona-se o manifold a ele interligado. Assim sendo, o custo do "bundle" de ligação poço ao manifold pôde ser considerado nulo por não representar aumento significativo no custo total do problema.

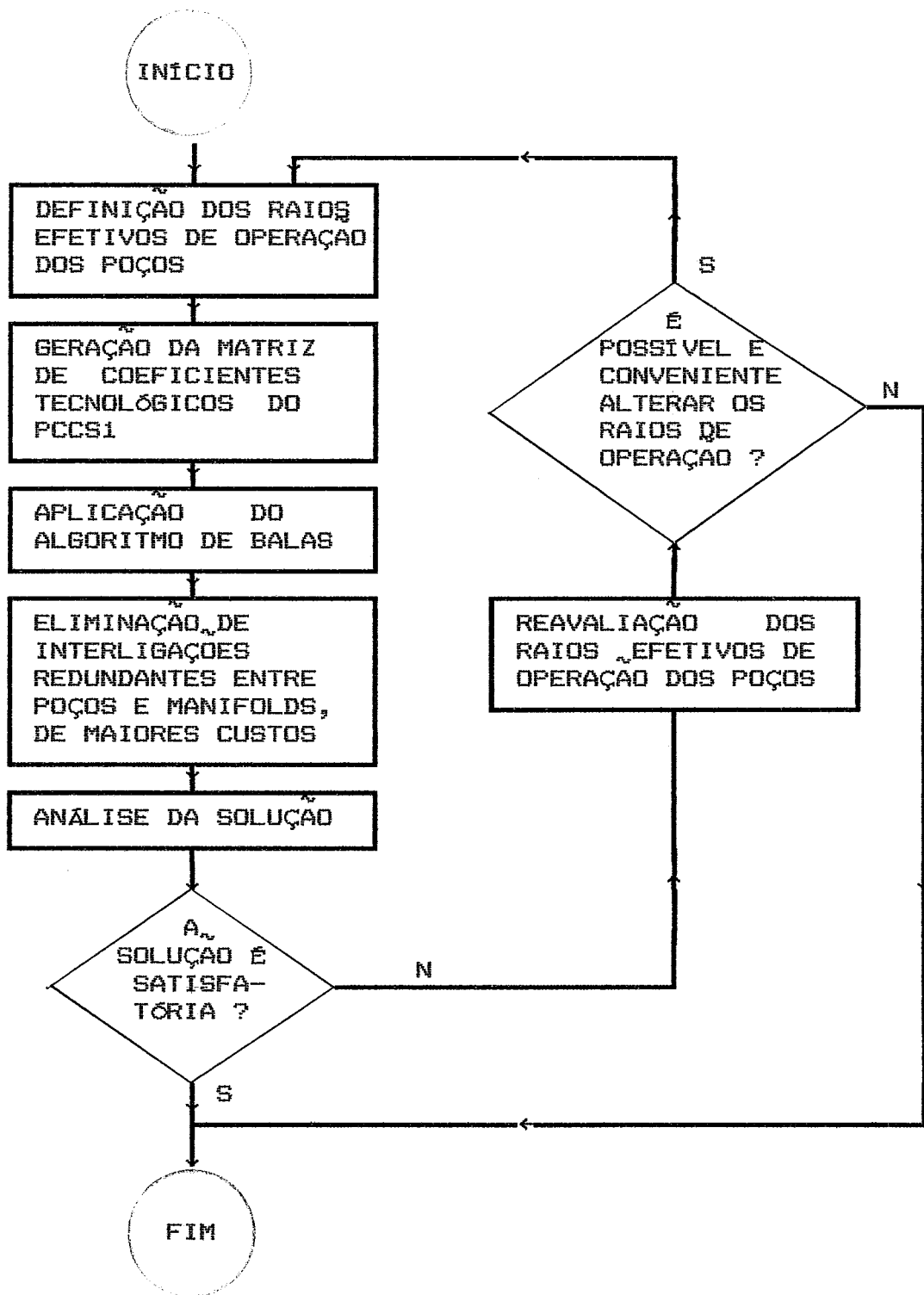


figura 7: DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÉTODO DE SOLUÇÃO ADOTADO

7.4 - EXEMPLOS NUMÉRICOS:

Neste tópico, resultados numéricos para a configuração de exploração de três diferentes campos submarinos de petróleo serão expostos.

Todos os exemplos considerados, foram resolvidos pelo Sistema Inteligente para Configuração de Exploração de Campos Submarinos (SICCS), apresentado pela PETROBRÁS e o ILTC.

Os dados de entrada necessários a resolução do problema encontram-se nas tabelas 1.n e 2.n. Os resultados numéricos encontrados pela aplicação do método desenvolvido aos casos vistos, são apresentados nas tabelas 3.n, 4.n e 5.n. E, finalmente os resultados obtidos através da aplicação do SICCS, dispõem-se nas tabelas 6.n, 7.n e 8.n, onde n indica o exemplo abordado.

O primeiro exemplo considerado trata de um caso com dados hipotéticos utilizado para verificar o desempenho do SICCS, valendo-se de um campo submarino com 23 poços.

Neste caso a aplicação das técnicas de redução de colunas à matriz de coeficientes tecnológicos do PCCS1 garantiu uma economia de 62% no tamanho da matriz.

O número de manifolds atribuídos ao campo foi o mínimo possível levando-se em conta a limitação no número de interligações que os manifolds suportam. Coube, todavia, ainda ao método, encontrar uma localização para os manifolds e as cabeças dos poços de forma a minimizar o custo de perfuração e do "bundle" de ligação poço a manifold. Neste ponto, um ajuste nos raios de operação dos poços de forma a localizar os manifolds o mais

próximo deles possível, foi recomendável.

A melhor configuração do campo encontrada, está representada na figura 8. Se comparada à configuração obtida pela aplicação do SICCS (figura 9) implica numa economia de 6% ou 9.630 m US\$ no custo de perfuração dos poços e do "bundle" de ligação poço a manifold acima referido.

Já o segundo teste realizado, foi aplicado a um caso real que estuda a configuração de um dos campos que compõem a Bacia de Campos. Os dados deste exemplo refletem a área de influência de uma das Unidades Estacionárias de Produção da fase II do desenvolvimento do Campo de Albacora, onde o número de poços é considerado relativamente grande se comparado aos demais campos da Bacia.

Considerando-se então um campo submarino com 47 poços, fez-se ainda mais importante a aplicação das técnicas de redução de colunas da matriz A, sem as quais a resolução do problema se tornaria inviável sob os recursos disponíveis. Neste caso, uma redução de 77% na matriz foi obtida.

É válido observar que com a aplicação do método desenvolvido ao exemplo em questão, não se melhorou apenas a localização dos manifolds e cabeças dos poços, mas também reduziu-se o número de manifolds utilizados de forma a prover uma economia de 14% ou 19.9946 M US\$ no custo total de configuração de exploração do campo, quando a solução é comparada ao resultado obtido através da aplicação do SICCS ao caso.

A planta esquemática dos campos obtidos pelo método desenvolvido e pelo SICCS encontram-se nas figuras 10 e 11

respectivamente.

Finalmente, o terceiro exemplo considerado, abordou novamente um caso real. Desta vez, a aplicação do método foi feita sobre a Bacia de Santos, onde uma Unidade Estacionária de Produção já posicionada foi aproveitada para atender ao campo.

Apesar de se tratar de um problema bem menor, o uso das técnicas de redução de colunas foi bastante útil ao passo que reduziu o tamanho da matriz em 50%.

Tendo-se então, um campo submarino composto por 15 poços, o número de manifolds atribuídos pela aplicação do PCCS, bem como pela aplicação do SICCS foi o menor possível, ou seja, somente 2. Novamente o método se encarregou de melhorar a localização dos manifolds e cabeças dos poços de forma a prover uma redução de 5% ou de 5.030 m US\$ no custo de perfuração de poços e do "bundle" de ligação poço a manifold em relação a configuração apresentada pelo SICCS.

As figuras 12 e 13 ilustram respectivamente as soluções propostas pelo método desenvolvido e pelo SICCS.

—LEGENDA—
 X CABEÇA DO POÇO
 O OBJETIVO
 □ MANIFOLD

CASO TESTE

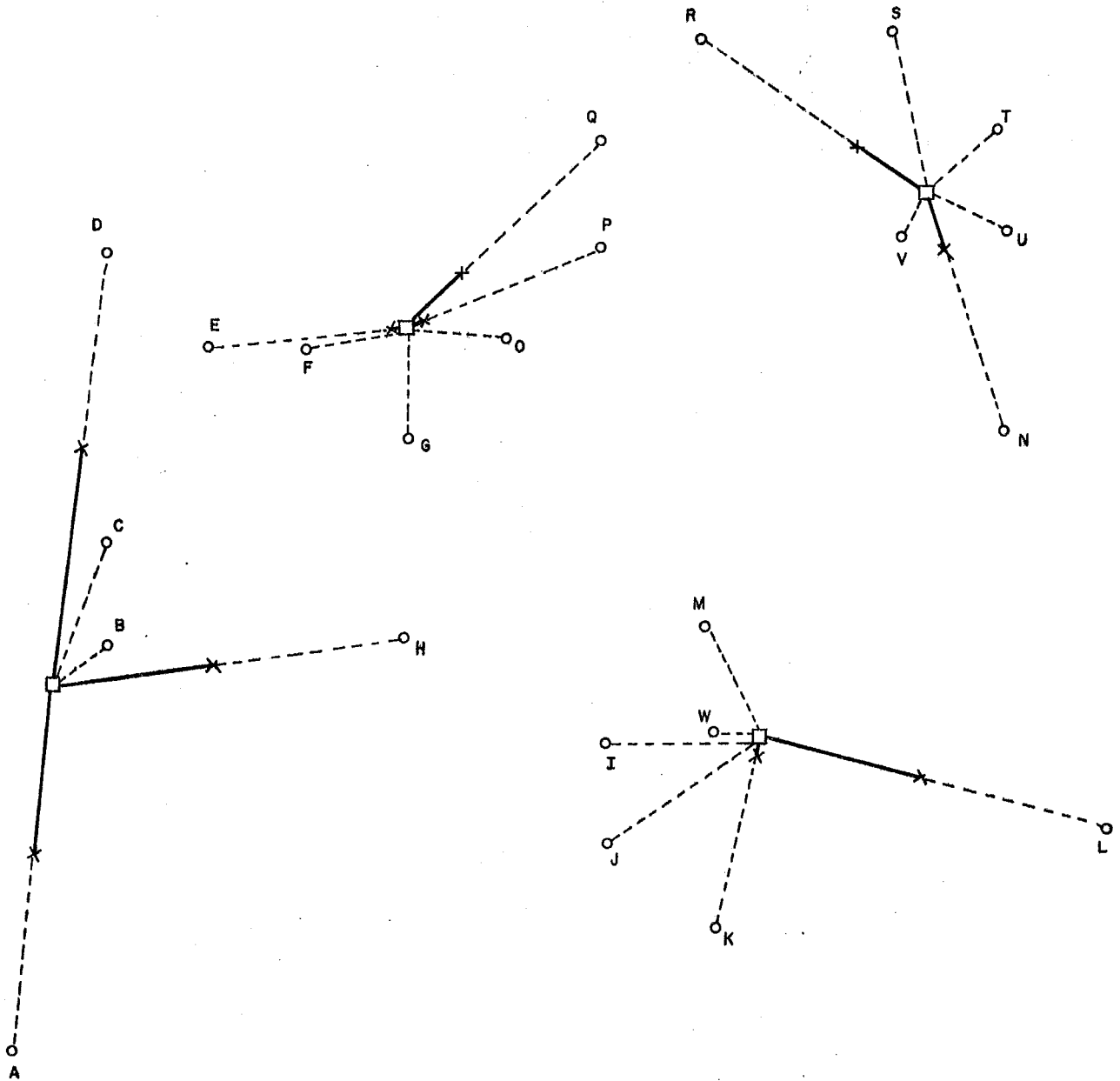


figura 8 - EXEMPLO 1 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO MÉTODO PROPOSTO

CASO TESTE

— LEGENDA —

- X CABEÇA DE POÇO
- O OBJETIVO
- MANIFOLD

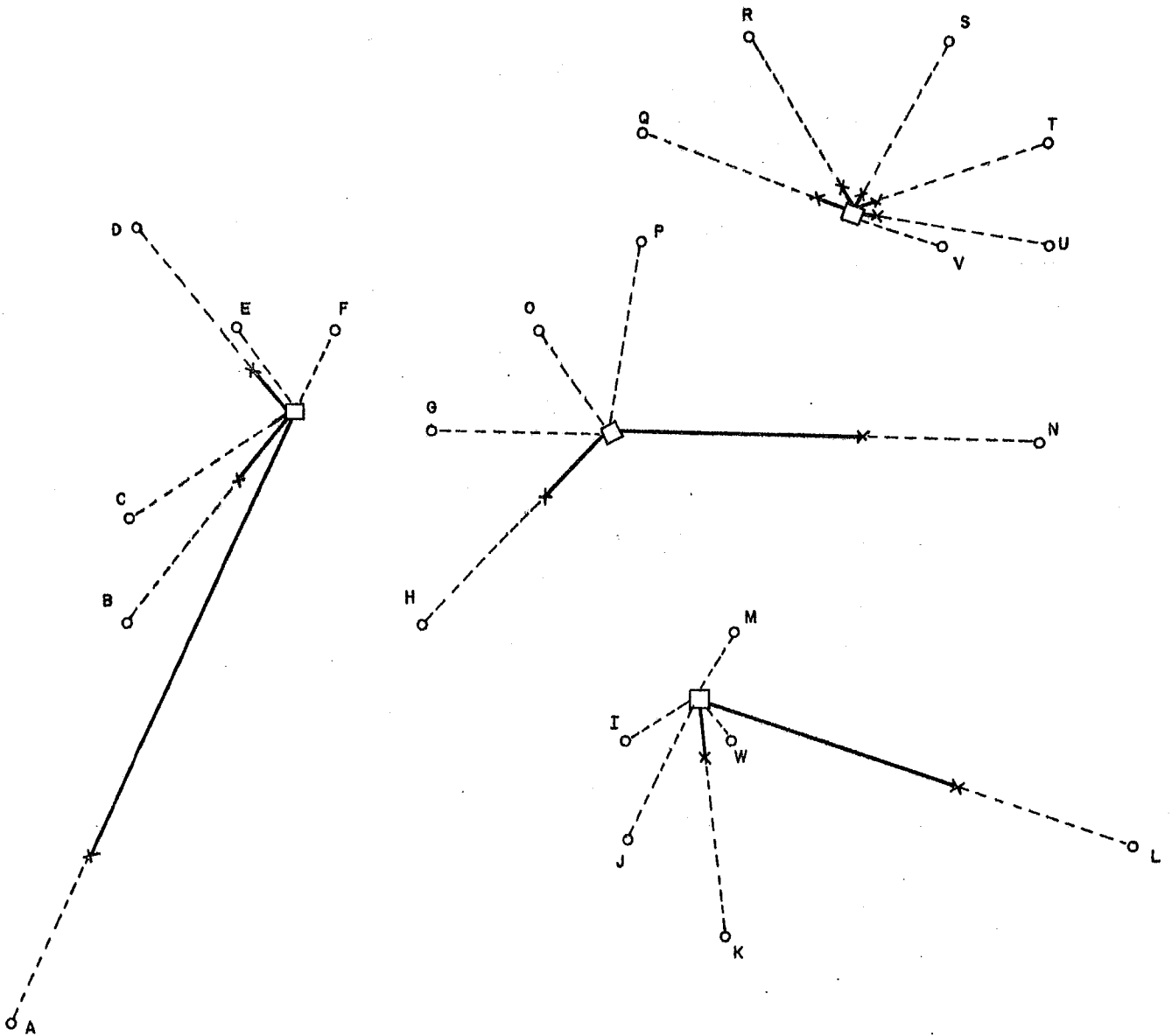


figura 9 - EXEMPLO 1 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO SICCS

ALBACORA - FASE II

- LEGENDA —
X CABEÇA DE POÇO
O OBJETIVO
□ MANIFOLD

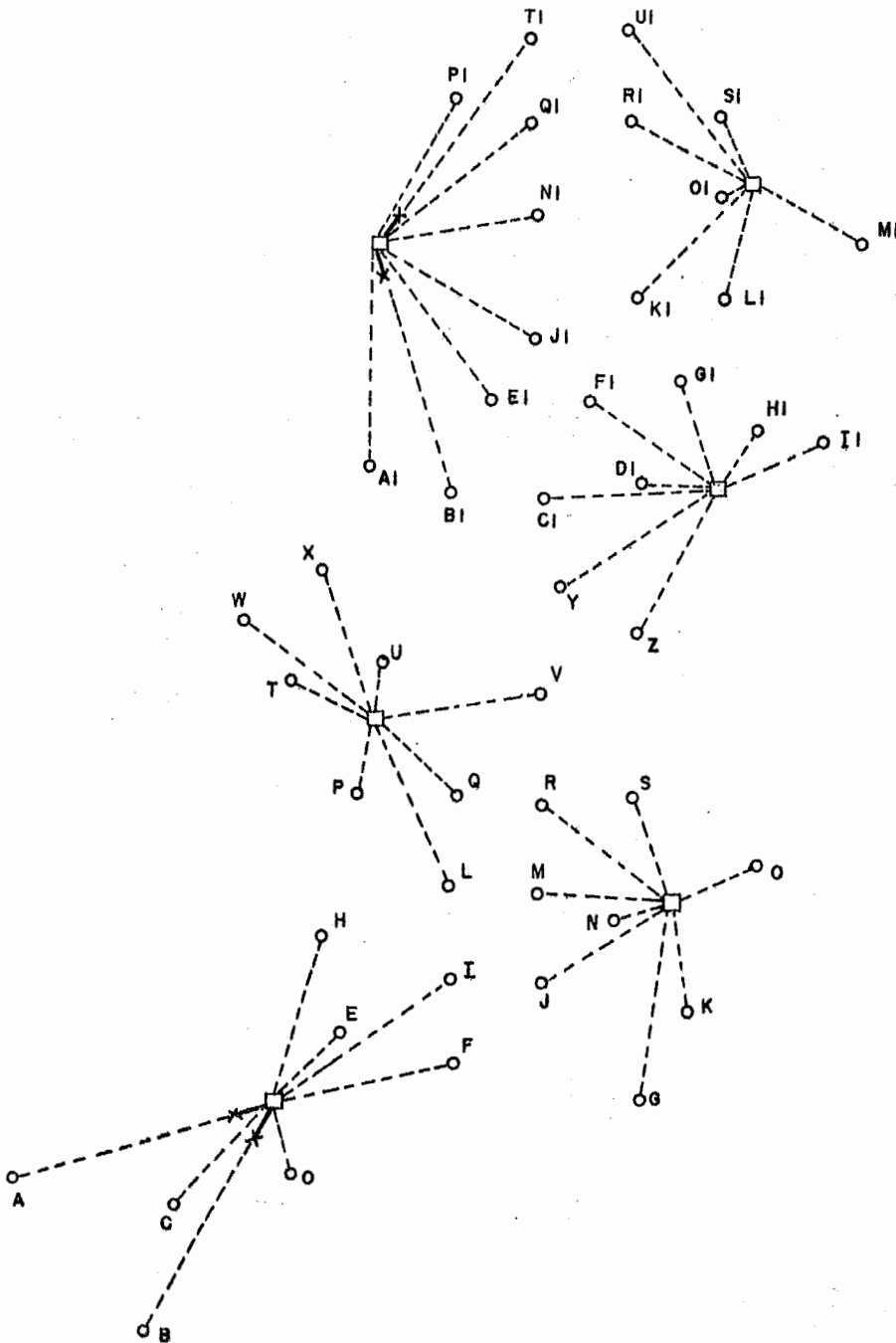


figura 10 - EXEMPLO 2 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO MÉTODO PROPOSTO

—LEGENDA—

- X CABEÇA DO POÇO
- O OBJETIVO
- MANIFOLD

ESTUDO PRELIMINAR - BACIA DE SANTOS

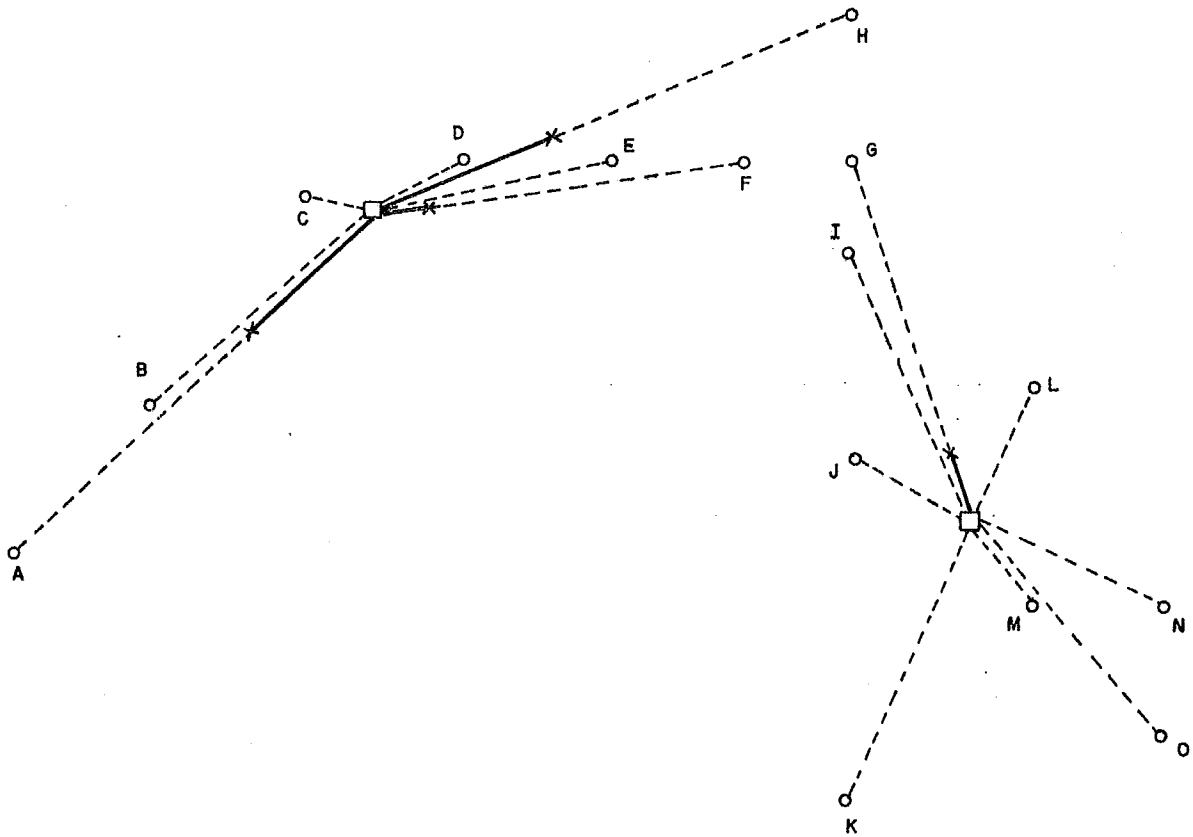


figura 12 - EXEMPLO 3 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO MÉTODO PROPOSTO

ESTUDO PRELIMINAR - BACIA DE SANTOS

— LÉGENDA —

- X CABEÇA DE POÇO
- O OBJETIVO
- MANIFOLD

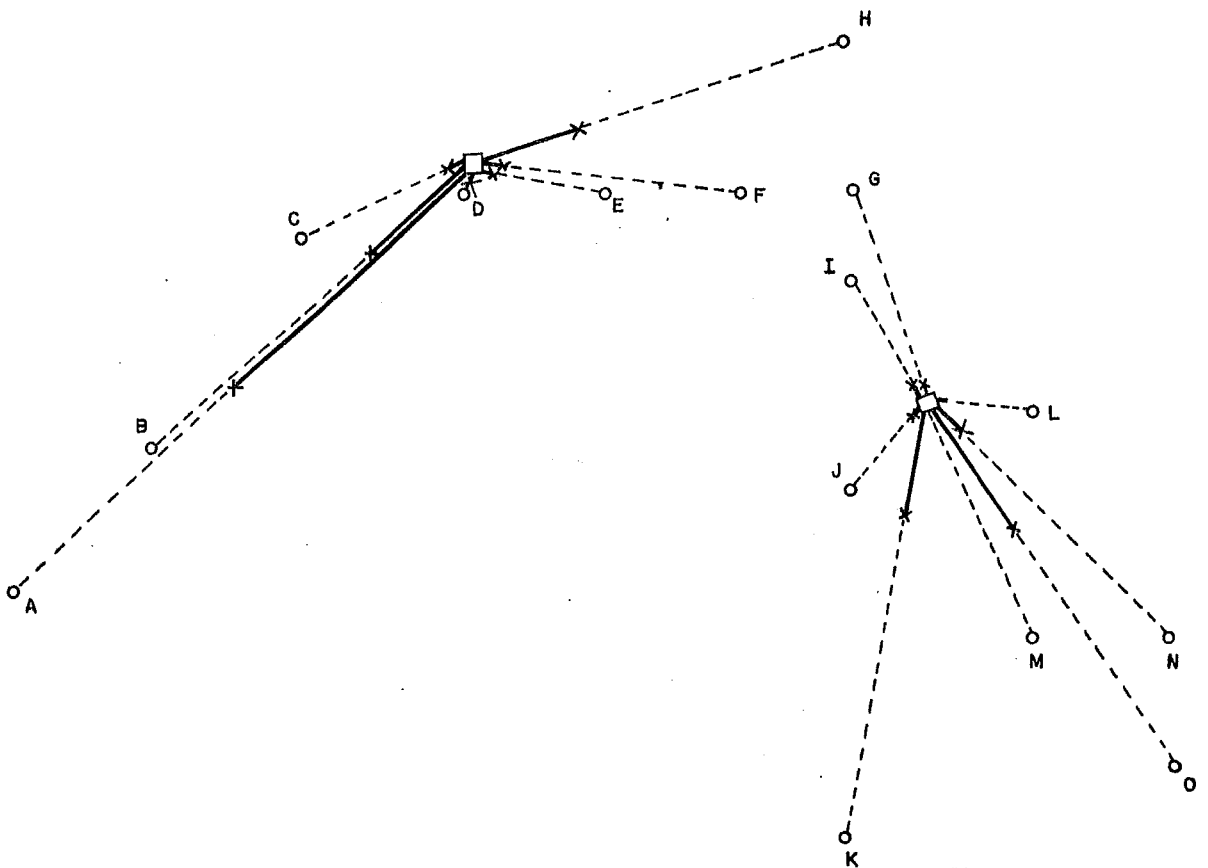


figura 13 - EXEMPLO 3 - SOLUÇÃO OBTIDA PELO SICCS

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

O trabalho desenvolvido nesta tese teve por fim realizar um estudo sobre o PROBLEMA DE RECOBRIMENTO (PR). O primeiro passo dado para se alcançar tal finalidade foi a reunião de artigos encontrados na literatura, relacionados ao problema.

O que pôde-se observar com a pesquisa realizada, foi que apesar do modelo de recobrimento adequar-se a uma infinidade de problemas reais, é muitas vezes abandonado face a uma formulação que conduza de alguma forma o problema, a soluções de comportamento polinomial. Todavia, deve-se ressaltar que tais formulações necessitam em geral de um número muito grande de restrições e variáveis para traduzirem a realidade do problema.

Para ilustrar a aplicação do modelo de recobrimento e verificar o desempenho de alguns algoritmos de resolução do PR, foi desenvolvido um novo método heurístico para solucionar o problema de Configuração de Exploração de Campos Submarinos. Por tratar-se de um problema muito complexo pela grande quantidade de fatores influentes na solução, a heurística elaborada dividiu o problema em três etapas. A primeira etapa, baseada nos estudos de Mehrez e Stullman [29] e Goldberg [22], considera o conceito de "alcance efetivo" para os poços do campo e formula o problema

como um PR.

Dentro do escopo de testar o método proposto, algumas aplicações foram realizadas, estendendo-se inclusive a casos reais.

Pôde-se observar desta forma, a grande aproximação entre a formulação desenvolvida e a realidade do problema. Apesar do Problema de configurar campos submarinos ter sido abordado sob uma ótica inteiramente nova, foram geradas em todas as aplicações, soluções muito boas e sempre melhores do que as oferecidas até o momento.

Na busca do melhor resultado, o algoritmo exato de Balas foi escolhido para resolver a primeira etapa do procedimento. Considerando-se os recursos disponíveis para a resolução do problema bem como a despreocupação com relação ao tempo de execução, o algoritmo funcionou bem, tendo-se em vista a obtenção da solução ótima em todas as situações abordadas. Cabe entretanto notar, que o método do subgradiente, imprescindível à convergência do algoritmo de Balas num tempo razoável, sobrecarrega bastante o esforço computacional necessário à resolução do problema. Este fato no entanto, não compromete a validade da aplicação do algoritmo, ao se considerar a redução significativa obtida no custo do problema quando comparado às soluções geradas por métodos heurísticos.

Como contribuição a estudos subsequentes, o trabalho desenvolvido confirma através de testes computacionais o bom desempenho de mais uma aplicação do método introduzido por

Goldbarg [22] para resolver o Problema de Alocação de Facilidades, baseado na existência de um raio efetivo de operação associado a cada ponto de demanda do problema (Mehrez e Stulman [29]).

O trabalho fornece ainda um novo método para resolver o PROBLEMA DE CONFIGURAÇÃO DE EXPLOTAÇÃO DE CAMPOS SUBMARINOS DE PETRÓLEO. Trata-se de um método combinatório com resultados melhores que os obtidos até o momento pela Petrobrás, através de técnicas de inteligência artificial (IA). Dispõe-se agora portanto, de um método combinatório e um outro baseado em IA para resolver o mesmo problema, abrindo-se assim um caminho para pesquisas sobre comparação e/ou união de ambas as "áreas".

Procurando-se aprimorar o método desenvolvido através do algoritmo de Balas implementado, pode-se ainda buscar uma maior rapidez no método do subgradiente. O método do subgradiente objetiva resolver o seguinte problema:

$$\max_{u \in F} \min_{x \in G} L(x,u) = cx + ue - uAx$$

onde:

F é uma relaxação da região viável do problema

$$(L) \min \{cx \mid Ax \geq e, x \geq 0\}$$

G é uma relaxação da região viável do problema

$$(D) \max \{ue \mid uA \leq c, u \geq 0\}$$

A região G utilizada no método implementado é

$$G = \{x \in R^n \mid 0 \leq x_j \leq 1, j \in N\}$$

Todavia, Balas, em seu artigo, sugere uma outra região, abaixo definida, justamente como uma tentativa de melhorar a

eficiência do método.

Considerando-se $\bar{M} \subset M$ tal que $N_i \cap N_k = \emptyset, \forall i, k \in \bar{M}, i \neq k$, tem-se:

$$G = \left\{ x \in R^n \left| \begin{array}{l} \sum_{j \in N_i} x_j \geq 1, \quad i \in \bar{M} \\ \sum_{j \in N} d_j x_j \geq d_0 \\ 0 \leq x_j \leq 1, \quad j \in N \end{array} \right. \right.$$

onde $d_j = |M_j| - 1$ se $j \in N_i$ para algum $i \in \bar{M}$, caso contrário $d_j = |M_j|$, e $d_0 = |M \setminus \bar{M}|$

Testes realizados com o método do subgradiente utilizando a região \tilde{G} sugerida por Balas e outros estudos que viessem a

contribuir para uma maior rapidez do método, também seriam bastante válidos como continuidade ao trabalho desenvolvido.

TABELA 1.1 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 1

DESCRIÇÃO: CASO TESTE

NOME	COORDENADAS ESPACIAIS (Km)		PROFUNDIDADE (Km)	RAIO EFETIVO DE OPERAÇÃO (Km)
	X	Y		
A	1.6	5.2	3.2	9.0
B	3.0	11.3	3.2	6.5
C	3.0	12.8	3.2	6.5
D	3.0	17.1	3.2	6.5
E	4.5	15.7	3.2	5.0
F	6.0	15.7	3.2	5.0
G	7.5	14.3	3.2	5.5
H	7.5	11.4	3.2	5.5
I	10.5	9.8	3.2	3.0
J	10.5	8.3	3.2	3.0
K	12.1	7.0	3.2	3.0
L	18.0	8.5	3.2	9.0
M	12.0	11.5	3.2	3.0
N	16.4	14.4	3.2	9.0
O	9.0	15.8	3.2	5.0
P	10.4	17.2	3.2	5.0

TABELA 1.1 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 1

(continuação)

NOME	COORDENADAS ESPACIAIS (Km)		PROFUNDIDADE (Km)	RAIO EFETIVO DE OPERAÇÃO (Km)
	X	Y		
Q	10.4	18.8	3.2	5.0
R	11.9	20.3	3.2	5.0
S	14.8	20.4	3.2	5.0
T	16.3	18.9	3.2	5.0
U	16.5	17.4	3.2	5.0
V	14.9	17.3	3.2	5.0
W	12.1	9.9	3.2	3.0

ALCANCE MÁXIMO (Km): 2.9

CUSTO DO DUNDLE (M US\$/Km): 0.0013

CUSTO DE PERFURAÇÃO (M US\$/Km): 0.00143

TABELA 2.1 - CARACTERÍSTICAS DOS MANIFOLDS - EXEMPLO 1

LÂMINA D'ÁGUA MÁXIMA (Km): 0.8

NÚMERO MÍNIMO DE POÇOS INTERLIGADOS: 4

NÚMERO MÁXIMO DE POÇOS INTERLIGADOS: 6

CUSTO DE ALOCAÇÃO (M US\$): 20.0

TABELA 3.1 - SOLUÇÃO (CUSTO) - EXEMPLO 1

CUSTO DE ALOCAÇÃO DOS MANIFOLDS (M US\$): 80.0

CUSTO TOTAL DO BUNDLE DE LIGAÇÃO

POÇO A MANIFOLD (M US\$): 0.0195

CUSTO TOTAL DE PERFURAÇÃO DOS POÇOS (M US\$): 0.1296

CUSTO TOTAL (M US\$): 80.1491

TABELA 4.1 - SOLUÇÃO (MANIFOLDS) - EXEMPLO 1

MANIFOLD	COORDENADAS ESPACIAIS		POÇOS INTERLIGADOS
	(Km)		
	X	Y	
1	15.336	18.000	N R S T U V
2	7.536	15.956	E F G O P Q
3	2.049	10.670	A B C D H
4	12.797	9.918	I J K L M W

TABELA 5.1 - SOLUÇÃO (POÇOS) - EXEMPLO 1

POÇO	CABEÇA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD. ESPACIAIS (Km)		DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)
	X	Y				
A	1.837	8.090	4.31857	0.0062	2.58840	0.0034
B	2.049	10.670	3.39725	0.0049	0.0	0.0
C	2.049	10.670	3.95996	0.0057	0.0	0.0
D	2.576	14.231	4.31857	0.0046	3.59995	0.0047
E	7.390	15.944	4.31857	0.0062	1.46774	0.0002
F	7.536	15.956	3.55877	0.0051	0.0	0.0
G	7.536	15.956	3.60328	0.0052	0.0	0.0
H	4.626	11.015	4.31857	0.0062	2.59966	0.0034
I	12.797	9.918	3.94083	0.0056	0.0	0.0
J	12.797	9.918	4.25842	0.0061	0.0	0.0
K	12.774	9.821	4.31857	0.0062	0.10009	0.0001
L	15.202	9.263	4.31857	0.0062	2.49277	0.0032
M	12.797	9.918	3.65759	0.0052	0.0	0.0
N	15.578	17.181	4.31857	0.0062	0.85394	0.0011
O	7.536	15.956	3.52244	0.0050	0.0	0.0
P	7.740	16.045	4.31857	0.0062	2.22504	0.0003

TABELA 5.1 - SOLUÇÃO (POÇOS) - EXEMPLO 1

POÇO	CABEÇA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD. ESPACIAIS (Km)		DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)
	X	Y				
Q	8.342	16.757	4.31857	0.0062	1.13619	0.0015
R	14.310	18.687	4.31857	0.0062	1.23474	0.0016
S	15.336	18.000	4.03575	0.0058	0.0	0.0
T	15.336	18.000	3.46111	0.0049	0.0	0.0
U	15.336	18.000	3.45759	0.0049	0.0	0.0
V	15.336	18.000	3.30456	0.0047	0.0	0.0
W	12.797	9.918	3.27508	0.0047	0.0	0.0

TABELA 6.1 - SOLUÇÃO SICCS (CUSTO) - EXEMPLO 1

CUSTO DE ALOCAÇÃO DOS MANIFOLDS (M US\$): 80.0

CUSTO TOTAL DO BUNDLE DE LIGAÇÃO

POÇO A MANIFOLD (M US\$): 0.0286

CUSTO TOTAL DE PERFURAÇÃO DOS POÇOS (M US\$): 0.1301

CUSTO TOTAL (M US\$): 80.1587

TABELA 7.1 - SOLUÇÃO SICCS (MANIFOLDS) - EXEMPLO 1

MANIFOLD	COORDENADAS ESPACIAIS		POÇOS INTERLIGADOS
	(Km)		
	X	Y	
1	5.500	14.500	A B C D E F
2	10.100	14.400	G H N O P
3	13.500	17.700	Q R S T U V
4	11.600	10.500	I J K L M W

TABELA 8.1 - SOLUÇÃO SICCŜ (POÇOS) - EXEMPLO 1

POÇO	CABECA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD.ESPACIAIS		DISTÂNCIA	CUSTO	DISTÂNCIA	CUSTO
	(Km)					
X	Y					
A	2.800	7.700	4.23438	0.0061	7.31642	0.0095
B	4.600	13.500	4.20000	0.0060	1.34536	0.0018
C	5.100	14.300	4.11096	0.0059	0.44721	0.0006
D	4.800	15.100	4.18091	0.0060	0.92196	0.0012
E	5.500	14.500	3.56090	0.0051	0.0	0.0
F	5.500	14.500	3.45398	0.0049	0.0	0.0
G	10.100	14.400	4.12432	0.0059	0.0	0.0
H	9.100	13.400	4.09878	0.0059	1.41421	0.0018
I	11.600	10.500	3.45543	0.0049	0.0	0.0
J	11.600	10.500	4.03609	0.0058	0.0	0.0
K	11.600	9.600	4.15331	0.0059	0.0	0.0
L	15.400	9.300	4.20000	0.0060	3.98497	0.0052
M	11.600	10.500	3,37639	0.0048	0.0	0.0
N	13.800	14.400	4.12311	0.0059	3.70000	0.0048
O	10.100	14.400	3.66197	0.0052	0.0	0.0
P	10.100	14.400	4.26263	0.0061	0.0	0.0

TABELA B.1 - SOLUÇÃO SICCŜ (POÇOS) - EXEMPLO 1

POÇO	CABEÇA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD.ESPACIAIS (Km)		DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)
	X	Y				
Q	13.000	18.000	4.20000	0.0060	0.58310	0.0008
R	13.300	18.050	4.15482	0.0059	0.40311	0.0005
S	13.600	18.000	4.17612	0.0060	0.31623	0.0004
T	13.800	17.900	4.18210	0.0060	0.36056	0.0005
U	13.800	17.700	4.19762	0.0060	0.30000	0.0004
V	13.500	17.700	3.51568	0.0050	0.0	0.0
W	11.600	10.500	3.29393	0.0047	0.0	0.0

TABELA 1.2 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 2

DESCRIBÇÃO: ALBACORA - FASE II

NOME	COORDENADAS ESPACIAIS (Km)		PROFUNDIDADE (Km)	RAIO EFETIVO DE OPERAÇÃO (Km)
	X	Y		
A	1.8	3.2	3.2	3.5
B	3.5	1.1	3.2	3.5
C	3.9	2.8	3.2	3.5
D	5.45	3.2	3.2	3.5
E	6.1	5.1	3.2	3.5
F	7.55	4.75	3.2	3.5
G	10.0	4.25	3.2	3.5
H	5.85	6.4	3.2	3.5
I	7.5	5.8	3.2	3.5
J	8.7	5.8	3.2	3.5
K	10.6	5.4	3.2	3.5
L	7.5	7.0	3.2	3.5
M	8.65	6.95	3.2	3.5
N	9.65	6.6	3.2	3.5
O	11.5	7.3	3.2	3.5

TABELA 1.2 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 2

(continuação)

NOME	COORDENADAS ESPACIAIS (Km)		PROFUNDIDADE (Km)	RAIO EFETIVO DE OPERAÇÃO (Km)
	X	Y		
	P	6.3		
Q	7.6	8.2	3.2	3.5
R	8.7	8.1	3.2	3.5
S	9.9	8.2	3.2	3.5
T	5.4	9.7	3.2	3.5
U	6.6	9.9	3.2	3.5
V	8.7	9.55	3.2	3.5
W	4.8	10.5	3.2	3.5
X	5.8	11.1	3.2	3.5
Y	8.9	10.9	3.2	3.5
Z	9.9	10.3	3.2	3.5
A1	6.4	12.5	3.2	3.5
B1	7.5	12.1	3.2	3.5
C1	8.7	12.1	3.2	3.5
D1	10.0	12.25	3.2	3.5
E1	8.0	13.35	3.2	3.5

TABELA 1.2 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 2

(continuação)

NOME	COORDENADAS ESPACIAIS (Km)		PROFUNDIDADE (Km)	RAIO EFETIVO DE OPERAÇÃO (Km)
	X	Y		
	F1	9.3		
G1	10.5	13.6	3.2	3.5
H1	11.5	13.0	3.2	3.5
I1	12.4	12.8	3.2	3.5
J1	8.6	14.2	3.2	3.5
K1	9.9	14.7	3.2	3.5
L1	11.1	14.7	3.2	3.5
M1	12.75	15.4	3.2	3.5
N1	8.6	15.8	3.2	3.5
O1	11.0	16.0	3.2	3.5
P1	7.5	17.3	3.2	3.5
Q1	8.5	17.0	3.2	3.5
R1	9.8	17.05	3.2	3.5
S1	11.0	17.05	3.2	3.5
T1	8.5	18.1	3.2	3.5
U1	9.8	18.2	3.2	3.5

TABELA 1.2 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 2

(continuação)

ALCANCE MÁXIMO (Km): 3.0

CUSTO DO DUNDE (M US\$/Km): 0.0013

CUSTO DE PERFURAÇÃO (M US\$/Km): 0.00143

TABELA 2.2 - CARACTERÍSTICAS DOS MANIFOLDS - EXEMPLO 2

LÂMINA D'ÁGUA MÁXIMA (Km): 0.8

NÚMERO MÍNIMO DE POÇOS INTERLIGADOS: 6

NÚMERO MÁXIMO DE POÇOS INTERLIGADOS: 8

CUSTO DE ALOCAÇÃO (M US\$): 20.0

TABELA 3.2 - SOLUÇÃO (CUSTO) - EXEMPLO 2

CUSTO DE ALOCAÇÃO DOS MANIFOLDS (M US\$): 120.0

CUSTO TOTAL DO BUNDLE DE LIGAÇÃO

POÇO A MANIFOLD (M US\$): 0.0024

CUSTO TOTAL DE PERFURAÇÃO DOS POÇOS (M US\$): 0.2540

CUSTO TOTAL (M US\$): 120.2564

TABELA 4.2 - SOLUÇÃO (MANIFOLDS) - EXEMPLO 2

MANIFOLD	COORDENADAS ESPACIAIS		POÇOS INTERLIGADOS
	(Km)		
	X	Y	
1	11.411	16.157	K1 L1 M1 O1 R1 S1 U1
2	10.364	6.831	G J K M N O R S
3	6.536	9.164	L P Q T U V W X
4	10.999	12.189	Y Z C1 D1 F1 G1 H1 I1
5	6.457	15.441	A1 B1 E1 J1 N1 P1 Q1 T1
6	5.160	4.182	A B C D E F H I

TABELA 5.2 - SOLUÇÃO (POCOS) - EXEMPLO 2

POÇO	CABEÇA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD. ESPACIAIS (Km)		DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)
	X	Y				
A	4.680	4.042	4.38634	0.0063	0.50056	0.0007
B	4.923	3.741	4.38634	0.0063	0.50056	0.0007
C	5.160	4.182	3.70642	0.0053	0.0	0.0
D	5.160	4.182	3.35983	0.0048	0.0	0.0
E	5.160	4.182	3.45924	0.0049	0.0	0.0
F	5.160	4.182	4.03419	0.0058	0.0	0.0
G	10.364	6.831	4.12723	0.0059	0.0	0.0
H	5.160	4.182	3.95419	0.0057	0.0	0.0
I	5.160	4.182	4.28177	0.0061	0.0	0.0
J	10.364	6.831	3.75125	0.0054	0.0	0.0
K	10.364	6.831	3.51333	0.0050	0.0	0.0
L	6.536	9.164	3.98148	0.0057	0.0	0.0
M	10.364	6.831	3.63207	0.0052	0.0	0.0
N	10.364	6.831	3.28682	0.0047	0.0	0.0
O	10.364	6.831	3.42789	0.0049	0.0	0.0

TABELA 5.2 - SOLUÇÃO (POÇOS) - EXEMPLO 2

POÇO	CABEÇA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD. ESPACIAIS		DISTÂNCIA	CUSTO	DISTÂNCIA	CUSTO
	(Km)					
P	6.536	9.164	3.35037	0.0048	0.0	0.0
Q	6.536	9.164	3.50733	0.0050	0.0	0.0
R	10.364	6.831	3.82351	0.0055	0.0	0.0
S	10.364	6.831	3.51133	0.0050	0.0	0.0
T	6.536	9.164	3.43770	0.0049	0.0	0.0
U	6.536	9.164	3.28417	0.0047	0.0	0.0
V	6.536	9.164	3.88225	0.0055	0.0	0.0
W	6.536	9.164	3.87796	0.0055	0.0	0.0
X	6.536	9.164	3.81179	0.0055	0.0	0.0
Y	10.999	12.189	4.03823	0.0058	0.0	0.0
Z	10.999	12.189	3.87506	0.0055	0.0	0.0
A1	6.457	15.441	4.34658	0.0062	0.0	0.0
B1	6.606	14.964	4.38634	0.0063	0.50002	0.0007
C1	10.999	12.189	3.94123	0.0056	0.0	0.0
D1	10.999	12.189	3.35287	0.0048	0.0	0.0
E1	6.457	15.441	4.12227	0.0059	0.0	0.0

TABELA 5.2 - SOLUÇÃO (POCOS) - EXEMPLO 2

POCO	CABEÇA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD. ESPACIAIS (Km)		DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)
	X	Y				
F1	10.999	12.189	3.82009	0.0055	0.0	0.0
G1	10.999	12.189	3.53269	0.0051	0.0	0.0
H1	10.999	12.189	3.33897	0.0048	0.0	0.0
I1	10.999	12.189	3.54628	0.0051	0.0	0.0
J1	6.457	15.441	4.04630	0.0058	0.0	0.0
K1	11.411	16.157	3.82701	0.0055	0.0	0.0
L1	11.411	16.157	3.52981	0.0050	0.0	0.0
M1	11.411	16.157	3.55049	0.0051	0.0	0.0
N1	6.457	15.441	3.86799	0.0055	0.0	0.0
O1	11.411	16.157	3.23010	0.0046	0.0	0.0
P1	6.457	15.441	3.84496	0.0055	0.0	0.0
Q1	6.457	15.441	4.10419	0.0059	0.0	0.0
R1	11.411	16.157	3.69226	0.0053	0.0	0.0
S1	11.411	16.157	3.34759	0.0048	0.0	0.0
T1	6.672	15.721	4.38634	0.0063	0.35323	0.0005
U1	11.411	16.157	4.12422	0.0059	0.0	0.0

TABELA 6.2 - SOLUÇÃO SICCS (CUSTO) - EXEMPLO 2

CUSTO DE ALOCAÇÃO DOS MANIFOLDS (M US\$): 140.0

CUSTO TOTAL DO BUNDLE DE LIGAÇÃO

POÇO A MANIFOLD (M US\$): 0.0066

CUSTO TOTAL DE PERFURAÇÃO DOS POÇOS (M US\$): 0.2444

CUSTO TOTAL (M US\$): 140.2510

TABELA 7.2 - SOLUÇÃO SICCS (MANIFOLDS) - EXEMPLO 2

MANIFOLD	COORDENADAS ESPACIAIS		POÇOS INTERLIGADOS
	(Km)		
	X	Y	
1	6.200	5.400	A B C D E F H I
2	9.600	7.300	G J K M N O S
3	6.900	9.600	L P Q T U W
4	8.700	12.100	B1 C1 D1 E1 F1 J1
5	10.700	13.800	G1 H1 I1 K1 L1 M1
6	9.200	16.800	N1 O1 P1 Q1 R1 S1 T1 U1
7	8.500	10.700	R V X Y Z A1

TABELA 8.2 - SOLUÇÃO SICCŜ (POÇOS) - EXEMPLO 2

POÇO	CABEÇA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD.ESPACIAIS (Km)		DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)
	X	Y				
A	4.200	4.400	4.17612	0.0060	2.23607	0.0029
B	5.000	3.400	4.21663	0.0060	2.33238	0.0030
C	5.800	5.100	4.37493	0.0063	0.50000	0.0007
D	6.200	5.400	3.95506	0.0057	0.0	0.0
E	6.200	5.400	3.21559	0.0046	0.0	0.0
F	6.200	5.400	3.53341	0.0051	0.0	0.0
G	9.600	7.300	4.43875	0.0064	0.0	0.0
H	6.200	5.400	3.37083	0.0048	0.0	0.0
I	6.200	5.400	3.47707	0.0050	0.0	0.0
J	9.600	7.300	3.64692	0.0052	0.0	0.0
K	9.600	7.300	3.85357	0.0055	0.0	0.0
L	6.900	9.600	4.16653	0.0060	0.0	0.0
M	9.600	7.300	3.35634	0.0048	0.0	0.0
N	9.600	7.300	3.27605	0.0047	0.0	0.0
O	9.600	7.300	3.72156	0.0053	0.0	0.0

TABELA B.2 - SOLUÇÃO SICC'S (POÇOS) - EXEMPLO 2

POÇO	CABEÇA		(continuação)		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD. ESPACIAIS (Km)		PERFURAÇÃO			
	X	Y	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)
P	6.900	9.600	3.54401	0.0051	0.0	0.0
Q	6.900	9.600	3.56230	0.0051	0.0	0.0
R	8.500	10.700	4.12795	0.0059	0.0	0.0
S	9.600	7.300	3.33766	0.0048	0.0	0.0
T	6.900	9.600	3.53553	0.0051	0.0	0.0
U	6.900	9.600	3.22800	0.0046	0.0	0.0
V	8.500	10.700	3.40624	0.0049	0.0	0.0
W	6.900	9.600	3.93192	0.0056	0.0	0.0
X	8.500	10.700	4.20595	0.0060	0.0	0.0
Y	8.500	10.700	3.23111	0.0046	0.0	0.0
Z	8.500	10.700	3.51568	0.0050	0.0	0.0
A1	8.500	10.700	4.22966	0.0061	0.0	0.0
B1	8.700	12.100	3.41760	0.0049	0.0	0.0
C1	8.700	12.100	3.20000	0.0046	0.0	0.0
D1	8.700	12.100	3.45724	0.0049	0.0	0.0
E1	8.700	12.100	3.50607	0.0050	0.0	0.0

TABELA B.2 - SOLUÇÃO SICCŜ (POÇOS) - EXEMPLO 2

POÇO	CABEÇA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD.ESPACIAIS (Km)		DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)
	X	Y				
F1	8.700	12.100	3.50571	0.0050	0.0	0.0
G1	10.700	13.800	3.21248	0.0046	0.0	0.0
H1	10.700	13.800	3.39411	0.0049	0.0	0.0
I1	10.700	13.800	3.76000	0.0054	0.0	0.0
J1	8.700	12.100	3.82888	0.0055	0.0	0.0
K1	10.700	13.800	3.41906	0.0049	0.0	0.0
L1	10.700	13.800	3.34813	0.0048	0.0	0.0
M1	10.700	13.800	4.12341	0.0059	0.0	0.0
N1	9.200	16.800	3.40588	0.0049	0.0	0.0
O1	9.200	16.800	3.75766	0.0054	0.0	0.0
P1	9.200	16.800	3.65787	0.0052	0.0	0.0
Q1	9.200	16.800	3.28177	0.0047	0.0	0.0
R1	9.200	16.800	3.26535	0.0047	0.0	0.0
S1	9.200	16.800	3.68001	0.0053	0.0	0.0
T1	9.200	16.800	3.52420	0.0050	0.0	0.0
U1	9.200	16.800	3.54401	0.0051	0.0	0.0

TABELA 1.3 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 3

DESCRIPÇÃO: BACIA DE SANTOS

NOME	COORDENADAS ESPACIAIS (Km)		PROFUNDIDADE (Km)	RAIO EFETIVO DE OPERAÇÃO (Km)
	X	Y		
A	0.95	3.95	3.2	6.4
B	2.8	5.8	3.2	4.4
C	4.7	8.6	3.2	4.9
D	6.8	9.1	3.2	4.9
E	8.7	9.1	3.2	4.9
F	10.4	9.1	3.2	4.9
G	11.8	9.1	3.2	10.0
H	11.8	11.0	3.2	7.0
I	11.8	7.9	3.2	3.9
J	11.8	5.2	3.2	4.4
K	11.8	0.7	3.2	7.0
L	14.2	6.2	3.2	2.0
M	14.2	3.3	3.2	3.6
N	15.9	3.3	3.2	3.6
O	15.9	1.6	3.2	5.4

TABELA 1.3 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS - EXEMPLO 3

(continuação)

ALCANCE MÁXIMO (Km): 4.2

CUSTO DO DUNDE (M US\$/Km): 0.0013

CUSTO DE PERFURAÇÃO (M US\$/Km): 0.00143

TABELA 2.3 - CARACTERÍSTICAS DOS MANIFOLDS - EXEMPLO 3

LÂMINA D'ÁGUA MÁXIMA (Km): 0.8

NÚMERO MÍNIMO DE POÇOS INTERLIGADOS: 6

NÚMERO MÁXIMO DE POÇOS INTERLIGADOS: 8

CUSTO DE ALOCAÇÃO (M US\$): 20.0

TABELA 3.3 - SOLUÇÃO (CUSTO) - EXEMPLO 3

CUSTO DE ALOCAÇÃO DOS MANIFOLDS (M US\$): 40.0

CUSTO TOTAL DO BUNDLE DE LIGAÇÃO

POÇO A MANIFOLD (M US\$): 0.0081

CUSTO TOTAL DE PERFURAÇÃO DOS POCOS (M US\$): 0.0967

CUSTO TOTAL (M US\$): 40.1048

TABELA 4.3 - SOLUÇÃO (MANIFOLDS) - EXEMPLO 3

MANIFOLD	COORDENADAS ESPACIAIS		POÇOS INTERLIGADOS
	(Km)		
	X	Y	
1	13.427	4.356	G I J K L M N O
2	5.550	8.399	A B C D E F H

TABELA 5.3 - SOLUÇÃO (POÇOS) - EXEMPLO 3

(continuação)

POÇO	CABEÇA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD. ESPACIAIS (Km)		DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)
	X	Y				
A	3.969	6.870	5.28015	0.0076	2.19950	0.0029
B	5.550	8.399	4.95553	0.0071	0.0	0.0
C	5.550	8.399	3.31706	0.0047	0.0	0.0
D	5.550	8.399	3.50627	0.0050	0.0	0.0
E	5.550	8.399	4.54466	0.0065	0.0	0.0
F	6.243	8.499	5.28015	0.0076	0.70040	0.0009
G	13.163	5.127	5.28015	0.0076	0.81524	0.0011
H	7.922	9.386	5.28015	0.0076	2.56962	0.0033
I	13.427	4.356	5.04451	0.0072	0.0	0.0
J	13.427	4.356	3.68775	0.0053	0.0	0.0
K	13.427	4.356	5.12382	0.0073	0.0	0.0
L	13.427	4.356	3.77331	0.0054	0.0	0.0
M	13.427	4.356	3.45726	0.0049	0.0	0.0
N	13.427	4.356	4.35600	0.0042	0.0	0.0
O	13.427	4.356	4.89400	0.0070	0.0	0.0

TABELA 6.3 - SOLUÇÃO SICCŜ (CUSTO) - EXEMPLO 3

CUSTO DE ALOCAÇÃO DOS MANIFOLDS (M US\$): 40.0

CUSTO TOTAL DO BUNDLE DE LIGAÇÃO

POÇO A MANIFOLD (M US\$): 0.0179

CUSTO TOTAL DE PERFURAÇÃO DOS POÇOS (M US\$): 0.0920

CUSTO TOTAL (M US\$): 40.1099

TABELA 7.3 - SOLUÇÃO SICCŜ (MANIFOLDS) - EXEMPLO 3

MANIFOLD	COORDENADAS ESPACIAIS		POÇOS INTERLIGADOS							
	(Km)									
	X	Y								
1	6.900	9.500	A	B	C	D	E	F	H	
2	12.800	6.400	G	I	J	K	L	M	N	O

TABELA 8.3 - SOLUÇÃO SICC5 (POÇOS) - EXEMPLO 3

POÇO	CABEÇA		PERFURAÇÃO		BUNDLE DE LIGAÇÃO	
	COORD.ESPACIAIS (Km)		DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)	DISTÂNCIA (Km)	CUSTO (M US\$)
	X	Y				
A	3.850	6.950	5.25833	0.0075	3.97555	0.0052
B	5.600	8.200	4.88262	0.0070	1.83848	0.0024
C	6.600	9.400	3.80657	0.0054	0.16228	0.0004
D	6.900	9.500	3.22645	0.0046	0.0	0.0
E	7.200	9.300	3.53977	0.0051	0.36056	0.0005
F	7.300	9.400	4.46542	0.0064	0.41231	0.0005
G	12.800	6.500	4.24264	0.0061	0.10000	0.0001
H	8.300	9.800	4.89183	0.0070	1.43178	0.0019
I	12.600	6.400	3.62353	0.0052	1.20000	0.0003
J	12.600	6.100	3.41906	0.0049	0.36056	0.0005
K	12.500	4.700	5.17011	0.0074	1.72627	0.0025
L	13.000	6.300	3.41906	0.0049	0.02236	0.0003
M	12.800	6.400	4.67012	0.0067	0.0	0.0
N	13.200	5.800	4.87647	0.0070	0.72111	0.0010
O	13.800	4.600	4.86313	0.0070	2.05913	0.0027

BIBLIOGRAFIA

- [1] Balas, E. & Padberg, M., "On the Set Covering Problem", *Operations Research*, No. 20, p. 1152-1161, 1970.
- [2] Balas, E. & Padberg, M., "Set Partitioning: A Survey", *SIAM Review*, Vol. 18, No. 4, p. 710-760, 1976.
- [3] Balas, E., "Cutting Planes from Conditional Bounds: A New Approach to Set Covering", *Mathematical Programming*, No. 12, p. 19-36, 1980.
- [4] Balas, E. & Ho, A., "Set Covering Algorithms Using Cutting Planes, Heuristics, and Subgradient Optimization: A Computational Study", *Mathematical Programming*, No. 12, p. 37-60, 1980.
- [5] Baker, E. K., "Efficient Heuristic Algorithms for the Weighted Set Covering Problem", *Comput & Ops Res*, Vol. 8, No. 4, p. 303-310, 1981.
- [6] Baker, E. & Fisher, M., "Computational Results for very large Air Crew Scheduling Problems", *Omega*, Vol. 9, No. 6, p. 613-618, 1981.

[7] Beasley, J. E., "An Algorithm for Set Covering Problems", *European Journal of Operational Research*, No. 31, p. 85-93, 1987.

[8] Beasley, J. E., "A Lagrangean Heuristic for non-unicost Set Covering Problems", *School of Management - Imperial College - London SW7 2AZ*, 1988.

[9] Becker R., "Programação de uma Frota de Petroleiros: Proposta de um Método para o Longo Curso", *Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ*, 1987.

[10] Campello, R. E., Maculan, N. & Lopes, L. R., "Relaxação Lagrangeana em Programação Inteira", *Sistemas, COPPE, UFRJ, ES40-84*, 1984.

[11] Campello, R. E. & Maculan, N., "Branch and Bound approach to a Fixed-charge Network Expansion", *Memórias de Matemática, Vol. 2, Instituto de Matemática, UFRJ*, 1987.

[12] Christofides, N., "Graph Theory: An Algorithmic Approach", *Academic Press*, 1975.

[13] Christofides, N. & Korman, S., "A Computational Survey of Methods for the Set Covering Problem", *Management Science*, Vol. 21, No. 5, p. 591-599, 1975.

[14] Chvatal, V., "A greedy Heuristic for the Set Covering Problem", *Mathematics of Operations Research*, Vol. 4, No. 3, p. 233-235, 1979.

[15] Erlenkotter, D., "A Dual Based Procedure for Uncapacitated Facility Location", *Operations Research*, No. 26, p. 990-1009, 1978.

[16] Etcheberry, J., "The Set Covering Problem: A New Implicit Enumeration Algorithm", *Operations Research*, Vol. 25, No. 5, p. 760-772, 1977.

[17] Feo, T. & Resende, M., "A Probabilistic Heuristic for a Computationally Difficult Set Covering Problem", *Operation Research Letters*, No. 8, p. 67-71, 1989.

[18] Francis, R. L. & White, J. A., "Facility Layout and Location, an Analytical Approach", *Pentice-Hall, Inc.*, 1974.

[19] Garfinkel, R. S. & Nemhauser, G. L., "Integer Programming", *John Wiley and Sons*, 1972

[20] Garfikel, R. & Nemhauser, G. L., "Optimal Set Covering: A Survey", *Perspectives on Optimization*, (Ed. A. M. Geoffrion), p.164-193, Addison-Wesley, Reading, Mass, 1972.

[21] Goffin, J. L., "On the Convergence Rates of Subgradient Optimization Methods", *Mathematical Programming*, Vol. 13, p. 329-348, 1977.

[22] Goldberg, M. C., "O Problema de Alocação Ótima de Radares de Vigilância: Um estudo por Técnicas de Cobertura", *Tese de Mestrado, IME*, 1987.

[23] Golden, B. L. & Assad, A. A., "Vehicle Routing Methods and Studies", *North - Holland*, 1988.

[24] Held, M., Wolfe, P. & Crowder H. P., "Validation of Subgradient Optimization", *Mathematical Programming*, Vol. 6, p. 62-88, 1974.

[25] Ho, A., "Worst Case Analysis of a Class of Set Covering Heuristics", *GSIA, Carnegie-Mellon University*, 1979.

[26] Hulme, B. L. & Baca, L. S., "Set Covering, Partition and Packing", *Sandia Report*, 1984.

[27] Karp, R. M., "Reducibility Among Combinatorial Problems", *Complexity of Computer Computations*, p. 85-103, 1972.

[28] Maculan, N., "Programação Linear Inteira", *PDD 17/78, COPPE/UFRJ*, 1978.

[29] Mehrez, A. & Stulman, A., "An Extended Continuous Maximal Covering Location Problem With Facility Placement", *Comput & Ops Res*, Vol. 11, No. 1, p. 19-23, 1984.

[30] Murty, K. G., "Linear and Combinatorial Programming", *John Wiley and Sons, Inc.* 1976.

[31] Nemhauser, G. L. & Garfinkel R. S., "Integer Programming", *John Wiley and Sons, Inc., New York*, 1972.

[32] Nemhauser, G. L. & Rushmeir, R. A., "Performance of Parallel Branch-and-Bound for Set Covering Problem", *Report Series J-89-02, ISE, Georgia Institute of Technology*, 1989.

[33] Nemhauser, G. L. & Rushmeir, R. A., "Performance of a Parallel Cost Splitting Algorithm for the Set Covering Problem", *Report Series J-90-03, ISE, Georgia Institute of Technology*, 1990.

[34] Paixão, J., "Algorithms for Large Scale Set Covering Problems", *Ph.D. thesis, Report of Man. Sci. Imperial College, London*, 1983.

[35] Ochi, L. S., "Contribuições à Solução de Problemas de Percursos e Sequenciamento de Veículos", *Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ*, 1989.

[36] Roth, R., "Computer Solutions to Minimum Cover Problems", *Operations Research*, Vol. 17, No. 3, p. 455-465, 1968.

[37] Salkin, H. M., "Integer Programming", *Addison - Wisley Publishing Company*, 1975.

[38] Schiryver, A., "Theory of Linear and Integer Programming", *Wiley*, 1986.

[39] Taha, H. A., "Integer Programming: Theory Applications and Computations", *Academic Press*, 1975.

[40] Toregas, C., "Location under maximum travel time constraints", *Tese de Doutorada, Cornell University*, 1971.

[41] Vasko, F. J. & Wilson, G. R., "An Efficient Heuristic for Large Set Covering Problems", *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 31, p. 163-171, 1984.

[42] Vasko, F. J. & Wilson, G. R., "Using a Facility Location Algorithm to Solve Large Set Covering Problems", *Operations Research Letters*, Vol. 3, No. 2, p. 85-90, 1984.

[43] Vasko, F. J. & Wilson, G. R., "Hibrid Heuristics for Minimum Cardinality Set Covering Problems", *Naval Research Logistics' Quarterly*, Vol. 33, p. 241-249, 1986.

[44] Vibranovski, B., Vianna, F. G., Prado, M. G. & Telles, P., "Sistema Inteligente Para Configuração de Exploração de Campos Submarinos (SICCS)", *PETROBRAS / ILTC*, 1990.

[45] White, J. & Case, K., "On Covering Problems and the Central Facilities Location Problem", *Geographical Anal.*, No. 6, p. 281-293, 1974.