



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



Luiz Fernando Chagas Rodrigues

## **Otimização de Custo de Lançamento de Linha utilizando Algoritmos Genéticos**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da  
PUC/Rio como parte dos requisitos para a obtenção do título de  
Especialização em Business Intelligence.

Prof.<sup>a</sup>. Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco, Ph.D.

Prof. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco, Ph.D.

Rio de Janeiro

10/12/2009



*Aos meus amigos da Petrobras pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.*

## **Agradecimentos**

Agradeço à Petrobras pela oportunidade de realizar este curso e desenvolver este trabalho.

Em especial ao engenheiro Antonio Carlos Bittencourt com quem trabalho no desenvolvimento do sistema O3P. O sistema serviu de plataforma para abrigar o resultado deste trabalho

## **RESUMO**

O planejamento de um campo petrolífero é um processo de várias fases e por isto envolve diversas variáveis. Neste trabalho são apresentadas as características gerais de uma avaliação econômica deste tipo de projeto e é proposta uma solução para o problema de posicionamento ótimo de Unidades Especiais de Produção (UEP) e manifolds a fim de minimizar o custo de lançamento de linhas de produção. A instalação de linhas de produção ou injeção é conhecida como arranjo submarino de um projeto. O custo final de implantação de uma linha depende da profundidade do campo, do tipo de linha e de seu comprimento. Nesse sentido, ao conseguir posicionar uma UEP e manifolds de um projeto de forma ideal, estamos indiretamente reduzindo o custo do projeto. Deve-se ainda considerar que existem restrições de segurança assim como limites operacionais dos equipamentos envolvidos. Por fim, é importante destacar que diversos fatores contribuem para o posicionamento de uma UEP. O custo para a instalação das linhas é apenas um deles e não necessariamente pode ser o mais importante.

## **ABSTRACT**

The planning of an oil field is a process of several stages and this involves many variables. This work presents the general characteristics of an economic evaluation of this type of project and proposes a solution to the problem of optimal positioning of the oil platforms and manifolds to minimize the cost of launching production lines. The installation of production lines or injection is known as submarine arrangement. The final cost of deployment of a line depends on the depth of field, the type of line and length. In this sense, to achieve the position of oil platforms and manifolds of a project ideally, we are indirectly reducing the cost of the project. It should also consider that there are security restrictions and operational limits of the equipment involved. Finally, it is important to note that several factors contribute to the positioning of a oil platform. The cost for the installation of the lines is just one of them and may not necessarily be the most important.

## Sumário

1.	Introdução.....	6
1.1.	Motivação.....	7
1.2.	Objetivos do trabalho .....	8
1.3.	Descrição do trabalho .....	8
1.4.	Organização da monografia .....	8
2.	Descrição do Problema .....	9
2.1.	Restrições das Plataformas de Produção.....	9
2.2.	O Cálculo do Custo de Linha.....	10
2.3.	Enunciado do Problema .....	11
3.	Estado da Arte .....	14
4.	Arquitetura do Sistema Proposto .....	17
4.1.	Domínio da solução.....	17
4.2.	Representação do Cromossoma.....	17
4.3.	Operações sobre Cromossomas de Posicionamento .....	20
4.4.	Operações Sobre o Cromossoma de Ordem.....	22
4.5.	Função de Avaliação.....	23
4.6.	Implementação do Sistema .....	25
5.	Resultados.....	27
6.	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	34
	Referências Bibliográficas .....	36

## 1. Introdução

O desenvolvimento de campos petrolíferos envolve projetos que costumam ser muito dispendiosos para uma companhia de petróleo. Muitos componentes são envolvidos e as cifras milionárias fazem com que pequenos erros se transformem em grande quantidade de dinheiro. Portanto, é plausível que existam sistemas que apoiem a tarefa de planejamento de tais projetos.

Tratando-se especificamente da Petrobras, existem setores especializados para a avaliação econômica desses projetos. De uma maneira geral, o objetivo dos especialistas é definir todos os componentes e suas respectivas utilizações para que um campo possa ser avaliado antes de ser desenvolvido. Este tipo de análise permite definir se um campo é economicamente viável ou não, ou seja, se a empresa vai ter lucro ou prejuízo com aquele empreendimento. Em alguns cenários é possível que um campo seja privilegiado em função de outro, caso possua uma melhor expectativa econômica.

O planejamento de um campo petrolífero é multidisciplinar e permite diversos estudos relacionados ao assunto. Dentre alguns temas pode-se citar a utilização de campos inteligentes (LIMA, SOBREIRA, *et al.*, 2010), planejamento de malha de perfuração de poços (MONTES, BARTOLOME, 2001), modelos eficientes de abandono (SILVA, MAINIER, 2008),(FISHMAN, 1985), modelos de estimativa de custo de lançamento de linhas (BROWN, HIRSCH, 1977) e modelos para cálculo de VPL (valor presente líquido) do projeto.

Podemos fracionar o problema de maximização de VPL em diversos sub-problemas que contribuirão para o resultado final. Por exemplo, podemos utilizar uma malha de poços que extraia a maior quantidade possível de óleo do reservatório em questão. Podemos também definir um cronograma de perfuração dos poços de maneira a minimizar o custo de aluguel de sondas (COSTA, 2005).

Neste trabalho será abordado o problema de posicionamento de plataformas e manifolds, com o objetivo de minimizar os custos com linhas de produção e injeção. Será utilizada a técnica de algoritmos genéticos para alcançar tal objetivo (MICHALEWICZ, 1996). Em (WATSON, HAWKES, *et al.* 2008) encontramos uma solução para o projeto conceitual e eficiente para um arranjo submarino de dutos de gás. Enquanto que em (BROWN, HIRSCH, 1977) encontramos um estudo de análise econômica para a instalação de dutos submersos.

As plataformas do problema em questão possuem algumas restrições quanto à capacidade de processamento. Existem também restrições quanto a distancia mínima de segurança das plataformas aos poços que deve ser respeitada. O custo da linha é influenciado pela profundidade do campo, pelo seu tipo e pelo seu comprimento. O problema consiste em posicionar as plataformas e manifolds, respeitando as restrições impostas, de forma que o custo para a instalação das linhas seja o mínimo possível.

A técnica de algoritmos genéticos empregada para elaborar a solução constitui uma simulação computadorizada. Nesta simulação, inicialmente, diversas soluções aleatórias são propostas para solucionar o problema. Cada solução desse conjunto é chamada de indivíduo. Os indivíduos são combinados entre si de forma a gerar novos indivíduos. Cada etapa em que combinações são realizadas constitui-se uma geração. A forma como os indivíduos são combinados pode gerar soluções cada vez melhores, ou seja, os indivíduos evoluem com o passar das gerações.

A solução apresentada por esse trabalho modela o problema de acordo com a técnica de algoritmos genéticos. O posicionamento de plataformas e manifolds e suas interligações submarinas são representados como indivíduos. Operações foram modeladas para permitir sua evolução com o passar das gerações.

### **1.1. Motivação**

Atualmente a tarefa de avaliação econômica é suportada pelo sistema O3P (Simulador de Orçamentação de Pré-Projetos Produção). Neste sistema é permitido ao engenheiro responsável pelo planejamento inserir todos os componentes necessários do projeto, para que assim, possa avaliá-lo economicamente.

Uma funcionalidade interessante para o usuário é poder realizar alterações e, assim, observar o impacto desta alteração no VPL do projeto. Muitas vezes, os projetos são comparados ou escolhidos a partir do seu VPL. Portanto, torna-se interessante que o sistema auxilie o usuário a escolher os parâmetros de forma que isso maximize o valor do VPL.

Para reduzir o custo de lançamento de linhas, o usuário do sistema pode posicionar manualmente as plataformas e manifolds existentes. Ao recalculando o VPL do projeto é possível obter o custo do novo posicionamento. Cabe ao usuário manter essas alterações ou simular novas.

A tarefa de posicionamento manual, além de demorada, não garante que o melhor resultado será atingido. Esta forma de trabalho é pouco eficiente e dificulta o trabalho de maximização de VPL de um projeto.

## **1.2. Objetivos do trabalho**

Este trabalho busca uma solução alternativa para a redução de custo do lançamento de linhas. Pretende-se alcançar os seguintes objetivos:

- Obter resultados próximos ao ótimo no problema de redução de custo de lançamento de linhas.
- Realizar a tarefa de otimização em tempo aceitável.
- Incorporar a solução implementada ao sistema O3P.

## **1.3. Descrição do trabalho**

Inicialmente foi definido o domínio da solução deste trabalho. Foram limitados o tamanho do mapa, o tipo de poço utilizado assim como os tipos de linhas. As restrições das plataformas e manifolds também foram consideradas.

A etapa posterior foi a definição das soluções do problema em questão como indivíduos de um algoritmo genético. Para isso foi feita a modelagem dos cromossomas destes indivíduos. As operações de *crossover* e mutação sobre os indivíduos também foram elaboradas nesta fase.

Finalmente a função de avaliação, responsável por definir o quão bom é um indivíduo, foi elaborada. Toda a modelagem foi implementada utilizando o framework Java ECJ (ECJ, 2010).

## **1.4. Organização da monografia**

Os capítulos restantes deste trabalho estão organizados da seguinte forma. No capítulo 2 serão apresentados o problema, de forma mais detalhada, e as variações que o tornam mais realista. O capítulo 3 abordará uma solução para o problema utilizando algoritmos genéticos. Será descrito o modelo utilizado, assim como as operações de evolução. Finalmente, o capítulo 4 trará as conclusões e as futuras aplicações do trabalho.



## **2. Descrição do Problema**

Este capítulo apresenta mais detalhadamente as restrições das plataformas de produção, como são calculados os custos de lançamento de linhas e a descrição do problema com algumas possíveis variações.

### **2.1. Restrições das Plataformas de Produção**

Uma plataforma de produção possui diversas atribuições dentro de um campo petrolífero. Muitas vezes, elas são projetadas para operar especificamente em um campo. Seu dimensionamento envolve a escolha adequada de módulos para as características do campo em questão (LIMA, SOBREIRA, *et al.*, 2010). Por exemplo, uma plataforma que opere em águas profundas com óleo leve é bem diferente de uma que opere em profundidade menor com óleo pesado.

Levando em consideração que uma plataforma é um componente do campo petrolífero onde o espaço para inclusão de módulos é muito restrito e sua construção é muito onerosa, é admissível que uma plataforma seja reaproveitada a partir de um campo desativado. Nesses casos, é preciso que se faça adaptações para atender as características no novo campo. No caso de novas unidades as restrições podem ser traduzidas em prazos e custos para atender a capacidade de processamento requerida (LIMA, SOBREIRA, *et al.*, 2010).

Considerando, portanto, o impacto direto das restrições orçamentárias e físicas nas capacidades de processamento de óleo e de injeção de água ou gás, o desenvolvimento de um campo pode necessitar de várias plataformas sendo que cada uma produza o hidrocarboneto de um número limitado de poços.

Outro fator a ser observado são as restrições de segurança. Elas impedem que uma plataforma seja posicionada muito próxima à cabeça dos poços no fundo do mar, no caso de completação molhada. Caso ocorra um acidente no poço e seu equipamento de segurança não funcione adequadamente, pode acontecer a liberação de uma grande quantidade de óleo e gás. Por possuírem densidade menor do que a água, o óleo e o gás serão levados à superfície e, caso entrem em contato com a plataforma, podem provocar um acidente. Existem teorias que suportam a hipótese de que mesmo que não ocorra um incêndio a plataforma pode vir a afundar, devido a redução da densidade do líquido em que flutua.

## **2.2. O Cálculo do Custo de Linha**

Uma linha pode ser classificada em quatro tipos distintos: linha de fluxo, anular, umbilical e riser. Quando dizemos que uma linha é lançada podemos ter, na verdade, um “feixe” de linhas, isto é, diversas linhas juntas formando um bundle: uma de fluxo, um umbilical e um riser, por exemplo.

Linhas de fluxo estão conectadas diretamente com a coluna de produção do poço, sendo uma linha por onde o óleo é produzido. Uma linha de fluxo pode ser utilizada também para a injeção de água ou gás. Tudo depende, é claro, do tipo de poço em questão. Estas linhas transportam a produção ou a injeção no leito do mar (BURKE, ODY, 2010).

Linhas anulares estão conectadas ao espaço anular do poço, que é formado pelo espaço entre a coluna de produção e a parede do poço. São geralmente utilizadas para técnicas de elevação de óleo, como, por exemplo, gás lift. Este tipo de linha só existe em poços de produção.

O umbilical é, na verdade, um conjunto de cabos que são conectados à cabeça do poço. Seu objetivo é permitir controlar o poço remotamente, habilitando a abertura e o fechamento de válvulas.

Finalmente, o riser é o tipo de linha mais resistente responsável por conectar as linhas de fluxo do fundo do mar à plataforma. Em profundidades muito elevadas é comum o uso de bóias para sustentação do peso do riser. Geralmente são mais caras do que as linhas de fluxo e anulares. Além disso possuem um rastro mínimo proporcional à lâmina d`água.

O sistema O3P possui um módulo para cálculo de custo de linha. Os parâmetros que influenciam no preço são: pressão suportada, profundidade de operação, diâmetro e comprimento. Linhas umbilicais têm o preço calculado diretamente a partir do seu comprimento. O preço por metro do riser é diferente em relação às demais linhas.

A figura abaixo resume a disposição de um riser juntamente com uma linha de fluxo ou anular.



Ilustração 1 - Esquema de um Riser conectado a uma linha de fluxo ou anular

### 2.3. Enunciado do Problema

O problema de posicionamento de plataformas de produção é de fácil enunciado. No entanto, podem ser incluídos novos elementos que dificultem sua solução. Neste trabalho selecionamos poucas variáveis a fim de dar ênfase ao método de abordagem do problema e à proposta de solução.

Podemos encontrar estudos relacionados ao custo de instalação de dutos submarinos em (BROWN, HIRSCH, 1977). Enquanto que em (WATSON, HAWKES, *et al.* 2008) temos um modelo para o projeto de dutos eficientes.

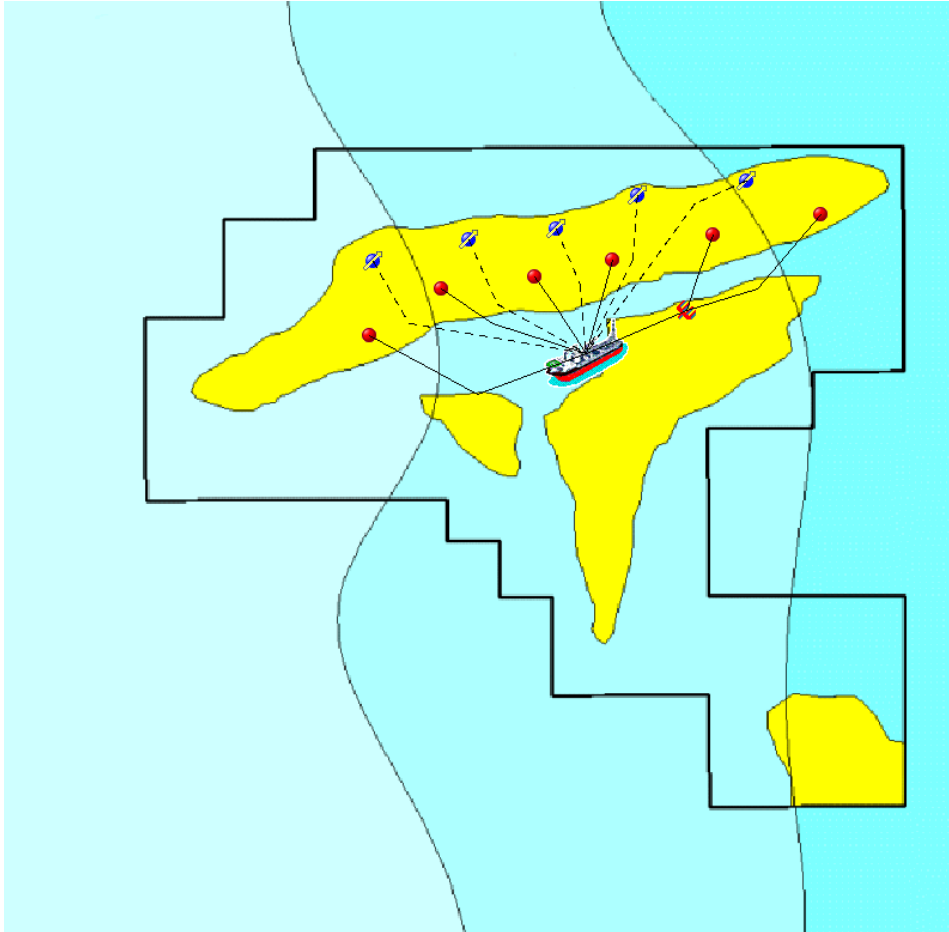
Consideramos que em um campo petrolífero produtor de óleo exista uma malha de perfuração já definida com poços de produção e injeção. Considere também que cada plataforma possua uma capacidade de processamento de óleo e limitações quanto à capacidade de injeção (gás ou água). Outra limitação da plataforma é a obrigatoriedade da existência de um círculo de segurança ao seu redor onde não podem existir poços ou quaisquer outras estruturas.

Em um projeto real os poços não são conectados individualmente à plataforma com riser. São utilizados manifolds para reduzir o número de linhas. Portanto vamos considerar que será possível o uso de manifolds, onde será restringido o número de linhas conectadas assim como uma vazão máxima.

O problema de otimização consiste em posicionar as plataformas e manifolds que estão à disposição do projeto e definir um conjunto de poços para associar a cada plataforma com o objetivo de minimizar os custos de lançamento de linhas. A solução do problema deve considerar as restrições de segurança e a capacidade de processamento das plataformas. Assim como as limitações dos manifolds. Note que a solução pode não ser tão evidente visto que as linhas possuem custos diferentes de acordo com seu tipo e forma de instalação. Por

exemplo: uma linha produtora com rizer sera mais onerosa do que uma linha produtora sem rizer.

Abaixo temos a representação de um projeto fictício de um campo petrolífero gerado pelo sistema O3P.



**Ilustração 2- Exemplo de projeto no O3P**

O campo petrolífero, que foi delimitado por prospecções marítimas, está definido com a cor amarela. O termo técnico para a delimitação desta área é chamado de contorno geológico. A linha preta ao seu redor representa a área concedida para produção, ou seja, o ring fence de produção.

O círculos pequenos representam os poços. Sua cor representa o tipo de fluido. Vermelho para produtores de óleo e azul com seta para injetores de água. O sistema também permite a inclusão de poços produtores ou injetores de gás, representados pela cor verde.

Neste exemplo possuímos três tipos de plataforma: uma FPSO, na parte superior, uma Semi- Submersível, abaixo e à direita, e uma TLP, abaixo e à

esquerda. O círculo vermelho ao redor das plataformas representam a área de segurança citada anteriormente.

Para este exemplo, podemos imaginar qual seria a melhor posição das plataformas para reduzir o comprimento das linhas. Também seria necessário estabelecer o conjunto de poços que serão associados a cada plataforma. Vale lembrar que não podem existir poços dentro do círculo vermelho de segurança e que as capacidades das plataformas devem ser respeitadas.

### 3. Estado da Arte

A técnica empregada para solução do problema de otimização de custo de lançamento de linhas chama-se algoritmo genético. Segundo (WIKIPEDIA,2009): “Um algoritmo genético (AG) é uma técnica de procura utilizada na ciência da computação para achar soluções aproximadas em problemas de otimização e busca, fundamentado principalmente pelo americano John Henry Holland. Algoritmos genéticos são uma classe particular de algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação (ou crossing over).”

Ainda segundo (WIKIPEDIA, 2009): “Algoritmos genéticos são implementados como uma simulação de computador em que uma população de representações abstratas de solução é selecionada em busca de soluções melhores. A evolução geralmente se inicia a partir de um conjunto de soluções criado aleatoriamente e é realizada por meio de gerações. A cada geração, a adaptação de cada solução na população é avaliada, alguns indivíduos são selecionados para a próxima geração, e recombinados ou mutados para formar uma nova população. A nova população então é utilizada como entrada para a próxima iteração do algoritmo.”

O conceito de indivíduo de uma população surge para descrever uma solução para o problema que se deseja resolver. Cada indivíduo possui sua representação sob a forma de um cromossoma. O objetivo do algoritmo genético é encontrar o indivíduo que melhor resolva o problema. Nem sempre é possível encontrar a solução ótima, no entanto, podem-se alcançar resultados que satisfaçam os requisitos do problema, chegando, portanto, muitas vezes, bem próximo a uma solução ótima.

De acordo com Jonh Holland (HOLLAND, 1975) os algoritmos genéticos, baseados no fenômeno da seleção natural, representam uma abstração da evolução das espécies (DARWIN, 1859). O estudo da herança genética (MENDEL, 1865) também é caracterizado nesta técnica ao quando aplicados o conceito de recombinação e mutação.

Existem diversas representações de cromossomas. Cada modelagem justifica um formato diferente. Por exemplo: um cromossoma representado por número flutuantes pode ser adequado para problemas de otimização de funções matemáticas. Problemas de otimização combinatória, por sua vez, podem ser atacados com uma modelagem baseada em ordem. Nada impede, no entanto,

que seja feita uma modelagem que misture diversas representações de cromossomas.

Durante a execução de um algoritmo genético, os indivíduos são avaliados pela chamada função-objetivo. Esta função é capaz de definir o “valor” de um indivíduo. Dependendo do formato utilizado para o cromossoma, pode ser necessária uma decodificação. Neste caso, o cromossoma é transformado em uma entrada válida para a função-objetivo.

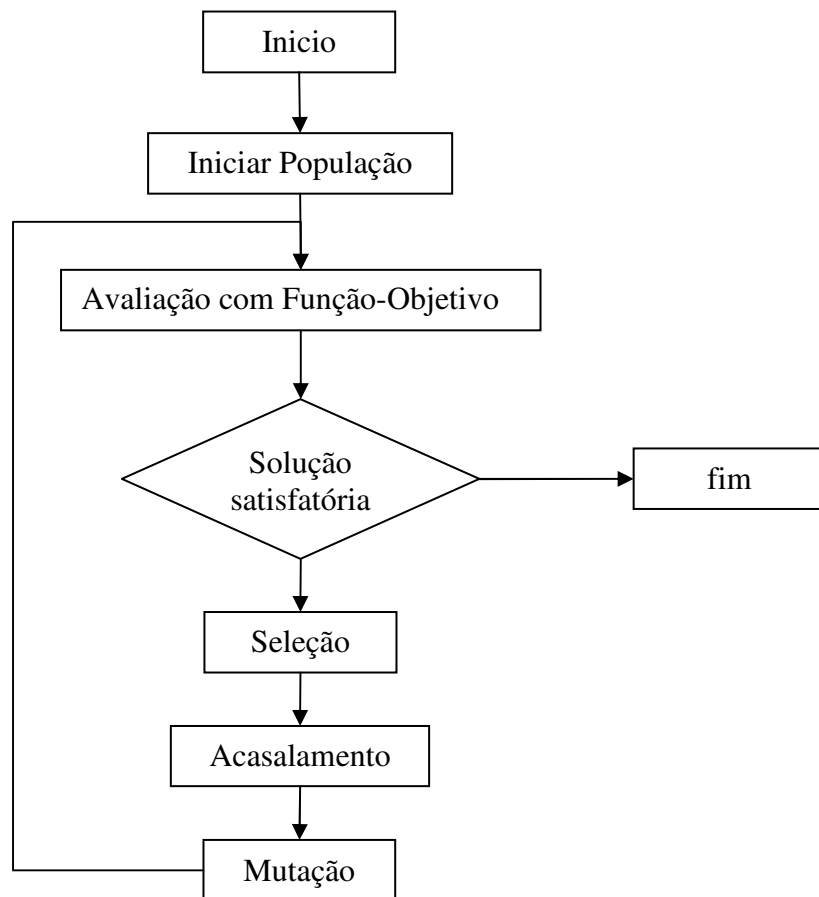
Nem sempre é necessário entender o funcionamento da função-objetivo, basta utilizá-la como uma caixa preta. Neste contexto, podemos imaginar a função objetivo como sendo uma simples avaliação de uma função matemática até uma complexa e demorada execução de um simulador de reservatórios. Notamos, portanto, que algumas vezes sua avaliação pode ser custosa, o que pode ser compensado com o uso de diversos processadores em paralelo, reduzindo o tempo total de execução. A própria natureza do algoritmo permite essa abordagem.

A possibilidade de valorar os indivíduos com uma função-objetivo remete ao conceito de seleção. Após avaliar todos os elementos de uma população o algoritmo seleciona os indivíduos genitores da próxima geração. Existem diversos métodos de seleção que serão abordados mais adiante, cada método de seleção possui seu uso mais apropriado. De uma maneira geral, os indivíduos com melhor avaliação possuem mais chance de serem selecionados. Espera-se que, selecionando bons indivíduos será possível gerar bons descendentes.

Os indivíduos selecionados são então acasalados (crossing-over). Neste processo, assim como na reprodução sexuada, os descendentes do acasalamento recebem uma carga genética composta pela carga de seus genitores. Existe ainda a etapa da mutação, que altera sutil e aleatoriamente o cromossoma de um indivíduo da nova geração.

Tanto o acasalamento quanto a mutação estão sujeitos a sorteios probabilísticos. Notamos que uma alta probabilidade de acasalamento pode levar a uma convergência prematura sub-ótima. O conceito de mutação serve para causar distúrbios nessa convergência, com a idéia de direcioná-la para uma solução melhor. Geralmente trabalha-se com a probabilidade de acasalamento maior do que a de mutação. Um algoritmo genético que abuse da mutação pode se aproximar de uma busca aleatória.

Em síntese, a execução de um algoritmo genético consiste em gerar uma população inicial com indivíduos aleatórios, ordená-los de acordo com a função-objetivo, reproduzi-los, realizar mutação e reiniciar o ciclo novamente a partir da ordenação. Podemos visualizar o fluxograma da execução:



**Ilustração 3 - Fluxograma de um Algoritmo Genético**

Uma vantagem dos algoritmos genéticos é sua simples implementação. Soluções analíticas geralmente são muito complexas e de difícil entendimento. Por outro lado, a simplicidade de um AG possibilita sua rápida alteração quando o problema sofre alterações. Esta diferença pode ser crucial para a classe de problemas que se deseja resolver.

Os algoritmos genéticos possuem ampla aplicação em problemas de otimização como planejamento, controle adaptativo, jogos, modelagem cognitiva, problemas de transportes, problemas de caixeiro viajante, entre outros (MICHALEWICZ, 1996).



## **4. Arquitetura do Sistema Proposto**

### **4.1. Domínio da solução**

O domínio de solução deste trabalho considerou poços de produção e injeção. Os primeiros podem produzir óleo ou gás enquanto os segundos podem injetar água ou gás.

As propriedades das plataformas são os círculos de segurança, capacidade de injeção, capacidade de produção e número de risers que podem ser conectados. As variáveis que indicam o posicionamento das plataformas são restringidas ao espaço definido por um retângulo que representa o mapa em questão. A origem do mapa se localiza no canto inferior esquerdo e seus limites podem ser encontrados aplicando-se a largura e a altura do mapa. Também é associado ao problema informação quanto a profundidade do campo.

Os tipos de linhas utilizados foram: linhas de fluxo, juntamente com linhas anulares, umbilicais e riser. Os parâmetros de pressão, diâmetro e profundidade das linhas são fixos para todas elas. As linhas podem ser produtoras ou injetoras. Dependendo do tipo de elemento que ela conecta.

Os manifolds, assim como os poços, são classificados em injetores e produtores. Portanto, não podemos conectar poços injetores em manifolds de produção nem poços produtores em manifolds de injeção. Como restrição, os manifolds possuem uma capacidade máxima de vazão assim como um limite de entradas e saídas. É permitido conectar a saída de um manifold na entrada de outro, desde que as restrições de tipo de manifold e vazão máxima sejam respeitadas.

Assim como nos manifolds, as capacidades das plataformas devem ser respeitadas. O fluxo de injeção ou produção não deve extrapolar seus limites para que uma linha seja nela conectada. Os limites de linhas ligadas à plataforma também não deve exceder o limite máximo de risers.

### **4.2. Representação do Cromossoma**

A modelagem considera dois tipos de elementos que serão manipulados pelo algoritmo genético: elementos fixos e elementos móveis. Os elementos móveis possuem coordenadas (x,y) de posicionamento no mapa, são as plataformas e os manifolds. Trata-se de um problema de otimização de números reais.

Os elementos fixos, por sua vez, representam um problema de ordem. Inicialmente eram representados somente pelos poços, que não mudavam de lugar, daí o nome de elementos fixos. Com a evolução do problema, tornou-se interessante colocar manifolds dentro do escopo do problema de ordem, de forma que um manifold pudesse se conectar a outro, mesmo sendo um elemento do problema de otimização de números reais.

A modelagem de um indivíduo incluiu, portanto, as seguintes características ao cromossomo: variáveis de posicionamento de plataformas, variáveis de posicionamento de manifolds, lista de ordenação de elementos moveis (plataformas e manifolds) e lista de ordenação de elementos fixos (poços e manifolds). O conceito de lista de ordenação ficará mais claro com a explicação da função de avaliação.

A representação da localização não apresenta grandes desafios, visto que podemos utilizar números reais para indicar as coordenadas  $x$  e  $y$ . Por conseguinte, para um problema com  $n$  plataformas e  $k$  manifolds, temos as coordenadas das plataformas representadas por  $X_p$  e  $Y_p$  enquanto que as coordenadas do manifold são representadas por  $X_m$  e  $Y_m$ . A primeira parte do cromossoma pode ser representada pelos vetores abaixo, onde o primeiro representa o posicionamento de plataformas e o segundo o posicionamento de manifolds.

$X_{p1}$	$Y_{p1}$	...	$X_{pn}$	$Y_{pn}$
----------	----------	-----	----------	----------

$X_{m1}$	$Y_{m1}$	...	$X_{mk}$	$Y_{mk}$
----------	----------	-----	----------	----------

A questão da representação do conjunto de poços associado a cada plataforma ou manifold é menos evidente. Seria possível representar dentro do cromossoma qual poço está associado a qual plataforma ou manifold. Neste formato, para um problema com  $m$  poços,  $n$  plataformas e  $k$  manifolds, existiria um vetor com  $m$  posições onde a primeira posição representaria o primeiro poço, a segunda o segundo e assim sucessivamente. Os valores associados representariam a plataforma em que o poço estaria associado. Por exemplo, caso a posição 1 possua o valor 3, isto significa que o poço 1 está associado à plataforma 3. No entanto, esta representação não é adequada já que pode gerar diversos indivíduos inválidos, pois a capacidade de processamento de óleo de

cada plataforma, assim como as restrições dos manifolds, não estariam sendo levados em conta.

A solução proposta, como já citado, é representar o cromossoma como um problema de ordem. Neste formato existem outros dois vetores, o primeiro representa os elementos fixos, enquanto que o segundo os elementos móveis.

Um ponto interessante para ser destacado é o fato dos elementos móveis estarem considerados dentro do problema de ordem. O motivo é que é importante também para a decodificação do cromossoma a ordem em que os manifolds e plataformas são escolhidos para conexão com os poços e manifolds. A decodificação será melhor explicada na seção da função de avaliação, no entanto, considere por enquanto que a decodificação envolve a iteração dos elementos móveis.

Imagine se percorressemos sempre as plataformas e depois os manifolds. Existiria o risco de todos os poços serem conectados diretamente na plataforma, subutilizando portanto os manifolds. Por outro lado, se percorressemos sempre os manifolds e depois as plataformas, existiria casos em que o poço seria ligado ao manifold e depois à plataforma, ignorando a possibilidade de conectá-lo diretamente à plataforma. Espera-se então, que a solução ótima esteja representada em uma lista que intercala a ordem em que os manifolds e plataformas são escolhidos.

A segunda parte do cromossoma fica representada, portanto, por dois vetores: elementos fixos e elementos móveis. Onde o tamanho do primeiro vetor é representado pela quantidade de poço e manifolds. O segundo vetor possui tamanho igual a quantidade de plataformas e manifolds.

Portanto, para um problema com  $n$  plataformas,  $k$  manifolds e  $m$  poços teremos o vetor de elementos fixos:

$EF_1$	...	$EF_{m+k}$
--------	-----	------------

E o vetor de elementos móveis:

$EM_1$	...	$EM_{n+k}$
--------	-----	------------

### **4.3. Operações sobre Cromossomas de Posicionamento**

A primeira parte do cromossoma, que possui números reais, representa o posicionamento das plataformas e manifolds. Pode ser manipulada com crossover aritmético e mutações creep.

A operação de crossover aritmético realiza uma combinação linear entre os dois vetores genitores. O resultado de dois filhos consegue manter características de um genitor em um filho e de outro genitor em outro filho. Suponha dois genitores G1 e G2 e seus filhos F1 e F2. Temos então a formação de F1 e F2 é expressa por:

$$F1 = a.G1 + (1-a).G2$$

$$F2 = a.G2 + (1-a).G1, \text{ onde } a \text{ é aleatório entre } 0 \text{ e } 1.$$

Note que, caso  $a$  seja próximo de 0, então F1 será bastante parecido com G2 e ligeiramente parecido com G1. Caso  $a$  seja próximo de 1, então F1 será bastante parecido com G1 e ligeiramente parecido com G2. Observe também que F2 é sempre o inverso de F1. Por exemplo, caso F1 se pareça mais com G2 ( $a$  próximo de 0) então F2 será parecido com G1. A idéia deste tipo de crossover é manter as características de uma boa solução variando levemente em função de outra boa solução.

Uma alternativa ao crossover aritmético seria o crossover de média. Esta pode ser definida como um caso especial do crossover aritmético, onde o valor de  $a$  é sempre 0,5. O resultado será sempre a média entre os genitores, o que nem sempre faz sentido. Por exemplo, suponha um domínio que inicie nas coordenadas (0,0) e termine em (100,100). Se dois indivíduos com boas avaliações, onde o primeiro propõe que a plataforma 1 esteja nas coordenadas (0,0) e um outro propõe que esteja no outro oposto do domínio (100,100). Não faria muito sentido apostar que existirá uma solução melhor colocando a plataforma 1 em (50,50). Em outras palavras, as características dos bons indivíduos não são preservadas. Por esse motivo que o crossover aritmético é preferido nesta solução.

A mutação creep considera uma variação do valor das coordenadas que respeitem o domínio do problema e varia em função do parâmetro  $p$ . Em sua forma clássica, pode ser descrita da seguinte forma para a variável  $X$ , na geração  $t$ , pertencente ao domínio que possui limite inferior  $\min$  e limite superior  $\max$ :

Um bit  $b$  é sorteado, caso seu valor seja 0, então:

$$X_{t+1} = X_t + \Delta(\max - X_t)$$

Caso,  $b$  seja igual a 1, então:

$$X_{t+1} = X_t - \Delta(X_t - \min)$$

Onde  $\Delta(s) = s \cdot \text{rand}$ , onde  $\text{rand}$  é um randômico entre 0 e  $p$ .

Observe que se o parâmetro  $p$  se aproximar de 0 o efeito da mutação sobre a variável será menor, enquanto que se for perto de 1 o ajuste será maior.

Embora as operações de crossover e mutação para a localização das plataformas sempre resultem em indivíduos dentro do escopo de variáveis, é possível que sejam gerados indivíduos que não respeitem as regras de segurança descrita anteriormente. Nada impede que uma operação de crossover ou mutação posicione uma plataforma com poços dentro da área de seu círculo de segurança.

A solução proposta para o problema é descartar indivíduos inválidos gerados pelo crossover e modificar a operação da mutação creep de maneira que somente resulte em indivíduos válidos.

A modificação consiste em, ao invés de considerar  $\min$  e  $\max$  do domínio das variáveis, podemos fazer com que  $\min$  seja o máximo que a plataforma poderia deslocar-se para esquerda até que seu círculo de segurança tangencie um elemento fixo. O equivalente pode ser feito para escolher o valor de  $\max$ . No entanto, o deslocamento em questão seria para direita.

De forma análoga a plataforma, o manifold também sofre mutações creep. Podemos restringir os valores de  $\min$  e  $\max$  utilizando um raciocínio equivalente: os manifolds que forem deslocados, não poderão ser alocados dentro de círculos de segurança de plataformas. Neste caso, para descobrir o deslocamento máximo permitido em direção a uma plataforma, podemos imaginar que o manifold possui um raio de segurança de mesmo valor do que a plataforma em questão. Desta forma, podemos considerar o manifold como uma plataforma.

Podemos descrever o cálculo do deslocamento da seguinte forma:

Suponha um ponto  $A$  que representa a localização da plataforma e um ponto  $B$  que representa a localização de um poço. Sabemos que a distância entre  $A$  e  $B$  é:

$$\overline{AB} = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2}$$

Suponha que o raio de segurança da plataforma é representado por  $r$ . Desejamos incrementar  $X_A$  com  $dx$  de forma que  $AB$  seja igual a  $r$ . Portanto temos:

$$r = \sqrt{((X_A + d_x) - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2}$$

Isolando  $dx$ , teremos:

$$d_x = X_B - X_A + \sqrt{r^2 - (Y_A - Y_B)^2}$$

O cálculo de  $dy$  pode ser obtido de forma análoga, resultado na equação:

$$d_y = Y_B - Y_A + \sqrt{r^2 - (X_A - X_B)^2}$$

Calculando-se  $dx$  e  $dy$  para todos os elementos fixos, podemos descobrir os limites máximos de deslocamento que uma plataforma pode sofrer em uma mutação. Os deslocamentos são então representados em quatro variáveis:  $dx$ Positivo,  $dx$ Negativo,  $dy$ Positivo e  $dy$ Negativo. Cada variável está limitada de zero (caso a plataforma já possua distância  $r$  de um elemento em determinada direção) ao limite do domínio. Por exemplo, o limite do domínio para  $dx$ Positivo é representado pela origem da coordenada  $X$  do mapa acrescido de sua medida de largura. Analogamente, o limite de domínio para  $dy$ Negativo seria a origem da coordenada  $Y$  do mapa.

A mutação creep por sua vez também sofrerá alterações, pois o valor máximo de deslocamento será fornecido como parâmetro, teremos, portanto, para o deslocamento em  $x$ :

Um bit  $b$  é sorteado, caso seu valor seja 0, então:

$$X_{t+1} = X_t + dxPositivo.rand$$

Caso,  $b$  seja igual a 1, então:

$$X_{t+1} = X_t - dxNegativo.rand$$

Onde  $rand$  é um randômico entre 0 e  $p$ .

#### **4.4. Operações Sobre o Cromossoma de Ordem**

Conforme descrito anteriormente, os vetores do cromossoma que representam elementos fixos e móveis serão tratados como um problema de

ordem. Para operações de crossover será utilizado o crossover uniforme baseado em ordem. A operação de mutação será feita por embaralhamento.

A operação de crossover uniforme baseado em ordem leva em consideração que a informação relevante do cromossoma é a ordem em que os poços aparecem. O objetivo então é transmitir aos descendentes esta característica. Podemos defini-lo seguindo o algoritmo abaixo:

A partir dos genitores  $P_1$  e  $P_2$ , para criar o descendente  $F_1$ :

- Gere um padrão de bits do comprimento dos genitores;
- Preencha  $F_1$ , copiando o genitor  $P_1$  nas posições em que o padrão é igual a "1";
- Faça uma lista dos elementos de  $P_1$  associados com os bits "0" do padrão;
- Permute estes elementos de modo que eles apareçam na mesma ordem em que aparecem em  $P_2$  ;
- Preencha as lacunas de  $F_1$  com os elementos ordenados no passo anterior;

A operação de mutação por embaralhamento é simples. Um sub-vetor é escolhido aleatoriamente e seu conteúdo é embaralhado.

#### **4.5. Função de Avaliação**

A decodificação é feita percorrendo os elementos fixos e associando os mesmo aos elementos móveis quando possível. Ambos vetores são tratados como dados de um problema combinatorial de ordem.

Segundo a modelagem, cada elemento sabe suas limitações e permite ou não ser conectado a outro elemento. Desta forma, um manifold que esteja com todas suas entradas preenchidas, por exemplo, não aceitará outra conexão. Assim, conforme a iteração progride, as linhas vão interligando os elementos e gerando a malha da solução. Ilustrando com pseudo código, a decodificação segue o seguinte algoritmo.

```
para cada fixo in elementosFixos
  para cada movel in elementosMoveis
    se(fixo.aceita(movel) E movel.aceita(fixo))
      cria linha fixo->movel
```

Note que é necessário que o elemento fixo aceite o elemento móvel e vice-versa. O caso onde o elemento fixo não aceitaria seria quando um manifold, na posição de um elemento fixo, estiver com todas as saídas ocupadas.

No final da iteração, temos um grafo montado que representa o arranjo submarino. No entanto, isto não é suficiente para gerar uma solução válida, pois é possível existir elementos não conectados a uma plataforma assim como manifolds subutilizados. Um manifold é subutilizado quando está conectado a uma plataforma mas não possui nenhuma conexão em suas entradas.

Neste sentido, algumas melhorias são realizadas ao arranjo gerado pela iteração. A primeira delas procura reduzir o número de manifolds subutilizados.

Para isso itera-se sobre os manifolds. Caso exista um manifold subutilizado, itera-se sobre as plataformas ordenando-as pela distância ao manifold subutilizado. A partir daí obtém-se os poços conectados diretamente a plataforma, também ordenados pela distância ao manifold. Para cada poço, verifica se é possível conecta-lo ao manifold. Caso seja remove a linha que liga o poço a plataforma e cria-se uma nova que liga o poço ao manifold.

A idéia por traz deste ajuste é trocar linha que ligam poços diretamente à plataforma passando por um manifold. Desta forma pretende-se encontrar uma solução mais barata visto que a linha que interliga o poço e a plataforma é de custo mais elevado por possuir um riser. Observe também que é sempre procurada a plataforma e os poços mais próximos ao manifold em questão. Procura-se com isso reduzir o comprimento da linha, conseqüentemente seu custo.

Abaixo é representado o algoritmo de ajuste utilizando um pseudo código:



```

para cada Manifold in elementosFixos
    se(manifold subutilizado)
        ordena plataformas por distancia ao manifold
        para cada plataforma
            ordena pocos conectados a plataforma por_ distancia ao manifold
            para cada poco conetado diretamente plataforma
                se(possivel conectar ao manifold)
                    remove linha poco->plataforma

```

O segundo ajuste também não garante que uma solução válida seja encontrada. Ainda existe a possibilidade de existirem elementos não conectados a uma plataforma. Para resolver este problema, itera-se sobre os elementos fixos do problema. Caso não exista uma linha conectada ao elemento, cria-se uma linha que o conecte a plataforma mais próxima que o aceite.

Abaixo o pseudo código do ajuste:

```

para cada ef em elementosFixos
    se não existe linha conectando ef
        ordenas plataformas por distancia ao ef
        para cada plataforma
            se(possivel conectar ef a plataforma)
                cria linha ef->plataforma

```

Após finalizar todos os ajustes, é possível calcular o custo do lançamento. Para isso são percorridas todas as linhas e calculados os custos de cada uma. O custo vai depender do tipo de linha (produção ou injeção), do seu comprimento e da necessidade de riser juntamente com a profundidade da lâmina d'água.

A avaliação do indivíduo será portando o somatório do custos das linhas. Como tratamos de uma problema de minimização, o valor da avaliação é invertido, ou seja, é calculado 1/custo. Sera considerado, portanto, o melhor indivíduo aquele que possuir maior valor na avaliação.

#### **4.6. Implementação do Sistema**

Devido a implementação do sistema O3P ser em Java, para o desenvolvimento do algoritmo genético deste trabalho foi utilizado a biblioteca ECJ (ECJ, 2010).

Arquiteturalmente, o algoritmo foi tratado como um novo projeto chamado de O3P-OCL, onde OCL significa Otimização de Custo de Linhas. Seguindo esta

organização, o projeto O3P pode utilizar o código de O3P-OCL, bastando acrescentá-lo as suas bibliotecas.

Sempre que necessário executar uma otimização, o código do O3P faz um mapeamento do modelo de dados de O3P para o modelo de dados de O3P-OCL. Após a execução ser realizada, transforma o modelo de dados do resultado em dados compatíveis com o modelo do O3P.

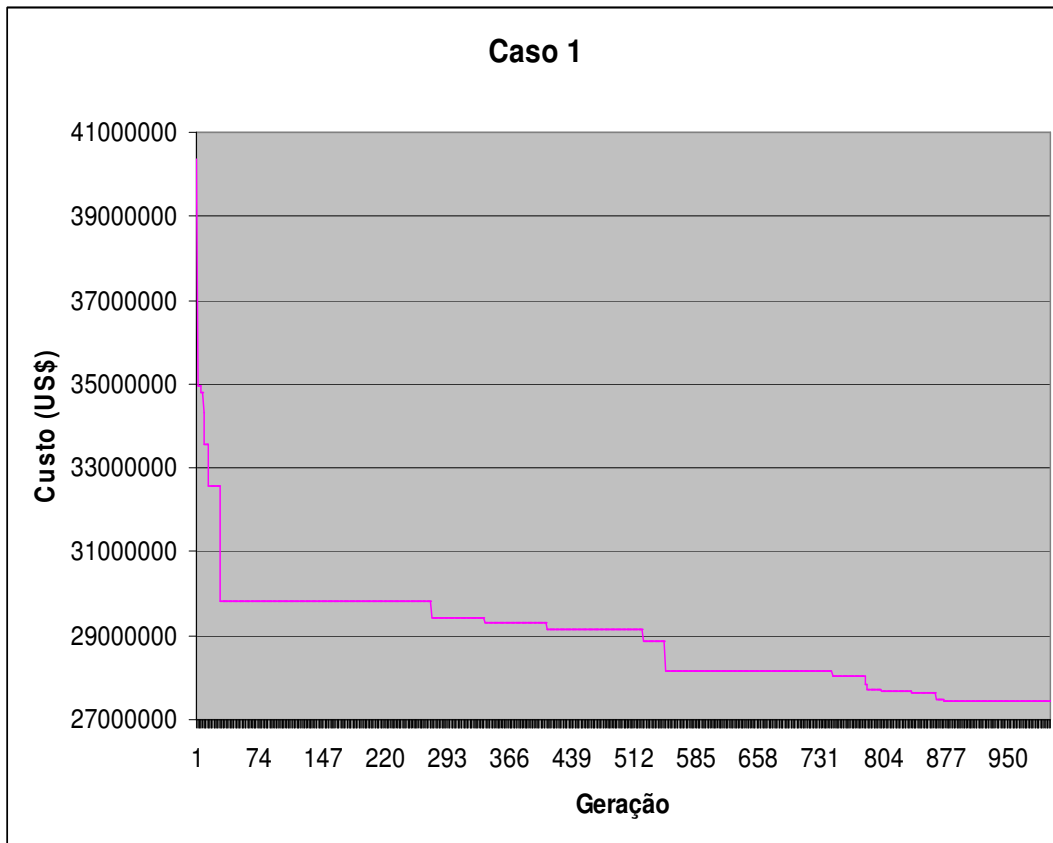
## 5. Resultados

Para realizar os testes do algoritmo, foram eleitos alguns cenários de teste. Procurou-se variar a complexidade dos cenários para analisar e comparar os resultados. Cada cenário foi executado com mil gerações. Embora este número seja exagerado, podemos analisar a conversão e verificar uma quantidade adequada de gerações.

O primeiro cenário criado considera dois poços produtores ao norte e dois poços injetores ao sul. São fornecidos dois manifolds, um de produção e o outro de injeção. Cada manifold possui duas entradas e uma saída. Uma plataforma com capacidade de dois risers é fornecida. A capacidade de cada equipamento não é levada em conta neste cenário, portanto os poços possuem uma capacidade de produção bem inferior a capacidade de processamento dos equipamentos.

É esperado como solução que os manifolds produção sejam conectados aos poços produção e utilizem apenas um riser para elevar a produção a plataforma. Analogamente, é esperado que o manifold de injeção interligue os poços de injeção e conecte os poços à plataforma utilizando apenas um riser. Pelo fato das linhas de injeção serem mais baratas do que as linha de produção, a posição esperada da plataforma seria próxima aos poços de produção e afastada dos poços de injeção.

O gráfico abaixo representa o desempenho da execução do cenário com mil gerações.



**Gráfico 1 - Otimização de custos do caso 1**

Note que em aproximadamente a partir da geração 900 não é detectada nenhuma melhoria no desempenho do algoritmo.

Abaixo o diagrama do O3P antes e depois da execução.

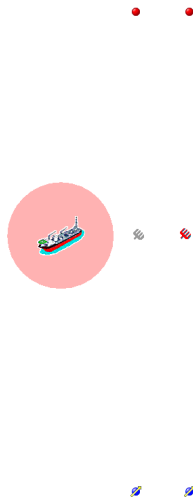


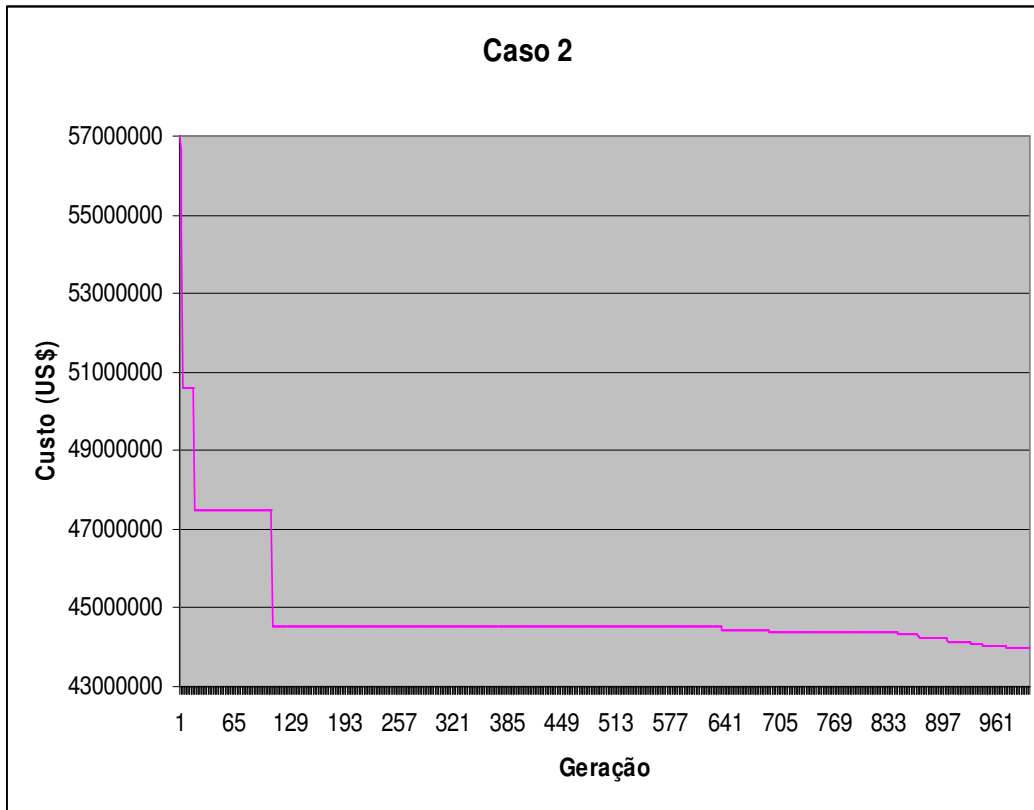
Ilustração 4 - Diagrama do caso 1 antes da otimização



Ilustração 5 - Diagrama do caso 1 após a otimização

O segundo caso é derivado do primeiro. Um novo poço é adicionado e colocado no limite horizontal do mapa, no extremo leste. É adicionada uma nova conexão de riser para a plataforma. Espera-se que o novo poço seja conectado diretamente à plataforma uma vez que os manifolds estarão com suas entradas ocupadas.

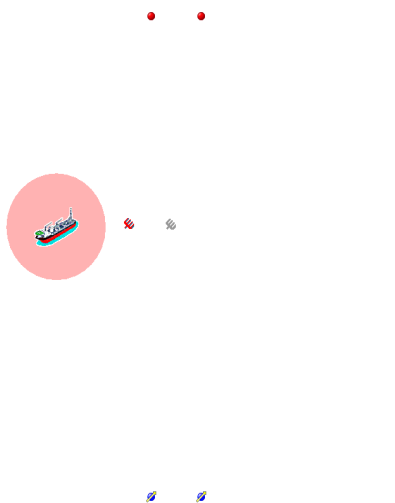
Abaixo o gráfico de desempenho da execução do cenário.



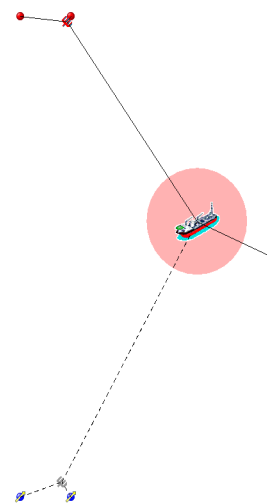
**Gráfico 2 - Otimização de custos do caso 2**

Podemos observar que o desempenho do algoritmo ficou estabilizado a partir da geração 150.

Abaixo o diagrama com o resultado da execução:



**Ilustração 6 - Diagrama para o caso 2 antes da otimização**



**Ilustração 7 - Diagrama para o caso 2 após a otimização**

Para o terceiro cenário, utilizaremos o projeto exemplo do O3P. Este projeto considera uma malha de perfuração com seis poços de produção e cinco poço injetores. O problema possui 2 manifolds de produção e 2 manifolds de injeção. Dos manifolds de produção um possui quatro entradas e uma saída enquanto o outro possui duas entradas e uma saída. Dos manifolds de injeção, um possui três entradas e uma saída enquanto que o outro possui duas entradas e uma saída.

O mapa do problema possui aproximadamente 20 quilômetros de largura e altura. A lâmina d'água é de 1850 metros e o lastro do risers está configurado para 45%.

Abaixo o gráfico com o desempenho da execução do algoritmo.

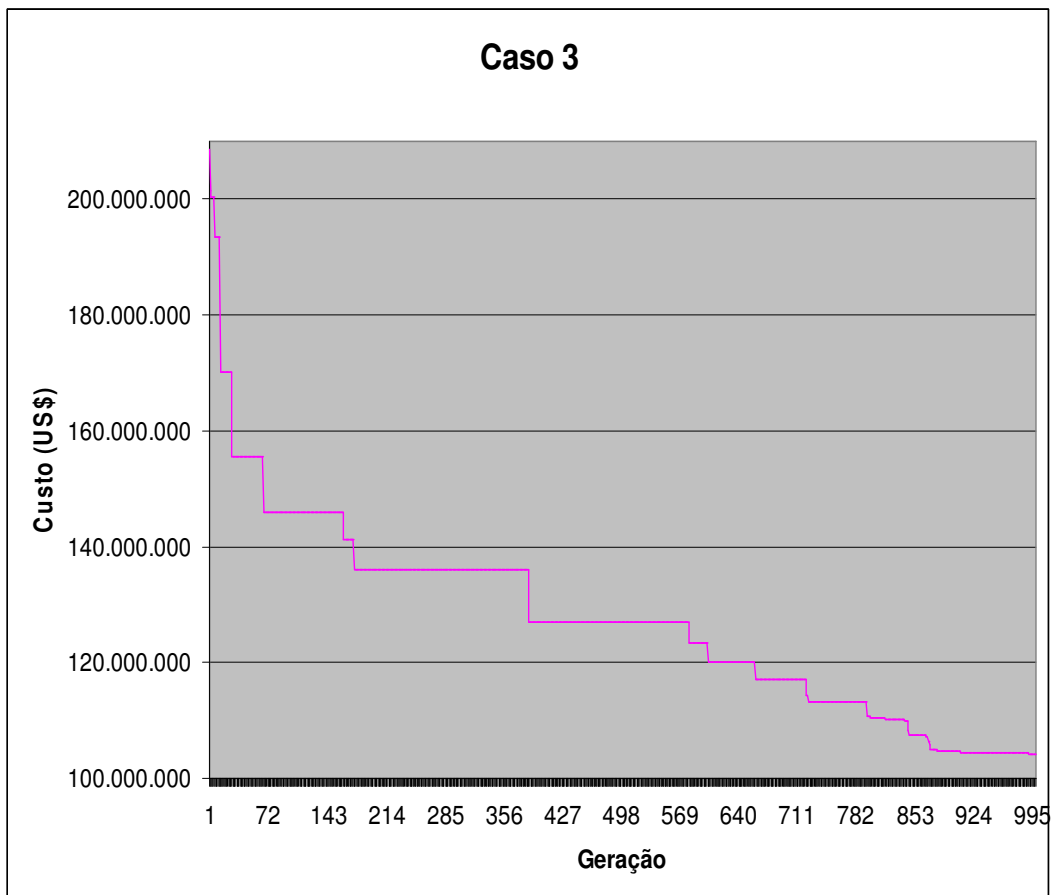


Gráfico 3 – Otimização de custos do caso 3

Finalmente o diagrama com a solução proposta para o terceiro cenário.

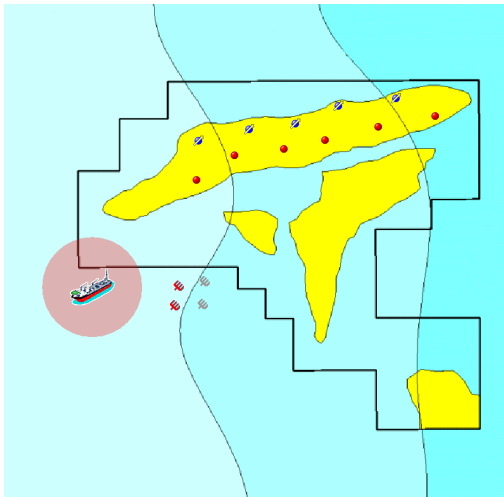


Ilustração 8 - Diagrama do caso 3 antes da otimização

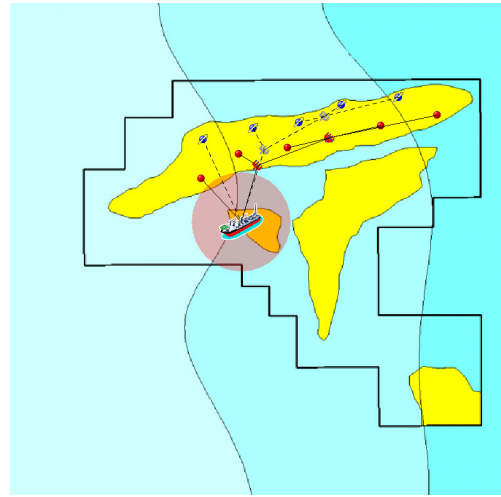


Ilustração 9 – Diagrama do caso 3 após a otimização

Observe que o custo total para o terceiro cenário não permaneceu estabilizado por muito tempo. Este caso foi, portanto, executado mais uma vez com o total de dez mil gerações. O resultado pode ser observado no gráfico e diagrama abaixo:

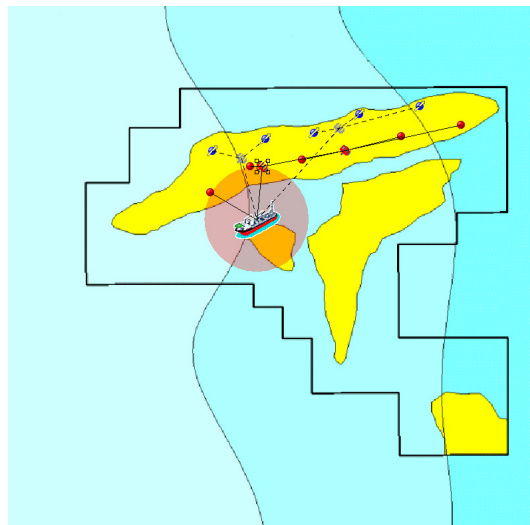
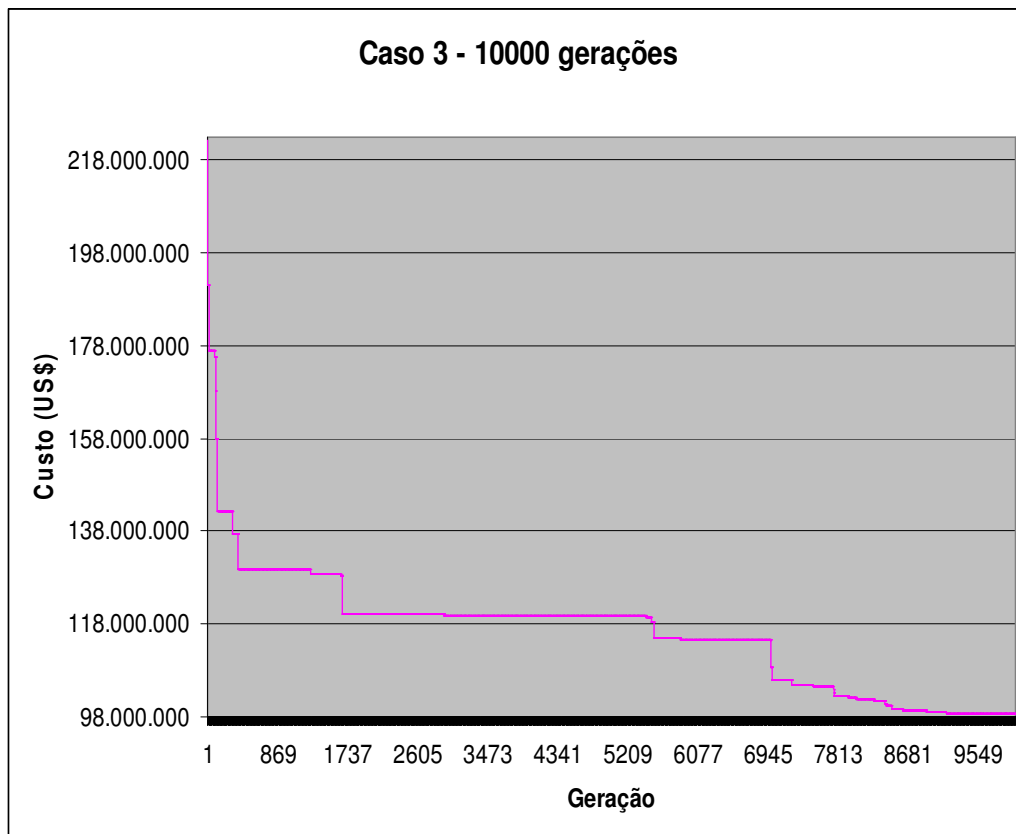


Ilustração 10 - Diagrama do caso 3 após otimização com dez mil gerações





**Gráfico 4 - Otimização do caso 3 com dez mil gerações**

Observe que a execução do problema com dez mil gerações resultou em um custo de cinco milhões de dólares mais barato.

## 6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho algumas mudanças de escopo foram realizadas para tornar o problema mais realista. Neste contexto, a técnica de algoritmos genéticos apresentou bastante flexibilidade para adaptar-se ao problema. Uma vez estabelecidas as operações de crossover e mutação, as alterações posteriores puderam ser implementadas sem grande esforço.

A primeira solução do problema fixava a ordem em que os manifolds e plataformas seriam decodificados. Esta decodificação, como visto anteriormente, prejudicaria ou sobrecarregaria alguns elementos. Foi necessário alterar a modelagem para considerar a ordem de decodificação dos manifolds e plataformas como parte do problema de ordem. Esta alteração foi realizada com muito pouco esforço, visto que os operadores já estavam definidos.

Talvez o ponto mais desafiante da modelagem da solução foi a elaboração da função de avaliação. As primeiras funções não possuíam ajustes e muitas vezes decodificavam os cromossomas em indivíduos inválidos. Este fato prejudicava o desempenho do algoritmo tornando-o inviável. Após a implementação dos ajustes a execução do algoritmo tornou-se viável.

A atual implementação ainda permite que indivíduos inválidos sejam criados. Sempre que uma operação de crossover ou mutação gera um indivíduo inválido, o mesmo é descartado. No entanto, é desejado que a modelagem dos cromossomas e sua decodificação não se baseiem fortemente na eliminação dos indivíduos. Este tipo de comportamento influencia na performance do algoritmo.

Como forma de atenuar a eliminação de indivíduos inválidos as operações de mutação creep foram alteradas para somente gerar indivíduos válidos. No entanto, o crossover dos números reais, pode resultar em elementos inválidos.

Um ponto de melhoria que pode ser indentificado é alterar as operações de crossover e mutação para não descartar elementos inválidos e sim alterá-los para um estado válido. Para isso, ao invés de limitar as operações creep, seria permitido fazer o crossover e mutações de números reais na sua forma clássica. Após realizar as operações em um indivíduo seria verificado se existe algum posicionamento inválido (dentro do raio de segurança). Em caso afirmativo, o novo indivíduo seria “expulso” da área de segurança. Caso o novo indivíduo seja uma plataforma, a mesma seria deslocada em sentido oposto ao deslocamento

realizado até que não existam mais elementos dentro de sua área de segurança. Para comparar as duas estratégias, seria necessário implementar e verificar se realmente existiria uma convergência eficiente para bons resultados.

Em um projeto real, o orçamento do lançamento de linhas não depende apenas do custo dos materiais. Existe uma forte dependência com o navio utilizado para lançamento. Cada navio possui uma eficiência e pode estar sujeito a um cronograma de alocações. Neste contexto, um ponto de melhoria seria representar a disponibilidade dos navios como parte do problema. Neste novo problema, seria calculado o valor presente líquido do lançamento baseando-se na data de alocação do navio.

Finalmente, após a execução de três cenários, foi possível verificar que o número de gerações necessárias para um problema ser resolvido aproxima-se de 600 no pior caso. Como a execução do problema ocorre rapidamente, foi estabelecido, que na versão do algoritmo que será utilizado no O3P será utilizado um número 50% maior como margem de segurança. Atualmente o caso do projeto exemplo executa em 125 segundos.

## Referências Bibliográficas

- BROWN, R. J. Hirsch, A. S. **Economic Analyses for Instalation of Offshore Pipelines.** Society of Petroleum Engineers of AIME, 1977.
- BURKE, R.N. ODY, T. **Intelligent Pipeline Design and Construction.** Intelligent Energy Conference and Exhibition, Utrecht, Holanda, 2010.
- COSTA, L. R. D. **Soluções para o Problema de Otimização de Itinerário de Sondas.** Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE. Rio de Janeiro. 2005.
- DARWIN, C. **The Origin of Species.** London: Albermale Street: [s.n.], 1859.
- ECJ. Evolutionary Computacional Framework for Java.  
<http://www.cs.gmu.edu/~eclab/projects/ecj/> em 23/03/2010
- FISHMAN, D. **The Economics of Disposal Methods for North Sea Oil and Gas Fields: A Study in Comparative Advantage.** Society of Petroleum Engineers Journal, 1985.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems.** Ann Arbor: MI: The University of Michigan Press, 1975.
- LIMA, C. B. C. SOBREIRA, G. KUMAR, A. SAUVE, B. **State-of-Art Digital Oilfield Implementation in Petrobras Campos Basin.** Utrecht, Holanda, 2010.
- MENDEL, G. **Ensaio com Plantas Híbridas.** [S.l.]: Sociedade de História Natural de Brno, 1865
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.** 3. ed. [S.l.]: New York: Springer, 1996.
- MONTES, G. BARTOLOME, P. **The use of Genetic Algorithms in Well Placement Otimization.** Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, 2001.
- SILVA, R. MAINIER, F. **Descomissionamento de Sistemas de Produção Offshore de Petróleo.** IV Congresso Nacional de Excelência em Gestão. 2008.
- SONGHURST, B.W., EDWARDS, W. G. **Subsea Separation: An Economic Production Method for Sub Marginal Fields.** Offshore Europe SPE19228. Aberdeen, 1989

WATSON, M. J., HAWKES, N. J. Pickergin, P. F. **Efficient Conceptual Design of an Offshore Gas Gathering Network**. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Perth, Australia, 2008.

WIKIPEDIA. **Algoritmo Genético**.

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Algoritmo\\_genético](http://pt.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_genético) em 23/03/2010