

# Ancoragem de Embarcações utilizando Algoritmos Genéticos

Sérgio Alvares R. de S. Maffra<sup>1</sup>  
sam@tecgraf.puc-rio.br

Marco Aurélio C. Pacheco<sup>2</sup>  
marco@ele.puc-rio.br

<sup>1</sup> Tecgraf, Departamento de Informática, PUC-Rio  
<sup>2</sup> ICA, Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
Rua Marques de S. Vicente 225, Gávea,  
CEP 22453-900, Rio de Janeiro, Brazil

## 1. Resumo

Este artigo descreve a aplicação utilização de Algoritmos Genéticos num sistema para o cálculo de ancoragem de embarcações usadas na exploração de petróleo no mar.

O algoritmo genético (AG) [1] busca a posição de âncoras que minimizem o deslocamento das embarcações causados por condições ambientais como vento, onda e correntes marítimas.

O cálculo do deslocamento para um conjunto de posições de âncoras proposto pelo AG foi realizado com o uso das equações de equilíbrio das catenárias para a determinação das forças causadas pelas linhas de ancoragem à embarcação e de um procedimento iterativo para o cálculo da posição de equilíbrio da mesma.

A função de avaliação do AG consiste no quadrado da soma de cada um dos deslocamentos (*offsets*) da embarcação devidos às diferentes condições ambientais.

## 2. Introdução

A introdução do uso de navios de perfuração e de plataformas semi-submersíveis na exploração de petróleo no mar tornou relevante o estudo de sistemas para a ancoragem de embarcações.

Devido ao alto valor do petróleo no mercado internacional e do alto custo de operações marítimas para sua exploração, as unidades produtoras devem permanecer ancoradas por períodos de tempo relativamente longos (em torno de 20 anos). Isto levou ao uso de plataformas fixas ao fundo do mar. O custo de tais plataformas, entretanto, aumenta geometricamente com a lâmina d'água de operação (distância entre a superfície do mar o fundo), inviabilizando a exploração em águas profundas.

Apenas com a introdução de plataformas semi-submersíveis e de navios ancorados por a colunas articuladas, ocorrida no final da década de 70, a exploração de petróleo em águas profundas se tornou viável.

A amarração dos mesmos passou a ser feita com cabos de aço, amarras, ou combinações dos mesmos, terminadas em âncoras de arraste ou estacas fixadas no fundo do mar.

A Figura 1 ilustra uma amarração típica de uma plataforma semi-submersível.

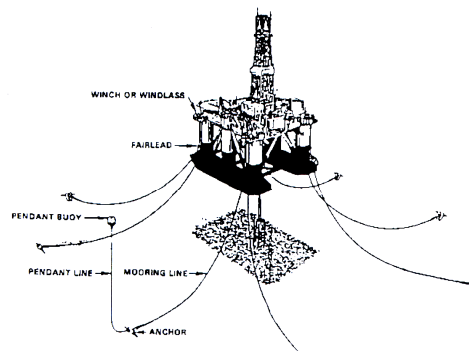


Figura 1: Ancoragem típica de uma plataforma semi-submersível [2]

A seção 3 do artigo apresenta alguns dos diversos problemas encontrados em projetos de ancoragens e apresenta o problema a ser tratado. A seção 4 introduz Algoritmos Genéticos e descreve o algoritmo implementado. Os experimentos e resultados obtidos são abordados na seção 5, que é seguida então da conclusão do experimento.

## 3. O Problema de Ancoragem

Em um projeto de ancoragem, diversos fatores devem ser levados em consideração, tais como o tempo que a embarcação ficará ancorada, a resistência dos materiais utilizados nas linhas de ancoragem, as diversas condições

ambientais a que está submetida a embarcação, dentre outros.

Linhas de ancoragem podem, por exemplo, ser compostas de diversos segmentos, cada um com um material de propriedades físicas e custos diferenciados. Bóias ou pesos podem ser instalados nas mesmas para lidar com restrições impostas por outros sistemas de ancoragem, próximos do local da amarração sendo projetada ou até mesmo pelo relevo do fundo do mar.

Como geralmente acontece em problemas reais de engenharia, a relação custo/benefício é clara no projeto de ancoragens. Seja na escolha dos materiais, ou na definição das condições ambientais que a amarração deve suportar, as decisões tomadas no projeto, terão influência tanto no custo quanto na qualidade do projeto.

Algoritmos genéticos [1] têm se mostrado como um ferramenta de busca e otimização eficiente para problemas com um grande número de variáveis, de difícil modelagem matemática e com grandes espaços de busca. Em particular, AGs têm se mostrado adequados para auxiliar no desenvolvimento de projetos de engenharia, como os de amarração.

O projeto de ancoragens oferece diversas opções para otimização, como o custo global do sistema de amarração; a segurança do sistema, que pode ser medida como uma função da tensão máxima admissível das linhas de ancoragem e da tensão aplicada às linhas utilizadas, etc. O problema escolhido para tratamento no experimento foi o *offset* ou *passeio* das embarcações, que é a distância percorrida pela embarcação a partir de uma posição inicial.

Deseja-se obter para um conjunto de linhas de ancoragem, previamente definidas, qual a posição para suas âncoras que minimizem o *offset* da embarcação.

#### 4. Algoritmo Genético

Algoritmos Genéticos constituem uma técnica de busca e otimização, altamente paralela, inspirada no princípio Darwiniano de seleção natural e reprodução genética [Error! Bookmark not defined.].

Estes princípios são imitados na construção de algoritmos computacionais que buscam uma melhor solução para um determinado problema, através da evolução de populações de soluções codificadas através de cromossomas artificiais.

Em AGs um cromossoma é uma estrutura de dados que representa uma das possíveis soluções do espaço de busca do problema.

Cromossomas são então submetidos a um processo evolucionário que envolve avaliação, seleção, recombinação sexual (crossover) e mutação. Após vários ciclos de evolução a população deverá conter indivíduos mais aptos.

No problema de ancoragem, para se avaliar o *offset* de uma embarcação, é necessário ter definidas as posições das âncoras que prendem às linhas de ancoragem, previamente definidas, ao fundo do mar.

O algoritmo genético, neste caso, fica então responsável pela escolha destas posições, de forma a minimizar o *offset*.

As seções seguintes tratam das definições específicas do algoritmo genético implementado.

#### 4.1 Descrição dos Genes e Cromossomas

Cada gene é composto das coordenadas nos eixos X e Y das âncoras. A coordenada Z das mesmas, utilizada na função de avaliação, é obtida através da projeção sobre o fundo do mar.

Cada coordenada é representada por uma *string* binária representando um número real. A decodificação do número binário é feita a partir da seguinte equação:

$$X_{real} = X_{binário} \times \frac{(V_{máx} - V_{mín})}{2^k - 1} + V_{mín},$$

onde X corresponde à variável sendo decodificada; k é o número de bits usados em cada variável;  $V_{mín}$  o valor mínimo que a coordenada pode assumir e  $V_{máx}$  o valor máximo da mesma.

$V_{máx}$  e  $V_{mín}$  são definidos em função da posição da embarcação e do comprimento da linha de ancoragem correspondente, segundo a equação abaixo, utilizada para as coordenadas X e Y de cada gene.

$$X_{máx} = X_{embarcação} + X_{fairlead} + L$$

$$X_{mín} = X_{embarcação} + X_{fairlead} - L,$$

onde  $X_{fairlead}$  corresponde à coordenada do ponto na embarcação na qual é conectada a linha de ancoragem. O mesmo é expresso no sistema de coordenadas local da embarcação. L é o comprimento da linha de ancoragem.

Os cromossomas, que correspondem às soluções propostas pelo AG são constituídos de um gene para cada linha de ancoragem existente.

#### 4.2 Operadores Genéticos

Utilizando a representação binária para as variáveis dos genes, não foi necessária a criação de operadores especializados. Foram utilizados os operadores de *crossover* de um ponto e o operador de mutação.

#### 4.3 Inicialização, Seleção e Reprodução

A população é inicializada de forma aleatória e a seleção de indivíduos é a roleta *rank-based* [1].

A reprodução dos indivíduos é feita utilizando a técnica de *steady-state* [3].

#### 4.4 Função de Avaliação

Um conjunto de condições ambientais relevantes para o problema de ancoragem consiste em condições de onda, vento e de correntes marítimas. Podemos converter cada conjunto formado por estas condições ambientais em uma força externa resultante ( $F_i$ ) atuando sobre a embarcação.

Para cada  $F_i$ , calculamos o deslocamento causado na embarcação ( $d_i$ ).

A função de avaliação utilizada para calcular a aptidão ( $A$ ) das soluções, considerando que temos  $n$  condições ambientais atuantes é dada por:

$$A = \left( \sum_{i=1}^n d_i \right)^2$$

##### 4.4.1 Cálculo do Offset das Embarcações

No cálculo do deslocamento das embarcações, as linhas de ancoragem são tratadas como molas não lineares, que exercem forças de restauração sobre a embarcação.

Estas forças, expressas como função da distância entre a âncora e o fairlead, são obtidas através das curvas características da linha de ancoragem que, por sua vez, são geradas utilizando-se as equações da catenária.

De posse das forças exercidas pelas linhas de ancoragem, o cálculo da nova posição de equilíbrio é realizado.

Para isso, deve-se resolver o seguinte sistema de equações:

$$[K]\{u\} = \{F_i - R_{int}\},$$

onde  $K$  é a matriz de rigidez do sistema,  $u$  o vetor deslocamento a ser descoberto,  $F_i$  corresponde às forças externas exercidas pelas condições ambientais e  $R_{int}$  é a resultante das

forças de restauração exercidas pelas linhas de ancoragem.

A cada resolução do sistema de equações acima, a embarcação é movida e o cálculo refeito, até que o deslocamento necessário seja inferior a um determinado valor (critério de convergência), ou seja, até que o sistema esteja em equilíbrio.

Maiores detalhes sobre o cálculo do offset das embarcações podem ser encontrados em [2].

#### 4.4.2 Penalizando Soluções Inválidas

As soluções propostas pelo AG que não atingirem convergência no processo de cálculo descrito no item anterior, são penalizadas. A avaliação penalizada corresponde ao maior *offset* encontrado até o momento atual no experimento.

### 5. Resultados

#### 5.1 Parâmetros dos Experimentos

A tabela abaixo indica os parâmetros comuns a todos os experimentos realizados

Lâmina d'água	500 m
População	50
Taxa de Mutação	0.001
Taxa de Crossover	0.60
GAP	0.95

Os gráficos de desempenho do algoritmo genético apresentam a média de 10 experimentos da avaliação das melhores soluções a cada geração. [1].

#### 5.2 Experimento 1

Este experimento foi realizado com 4 linhas de ancoragem idênticas, sem a atuação de condições ambientais. Cada variável foi representada com 14 bits.

O menor *offset* obtido para esta configuração foi igual a 0.63 metros, para a configuração ilustrada na Figura 2.

Pode-se verificar pela vista superior que as linhas não ficaram dispostas uniformemente, por exemplo, com um ângulo de 90 graus entre cada uma, uma vez que isto não é levado em consideração na função de avaliação. Note também que as linhas A e D também se encontram mais tensionadas, enquanto que a tensão na linha C é bem reduzida se comparada com as outras duas.

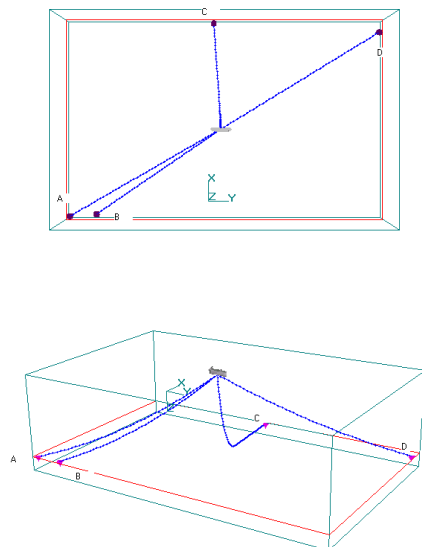


Figura 2: Posição das âncoras no experimento 1

Os gráficos da Figura 3 são relativos à média dos 10 experimentos.

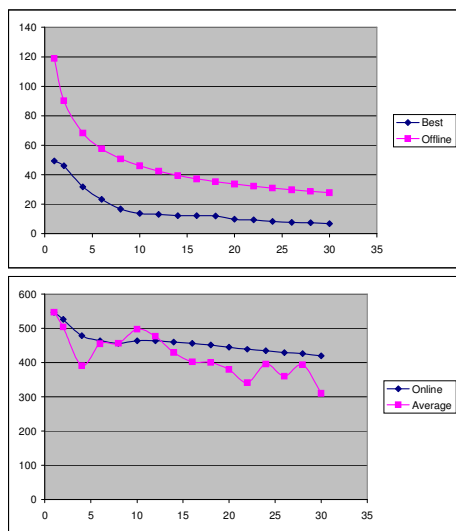


Figura 3: Gráficos do experimento 1

Para as 15000 avaliações realizadas neste experimento, apenas 232 não convergiram. Para este exemplo, temos como solução ótima um deslocamento de 0 metros, correspondente a um posicionamento simétrico para as 4 âncoras, por exemplo, cada uma colocada à uma distância de 800 metros e com um ângulo de 90 graus entre elas.

### 5.3 Experimento 2

Foram utilizadas 4 linhas de ancoragem neste experimento e uma força externa na direção (1, 1, 0) com módulo igual a 4200 kN.

Cada variável foi representada com 10 bits.

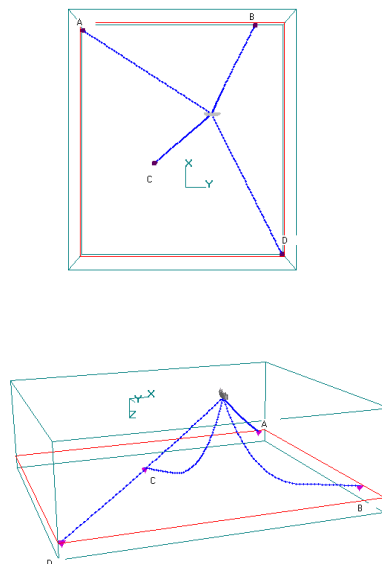


Figura 4: Posição das âncoras no experimento 2

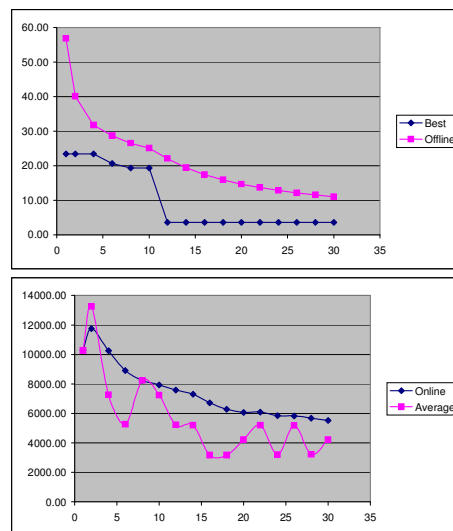


Figura 5: Gráficos do experimento 2

Note como as linhas A e D ficaram tensionadas afim de equilibrar a força externa aplicada (Figura 4). O deslocamento encontrado para este exemplo foi igual a 3.62 metros (Figura 5).

### 5.4 Experimento 3

Este experimento também foi realizado com 4 linhas, porém com diversos casos de condições ambientais atuando sobre a embarcação.

A tabela abaixo indica as forças externas atuantes sobre o modelo.

Direção	Intensidade (kN)
( 1, 1, 0 )	0
( 0, 1, 0 )	3000
( 0, -1, 0 )	3000
( 1, 0, 0 )	3000
( -1, 0, 0 )	3000

Forças atuantes no modelo do experimento 3

É importante ressaltar o significado da aplicação das 5 diferentes condições ambientais definidas acima. Note que as 5 forças são aplicadas independentemente, ou seja, o deslocamento a ser minimizado corresponde à soma dos deslocamentos individuais. Isso quer dizer que a posição descoberta para as âncoras deve ser satisfatória para todas as forças acima.

O deslocamento total para este experimento foi igual a 22.36 metros.

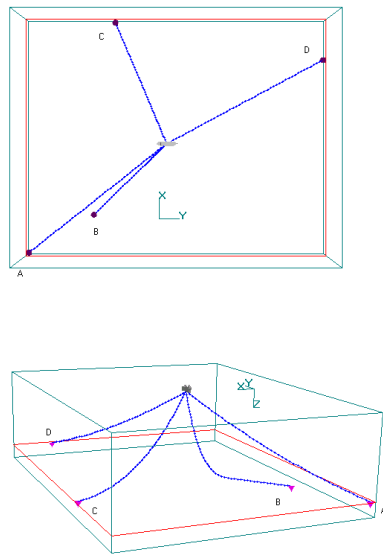


Figura 6: Posição das âncoras no experimento 3

O posicionamento de âncoras obtido faz com que as linhas A, C e D sejam as mais tracionadas. As mesmas estão posicionadas em forma de um triângulo, que permite uma boa resistência para as diversas forças atuantes (Figura 6).

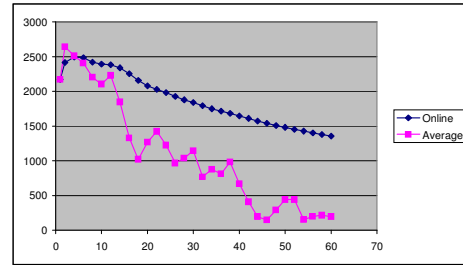
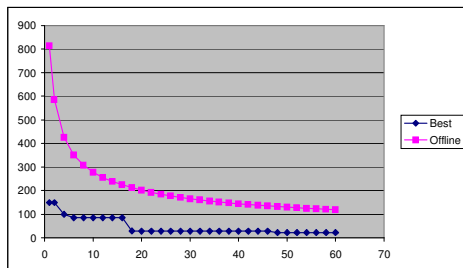


Figura 7: Gráficos do experimento 3

Das 3000 avaliações feitas neste experimento, 326 não convergiram, ou seja, a posição de âncoras proposta pelo AG não resultou em um sistema capaz de atingir uma condição de equilíbrio (Figura 7).

## 5.5 Experimento 4

Este experimento foi realizado com 8 linhas de ancoragem. O modelo foi submetido ao mesmo conjunto de condições ambientais ao qual foi submetido o experimento anterior. Neste experimento, cada variável foi representada com 14 bits.

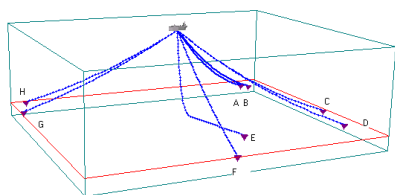
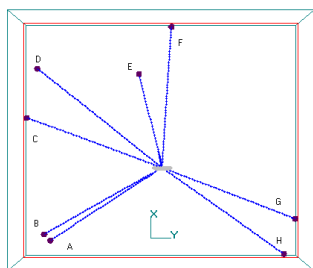


Figura 8: Posição das âncoras no experimento 4

O valor mínimo encontrado para a soma de todos os deslocamentos neste modelo foi igual a 78.92 metros. Apesar de ser muito maior que os obtidos nos exemplos anteriores, ainda podemos considerar este valor como aceitável. É comum a aceitação de deslocamentos iguais a 10% da lâmina d'água (500 metros neste exemplo). Como o valor corresponde à soma dos 5 deslocamentos possíveis, podemos dizer que o deslocamento médio deste experimento foi igual a 16 metros, bem abaixo do limite admissível.

Observando a Figura 8, podemos notar que a linha de ancoragem E, se encontra menos tracionada que as demais, uma ação mais efetiva de E poderia levar a um deslocamento total menor.

Os gráficos da Figura 9 ilustram o processo de evolução do modelo. A curva *best* sugere que, continuado o experimento, o valor da função de avaliação ainda pode ser melhorado.

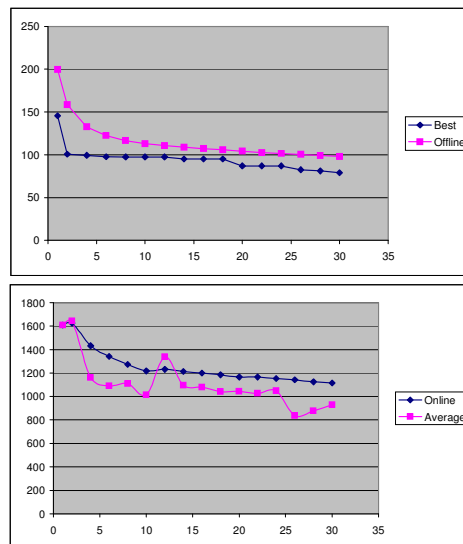


Figura 9: Gráficos do experimento 4

Das 1500 avaliações realizadas neste experimento, 132 não convergiram.

## 5.6 Análise dos Resultados

Nos exemplos em que houve a aplicação de forças devido à ação de condições ambientais, observou-se a não convergência de até 10% do número total de avaliações realizadas. Para alguns exemplos isso corresponde à perda de toda uma geração.

Observando a curva de desempenho *average* dos experimentos, pode-se notar a sensibilidade da função de avaliação, dada a oscilação apresentada pela curva.

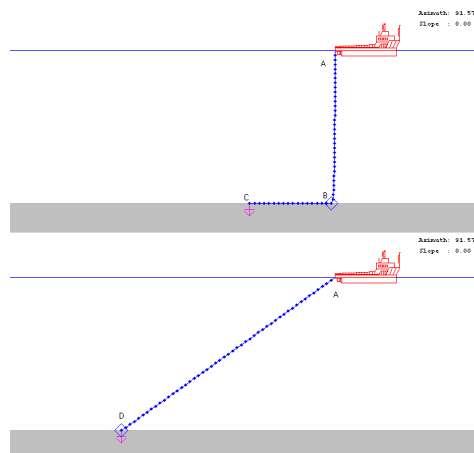


Figura 10: Distâncias máximas e mínimas para as âncoras

Há duas causas possíveis para a não convergência dos modelos: as forças atuantes na embarcação não podem ser equilibradas ou não foi possível verificar o equilíbrio devido a erros na geração das curvas de restauração, que representam as forças exercidas por cada linha

de ancoragem. A última pode ter sido causada pela escolha feita para  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$ . A Figura 10 ilustra os valores para  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$  em que as curvas de restauração podem ser geradas. A aproximação destes valores feita no algoritmo permite a existência de âncoras posicionadas sob a embarcação, estando estas não tracionadas, o que acarreta a não convergência.

Isto pode ser melhorado com a utilização dos limites ilustrados na Figura 10: a configuração ABC (o “L” formado pela linha) e a configuração AD (a linha totalmente esticada). Os limites implementados não levam em consideração a lâmina d’água, ou seja, consideram que a linha se encontra disposta na superfície do mar.

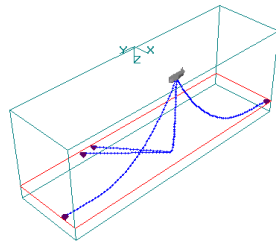


Figura 11: Importância da definição das condições ambientais

A Figura 11 ilustra a importância da definição das forças atuantes na embarcação. O modelo ilustrado não recebeu nenhuma força externa. Note que, no posicionamento obtido, a embarcação se encontra praticamente livre na direção X. Guiado apenas pela função de avaliação, que mede apenas o deslocamento, o AG não tem conhecimento de tal fato.

Para o uso do algoritmo na prática é necessária a introdução de novas considerações na função de avaliação. Entre elas, pode-se citar o problema ilustrado na figura 11 e a não utilização de todas as linhas de ancoragem, conforme observado nos experimentos. Por “utilização”, nos referimos à existência de linhas pouco tracionadas, quase que na configuração ABC da figura 10.

Outra alternativa de lidar com a não utilização de todas as linhas de ancoragem é a modificação do AG para permitir a inclusão/exclusão de linhas de ancoragem.

## 6. Conclusões

Considera-se que o experimento foi bem sucedido como um teste da viabilidade do uso de AGs no projeto de sistemas de ancoragem. O algoritmo precisa, no entanto, ser revisado de forma a introduzir em sua função de

avaliação considerações como as citadas na seção 5.6.

Tais considerações podem ser levantadas estudando-se os diversos tipos de sistemas de ancoragem existentes (*spread mooring*, *catenárias*, *taut legs* e *single point mooring*) [2].

## 7. Agradecimentos

Parte do desenvolvimento do presente trabalho foi realizado no Tecgraf/PUC-Rio (Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica) [4] utilizando-se o programa Prea3D.

O apoio dado pela equipe de desenvolvimento do Prea3D foi essencial à realização do experimento.

O algoritmo genético implementado foi baseado no GENESIS, desenvolvido por John J. Grefenstette [5].

## Referências

- [1] D. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley 1989.
- [2] Conceitos Básicos sobre Cálculos de Sistemas de Ancoragem utilizando o programa Ariane©. Manual de utilização – Bureau Veritas do Brasil, Março de 2000
- [3] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs, Springer-Verlag-1994
- [4] Tecgraf/PUC-Rio, [www.tecgraf.puc-rio.br](http://www.tecgraf.puc-rio.br)
- [5] John J. Grefenstette, A User's Guide to GENESIS Version 5.0, 1990