

OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE EMPUXO EM SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DINÂMICO

Autor: **Emilio Celso de Souza**

Orientador: **Prof. Dr. Decio Crisol Donha**

e.mail: decdonha@usp.br

Departamento de Engenharia Mecânica

Escola Politécnica da USP

Av. Prof. Mello Moraes, 2231

05508-970 São Paulo (SP)

Brasil

Resumo

O presente trabalho apresenta um estudo de otimização de alocação de empuxo nos propulsores em sistemas de posicionamento dinâmico. Neste estudo foi realizada uma pesquisa sobre os diferentes métodos de otimização aplicados ao problema de alocação de empuxo, que envolvem técnicas clássicas de otimização, como o algoritmo de Programação Quadrática Seqüencial (SQP). Tais métodos consideram como função objetivo a ser minimizada a potência total consumida pelos propulsores ou simplesmente o empuxo dos propulsores durante o processo de alocação. As variáveis funcionais são justamente as forças de empuxo.

Como contribuição, neste trabalho desenvolveu-se um método de alocação de empuxo baseado nos Algoritmos Genéticos, onde o objetivo é, como nas técnicas pesquisadas, minimizar o consumo total de energia durante uma tarefa típica de posicionamento. O método de alocação baseado nos algoritmos genéticos foi desenvolvido considerando população com indivíduos binários e população com indivíduos reais. Através da minimização de uma função custo contendo termos que tratam do equilíbrio (nas direções de avanço, deriva e aproamento), a interferência entre os propulsores, a interação casco-propulsor e a saturação nos propulsores, pode-se alcançar os objetivos pretendidos.

Para a validação do algoritmo foi realizado um grande número de simulações variando-se os parâmetros de ponderação. Os dois métodos são, então, comparados e no final é apresentado um estudo de viabilidade de cada método.

Palavras Chave: Algoritmos Genéticos; Posicionamento Dinâmico; Alocação de Empuxo; Programação Linear Quadrática; Otimização.

1. Introdução

O Sistema de Posicionamento Dinâmico (SPD) é um sistema de controle ativo, projetado para manter uma embarcação em torno de uma posição desejada.

O SPD é constituído de um conjunto de subsistemas integrados incluindo o subsistema controlador, o subsistema de propulsão, o subsistema de sensoriamento e o¹

¹ Artigo extraído da Dissertação: "OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE EMPUXO EM SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DINÂMICO", de Emilio Celso de Souza, apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica sob a orientação do Prof. Dr. Decio Crisol Donha.

subsistema de potência (TANNURI (2002); SINDING, ANDERSEN (1998)). A estrutura do SPD incluindo os quatro subsistemas é apresentada na figura 1.1, extraída e adaptada de HAMAMATSU (2002), TANNURI (2002) e DONHA (1989).

O controle do posicionamento da embarcação ocorre no plano horizontal ao longo dos movimentos de translação nos eixos x_1 (*avanço*) e x_2 (*deriva*), e movimento de rotação em torno do eixo x_6 (*aproamento*).

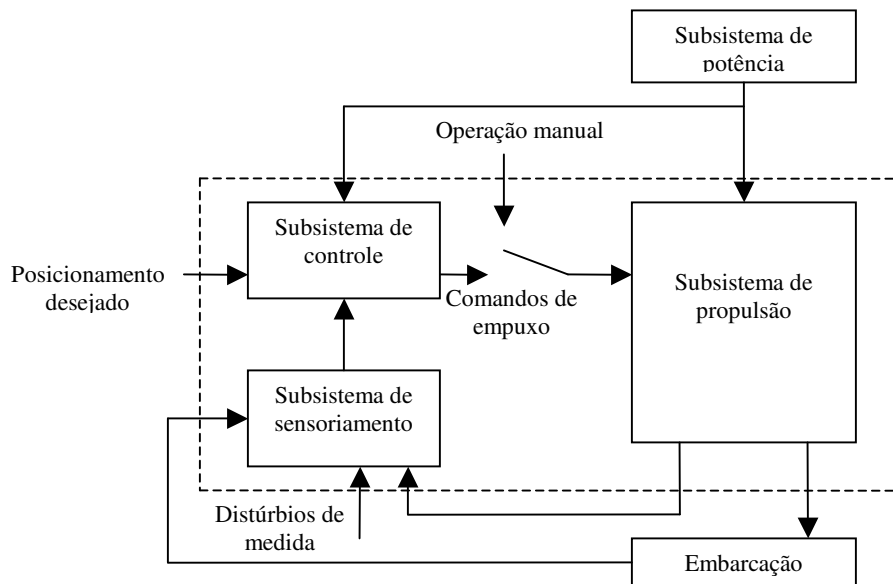


Figura 1.1 – Estrutura Básica do controle da embarcação (extraído em partes de HAMAMATSU, 2002; TANNURI, 2002 e DONHA, 1989).

O algoritmo de alocação de empuxo instalado no subsistema de controle deve permitir que o conjunto de propulsores mantenha a embarcação o maior tempo possível na posição desejada, com um baixo consumo de energia. Para tanto, é necessário que ele considere as restrições funcionais tais como interferências entre propulsores, interação casco-propulsor, além da saturação em cada propulsor. Quando o empuxo total disponível é maior do que a força comandada há várias configurações para o problema de alocação e algum novo critério deve ser incorporado ao problema para superar esta indeterminação.

No presente trabalho será estudado o problema de alocação de empuxo, através do desenvolvimento de um algoritmo de otimização baseado no método dos Algoritmos Genéticos, cujos resultados são comparados aos obtidos pelo método SQP (TANNURI, 2002).

2. Método dos algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são concebidos com base na genética pesquisada por Charles Darwin, ou seja, obedece ao princípio da seleção natural, e se classifica como um método probabilístico. (GOLDBERG, 1989; GEN, CHENG, 1997; SOARES, 1997; COELHO, 2002; PACHECO, 1999; WHITLEY, 2000). A execução do algoritmo genético é realizada através de três etapas:

1. determinação da população inicial, onde as variáveis funcionais são geradas aleatoriamente, dentro de um intervalo pré-estabelecido
2. cálculo da aptidão e seleção dos indivíduos, onde as variáveis são testadas na função objetivo, e os melhores resultados são selecionados, através das variáveis que os produziram
3. reprodução, cruzamento e mutação, para diversificar a população.

A população inicial contém as forças de empuxo ao longo de x_1 (avanço) e x_2 (deriva) em cada propulsor. Os ângulos de azimute são calculados em função destas forças. A produção de empuxo nos propulsores ocorre de forma ótima quando a diferença entre as forças comandadas e geradas nos propulsores é nula, e a potência consumida é mínima. Estas características são atingidas quando as restrições impostas pelo SPD são respeitadas. No caso de todos os propulsores saturarem, o equilíbrio não mais é verificado.

3. Introdução do problema de Alocação do Empuxo

A alocação de empuxo consiste na distribuição ótima de forças de controle entre os propulsores da embarcação através do algoritmo de alocação de empuxo, sendo estas forças determinadas pelo controlador (DONHA, 1983; DONHA, 1989; TANNURI, 2002).

Para o algoritmo de alocação de empuxo serão consideradas as restrições funcionais:

- a força resultante em cada propulsor deve ser menor ou igual à força de empuxo de saturação,
- quando dois propulsores estiverem relativamente próximos, a interferência entre eles deve ser evitada através da aplicação adequada de ponderações para as forças de empuxo produzidas nestes propulsores,
- deverá ser evitada a interferência casco-propulsor.

A modelagem da alocação de empuxo em função das forças comandadas leva em conta a quantidade de propulsores, seu arranjo em relação ao centro de gravidade da embarcação e o ângulo de azimute.

As forças e momentos comandados são representadas pelo vetor:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Ocorrendo o equilíbrio estático, a relação de \mathbf{F} com as componentes das forças e momentos de propulsão (\mathbf{T}) é dada pela equação:

$$\mathbf{A}\mathbf{T} = \mathbf{F} \quad (3.2)$$

sendo

$$\mathbf{T} = [Tx_{1,1} \quad Tx_{1,2} \quad \cdots \quad Tx_{1,n} \quad Tx_{2,1} \quad Tx_{2,2} \quad \cdots \quad Tx_{2,n}]^T \quad (3.3)$$

e

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 \\ -x_{2,1} & \cdots & -x_{2,n} & x_{1,1} & \cdots & x_{1,n} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

com $x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n}, x_{2,1}, \dots, x_{2,n}$ sendo as variáveis na direção de avanço (x_1) e deriva (x_2), respectivamente, para cada um dos n propulsores.

Havendo múltiplas soluções, a que importará no problema é aquela que minimize a potência (energia) consumida, que pode ser avaliada pela expressão:

$$P = \sum_{i=1}^n \left(k_{1,i} |Tx_{1,i}|^{3/2} + k_{2,i} |Tx_{2,i}|^{3/2} \right) \quad (3.5)$$

Os fatores $k_{1,i}$ e $k_{2,i}$ representam fatores de penalidade a serem considerados em caso de reversão.

Para a formulação por algoritmos genéticos, a equação 3.2 é válida enquanto houver propulsores não saturados, mas como regra geral ela pode ser re-escrita da seguinte forma:

$$\Delta\mathbf{F} = |\mathbf{F} - \mathbf{A}\mathbf{T}| \quad (3.6)$$

o que permite introduzir como novo objetivo a minimização do termo $\Delta\mathbf{F}$, além das restrições funcionais, apresentadas anteriormente.

A saturação é matematicamente representada como uma das restrições funcionais, pela equação:

$$T_i \leq T_{máx,i}, \quad i = 1, \dots, n_{prop} \quad (3.7)$$

sendo $T_{máx}$ a força máxima de empuxo na saturação.

A interferência entre dois propulsores ocorre quando eles se encontram relativamente próximos, a uma distância menor que 20 vezes o diâmetro, e com inclinação entre suas linhas de ação abaixo de um ângulo limite. A figura 3.1 mostra dois propulsores com suas linhas de ação formando um ângulo α entre si.

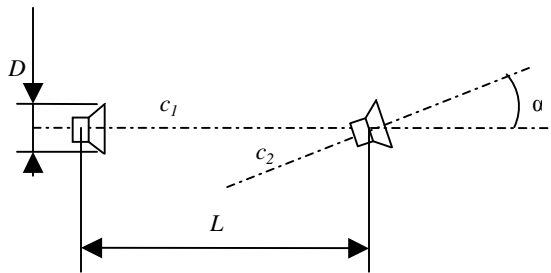


Figura 3.1– Interferência entre dois propulsores. O ângulo α é o ângulo de interferência entre eles, obtido pelas linhas de ação c_1 e c_2

A verificação da interferência é realizada através do cálculo do ângulo em relação à linha que une os dois propulsores. Considere-se que γ seja o ângulo limite de interferência. Se $\alpha > \gamma$ haverá interferência considerável. O cálculo da interferência é realizado pela equação:

$$\alpha = \alpha^{p_1} + \alpha^{p_2} \quad (3.8)$$

Na figura 3.2 os ângulos α^{p_1} e α^{p_2} são calculados em relação ao referencial fixo à embarcação, o ângulo β é o ângulo que a linha de união dos propulsores forma com este referencial e os ângulos β^{p_1} e β^{p_2} são os ângulos que a linha de ação de cada propulsor forma com a linha de união entre eles.

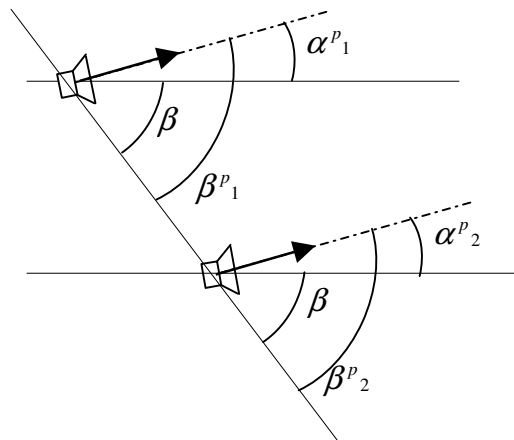


Figura 3.2 – Mudança de referencial para o ângulo de azimute.

Além da interferência entre dois propulsores, é possível também que a esteira de um determinado propulsor esteja direcionada para partes do casco, dificultando ou impedindo o escoamento, diminuindo assim a sua eficiência. As regiões que dificultam tal escoamento são chamadas de zonas mortas ou zonas proibidas.

Se houver a necessidade de empuxo naquela direção, deve-se verificar a possibilidade de uso de outro propulsor ou mesmo de alterar o arranjo (SOUZA, 2005).

4. Método dos algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são concebidos com base na genética pesquisada por Charles Darwin, ou seja, obedece ao princípio da seleção natural, e se classifica como um método probabilístico. (GOLDBERG, 1989; GEN, CHENG, 1997; SOARES, 1997; COELHO, 2002; PACHECO, 1999; WHITLEY, 2000). A execução do algoritmo genético é realizada através de três etapas:

1. determinação da população inicial, onde as variáveis funcionais são geradas aleatoriamente, dentro de um intervalo pré-estabelecido
2. cálculo da aptidão e seleção dos indivíduos, onde as variáveis são testadas na função objetivo, e os melhores resultados são selecionados, através das variáveis que os produziram
3. reprodução, cruzamento e mutação, para diversificar a população.

Neste problema, a população inicial constitui-se de forças de empuxo ao longo de x_1 (avanço) e x_2 (deriva) em cada propulsor. Os ângulos de azimute são calculados em função destas forças. A produção de empuxo nos propulsores ocorre de forma ótima quando a diferença entre as forças comandadas e geradas nos propulsores é nula, e a potência consumida é mínima. Estas características são atingidas quando as restrições impostas são respeitadas. No caso de todos os propulsores saturarem, o equilíbrio não é mais possível.

A formulação do algoritmo genético possui as restrições funcionais incorporadas à função objetivo através de funções de penalidades (MORALES; GARCIA, 2002). As operações realizadas são:

4.1. Algoritmos genéticos com população binária

População inicial

A determinação da população inicial será realizada a partir dos itens descritos a seguir:

- as componentes da força de empuxo $T_{x_{1,i}}$ e $T_{x_{2,i}}$ são determinadas, com seus valores dentro da faixa admissível correspondente a $T_{máx}$.
- os ângulos de azimute são calculados em cada geração do algoritmo.
- a força de empuxo resultante é calculada em cada geração do algoritmo.

Cálculo da Aptidão

Os algoritmos genéticos consideram como mais aptos aqueles indivíduos que maximizam a função objetivo (COELHO, 2002; SOARES, 1997). Nestas condições a aptidão é calculada por:

$$f_i = \frac{f_{obj,i}}{\sum_{i=1}^{n_{ind}} f_{obj,i}}, \quad i = 1, \dots, n_{ind} \quad (4.1)$$

onde f_i é o valor da aptidão para o i -ésimo indivíduo, $f_{obj,i}$ é o valor da função objetivo para o i -ésimo elemento e n_{ind} é o número de indivíduos na população.

Seleção

O método utilizado para seleção no presente trabalho será o método da roleta. Este método toma os valores de f_i calculados na equação 4.1 e os distribui uniformemente em um círculo, simulando uma roleta. Quando ela é girada, os maiores valores de f_i são selecionados. O número de giros da roleta corresponde ao número de indivíduos na população. Através deste procedimento, os indivíduos com menores aptidões tendem a desaparecer, enquanto os melhores se multiplicam, ocupando o lugar dos que desapareceram. Quando os novos elementos são selecionados, sobre eles são aplicados os operadores genéticos.

Cruzamento e mutação

Os indivíduos provenientes da seleção são recombinados através do cruzamento. A figura 4.1 ilustra o cruzamento entre dois indivíduos.

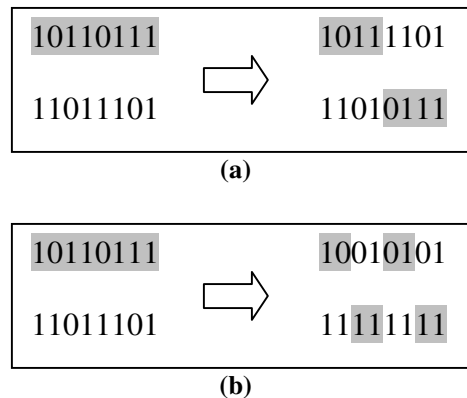


Figura 4.1 – Representação de pontos de cruzamento para dois cromossomos durante o cruzamento: (a) um único ponto, (b) múltiplos pontos.

A quantidade de indivíduos envolvidos no cruzamento em relação ao total de indivíduos, depende da porcentagem de cruzamento (p_c).

A mutação é utilizada para diversificar a população. Ela pode evitar, por exemplo, a ocorrência de um mínimo local. A mutação também acontece mediante um valor chamado de probabilidade de mutação (p_m).

4.2. Algoritmos genéticos com população real (ponto flutuante)

Na população real, as operações são realizadas diretamente sobre os valores reais dos indivíduos, ou representados em ponto flutuante. Dentre os diversos critérios de

cruzamento e mutação, selecionou-se a mutação uniforme e o cruzamento aritmético (COELHO, 2002):

5. Minimização da Função Objetivo

No procedimento de alocação de empuxo, o evento proibido é o valor da força de empuxo no propulsor ultrapassar o valor de saturação. Os demais termos, como interferências e consumo de energia devem ser minimizados. Com estas informações, define-se a função objetivo:

$$J = \Delta F_1^N(k_{f1}) + \Delta F_2^N(k_{f2}) + \Delta F_6^N(k_{f6}) + \sum_{\substack{m,n \\ m \neq n}} k_{prop} I_{mn}^N(k_{mn}) + \sum_{i=1}^{n_{prop}} k_{sat} S_i^N(k_{s,i}) + \sum_{i=1}^{n_{prop}} k_{cp} Q_i^N(k_{Q,i}) + P^N(k_p) \quad (5.1)$$

onde:

| | |
|--|--|
| k_{f1}, k_{f2}, k_{f6} | Fatores de ponderação para as diferenças de forças em <i>surge</i> , <i>sway</i> e de momento em <i>yaw</i> , respectivamente. |
| k_{mn} | Fator de ponderação para a interferência entre os propulsores. |
| k_{prop} | Fator indicativo do nível de interferência para o par de propulsores <i>mn</i> atuando com interferência |
| k_{sat} | Fator indicativo da ocorrência ou não de saturação. Seu valor é igual a 1 quando houver saturação e 0 quando não houver. |
| $k_{s,i}$ | Fator de ponderação para o propulsor <i>i</i> que atingir saturação. |
| k_{cp} | Fator indicativo da presença ou não de interação casco-propulsor. Havendo interação, seu valor é 1; caso contrário, seu valor é 0. |
| $k_{Q,i}$ | Fator indicativo do nível de interação casco-propulsor para o propulsor <i>i</i> . |
| k_p | Fator de ponderação para a potência consumida pelo conjunto de propulsores. |
| $\Delta F_1^N, \Delta F_2^N, \Delta F_6^N$ | Diferenças de forças obtidas pelos termos da equação 3.6 após normalização. |
| I_{mn}^N | Valor médio das forças nos propulsores <i>m</i> e <i>n</i> que atuam com interferência, após normalização. |
| S_i | Força de empuxo normalizada no propulsor <i>i</i> , se houver saturação. |
| Q_i^N | Força de empuxo normalizada no propulsor <i>i</i> , quando houver interferência com o casco. |
| P^N | Potência consumida, após normalização. |

Na equação 5.1, cada grupo de termos apresenta comportamento diferenciado. Podem-se dividir os termos em três grupos, que possuem comportamentos diferentes:

- **Grupo 1** – Constituído pelas diferenças de forças e pela potência: $\Delta F_1^N, \Delta F_2^N, \Delta F_6^N$ e P^N . Os elementos deste grupo produzem valores proporcionais aos originais normalizados.
- **Grupo 2** – Constituído pela média das forças nos propulsores atuando com interferência e na interação casco-propulsor: I_{mm}^N e Q_i^N . As funções deste grupo são as funções que ponderam o valor médio das forças de empuxo dos propulsores que atuam com interferência e o valor médio da força de empuxo dos propulsores que produz interação com o casco da embarcação
- **Grupo 3** – Constituído pelas forças em propulsores que atingiram saturação. Seu termo é S_i . Neste grupo manipula-se a saturação dos propulsores, através do fator de ponderação $k_{s,i}$, sendo i o número do propulsor. O objetivo deste fator é eliminar o termo Q_i^N , uma vez que não é possível o propulsor operar em faixas superiores à saturação.

Os fatores de ponderação na equação 5.1 significam penalidades aplicadas a cada termo. Após a determinação de J nesta equação para cada termo, chega-se a equação:

$$J = [I_{D1} \quad I_{D2} \quad \dots \quad I_{D,n_{ind}}]^T \quad (5.2)$$

que é usada no cálculo da aptidão e posterior seleção. Quanto maior a penalidade, menor a probabilidade de o indivíduo ser selecionado.

6. Alocação de empuxo pelo método SQP

A formulação do problema de alocação de empuxo pelo método SQP utiliza as Equações (3.2) a (3.5), e a função objetivo é dada pela equação (3.5) (SINDING; ANDERSEN, 1998). Sua apresentação aqui é para balizar o método dos algoritmos genéticos. Assim, a função objetivo, representada pelo funcional $L(\mathbf{T})$, e o vínculo de igualdade $f(\mathbf{T}) = 0$ podem ser escritos como:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{T}) &= \sum |\mathbf{T}|^{3/2} \\ f(\mathbf{T}) &= \mathbf{AT} - \mathbf{F} \end{aligned} \quad (6.1)$$

onde \mathbf{T} inclui todas as forças produzidas pelos propulsores, como apresentado pela equação (3.3). Seguindo o procedimento convencional (BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 1993) define-se um vetor com os multiplicadores de Lagrange λ e a função $F(\mathbf{T}, \lambda) = L(\mathbf{T}) + \lambda f(\mathbf{T})$. A condição necessária para que a solução seja um ponto estacionário é

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{T}} = 0 \Rightarrow \frac{3}{2} \sqrt{|\mathbf{T}|} \cdot s + \mathbf{A}^T \lambda = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \mathbf{A} \mathbf{T} - \mathbf{F} = 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

onde s representa o sinal do elemento correspondente no vetor \mathbf{T} .

Para que seja um ponto de mínimo, verifica-se a condição necessária e suficiente, que neste caso produz:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \mathbf{T}^2} = \frac{3}{4\sqrt{|\mathbf{T}|}} \cdot s \geq 0 \quad (6.3)$$

Esta formulação é válida enquanto não houver propulsores saturados. Quando todos saturarem, ela já não vale mais devido à violação da restrição de igualdade na segunda expressão da equação (6.2).

7. Resultados

A seguir serão apresentados resultados para uma alocação de empuxo aplicando os métodos dos algoritmos genéticos e o método SQP. As forças aplicadas são tratadas como forças resultantes, já levando em conta todos os efeitos externos.

Para a validação dos algoritmos, o estudo será aplicado a uma barçaça tipo BGL1, contendo 6 propulsores azimutais dispostos no casco conforme esquema apresentado na figura 7.1 (TANNURI, 2002):

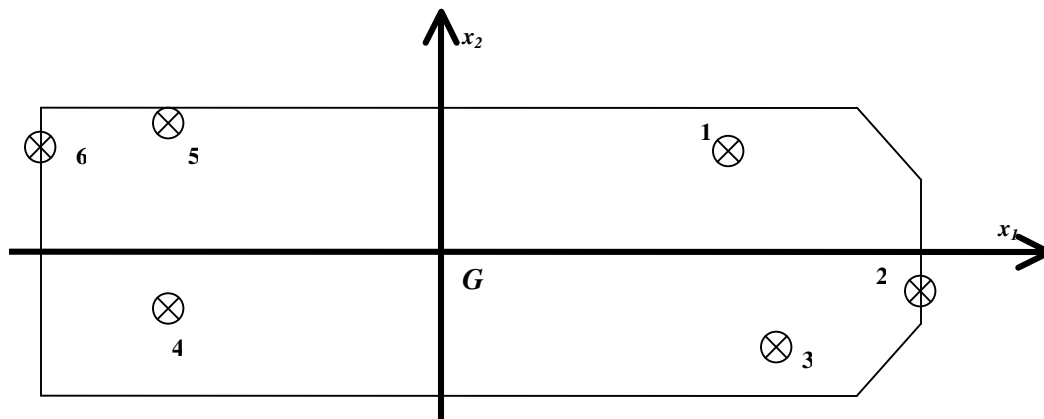


Figura 7.1 – Disposição dos propulsores no casco da barçaça BGL1 (extraída e adaptada de TANNURI, 2002).

Em relação ao centro de gravidade da barçaça (ponto G), as coordenadas de cada propulsor estão apresentadas na tabela 7.1:

Tabela 7.1 – Coordenadas dos propulsores para o modelo de estudo.

| Propulsor | $x_{1,i}$ (m) | $x_{2,i}$ (m) |
|-----------|---------------|---------------|
| 1 | 35,61 | 13,15 |
| 2 | 59,33 | -7,64 |

| | | |
|---|--------|--------|
| 3 | 42,81 | -13,15 |
| 4 | -33,99 | -8,44 |
| 5 | -33,99 | 19,15 |
| 6 | -50,00 | 13,15 |

O diâmetro considerado para todos os propulsores é de 2 metros.

A interferência é considerada na ocasião do cálculo da potência, e pode ocorrer entre os pares de propulsores (1,2), (1,3), (2,3), (4,5), (4,6) e (5,6). As outras combinações não produzem interferência considerável devido à distância entre eles ser superior a 20 vezes o valor do diâmetro.

7.1. Dados de entrada

As forças comandadas podem ser aplicadas de diversas formas: como uma onda senoidal, crescente ou decrescente linearmente (aplicação rampa), de forma brusca (aplicação degrau), entre outras. Aqui serão apresentados os resultados para uma forma linear. Nela, a partir de um valor inicial para as forças F_1 (avanço), F_2 (deriva) e F_6 (guinada), seus valores aumentam linearmente até um valor máximo estipulado. O intervalo total de forças é dividido em subintervalos, cada qual analisado separadamente. A análise total dos subintervalos dará a descrição da alocação de empuxo para a embarcação

Os dados referentes à simulação para esta forma de aplicação de forças são:

$$T_{máx} = 285.000 \text{ N}$$

$$F_{1,min} = 0, F_{1,máx} = 1.000.000 \text{ N}$$

$$F_{2,min} = 0, F_{2,máx} = 1.000.000 \text{ N}$$

$$F_{6,min} = 0, F_{6,máx} = 60.000.000 \text{ N}$$

onde $T_{máx}$ é a força máxima admissível para cada propulsor ou limite de saturação, $F_{1,min}$, $F_{2,min}$ e $F_{6,min}$ são, respectivamente, as forças iniciais consideradas no intervalo, e $F_{1,máx}$, $F_{2,máx}$ e $F_{6,máx}$ são as forças finais, no mesmo intervalo. A faixa de valores será dividida em 500 partes.

7.2. Solução por Algoritmos Genéticos com População Binária

Uma das características mais interessantes dos algoritmos genéticos é a garantia de convergência para o extremo global em modelos complexos, com valores ideais para a probabilidade de cruzamento, mutação, e tamanho da população.

O teste de convergência do algoritmo será realizado com diferentes valores de ponderação para cada um dos grupos: 1, 2 e 3, mostrados em uma tabela. Os dados considerados nesta simulação são:

$$\begin{array}{ll} F_1 = 500.000 \text{ N} & p_m = 0,001 \\ F_2 = 500.000 \text{ N} & n_{ind} = 20 \\ F_6 = 30.000.000 \text{ N.m} & n_{ger} = 100 \\ p_c = 0,75 & \end{array}$$

onde F_1 e F_2 são, respectivamente, as forças em *surge* e *sway*, respectivamente, e F_6 é o momento em *yaw*, p_c é a probabilidade de cruzamento, p_m , a probabilidade de mutação e

n_{ind} é o tamanho da população, ou o número de indivíduos e n_{ger} é o número de gerações considerado pelo algoritmo.

A cada geração do algoritmo são produzidos 20 indivíduos, dos quais nem todos convergem para o mesmo resultado. O importante é encontrar o valor ótimo dentre os indivíduos produzidos.

Os resultados apresentados nas figuras 7.2 e 7.3 testam a convergência do algoritmo, considerando diferentes ponderações para os termos.

Tabela 7.2 – Simulação da alocação de empuxo, com ponderações maiores para os termos do Grupo 1, exceto para a potência.

| Grupo 1 | | | | Grupo 2 | | Grupo 3 |
|----------------|----------------|----------------|-------|------------|---------|---------|
| ΔF_1^N | ΔF_2^N | ΔF_6^N | P^N | I_{mn}^N | Q_i^N | S_i |
| 10 | 10 | 15 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Os resultados para estas ponderações são:

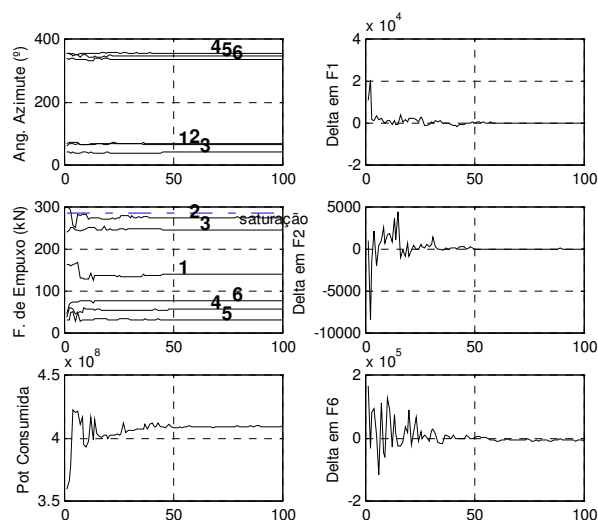


Figura 7.2 – Resultados da simulação com ponderação priorizando os termos do Grupo 1: ΔF_1^N , ΔF_2^N e ΔF_6^N .

A figura 7.2 apresenta as forças de empuxo e os ângulos de azimute em cada um dos 6 propulsores. Verifica-se, nos gráficos do lado direito da figura, que ocorre o equilíbrio entre as forças comandadas e produzidas

Para as mesmas condições anteriores, porém considerando uma maior ponderação para a potência, obtém-se os resultados apresentados na figura 7.3:

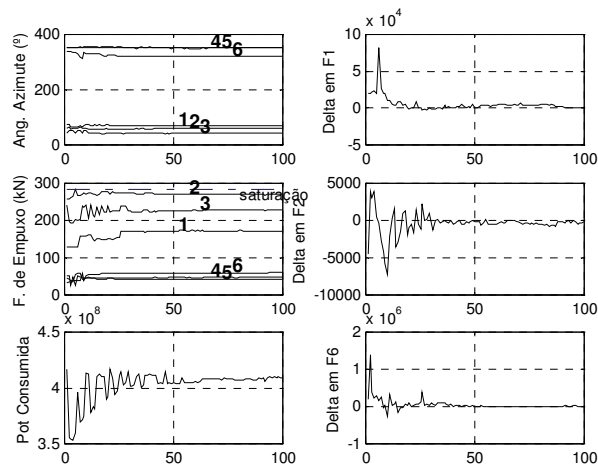


Figura 7.3 – Simulação com uma prioridade maior para a potência consumida.

Verifica-se nos gráficos do lado direito da figura 7.3 que a diferença entre as forças de empuxo e as comandadas começa a aumentar à medida que a potência consumida diminui. Isso ocorre por causa da maior prioridade atribuída à potencia, em detrimento das diferenças de forças. A alocação ótima é aquela que minimiza a potência consumida mantendo o equilíbrio da embarcação.

7.3. Forças comandadas linearmente crescentes

A figura 7.4 apresenta a simulação para as forças comandadas linearmente crescentes. Nela estão mostrados os valores dos ângulos de azimute, das forças de propulsão para cada propulsor e da potência consumida durante a evolução das forças:

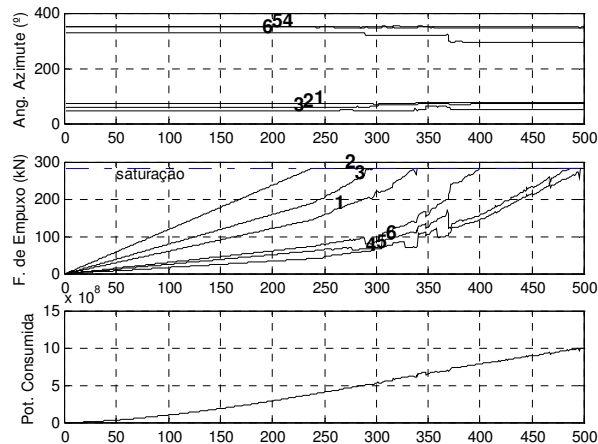


Figura 7.4– Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para uma variação linear de forças usando algoritmos genéticos binários.

Na figura é possível verificar que, à medida que os propulsores atingem a saturação, os demais propulsores se sobrecarregam, sendo então mais solicitados. Isso ocorre para que o equilíbrio seja mantido, até que todos os propulsores saturem, quando então o equilíbrio deixa de ser respeitado.

A figura 7.5 mostra a evolução das forças comandadas e produzidas. À medida que os propulsores saturam, a diferença aumenta.

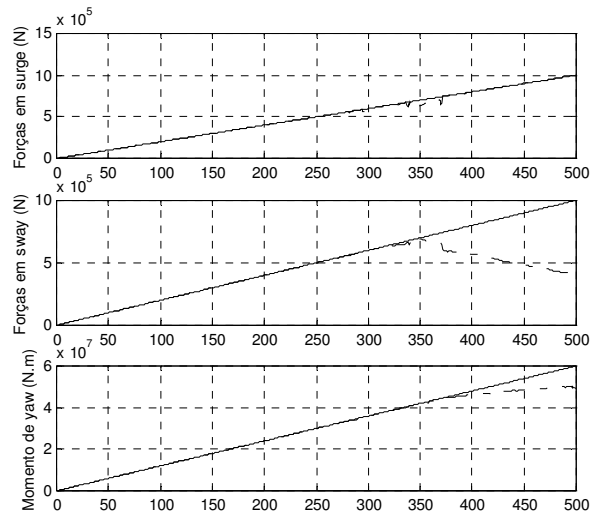


Figura 7.5 – Forças comandadas e produzidas, para a forma linear com algoritmos genéticos binários.

Nesta figura, o gráfico que apresenta as forças em *sway* (deriva) mostra que a diferença aumenta nesta direção. Isso acontece porque, devido à forma construtiva da embarcação (figura 7.1), nesta direção existe maior facilidade de movimento em função dos agentes externos, e como as ponderações são iguais nas direções x_1 e x_2 , a segunda foi mais afetada.

7.4. Solução por Algoritmos Genéticos com População Real

As características das simulações dos algoritmos genéticos com população binária e população real são bastante semelhantes. O mesmo caso simulado na figura 7.4 está mostrado na figura 7.6, com população real:

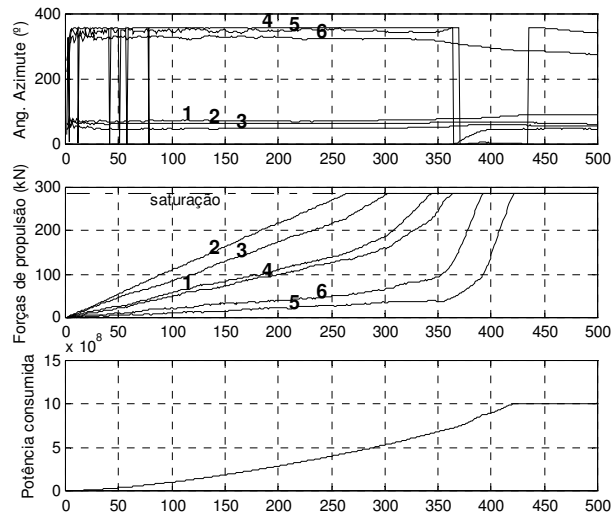


Figura 7.6 – Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para uma variação linear de forças usando algoritmos genéticos reais.

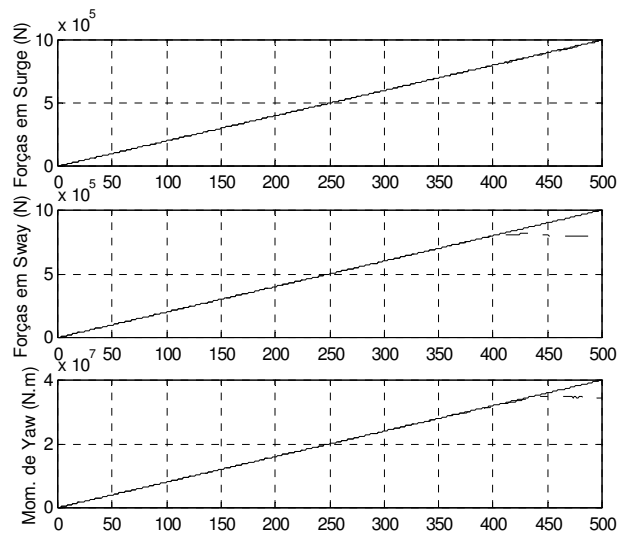


Figura 7.7 – Forças comandadas e produzidas, para a forma linear com algoritmos genéticos reais.

Assim como na figura 7.5, a figura 7.7 apresenta a comparação entre as duas forças (comandadas e produzidas).

7.5. Solução pelo método SQP

O método SQP usado aqui considera como restrições funcionais o equilíbrio da embarcação, conforme equação 3.2, e como função objetiva a minimização da potência, dada pela equação 3.5. A convergência neste método é obtida por derivações sucessivas. A figura 7.8 apresenta a simulação para a alocação de, e a figura 7.9 apresenta a diferença entre as forças comandadas e produzidas.

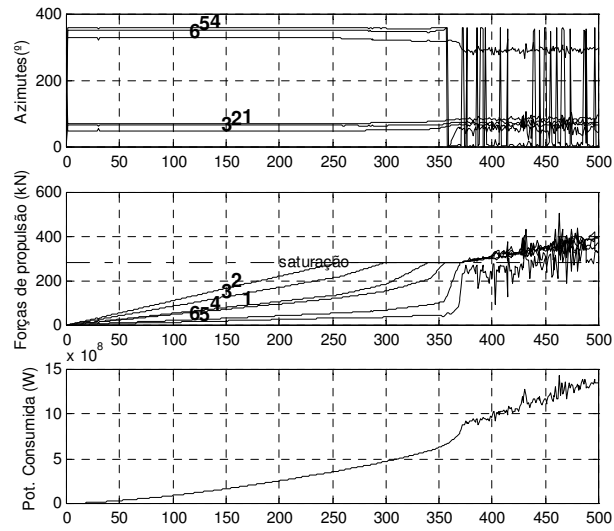


Figura 7.8– Resultados para a simulação pelo método SQP.

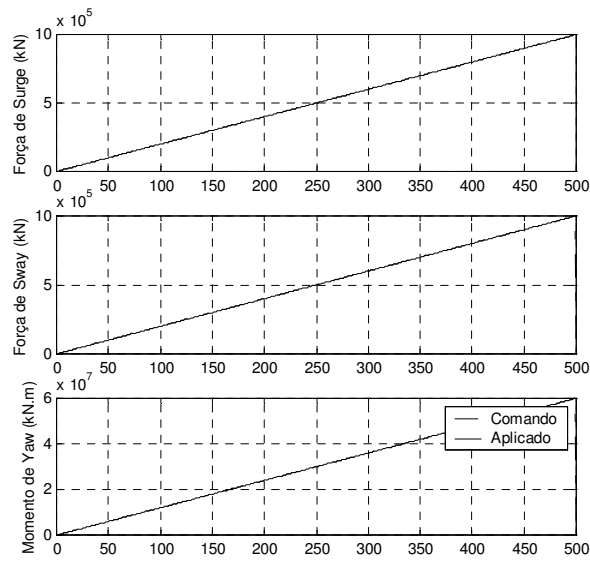


Figura 7.9 – Forças comandadas e produzidas, linearmente crescentes.

A solução para o problema SQP trata de vínculos de desigualdade não linear:

$$\begin{cases} \sqrt{(T_{x1,i})^2 + (T_{x2,i})^2} \leq T_{máx,i} , & i = 1, \dots, n_{prop} \\ T_i \leq T_{máx,i} \end{cases} \quad (7.1)$$

onde $T_{x1,i}$ e $T_{x2,i}$ são as componentes das forças de empuxo em *surge* e *sway*, respectivamente, T_i é a força de empuxo resultante, efetivamente produzida pelo propulsor e $T_{máx}$ é o empuxo máximo admissível por propulsor.

Com base na figura 7.9, teoricamente, a embarcação permaneceria em equilíbrio, o que não é verdade, já que os propulsores possuem um limite para a potência disponível e, conseqüentemente, para a força de empuxo. O que ocorre é que, estando todos os propulsores saturados, o método SQP deixa de ser válido, os resultados não tem sentido e tem-se a impressão de que o equilíbrio é mantido. Esta conclusão pode ser verificada na figura 7.8.

7.6. Comparação entre os métodos

A tabela 7.3 apresenta uma comparação entre Algoritmos Genéticos e o método SQP:

Tabela 7.3 – Potência consumida em diferentes iterações dos algoritmos

| | AG | | SQP |
|--------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | binário | real | |
| | Potência consumida calculada (W) | | |
| tempo (seg.) | 1241 | 203 | 51 |
| iteração 125 | 1,439779.10 ⁸ | 1,416423.10 ⁸ | 1,235015.10 ⁸ |
| iteração 250 | 4,072978.10 ⁸ | 4,000950.10 ⁸ | 3,514639.10 ⁸ |
| iteração 375 | 7,365477.10 ⁸ | 7,687981.10 ⁸ | 8,862583.10 ⁸ |
| iteração 500 | 9,977842.10 ⁸ | 9,735836.10 ⁸ | 1,352443.10 ⁹ |

Os valores das iterações foram tomados de forma a analisar os pontos mais ilustrativos do algoritmo: nenhum propulsor saturado (125 e 250), alguns propulsores saturados e outros não (375) e todos os propulsores saturados (500). A execução dos algoritmos foi realizada em um computador tipo PC, com 1 GB de memória e processamento simples, e o tempo de processamento mostrado na tabela 7.3 foi obtido nesta execução. Todavia, é possível realizar, para o método dos Algoritmos Genéticos, um processamento paralelo, o que diminui substancialmente o tempo de processamento.

Analisando a tabela 7.3 percebe-se que o método SQP é o mais rápido, e o método baseado em AG com população binária, o mais lento. As variações calculadas para a potência máxima entre os métodos estão apresentadas na tabela 7.4:

Tabela 7.4 – Comparação entre os métodos.

| | AG (bin) – AG (real) | AG (bin) – SQP | AG (real) – SQP |
|-----|-------------------------|-------------------|--------------------|
| 125 | 1,02 % | 1,17 % | 1,15 % |
| 250 | 1,02 % | 1,16 % | 1,14 % |
| 375 | 0,96 % | 0,83 % | 0,86 % |
| 500 | 1,02 % | 0,73 % | 0,72 % |

Comparativamente, os valores mais próximos estão entre os algoritmos genéticos. No método SQP, a restrição de posicionamento deixa de ser respeitada quando os propulsores saturam. Isso quer dizer que, pelos resultados obtidos, o método SQP violou as restrições referentes à saturação, enquanto o método dos Algoritmos Genéticos não..

7.7. Considerações sobre a interferência entre os propulsores

Neste trabalho foi considerado que o empuxo máximo admissível por propulsor corresponde à potência máxima que ele pode fornecer. Isso quer dizer que, em caso de interferência, os propulsores são mais solicitados para produzir o mesmo empuxo, pois o SPD consome mais energia (potência) para manter a posição quando ocorre a interferência, que causa perda de eficiência. Os dados a seguir serão usados na nova simulação, para produzir interferência.

$$T_{máx} = 285.000 \text{ N}$$

$$F_{2,min} = 0, F_{2,máx} = 1.000.000 \text{ N}$$

$$F_{1,min} = 0, F_{1,máx} = 1.000.000 \text{ N}$$

$$F_{6,min} = 0, F_{6,máx} = 40.000.000 \text{ N}$$

O resultado da simulação é apresentado a seguir:

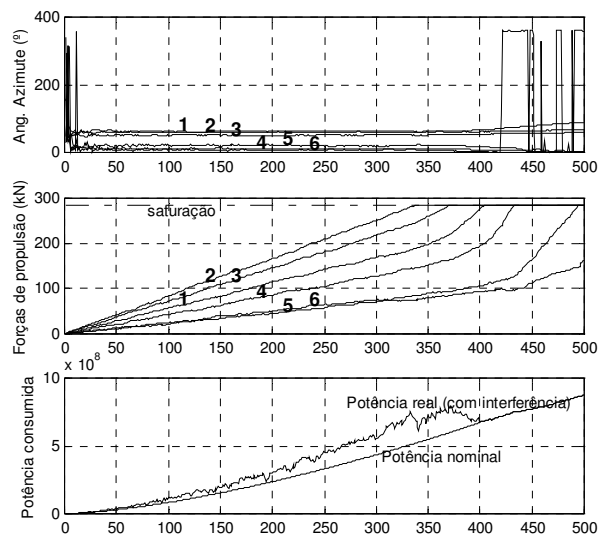


Figura 7.10 – Acrescimo de potencia na ocorrencia de interferencia entre propulsores.

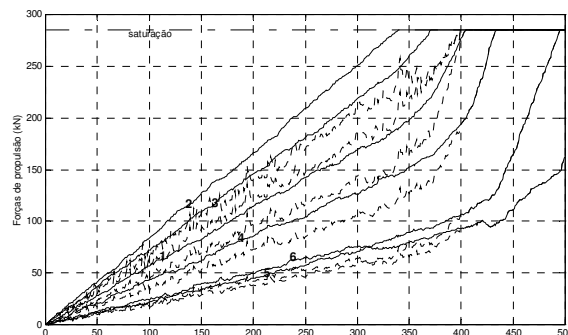


Figura 7.11 – R

interferência.

ocorrência de

A figura 7.10 mostra o que acontece com a potência quando há interferência. Pela simulação apresentada, a interferência acontece entre as iterações 8 e 398. Fora deste intervalo não há interferência considerável. Na figura 7.11 estão as forças nominais e as forças realmente produzidas para superar o efeito de interferência.

Neste exemplo foi considerado que, quando a interferência é máxima (propulsores com suas esteiras na mesma direção) a perda de eficiência é de 20%.

A verificação de interferência foi realizada apenas para a simulação com algoritmos genéticos reais, mas sua execução é a mesma para os demais métodos.

8. Conclusão

No presente trabalho foram desenvolvidos e testados dois algoritmos genéticos, sendo um com população e binária e outro, com população real. Estes algoritmos foram, então comparados com o algoritmo baseado no método SQP, adaptado a este trabalho e desenvolvido em parte por TANNURI (2002). Para validar seus resultados, o procedimento desenvolvido é aplicado na alocação de empuxo da BGL1. Foram testados vários valores de ponderação para cada um dos termos, para constatar a ineficiência do algoritmo para a alocação de empuxo.

Para validar os algoritmos e testar a diferença entre as forças comandadas e produzidas nos propulsores, os testes consideraram uma variação progressiva linear destas forças. A avaliação da interferência entre os propulsores foi feita através de um procedimento geométrico, desenvolvido para este caso. Os valores obtidos para a potência consumida nos dois casos foram bastante próximos, sendo que no método SQP, por ser um método determinístico, sempre se produzia o mesmo resultado e, no método dos algoritmos genéticos, os resultados não são identicamente iguais, mas estatisticamente muito próximos, resultado da sua convergência.

A execução do algoritmo baseado no método SQP foi mais rápida que pelo método dos algoritmos genéticos, porém a restrição da saturação não foi atendida quando todos os propulsores saturaram, o que não aconteceu com o método dos algoritmos genéticos.

Quando os propulsores atingem a saturação, o algoritmo desenvolvido permite verificar a divergência das forças, além de permitir escolher qual item ponderar de forma a penalizar os demais. Por isso o método dos algoritmos genéticos pode ser interessante para o problema de alocação de empuxo.

Como proposta de trabalhos futuros sugere-se a determinação dos parâmetros dos algoritmos genéticos para o problema de alocação de empuxo através de uma rede neural, desenvolvendo assim um algoritmo híbrido, para melhorar o desempenho dos resultados referentes a função de custo e uma maior estabilidade destes resultados em iterações distintas.

9. Referencias Bibliográficas

BAZARAA, M. S., SHERALI, H. D., SHETTY, C. M. **Nonlinear programming – Theory and Algorithms**, 2º Edição, John Wiley & Sons, Inc., 1993.

CASTRO, R. E., **Otimização de Estruturas com Multi Objetivos via Algoritmos Genéticos**, Rio de Janeiro, 2001. Tese – COPPE, Universidade Federal do Rio de

Janeiro Brasil.

COELHO, L. S., **Algoritmos genéticos**, CCET/PPGEPS, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2002.

DONHA, D. C., **Estudo do Posicionamento Dinâmico para Plataforma Semi-Submersível**, São Paulo, 1983. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

DONHA, D. C., **Estudo, Implementação, Teste e Avaliação de um Sistema de Posicionamento Dinâmico**, São Paulo, 1989. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

GEN, M., CHENG, R., **Genetic Algorithms and Engineering Design**, Wiley, New York, 1997.

GOLDBERG, D. E., **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1989.

HAMAMATSU, M., **Control Systems: Nonlinear DP Controller**, Dynamic Positioning Committee, Canadá, 2002.

MORALES, A. F. K., GARCIA, J. G., **Penalty Function Methods for Constrained Optimization with Genetic Algorithms: A Statistical Analysis**, Centro de Investigación em Computación, México, Instituto Politécnico Nacional, 2002.

PACHECO, M. A. C., **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações**, Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada, Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 1999.

SINDING, P., ANDERSEN, S. V., **A Force Allocation Strategy for Dynamic Positioning**, Proceedings of the Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference, Canada, p.346-353, 1998.

SOARES, G. L., **Algoritmos Genéticos: Estudo, Novas Técnicas e Aplicações**, Belo Horizonte, 1997. Dissertação (mestrado) – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.

SOUZA, E. C., **Otimização da Alocação de Empuxo em Sistemas de Posicionamento Dinâmico**, São Paulo, 2005. Dissertação (mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

TANNURI, E. A., **Desenvolvimento de Metodologia de Projeto de Sistema de Posicionamento Dinâmico Aplicado em Operações em Alto Mar**, São Paulo, 2002. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

WHITLEY, D., **A Genetic Algorithm Tutorial**, Computer Science Department, Colorado State University, 2000.