

EMILIO CELSO DE SOUZA

**OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE EMPUXO EM SISTEMAS DE
POSICIONAMENTO DINÂMICO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica

Orientador:

Prof. Dr. Decio Crisol Donha

São Paulo

2005

012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de outubro de 2005.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Emilio Celso de
Otimização da alocação de empuxo em sistema de posicionamento dinâmico / E.C. Souza. – ed.rev. -- São Paulo, 2005.
118 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Sistema de posicionamento dinâmico 2.Empuxo (Otimização) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de manifestar seu profundo reconhecimento, respeito e gratidão às seguintes pessoas e entidades:

Ao Prof. Dr. Decio Crisol Donha pela orientação, pelas valiosas informações concedidas durante o mestrado, pelo grande empenho na a realização deste trabalho e por ter contribuído significativamente pelo meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri pelas inúmeras contribuições durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Brinati, que sempre esteve pronto para oferecer preciosas informações para este trabalho.

Ao Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury que abriu a primeira porta para meu ingresso no programa.

Ao Prof. Dr. Cláudio Luiz Marte que sempre me incentivou durante a elaboração do trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, por ter concedido um espaço em uma sala com um microcomputador onde pude desempenhar grande parte do trabalho.

À minha amada mãe, Maria Eva, e ao meu pai e grande amigo Osvaldo, que nunca pouparam esforços em me orientar e apoiar em todas as minhas decisões.

Aos meus irmãos Silvia e Robson, que sempre estiveram do meu lado em todos os momentos, especialmente nos mais difíceis.

Aos meus nobres amigos que nunca me deixaram desanimar perante as adversidades.

Ao presidente da Soka Gakkai Internacional, Dr. Daisaku Ikeda que, com sua grandeza de alma, sempre ofereceu orientações valiosíssimas para todas as ocasiões, em especial, para a conclusão deste trabalho.

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 dois 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) e os Algoritmos Genéticos. 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, em uma tarefa típica de posicionamento. 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. 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.

ABSTRACT

This work presents a study on thrust allocation optimization logic of thruster allocation of thrusters in dynamic positioning systems.

This study includes a research on two different optimization methods applied to the thrust allocation problem, including some classical optimization techniques, such as Sequential Quadratic Programming (SQP) and the Genetic Algorithms. These methods consider, as objective function to be minimized, the total power consumption by thrusters or simply the sum of the generated forces in the thrusters during the thrust allocation process, in the typical positioning task. The functional variables are just the thrust forces.

As contribution for this work it was developed a thrust allocation method based on Genetic Algorithms. The allocation method based on genetic algorithms was developed considering both populations with real valued individuals and with binary valued population. This goal is achieved through the minimization of a cost function containing terms that handle the equilibrium (in the surge, sway and yaw directions), the thruster-thruster interaction, the thruster-hull interaction and the thrusters saturation.

Validation of the algorithm was performed through a number of tests using different weighting values in the objective function. Both methods are then compared and a feasibility study is presented for each one.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
SUMÁRIO	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIV
GLOSSÁRIO.....	XIX
Capítulo 1. Introdução	1
1.1. Sistema de Posicionamento Dinâmico (SPD).....	1
1.1.1. Subsistema controlador.....	2
1.1.2. Subsistema de propulsão.....	3
1.1.3. Subsistema de sensoriamento	4
1.1.4. Subsistema de potência.....	4
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Revisão Bibliográfica.....	6
1.4. Organização do trabalho	11
Capítulo 2. Métodos de Otimização Utilizados	13
2.1. Introdução	13
2.2. Método dos algoritmos genéticos	14
2.2.1. Considerações sobre restrições	15
2.3. Método da Programação Quadrática Sequencial (SQP).....	18
Capítulo 3. Modelagem da Alocação de Empuxo	25

3.1.	Introdução	25
3.2.	Sistemas de referência.....	26
3.3.	Alocação de empuxo nos propulsores.....	28
3.4.	Modelagem	29
3.4.1.	Energia consumida pelos propulsores.....	30
3.5.	Elementos da formulação do problema de minimização	30
3.5.1.	Saturação dos propulsores.....	31
3.5.2.	Interferência entre dois propulsores.....	32
3.5.3.	Interação casco-propulsor	36
3.6.	Formulação do problema de otimização	37
3.6.1.	Formulação do problema pelo método dos Algoritmos Genéticos....	38
3.6.1.1.	Algoritmos genéticos com população binária.....	38
3.6.1.2.	População inicial.....	40
3.6.1.3.	Cálculo da Aptidão	42
3.6.1.4.	Seleção	43
3.6.1.5.	Cruzamento e mutação.....	45
3.6.1.6.	Algoritmos genéticos com população real (ponto flutuante).....	46
3.6.1.7.	Mínimização da Função Objetivo.....	49
3.6.1.8.	Grupo 1	52
3.6.1.9.	Grupo 2	53
3.6.1.10.	Grupo 3	56
3.6.2.	Alocação de empuxo pelo método SQP.....	57
Capítulo 4.	Estudo de Caso	61
4.1.	Introdução	61
4.2.	Modelo para estudo.....	61
4.3.	Considerações sobre as simulações e os dados de entrada	63
4.3.1.	Aplicação de forças lineares	64
4.3.2.	Aplicação de forças senoidais.....	65
4.4.	Solução por Algoritmos Genéticos com População Binária.....	66
4.4.1.	Convergência do algoritmo.....	66
4.4.1.1.	Atribuição de ponderações para cada termo isoladamente.....	68
4.4.1.2.	Forças comandadas linearmente	71

4.4.1.3. Forças comandadas senoidalmente	72
4.5. Solução por Algoritmos Genéticos com População Real	73
4.6. Solução pelo método SQP	77
4.6.1. Forma linear	77
4.6.2. Forma senoidal.....	80
4.7. Comparação entre os métodos	81
4.7.1. Considerações sobre saturação no método dos AG	84
4.7.2. Considerações sobre a interferência entre os propulsores	85
Capítulo 5. Comentários e Conclusões.....	88
Referências Bibliográficas.....	90
Bibliografia não citada	94
Apêndice – Configurações de Alocação de Empuxo.....	96

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Movimentos de uma embarcação.
- Figura 1.2 Subsistema controlador, modelo KICS-5000 (extraído de HAMAMATSU, 2002).
- Figura 1.3 Modelo de um propulsor azimutal. (a) – esquema do propulsor, (b) montagem do propulsor no casco de um navio (extraído de SCHOTTEL, 2004).
- Figura 1.4 Estrutura Básica do controle da embarcação (extraído em partes de HAMAMATSU, 2002; TANNURI, 2002 e DONHA, 1989).
- Figura 3.1 Incidência das forças externas sobre a embarcação.
- Figura 3.2 Sistemas de referência usados na modelagem da alocação de empuxo.
- Figura 3.3 Atuação das forças comandadas sobre a embarcação.
- Figura 3.4 Distribuição dos propulsores no casco da embarcação.
- Figura 3.5 Definições das forças para propulsores azimutais.
- Figura 3.6 Interferência entre dois propulsores. O ângulo α é o ângulo de interferência entre eles, obtido pelas linhas de ação c_1 e c_2 .
- Figura 3.7 Dois propulsores alinhados através das suas linhas de ação. (a) Linhas de ação no mesmo sentido, (b) Linhas de ação em sentidos opostos.
- Figura 3.8 Dois propulsores próximos que não interagem entre si.
- Figura 3.9 Mudança de referencial para o ângulo de azimute.
- Figura 3.10 Possíveis ângulos de azimute em relação ao referencial relativo c_{ij} e o ângulo θ_i equivalente no primeiro quadrante
- Figura 3.11 Interação casco-propulsor (extraída e adaptada de SINDING; ANDERSEN, 1998)
- Figura 3.12 Fluxograma representativo das etapas do SGA.

- Figura 3.13 Representação de uma função quadrática normal e transformada. A função transformada permite a determinação do valor mínimo da função original através do seu valor máximo.
- Figura 3.14 Representação de uma distribuição de aptidões em forma de roleta.
- Figura 3.15 Representação de pontos de cruzamento para dois cromossomos durante o cruzamento: (a) um único ponto, (b) múltiplos pontos.
- Figura 3.16 Aplicação dos fatores de ponderação ao Grupo 1.
- Figura 3.17 Aplicação do fator de ponderação $k = 5$ a uma população com 10 indivíduos normalizada.
- Figura 3.18 Fator de ponderação k_{prop} proporcional ao ângulo de interferência e de incidência sobre o casco, respectivamente.
- Figura 3.19a Degradação dos propulsores quando submetidos a interferência, em função da distância (extraído de DIJK, AALBERS, 2001).
- Figura 3.19b Degradação dos propulsores quando submetidos a interferência, em função do ângulo de azimute (extraído de DIJK, AALBERS, 2001).
- Figura 3.20 Fator de ponderação para o caso de saturação, função do Grupo 3.
- Figura 4.1 Disposição dos propulsores no casco da barcaça BGL1 (extraída e adaptada de TANNURI, 2002).
- Figura 4.2 Representação da variação de forças comandadas linearmente.
- Figura 4.3 Representação da variação de forças comandadas senoidalmente, em um único sentido.
- Figura 4.4 Resultados da simulação com ponderação priorizando os termos do Grupo 1: ΔF_1^N , ΔF_2^N e ΔF_6^N .
- Figura 4.5 Simulação com uma prioridade maior para a potência consumida.
- Figura 4.6 Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para uma variação linear de forças usando algoritmos genéticos binários.
- Figura 4.7 Forças comandadas e produzidas, para a forma linear com

- algoritmos genéticos binários.
- Figura 4.8 Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para a forma senoidal.
- Figura 4.9 Diferenças de forças comandadas e produzidas considerando a forma senoidal.
- Figura 4.10 Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para uma variação linear de forças usando algoritmos genéticos reais.
- Figura 4.11 Forças comandadas e produzidas, para a forma linear com algoritmos genéticos reais.
- Figura 4.12 Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para uma variação senoidal de forças usando algoritmos genéticos reais.
- Figura 4.13 Forças comandadas e produzidas, para a forma senoidal com algoritmos genéticos reais.
- Figura 4.14 Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para uma variação linear de forças usando SQP.
- Figura 4.15 Forças comandadas e produzidas, para a forma linear usando SQP.
- Figura 4.16 Ângulos de azimute, forças de empuxo e potência consumida para a forma senoidal do método SQP.
- Figura 4.17 Forças comandadas e produzidas pelos propulsores para o método SQP na forma senoidal.
- Figura 4.18 Acréscimo de potência na ocorrência de interferência entre propulsores.
- Figura 4.19 Redução no efeito das forças produzidas nos propulsores na ocorrência de interferência.
- Figura A1.1 Diferentes configurações de forças com mesmos valores para forças totais e momentos.

LISTA DE TABELAS

- Tabela A1.1 Duas configurações de forças para uma disposição de dois propulsores.
- Tabela A1.2 Cálculo da soma das forças nas direções x_1 e x_2 e dos momentos nas duas configurações de forças do exemplo.
- Tabela A1.3 Resultados da execução de um algoritmo para produzir várias configurações de propulsores.
- Tabela 4.1 Coordenadas dos propulsores para o modelo de estudo.
- Tabela 4.2 Propulsores que sofrem interferência entre si, com suas distâncias.
- Tabela 4.3 Simulação da alocação de empuxo, com ponderações maiores para os termos do Grupo 1, exceto para a potência.
- Tabela 4.4 Simulação da alocação de empuxo, com maior prioridade para a potência consumida.
- Tabela 4.5 Valores da potência consumida pelo sistema propulsor em diferentes iterações dos algoritmos, na forma linear.
- Tabela 4.6 Valores da potência consumida pelo sistema propulsor em diferentes iterações dos algoritmos, na forma senoidal.
- Tabela 4.7 Comparação entre os métodos.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AG	Algoritmo Genético.
BFGS	<i>Broyden – Fletcher – Goldfarb - Shanno</i>
KKT	<i>Karush-Kuhn-Tucker</i>
SGA	<i>Simple Genetic Algorithm</i> (Algoritmo Genético Simples).
SPD	Sistema de Posicionamento Dinâmico.
SQP	<i>Sequential Quadratic Programming</i> (Programação Quadrática Sequencial).

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathbf{A}, \mathbf{A}(\alpha)$	Matriz de transformação do vetor \mathbf{T} para o vetor \mathbf{F} .
\mathbf{A}^+	Pseudoinversa de \mathbf{A} .
$c_{i,j}$	linha que une o propulsor i ao propulsor j .
D^p	Diâmetro do propulsor.
d_{nsat}	Soma de forças dos propulsores que não saturaram, num processo de equalização de forças.
d_{sat}	Diferença entre as forças produzidas e comandadas após a saturação.
\mathbf{F}	Vetor de forças comandadas F_1, F_2 e F_6 .
f_i	valor da aptidão (<i>fitness</i>) do i -ésimo indivíduo na população considerada, levando em conta a função transformada pelo cálculo da recíproca da função objetivo original .
$f'_{obj,i}$	valor da função objetivo transformada, através do cálculo da recíproca da função objetivo original, para o i -ésimo indivíduo na população considerada.
f_p	Fator de proporcionalidade para distribuição de resíduos de forças entre propulsores não saturados.
F_1	Força comandada na direção de coordenada x_1 , responsável pela produção da força em <i>surge</i> pela embarcação.
F_2	Força comandada na direção de coordenada x_2 , responsável pela produção da força em <i>sway</i> pela embarcação.
F_6	Momento de aproamento (<i>yaw</i>).
f_i	valor da aptidão (<i>fitness</i>) do i -ésimo indivíduo na população.
F_{in}	Limite inferior para as componentes em x_1 e x_2 da força de

	empuxo para todos os propulsores.
$f_{obj,i}$	valor da função objetivo para o i -ésimo indivíduo na população.
F_{su}	Limite superior para as componentes em x_1 e x_2 da força de empuxo para todos os propulsores.
G	Centro de gravidade.
I_D	Índice de desempenho calculado para cada indivíduo da população.
ID	Vetor com os índices de desempenho para toda a população.
ij	Conjunto de índices que designa uma matriz de cromossomos. i representa a posição do indivíduo na população, e j representa o número da população, correspondendo ao número do propulsor.
I_{mn}^N	Função do valor médio das forças nos propulsores m e n que atuam com interferência, considerando a população original normalizada.
$k_{1,i}, k_{2,i}$	Fatores de penalidade considerados na reversão dos propulsores nas direções de avanço e deriva, respectivamente.
k_{cp}	Fator indicativo da presença ou não de interação casco-propulsor.
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 propulsores m e n .
k_p	Fator de ponderação para a potência consumida pelo conjunto de propulsores.
k_{prop}	Fator indicativo do nível de interferência para o par de propulsores atuando com interferência.
$k_{Q,i}$	Fator indicativo do nível de interação casco-propulsor para o propulsor i .

k_{sat}	Fator indicativo da presença ou não de saturação.
$k_{s,i}$	Fator de ponderação para o propulsor i que atingir saturação.
L^p	Distância entre dois propulsores.
n_{bits}	Número de bits para cada cromossomo na população (tamanho do indivíduo).
n_{ind}	Número de indivíduos de uma população.
n_{prop}	Número de propulsores de uma embarcação.
\mathbf{p}_{ac}	vetor dos valores acumulados das aptidões para uma população.
$p_{ac,i}$	valor acumulado da aptidão para o conjunto de indivíduos, na posição i .
p_c	probabilidade de cruzamento.
p_m	probabilidade de mutação.
P^N	Função da potência consumida, considerando a população original normalizada.
p_r	Valor da precisão requerida para os valores obtidos da conversão de um cromossomo binário para real.
Q_i^N	Função da força de empuxo no propulsor i se houver interferência entre casco e propulsor.
\mathbf{S}	Matriz diagonal contendo os autovetores de $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$
\mathbf{S}^+	Pseudoinversa de \mathbf{S} .
S_i	Função da força de empuxo no propulsor i , se houver saturação.
\mathbf{T}	Vetor das forças de empuxo, para todos os propulsores no modelo considerado.
T_i	Valor do empuxo resultante no propulsor i .
T_{ij}	Empuxo correspondente ao indivíduo i no propulsor j .
$T_{máx}$	Valor do empuxo máximo admissível para cada propulsor.

$Tx_{1,i}, Tx_{2,i}$	Componente da força de empuxo para o propulsor i .
$Tx_{1,ij}, Tx_{2,ij}$	Componentes do empuxo gerados no indivíduo i , no propulsor j .
\mathbf{U}	matriz dos autovetores de \mathbf{AA}^T .
\mathbf{V}	matriz dos autovetores de $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$.
x_1	Movimento de avanço (<i>surge</i>).
$X_1, X_2, X_3,$ X_4, X_5, X_6	Coordenadas do sistema de referência global fixo à Terra.
x_2	Movimento de deriva (<i>sway</i>).
x_3	Movimento de arfagem (<i>heave</i>).
x_4	Movimento de balanço (<i>roll</i>).
x_5	Movimento de caturro (<i>pitch</i>)
x_6	Movimento de aproamento (<i>yaw</i>)
x_b	Valor do cromossomo na população, em binário.
x_i^p, y_i^p	distâncias do i -ésimo propulsor ao centro de gravidade da embarcação, nas coordenadas locais.
x_r	Valor do cromossomo na população convertido para real
$\mathbf{x}_{rv}, \mathbf{y}_{rv}, \mathbf{z}_{rv}$	População em ponto flutuante antes da recombinação.
$\mathbf{x}'_{rv}, \mathbf{y}'_{rv}, \mathbf{z}'_{rv}$	População em ponto flutuante após a recombinação.
α	ângulo de interferência entre dois propulsores, medido em relação à linha que os une.
α_i^p	Ângulo de azimute do propulsor i .
β_i^p	ângulo de azimute equivalente no sistema de referência relativo aos dois propulsores considerados na interferência.
γ	valor limite do ângulo de incidência. Acima deste valor, considera-se que não há interferência.

$\Delta \mathbf{F}$	Vetor com a diferença entre as forças comandadas e as forças efetivamente produzidas.
$\Delta F_1^N, \Delta F_2^N, \Delta F_6^N$	Diferenças de forças, considerando a população original normalizada.
Δ_{ind}	Valor da redução do número de indivíduos entre duas gerações sucessivas.
ξ, ν	Parâmetros de ponderação para operação de cruzamento aritmético.
θ_i	ângulo de azimute equivalente transferido para o primeiro quadrante.
$\lambda(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$	autovalores da matriz resultante da operação $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$.
τ_c	Vetor de forças comandadas (vide SØRDALEN, 2004).
ψ	Ângulo de incidência da força resultante dos agentes externos sobre a embarcação, no sistema de coordenadas locais da embarcação.

GLOSSÁRIO

- surge* Movimento da embarcação ao longo do seu eixo longitudinal, designado pela coordenada $x1$.
- sway* Movimento da embarcação ao longo do seu eixo transversal, designado pela coordenada $x2$.
- heave* Movimento vertical da embarcação, designada pela coordenada $x3$.
- roll* Movimento da embarcação em torno do eixo $x1$, designado pela coordenada angular $x4$.
- pitch* Movimento da embarcação em torno do eixo $x2$, designado pela coordenada angular $x5$.
- yaw* Movimento da embarcação em torno do eixo $x3$, designado pela coordenada angular $x6$.

Capítulo 1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se o Sistema de Posicionamento Dinâmico (SPD) e os subsistemas que o compõem. Dentre os subsistemas destaca-se o subsistema de controle, que contém o algoritmo de alocação de empuxo, sobre o qual se baseia o presente trabalho. Apresentam-se também os objetivos do trabalho, sua organização e as principais referências bibliográficas, que são cuidadosamente comentadas e em parte detalhadas nos capítulos seguintes

1.1. Sistema de Posicionamento Dinâmico (SPD)

A partir da década de 60 difundiu-se a utilização de sistemas de posicionamento dinâmico (SPD), que além de permitir a exploração de petróleo em águas profundas, viabilizou também outras áreas de aplicação marítima, como por exemplo, em pesquisas geofísicas, na manobra em portos, em veículos bombeiros, em veículos de suprimento, em navios guindastes, em veículos de supervisão e monitoramento de atividades submarinas. Outras informações sobre as origens da utilização de sistemas de posicionamento dinâmico podem ser encontradas em (TANNURI, 2002).

O SPD é um sistema de posicionamento ativo, que por meio de um sistema de controle, mantém uma embarcação em torno de uma posição desejada através de propulsores, usando a informação de sensores.

O controle do posicionamento da embarcação ocorre no plano horizontal ao longo dos movimentos de translação nos eixos x_1 e x_2 , e movimento de rotação em torno do eixo x_3 , ou seja, ele atua sobre os movimentos de avanço (*surge*), deriva (*sway*) e apreamento (*yaw*). A figura 1.1 apresenta os movimentos da embarcação, destacando-se os movimentos controlados pelo SPD (*surge*, *sway* e *yaw*), (McKINVEN, 2001).

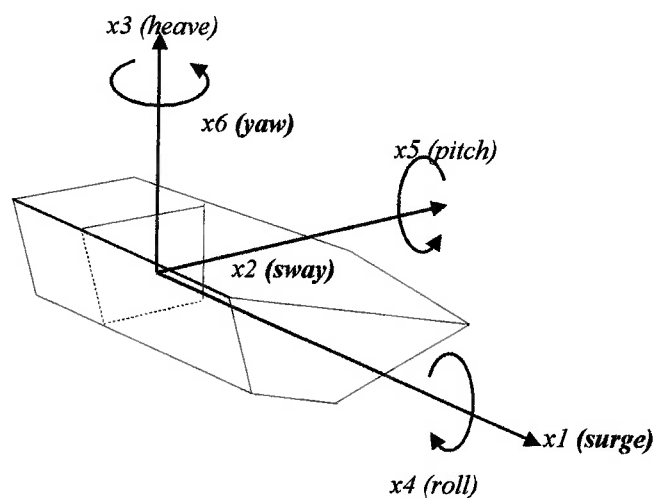


Figura 1.1 – Movimentos de uma embarcação.

O SPD é constituído de um conjunto de subsistemas integrados incluindo o subsistema controlador, o subsistema de propulsão, o subsistema de sensoriamento e o subsistema de potência (TANNURI (2002); SINDING, ANDERSEN (1998)).

1.1.1. Subsistema controlador

Geralmente trata-se de um computador dotado de placas de comunicação responsáveis pela leitura dos diversos sensores e pelo comando dos propulsores. Neste subsistema está contido o programa cujo algoritmo executa os cálculos das forças e momentos necessários para que a embarcação se mantenha em uma posição próxima à posição desejada, seja ela em ponto fixo ou uma trajetória definidos pelo operador. (McKINVEN, 2001).

A figura 1.2 apresenta o módulo controlador, modelo KICS-5000, produzido por Kawazaki (HAMAMATSU (2002)), composto por módulos de controle, de sensoriamento de ondas e de alocação de empuxo, além de uma interface gráfica (console).



Figura 1.2 – Subsistema controlador, modelo KICS-5000 (extraído de HAMAMATSU, 2002)

1.1.2. Subsistema de propulsão

O subsistema de propulsão ou subsistema atuador é formado por propulsores (hélices, fixos ou azimutais, jatos de água, propulsores cicloidais, etc.) estrategicamente arranjados no casco da embarcação e é responsável pela produção de empuxo necessário na tarefa de posicionamento.

Os propulsores azimutais, muito utilizados em posicionamento dinâmico, são em geral hélices de passo fixo ou variável. Os de passo fixo têm sua velocidade de rotação controlada para permitir a variação de empuxo, e os de passo variável possibilitam variação de empuxo por meio da variação do ângulo das pás. A figura 1.3 mostra o esquema de um propulsor azimutal do tipo hélice e sua montagem no casco de um navio (SCHOTTEL, 2004).

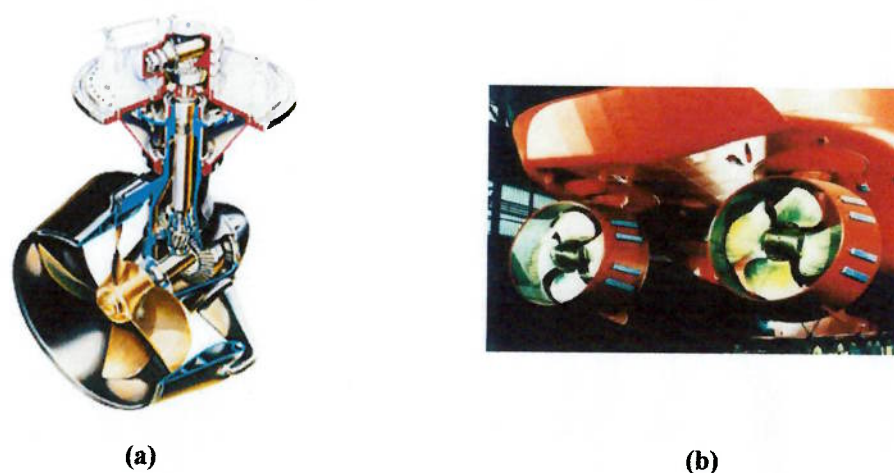


Figura 1.3 – Modelo de um propulsor azimuthal. (a) – esquema do propulsor, (b) montagem do propulsor no casco de um navio (extraído de SCHOTTEL, 2004)

1.1.3. Subsistema de sensoriamento

Composto por sensores responsáveis pelo fornecimento de informações ao controlador para que este acione os propulsores de forma apropriada. Normalmente são empregados mais de um sensor em SPD, com o propósito de garantir uma maior precisão e confiabilidade das medidas, garantindo redundâncias de medidas. Uma descrição a respeito dos diferentes tipos de sensores é encontrada em MOBERG (1983) e alguns exemplos em TANNURI (2002).

1.1.4. Subsistema de potência

A energia fornecida aos propulsores e outros elementos do SPD é fornecida pelo subsistema de potência. O SPD consome uma grande parte de energia produzida pelo subsistema de potência embarcado. O subsistema de potência deve ser flexível o suficiente para suportar variações abruptas de carga, para evitar consumo desnecessário de combustível, além de possibilitar respostas rápidas às variações de cargas.

A estrutura básica de um SPD é apresentada na figura 1.4, extraída e adaptada de HAMAMATSU (2002), TANNURI (2002) e DONHA (1989):

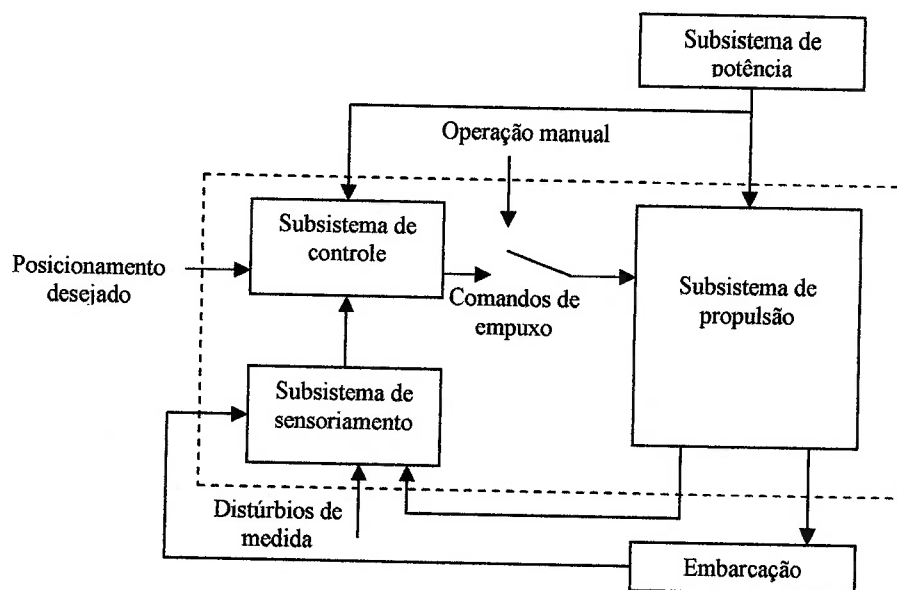


Figura 1.4 – Estrutura Básica do controle da embarcação (extraído em partes de HAMAMATSU, 2002; TANNURI, 2002 e DONHA, 1989).

A figura 1.4 apresenta, além dos subsistemas de um SPD, a entrada dos valores dos “*set points*” e a entrada de comando para operação manual. Nesta figura, o bloco correspondente ao subsistema de potência foi extraído de TANNURI (2002) e a inclusão dos distúrbios de medida, extraído de DONHA (1989).

O algoritmo de alocação de empuxo deve ser capaz de permitir que o conjunto de propulsores atenda algumas especificações como máxima eficiência e maior tempo na posição desejada, muitas vezes conflitantes. Para tanto, é necessário um algoritmo de otimização, onde várias técnicas podem ser aplicadas levando em conta as restrições funcionais impostas pelo SPD ou pelos propulsores em particular, no que diz respeito ao seu arranjo. Sobre a disposição, pode-se destacar o problema da interferência entre dois propulsores, quando um propulsor atua na esteira do outro, ou da interferência casco-propulsor, quando ocorrem as chamadas “zonas mortas”.

A alocação de empuxo é, então, parte integrante do sistema de posicionamento dinâmico. Sendo assim, o SPD evidentemente apresentará bom desempenho quando a alocação de empuxo for realizada de maneira ótima, ou seja, quando os propulsores mantiverem a embarcação próximo à posição desejada, com um baixo consumo de energia. 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.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo estudar mais profundamente o problema de alocação de empuxo. Para tanto, desenvolve-se um algoritmo de otimização baseado no método dos Algoritmos Genéticos, cujos resultados são posteriormente comparados com resultados produzidos por métodos alternativos clássicos, como o método SQP (TANNURI, 2002).

O método dos Algoritmos Genéticos aqui considerado parte da estrutura do SGA (*Simple Genetic Algorithm*) proposto por GOLDBERG (1989), onde uma população inicial é criada aleatoriamente e, através de operações genéticas (seleção, cruzamento e mutação) faz com que os elementos da população convirjam para um valor que otimize uma função objetivo.

O método SQP é um método clássico, que também pode utilizar uma função objetivo. Partindo de um ponto arbitrário, o algoritmo percorre uma direção viável de forma a encontrar uma solução ótima. Uma apresentação mais detalhada sobre os dois métodos será desenvolvida nos Capítulos 2 e 3.

Seja qual for o método utilizado, o problema de otimização de alocação de empuxo consiste, como já mencionado, em determinar o menor consumo de energia possível nos propulsores, ao mesmo tempo em que se deseja manter a embarcação o mais próximo possível do posicionamento desejado. O algoritmo de alocação de empuxo deve distribuir o empuxo de maneira ótima entre os propulsores, determinando adicionalmente seus ângulos de azimute.

1.3. Revisão Bibliográfica

Existe uma vasta bibliografia abordando o tema otimização de sistemas, tanto por algoritmos genéticos como por métodos clássicos.

Os trabalhos de (COELHO, 2002; GEN;CHENG, 1997; GOLDBERG, 1989; OLIVEIRA, 2003) apresentam uma grande quantidade de aplicações usando AG. Em PACHECO (1999) é apresentado um procedimento para cálculos de seleção, aptidão,

cruzamento e mutação, envolvendo uma formulação para decodificação de cromossomos binários e cinco mecanismos de seleção: proporcional, por torneios, com truncamento, por normalização linear e por normalização exponencial.

SOARES (1997) apresenta um apanhado geral sobre algoritmos genéticos com uma discussão a respeito de cada procedimento do algoritmo, além de uma comparação entre os operadores genéticos, um estudo sobre seu desempenho com base nas probabilidades de cruzamento e mutação. Parte dos conceitos apresentados nesta referência (trabalho com esquemas, operadores genéticos envolvendo esquemas, algoritmos) é encontrado também em GOLDBERG (1989).

CHOI, YANG (1998) desenvolveram um trabalho sobre dimensionamento de eixos de rotores divididos em elementos finitos, utilizando AG. As restrições consistiam em limitar os diâmetros dos elementos do rotor em função da sua resistência funcional, e a função objetivo consiste em determinar os valores ótimos para os diâmetros, de forma a elevar a rotação crítica do eixo, mantendo sua massa igual à massa original, antes do redimensionamento dos eixos. A solução deste problema por Algoritmos Genéticos envolveu a utilização de um SGA, proposto por GOLDBERG (1989), onde cada indivíduo representa a massa de um elemento do rotor, em função do seu diâmetro, e a população formada pelo conjunto destes indivíduos. O conjunto de valores para as massas que atende às restrições e ao mesmo tempo satisfaz a função objetivo é então determinado através de um procedimento de otimização dos diâmetros de cada elemento. Um trabalho semelhante foi realizado por YANG, HWANG (2002). Eles mostram como dimensionar uma antepara para um navio, com o objetivo de reduzir a massa total.

HAMIDA, PETROWSKI (2000) propuseram uma modelagem por algoritmos genéticos introduzindo o conceito de mutação logarítmica. Neste modelo é definido um intervalo de perturbação, na vizinhança da região admissível, e o operador de mutação, então, é definido como sendo o logaritmo deste intervalo.

CAVALCANTI, ALSINA, FERNEDA (1999) usam o conceito de Sistema de Controle Inteligente (SCI) integrando Redes Neurais com Algoritmos Genéticos, onde os Algoritmos Genéticos são utilizados para gerar os parâmetros do controlador

e posicionar um pêndulo invertido com peso desconhecido na posição de equilíbrio instável.

No trabalho apresentado por DIAS, VASCONCELOS (2002) é apresentado o conceito de ponderação de funções, onde se pretendeu resolver um problema de otimização com múltiplos objetivos. O conjunto de funções objetivo, juntamente com sua respectiva ponderação, produz uma nova função objetivo, que não possui uma única solução, porém ao ser resolvida por AG, produz a solução de acordo com a ponderação aplicada a cada função isoladamente. O processo desenvolvido neste trabalho é chamado de Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA).

Existem outros trabalhos que destacam aplicações de algoritmos genéticos. Dentre eles estão: NARCISO, LORENA (2002) que descreveram um método chamado Algoritmos Genéticos Construtivos (AGC) para resolver problemas de roteamento e localização. DOLEN, KAPLAN, SEIREG (2000) desenvolveram um projeto de otimização de posicionamento relativo de engrenagens, visando reduzir o vão livre entre seus dentes. CASTRO (2001) de forma similar a SOARES (1997), desenvolveu técnicas voltadas a aplicações em problemas de otimização multi-objetivos. Neste trabalho é desenvolvido um algoritmo cuja finalidade é fazer evoluir um conjunto uniformemente distribuído de soluções para determinar o conjunto ótimo de Pareto do problema tratado.

GIRARD (2003) propôs um sistema de controle para o posicionamento relativo entre embarcações. Normalmente um sistema de posicionamento dinâmico é empregado para manter uma embarcação em uma determinada posição. Nesta referência, o controle é extensivo às distâncias entre os diversos navios e/ou plataformas. Neste processo a maior dificuldade é manter a distância segura entre as embarcações, devido às não linearidades causadas pelos agentes externos.

No trabalho de MASLIAH, MILFRAM (2000) é apresentado uma técnica de controle de alocação de empuxo considerando os graus de liberdade da embarcação, juntamente com um estudo da influência destes graus de liberdade no sistema.

O trabalho apresentado por LAUVDAL, ADNANES (2000) descreve um simulador denominado Integrated Vessel Simulator (IVS) cujo propósito é integrar o controle do posicionamento dinâmico da embarcação com o seu subsistema de

potência. Nesta referência o controle leva em conta a ocorrência de distorções harmônicas, o curto circuito na parte elétrica dos atuadores, além do controle da alocação de empuxo.

O trabalho de KIM (2000) também trata do posicionamento dinâmico de embarcações, onde um observador não linear robusto é desenvolvido utilizando o conceito de modos deslizantes. Além de estimar a velocidade de translação da embarcação, observa as variações de carga ocorridas em função de influência dos agentes externos, filtrando-os de modo a evitar desgastes nos atuadores e alto consumo de potência. Uma solução semelhante foi proposta por SOUSA, FRAGA, MARTINS, PEREIRA (2002) que apresentam uma estrutura de controle para um veículo operado remotamente – *Remotely Operated Vehicle* (ROV).

VAN DIJK, AALBERS (2001) estudam a interferência entre propulsores, a interação entre caso e propulsor, além de levar em conta também o efeito do atrito da água nas diversas partes da embarcação e no próprio propulsor.

KOOREN, QUADVLIJG, AALBERS (2000) desenvolveram um estudo sobre posicionamento dinâmico, comparando sistemas de amarração com sistemas de propulsão, destacando a viabilidade de embarcações com propulsores, e baseado no trabalho de VAN DIJK, AALBERS (2001) descreveram os efeitos da interação entre propulsores.

FOSSSEN, JOHANSEN, FUGLSETH, TONDEL (2003) apresentam um estudo de otimização de alocação de empuxo incluindo, além dos propulsores, um leme para auxiliar no posicionamento. Chegam à conclusão que este problema possui função objetivo não convexa, devendo ser dividido em subproblemas com funções convexas.

FOSSSEN, JOHANSEN, BERGE (2002) desenvolveram uma formulação de otimização de controle, visando reduzir as solicitações de esforços nos componentes do sistema de posicionamento dinâmico. BACKMAYER, WHITCOMB, NAKAMURA, GROSENBAUGH (1997) analisaram a instabilidade de propulsores em funcionamento, considerando as perturbações causadas por variações dinâmicas.

LIANG, CHENG (2004) utilizaram a técnica da Programação Quadrática Seqüencial (SQP) para realizar a alocação de empuxo em propulsores de uma embarcação.

O trabalho de SØRDALEN (2004) tem muita relação com a alocação de empuxo desenvolvida no presente trabalho. Ele definiu as forças de empuxo e ângulos de azimute como dados a serem determinados em função das forças comandadas além de definir as singularidades presentes na matriz de coeficientes das restrições lineares em função dos ângulos de azimute.

SØRENSEN (1997) descreveu um sistema de posicionamento dinâmico onde os propulsores de hélices podem ser: de passo fixo e velocidade de rotação variável; de velocidade de rotação fixa e passo variável, ou uma combinação de ambos, como sendo as características usadas em sistemas de posicionamento convencionais, e apresentam como proposta um sistema de controle baseado no controle do torque dos propulsores e no seu consumo de potência.

O trabalho de EGELAND (2002) apresenta as técnicas de otimização da alocação de empuxo considerando que as forças comandadas são causadas pela ação dos ventos, ondas e correntezas, sendo que as ondas são determinadas com base no efeito médio de ondas de 2º ordem, usando equações hidrodinâmicas para obter seus resultados.

OMERDIC, ROBERTS (2004) apresentam uma técnica híbrida de otimização de alocação, usando o método da pseudoinversa e da programação quadrática. O método da pseudoinversa é usado no processo de alocação, e a viabilidade da solução é analisada quanto às restrições usadas. Se alguma restrição for violada, o método da programação quadrática seqüencial é então usado. O método híbrido, neste caso, foi adotado como forma de agilizar o processo, uma vez que o método da pseudoinversa é bastante rápido frente a outros métodos quando as soluções são admissíveis.

O trabalho de LAUDVAL, SØRENSEN, ÅDNANES, STRAND, HANSEN, SØRDALEN (2000) descreve um sistema integrado de alocação de empuxo, composto por computadores, atuadores e um software de controle, todos desenvolvidos pela ABB (Asea Brown Boveri) sob a marca registrada Marintronics.

CAMPONOGARA (2003) discorre sobre os métodos de otimização, lineares e não lineares, e apresenta um estudo comparativo entre eles, dividindo-os em áreas e subáreas de estudo.

Até o momento da elaboração do presente trabalho não foi encontrada nenhuma referência a respeito de alocação de empuxo por algoritmos genéticos.

1.4. Organização do trabalho

Para alcançar os objetivos pretendidos o trabalho foi subdividido numa parte teórico-descritiva e numa parte de aplicação e análise de resultados. A seguir descreve-se o conteúdo de cada capítulo.

O Capítulo 2 apresenta uma breve descrição sobre os métodos de otimização da alocação de empuxo em propulsores. É apresentado o conceito de algoritmos genéticos e como se comportam na presença de restrições funcionais, e do método SQP, com propostas de implementação colhidas da bibliografia consultada.

No Capítulo 3 é desenvolvida toda a modelagem para a alocação de empuxo, incluindo uma apresentação sobre as forças atuantes, disposição de propulsores no casco da embarcação e incidência de forças comandadas nos propulsores. Um tratamento geométrico é feito na Subseção (3.4.2), visando determinar a interferência entre propulsores. A Subseção (3.5.1) apresenta as alternativas propostas para a geração da população inicial para o problema de alocação de empuxo e os principais operadores genéticos. A Subseção (3.5.2) apresenta a função objetivo geral do problema, contribuição do presente trabalho, onde são definidas ponderações adequadas para penalizar termos durante a alocação de empuxo. A Subseção (3.5.3) apresenta a formulação para o método SQP, juntamente com uma comparação entre os recursos dos algoritmos genéticos a serem empregados no trabalho. O capítulo é finalizado, então, com esta comparação.

No Capítulo 4 é realizado um conjunto de testes com o algoritmo desenvolvido. Neste Capítulo são apresentadas as implicações das diversas ponderações utilizadas na função objetivo, e os resultados são apresentados graficamente. São consideradas duas formas de onda de aplicação de forças

comandadas, tanto para o método dos algoritmos genéticos como para o método SQP. Após a execução dos algoritmos, os resultados são então comparados e comentados.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho a respeito dos resultados obtidos no Capítulo 4, com comentários sobre tais resultados. São apresentadas também as vantagens e desvantagens de cada método. Uma sugestão para trabalhos e pesquisas futuras também é apresentada.

Capítulo 2. Métodos de Otimização Utilizados

2.1. Introdução

Neste capítulo faz-se uma breve introdução sobre os métodos de otimização utilizados no presente trabalho. Primeiro, tratam-se dos algoritmos genéticos e como podem ser usados em problemas de alocação de empuxo. Em seguida, tratam-se dos algoritmos de Programação Quadrática Seqüencial (SQP) e suas aplicações também aos problemas de alocação.

A otimização de um processo ou de uma atividade consiste matematicamente em encontrar o valor extremo de uma função objetivo, podendo estar sujeita a certas restrições funcionais. A forma e o tipo da função objetivo variam muito de acordo com a atividade, podendo ser linear, não linear, contínua ou descontínua, e para se encontrar o valor ótimo em cada caso, uma técnica específica é aplicada. Quando a função apresenta vários picos em um intervalo de busca, o método utilizado para se determinar o valor extremo poderá levar a um extremo local ao invés de um extremo global (SOARES, 1997). Estes métodos são conhecidos por métodos determinísticos, e são baseados nas técnicas da Programação Não Linear, que realizam o procedimento de busca pelo ponto extremo (ótimo) partindo de um ponto arbitrário, seguindo por direções viáveis previamente calculadas, até que um valor dentro de uma faixa estabelecida seja atingido.

Diferentemente dos métodos determinísticos, os algoritmos genéticos operam sobre um conjunto de pontos, chamado de população. A população inicial é gerada aleatoriamente, e cada um dos seus elementos abrangem todo um intervalo admissível para o problema que está sendo tratado. Cada um dos elementos da população é testado na função objetivo, e aqueles que produzirem melhores resultados para a função objetivo (maximização ou minimização) são escolhidos para se reproduzirem, através dos operadores genéticos, na geração seguinte. Devido a sua natureza estatística, o método dos algoritmos genéticos é considerado um método probabilístico, pois parte de um conjunto de elementos que probabilisticamente convergem para o extremo global (SOARES, 1997; GOLDBERG, 1989).

2.2. Método dos algoritmos genéticos

Um algoritmo genético é um algoritmo cujas instruções se baseiam na genética pesquisada por Charles Darwin, ou seja, obedece ao princípio da seleção natural (GOLDBERG, 1989; GEN, CHENG, 1997; SOARES, 1997; COELHO, 2002; PACHECO, 1999; WHITLEY, 2000). A seleção natural é, na verdade, um processo de otimização onde se utiliza uma função objetivo. Os melhores valores são encontrados a partir de um conjunto de valores atribuídos aleatoriamente às variáveis. Este conjunto de valores recebe a denominação de **população inicial**, e cada elemento da população é denominado **indivíduo**. Cada indivíduo na população é testado na função objetivo. Os indivíduos que produzirem os melhores valores para a função objetivo são candidatos a sobreviverem em uma próxima geração, considerados desta forma como indivíduos aptos. Aqueles que produzirem os piores valores tendem a desaparecer, recebendo a denominação de indivíduos inaptos. A fim de se produzir novos indivíduos a partir dos melhores selecionados, com características semelhantes, realiza-se o procedimento de cruzamento entre eles. Nem todos os indivíduos precisam sofrer cruzamento. A quantidade de indivíduos que participarão do cruzamento é determinada por meio de um fator conhecido por probabilidade de cruzamento. Finalmente, para produzir uma variedade maior, evitando a convergência prematura, os indivíduos são submetidos a uma outra operação chamada mutação, onde teoricamente ocorre troca de material genético, e matematicamente ocorre uma variação numérica no indivíduo, suficientemente pequena para não dispersar a população. Este procedimento é repetido um número de vezes, ou de gerações, até que todos os indivíduos da população convirjam para o melhor valor, dentro de uma faixa de incerteza determinada no algoritmo.

No problema de otimização da alocação de empuxo, a população inicial gerada 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. Para que o SPD utilize sua tarefa a contento é necessário que as forças e momentos comandados pelo controlador sejam produzidas fidedignamente, no subsistema de propulsão. Além de produzir o empuxo necessário para a realização da tarefa do SPD, a produção de empuxo deve ocorrer de forma ótima. Assim, o controlador deve alocar de forma ótima o empuxo a ser produzido em cada propulsor. Em outras palavras, a

diferença entre as forças comandadas e geradas nos propulsores deve ser o mais próximo possível de zero e este procedimento deve ser ideal, de acordo com os objetivos estabelecidos. A execução do algoritmo primeiro seleciona os indivíduos que mais aproximam esta diferença de zero. Por meio dos operadores genéticos, produzem-se novos indivíduos, até que o conjunto destes indivíduos apresente convergência (GOLDBERG, 1989; GEN, CHENG, 1997; SOARES, 1997; WHITLEY, 2000). Considerando-se que eventualmente pode haver mais de uma solução, é selecionada, por exemplo, aquela que apresentar o menor consumo de energia nos propulsores.

O equacionamento usando o método dos algoritmos genéticos possui, desta forma, uma função objetivo e tantas restrições quantas forem necessárias ao problema de alocação de empuxo. A solução do problema é realizada incluindo-se as restrições na função objetivo, por meio do método das penalidades ou das barreiras (BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 1993). A seguir serão mostradas as considerações sobre restrições, na elaboração da formulação por algoritmos genéticos.

2.2.1. Considerações sobre restrições

Como todo problema de otimização, a função objetivo a ser otimizada pode ou não estar submetida a restrições funcionais. Um conjunto de valores será a solução do problema quando atingir um valor ótimo. Havendo restrições funcionais a considerar, o problema é resolvido aplicando-se o método das penalidades ou o método das barreiras (BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 1993; ARORA, 1989) que consistem em incluir na função objetivo as restrições, de forma a transformá-la em um problema sem restrições. MORALES, GARCIA (2002) estudaram 5 formas de obter funções de penalidades a serem resolvidas pelo método dos algoritmos genéticos, aplicáveis também aos métodos clássicos. Cada uma das 5 estratégias parte da formulação básica:

$$F(\mathbf{x}) = \begin{cases} f(\mathbf{x}) & \mathbf{x} \in \text{região factível} \\ f(\mathbf{x}) + \text{penalidade}(x) & \mathbf{x} \notin \text{região factível} \end{cases} \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, \mathbf{x} é o vetor contendo as variáveis funcionais. As 5 estratégias estudadas foram:

- Método H (Homaiffar's) – Define níveis de penalidade dependendo da ordem de grandeza de violação para as restrições. A definição destes níveis implica na definição de intervalos para cada restrição violada e um valor de penalidade para cada intervalo.
- Método J (Joines & Houck's) – Neste método, a função de penalidade é modificada à medida em que o algoritmo genético é executado, ou seja, ela varia de acordo com o número de gerações.
- Método S (Schoenauer & Xanthaki's) – Além de definir a função de penalidade, este método define também um algoritmo capaz de encontrar indivíduos a partir da avaliação da restrição como sendo funções de aptidão, eliminando os indivíduos que não atendem a estas restrições. Este método, no entanto, considera um elevado elitismo na seleção dos indivíduos, o que pode produzir a perda de indivíduos contendo informações importantes no processo de cruzamento e mutação (OLIVEIRA; LORENA, 2003). Elitismo é um procedimento de seleção dos melhores indivíduos, descartando-se os demais, mesmo para as operações genéticas futuras.
- Método P (Powell & Skolnick's) – Este método opera no sentido de eliminar os pontos não factíveis. A função de penalidade é definida como:

$$P(\mathbf{x}) = r \sum f_j(\mathbf{x}) + \rho(\mathbf{x}, t) \quad (2.2)$$

onde

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \max \left\{ 0, \max \{f(\mathbf{x})\} - \min \{f(\mathbf{x})\} + \sum_{j=1}^p f_j(\mathbf{x}) \right\},$$

r é uma constante de proporcionalidade

p é o número de restrições.

- Método K (Kuri's) – Este é o mais simples de todos os métodos e consiste na definição da função de penalidade como:

$$P(\mathbf{x}) = \begin{cases} \left[K - \sum_{i=1}^s \frac{K}{p} \right] - f(\mathbf{x}), & s \neq p \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (2.3)$$

K é uma constante suficientemente grande no problema que garanta a não permanência de uma variável não factível, p é o número total de restrições e s o número de restrições satisfeitas.

O principal problema para construção de algoritmos evolutivos eficientes para problemas com restrições reside na forma de se tratar (evitar, manter e avaliar) as soluções não viáveis. Quando se trabalha apenas com restrições de intervalos constantes, tem-se efetivamente um espaço de busca convexo. Entretanto, restrições não lineares podem formar espaços de busca razoavelmente complexos (OLIVEIRA; LORENA, 2003). Há duas abordagens básicas para manipulação de soluções não viáveis:

- modificar o conjunto de operadores genéticos para não haver violação de restrição;
- penalizar soluções que violem alguma restrição.

Penalizar indivíduos não viáveis significa determinar ponderações a cada restrição que for violada pela solução que ele representa. Isto tende a reduzir a aptidão desse indivíduo e, conseqüentemente, sua probabilidade de participar do processo de evolução (seleção e cruzamento). Descartar soluções não viáveis é interessante quando o espaço de busca é convexo. Em espaços mais complexos, as soluções não viáveis têm importância na determinação de novos indivíduos viáveis, em uma nova geração, pois possuem informações genéticas a respeito deles. Nestes casos, o simples descarte do indivíduo pode causar convergência prematura ou perda de indivíduos importantes na aplicação dos operadores genéticos.

RUNARSSON, YAO (2000) tratam os problemas de otimização por algoritmos genéticos em termos de dominância entre função objetivo e funções de penalidade. Considerando que o vetor \mathbf{x} na equação 2.1 represente uma população, define-se

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{n_{ind}}] \quad (2.4)$$

e o conjunto de funções de penalidade na ordem:

$$F(x_1) \leq F(x_2) \leq \dots \leq F(x_{n_{prop}}) \quad (2.5)$$

Foi definido o parâmetro r_i como sendo

$$r_i = (f(x_i) - f(x_{i-1})) / (\phi_i - \phi_{i-1}) \quad (2.6)$$

onde ϕ_i e ϕ_{i-1} são os termos de penalidade em duas iterações sucessivas, $f(x_{i-1})$ e $f(x_i)$ são, respectivamente, os valores da função objetivo, também em duas iterações sucessivas. O resultado r_i obtido em (2.6) determina a dominância da função de penalidade sobre a função objetivo (Ver RUNARSSON, YAO, 2000).

A formulação desenvolvida no presente trabalho (a ser apresentada no Capítulo 3) não considerou nenhuma das formulações anteriores em particular. O conceito de dominância da função objetivo, por exemplo, foi utilizado como modelo para estabelecer critérios de ponderações para a função objetivo, que inclui os termos referentes às restrições. Outras técnicas pesquisadas também serviram de base para a elaboração das formulações para o presente trabalho.

2.3. Método da Programação Quadrática Seqüencial (SQP)

A forma geral de um problema de otimização é

$$\begin{aligned} & \text{Otimizar } f(\mathbf{x}) \\ & g(\mathbf{x}) \leq 0 \\ \text{sujeito a: } & h(\mathbf{x}) = 0 \\ & x \in \mathfrak{R}^n \end{aligned} \quad (2.7)$$

onde $g(\mathbf{x})$ representa o conjunto de restrições de desigualdade e $h(\mathbf{x})$, o conjunto de restrições de igualdade. Para que um vetor \mathbf{x}^* seja ponto extremo (máximo ou mínimo) e regular das restrições de igualdade, devem existir $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ e $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ reais tais que:

$$\nabla f(\mathbf{x}^*) + \sum \lambda_i \nabla h_i(\mathbf{x}^*) + \sum \mu_j \nabla g_j(\mathbf{x}^*) = 0 \quad (2.8)$$

Na equação, os termos λ_i e μ_j são, respectivamente, os Multiplicadores de Lagrange das restrições de igualdade e de desigualdade, respectivamente. Os multiplicadores λ_i não possuem restrição de sinal, mas os multiplicadores μ_j devem ser não negativos (ARORA, 1989).

A equação (2.8) é chamada de Condição Necessária de 1ª Ordem para Extremo Local. Além disso, considerando o vetor \mathbf{y} como sendo elemento pertencente ao conjunto \mathbf{M} , domínio de $h(\mathbf{x})$, define-se:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \{ \mathbf{y} : \nabla h_i(\mathbf{x}^*) \mathbf{y} = 0, \nabla g_j(\mathbf{x}^*) \mathbf{y} = 0 \} \quad j \in J_0(\mathbf{x}^*) \\ &\text{com} \\ J_0(\mathbf{x}^*) &= \{ j : g_j(\mathbf{x}^*) = 0 \} \end{aligned} \quad (2.9)$$

e, a partir de \mathbf{y} na equação (2.10),

$$\mathbf{y}^T (\nabla^2 f(\mathbf{x}^*) + \sum \lambda_i \nabla^2 h_i(\mathbf{x}^*) + \sum \mu_j \nabla^2 g_j(\mathbf{x}^*)) \mathbf{y} \geq 0 \quad (2.10)$$

que é a Condição Necessária de 2º Ordem para Extremo Local.

A solução empregada mais extensivamente para problemas que seguem a forma geral apresentada na equação (2.7) é a solução baseada no método da Programação Quadrática Sequencial (*Sequential Quadratic Programming - SQP*). As condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker - KKT (ARORA, 1989; BAZARAA, SHERALI, SHETTY, 1993; HILLIER, LIEBERMAN, 1995; CAMPONOGARA, 2003) são aplicadas de maneira iterativa, e a cada iteração principal do método é realizada uma aproximação para a programação quadrática, que fornece a direção viável de busca, e uma aproximação da matriz Hessiana é atualizada através do método BFGS conforme equação 2.14 (BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 1993).

O problema de Programação Quadrática resolvido a cada iteração do método SQP é, então, uma aproximação do problema original com restrições lineares e função objetivo quadrática. Para um problema de minimização, a formulação é

$$\min f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T \mathbf{d} + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \nabla^2 L(\mathbf{x}) \mathbf{d} \quad (2.11)$$

sujeito às restrições

$$\begin{aligned} g_i(\mathbf{x}) + \nabla g_i(\mathbf{x})^T \mathbf{d} &\leq 0 \\ h_i(\mathbf{x}) + \nabla h_i(\mathbf{x})^T \mathbf{d} &= 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

onde a função de Lagrange L é definida como

$$L(\mathbf{x}) \stackrel{\Delta}{=} f(\mathbf{x}) + \lambda^T h(\mathbf{x}) + \mu^T g(\mathbf{x}) \quad (2.13)$$

sendo λ o vetor contendo os Multiplicadores de Lagrange para as restrições de igualdade e μ o vetor contendo os multiplicadores de Lagrange para as restrições de desigualdade, ou valores das constantes provenientes das condições de *Karush-Kuhn-Tucker* (KKT) (ARORA, 1989; BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 1993).

Na equação (2.11) o Hessiano $\nabla^2 L(\mathbf{x})$ é substituído por sua aproximação H_k , chamada de aproximação BFGS (Broyden – Fletcher – Goldfarb - Shanno):

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T p_k} - \frac{H_k p_k p_k^T H_k}{p_k^T H_k p_k} \quad (2.14)$$

onde:

$$p_k = x_{k+1} - x_k$$

$$q_k = \nabla f(x_{k+1}) + \lambda^T \nabla h(x_{k+1}) - (\nabla f(x_k) + \lambda^T \nabla h(x_k))$$

A solução do subproblema de Programação Quadrática produz um vetor com a direção viável d_k que é usado para formar a nova iteração

$$x_{k+1} = x_k + \alpha d_k \quad (2.15)$$

Uma direção viável é determinada pela escolha de α de modo que a seguinte função de penalidades (também chamada de função de mérito) é minimizada:

$$\Psi(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \rho \left[\sum_{i=1}^p |h_i(\mathbf{x})| + \sum_{i=1}^m \max\{0, g_i(\mathbf{x})\} \right] \quad (2.16)$$

onde ρ é o fator de penalidade. Este subproblema de direção viável ajuda a melhorar a convergência do algoritmo SQP e ajuda a eliminar possíveis conflitos durante a redução da função objetivo e na viabilidade das restrições.

SØRDALEN (2004) desenvolveu um trabalho de alocação de empuxo, verificando as condições de equilíbrio da embarcação.

No seu trabalho considerou as forças comandadas pelo controlador:

$$\tau_c = \begin{bmatrix} \tau_{xc} & \tau_{yc} & \tau_{\psi c} \end{bmatrix}^T \quad (2.17)$$

onde τ_c , τ_{xc} , τ_{yc} e $\tau_{\psi c}$ são respectivamente, a força total comandada, a componente da força comandada na direção x (em *surge*), a força comandada na direção y (em *sway*) e o momento comandado em torno do centro de gravidade ψ (em *yaw*). As notações usadas são as mesmas extraídas do trabalho mencionado.

A partir das forças comandadas, determinam-se as forças de propulsão e os ângulos de azimute, de acordo com as equações:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & \dots & T_{n_{prop}} \end{bmatrix}^T \quad (2.18)$$

e

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_{n_{prop}} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

sendo \mathbf{T} o vetor com as forças de propulsão em cada propulsor, n_{prop} é o número de propulsores, α é o vetor com os n_{prop} ângulos de azimute para cada um dos n_{prop} propulsores. As forças e os ângulos são determinados de forma que a diferença

$$|\mathbf{A}(\alpha)\mathbf{T} - \tau_c| \quad (2.20)$$

seja mínima. A matriz $\mathbf{A}(\alpha)$ contém os coeficientes das componentes das forças de empuxo, em função do ângulo de azimute, e τ_c é o vetor das forças comandadas. Além disso, $|\mathbf{T}|$ deve ser mínimo o suficiente para minimizar o consumo de combustível.

As considerações nesta formulação são:

1. Os valores singulares de $\mathbf{A}(\alpha)$ devem ser pequenos,

2. A expressão $\mathbf{A}(\alpha)\mathbf{T} = \tau$ considera que a diferença dada pela equação 2.20 seja nula, e uma pseudo inversão produz altos ganhos e elevados valores de empuxo, e
3. $\det(\mathbf{A}(\alpha_i)) = -\det(\alpha_i - \pi)$, onde i é um propulsor dentre os n_{prop} propulsores.
4. existe um ângulo de azimute k onde $\det(\mathbf{A}(\alpha_k)) = 0$

A configuração singular neste caso exige que haja 3 propulsores por causa dos critérios colocados nos itens 3 e 4.

A decomposição da matriz \mathbf{A} é realizada como sendo:

$$\mathbf{A} = \mathbf{USV}^T \quad (2.21)$$

onde \mathbf{U} e \mathbf{V} são matrizes ortogonais, tais que:

- as colunas de \mathbf{U} são os autovetores de \mathbf{AA}^T
- as colunas de \mathbf{V} são os autovetores de $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$
- $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{n_{prop}} \end{bmatrix}$, com $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{n_{prop}} > 0$
- $\sigma_i = \sqrt{\lambda(\mathbf{A}^T\mathbf{A})_i}$, sendo $\lambda(\mathbf{A}^T\mathbf{A})$ o conjunto de autovalores de $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$.

Devido a singularidade da matriz \mathbf{A} , não é possível obter sua inversa. Sendo assim, a pseudo inversa de \mathbf{A} é dada por:

$$\mathbf{A}^+ = \mathbf{VS}^+\mathbf{U}^T \quad (2.22)$$

com

$$\mathbf{S}^+ = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{n_{prop}}} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

A solução proposta neste trabalho considera o comportamento das soluções frente às singularidades da matriz $\mathbf{A}(\alpha)$. Os resultados do experimento realizado podem ser encontrados em SØRDALEN (2004).

No trabalho de LIANG, CHENG (2002) é apresentada uma formulação semelhante, no aspecto do equilíbrio da embarcação. Neste trabalho, as forças comandadas (em *surge* e *sway*) são válidas quando maiores ou iguais às forças comandadas. O momento comandado, ao contrário, deve ser igual ao produzido pelos propulsores:

$$\begin{aligned} F_x - \sum_{i=1}^{n_{prop}} T_i \cos \alpha_i &\geq 0 \\ F_y - \sum_{i=1}^{n_{prop}} T_i \text{sen} \alpha_i &\geq 0 \\ M_z - \left(y_i \sum_{i=1}^{n_{prop}} T_i \cos \alpha_i + x_i \sum_{i=1}^{n_{prop}} T_i \text{sen} \alpha_i \right) &= 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

onde x_i e y_i são as coordenadas de cada um dos n_{prop} propulsores, F_x e F_y são as forças comandadas em *surge* e *sway*, respectivamente, M_z é o momento de *yaw*, T_i é a força de empuxo no propulsor i , α_i é o ângulo de azimute referente ao propulsor i . Neste trabalho a prioridade foi estabelecida com relação aos momentos. O objetivo é minimizar a soma das forças de empuxo em cada propulsor:

$$\min f(\mathbf{X}) = \left(\sum_{i=1}^{n_{prop}} T_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^{n_{prop}} T_i \text{sen} \alpha_i \right) \quad (2.25)$$

onde

$$\mathbf{X} = [T_1 \quad \alpha_1 \quad T_2 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad T_{n_{prop}} \quad \alpha_{n_{prop}}] \quad (2.26)$$

O presente trabalho tem por objetivo a minimização do consumo total de potência e não simplesmente minimizar as forças de empuxo, como proposto no trabalho de LIANG, CHENG (2002).

Além destes trabalhos, existem outros que tratam da formulação da alocação de empuxo através de critérios semelhantes. Dentre eles, destacam-se os trabalhos de SØRENSEN (1997), já apontado no capítulo anterior;

Será apresentado, no Capítulo 3, a formulação para a alocação de empuxo considerada no presente trabalho, como sendo o equilíbrio das três forças comandadas (duas forças e um momento) e os critérios usados para se obter a mínima potência.

Capítulo 3. Modelagem da Alocação de Empuxo

3.1. Introdução

Neste capítulo será desenvolvida a formulação da otimização da alocação de empuxo pelo método dos Algoritmos Genéticos e pelo método da Programação Quadrática Sequencial (SQP). Serão apresentados também os detalhes de cada um dos métodos.

A alocação de empuxo consiste na distribuição ótima de forças de controle entre os propulsores da embarcação, de modo que ela permaneça em torno da posição desejada, conforme descrito em (1.1). Para propulsores azimutais, além das forças, os ângulos de azimute também são determinados durante o processo de alocação de empuxo. O valor das forças e momentos de empuxo é determinado pelo controlador, a partir de leis de controle diversas (DONHA, 1983; DONHA, 1989; DONHA, 2000; TANNURI, 2002; BARROS, 1990). É o próprio controlador que distribui o empuxo necessário a ser produzido nos propulsores de forma ótima através de um algoritmo de alocação de empuxo.

A figura 3.1 apresenta a incidência das forças resultantes dos agentes externos sobre a embarcação, e do ângulo ψ que a mesma forma com a horizontal.

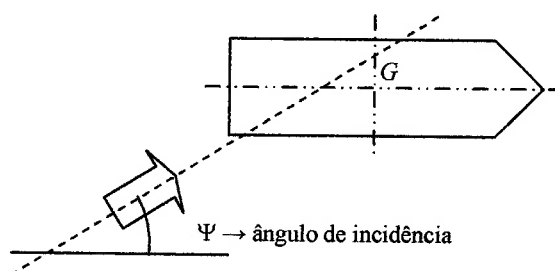


Figura 3.1 – Incidência das forças externas sobre a embarcação

O controlador determina as forças de empuxo que devem ser produzidas pelos propulsores e as aloca entre eles.

Nas seções seguintes serão apresentadas as características da embarcação para a qual vai se desenvolver o algoritmo de alocação de empuxo. Serão apresentados também os critérios para alocação de empuxo. Para tanto será desenvolvida uma função objetivo a ser minimizada, levando em conta as restrições funcionais impostas pelo sistema. Para a alocação de empuxo, as restrições funcionais são:

- 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 minimização da função objetivo será implementada e testada através de dois algoritmos. O primeiro, cujo desenvolvimento é a contribuição deste trabalho, será elaborado usando o método dos Algoritmos Genéticos (AG). O segundo algoritmo é baseado no método *Sequential Quadratic Programming* (SQP), parcialmente implementado em (TANNURI, 2002) e usado no presente trabalho como parâmetro de comparação para o primeiro algoritmo (AG).

3.2. Sistemas de referência

Na modelagem da alocação de empuxo são considerados dois referenciais. As forças comandadas pelo controlador se referem ao referencial móvel, fixo à embarcação, mas a posição e aproamento são medidos relativamente ao referencial fixo a Terra.

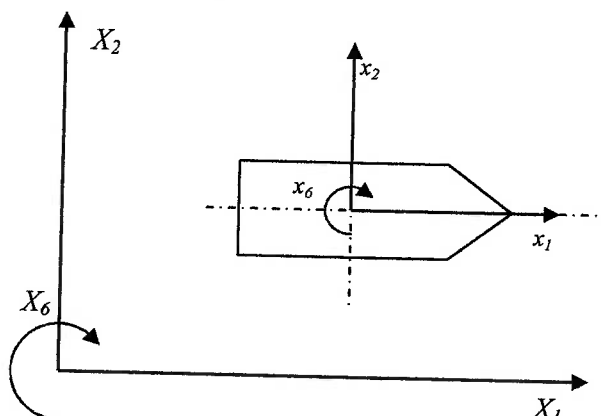


Figura 3.2 – Sistemas de referência usados na modelagem da alocação de empuxo

A figura 3.2 mostra apenas as coordenadas x_1 , x_2 e x_6 , consideradas no procedimento de posicionamento dinâmico. Em outras palavras, somente as forças e momentos atuantes nestas coordenadas (*surge*, *sway* e *yaw*, respectivamente) são contempladas no SPD. As demais forças são desconsideradas pelo SPD (McKINVEN, 2001).

As forças F_1 e F_2 são as componentes da projeção da força de empuxo comandada nas direções de x_1 e x_2 , respectivamente.

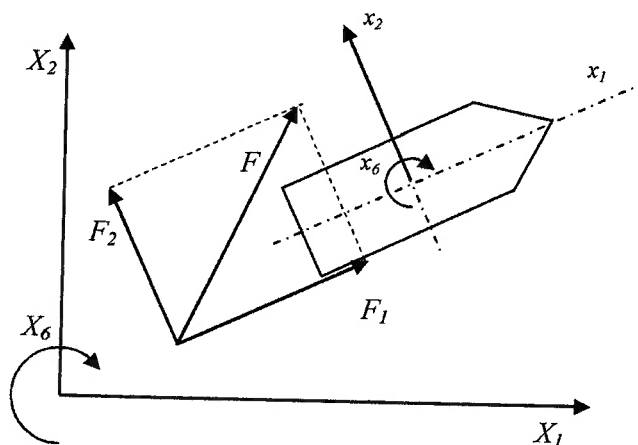


Figura 3.3 – Atuação das forças comandadas sobre a embarcação

A figura 3.3 mostra a ação das forças F_1 (*surge*) e F_2 (*sway*) comandadas pelo controlador. A força F , resultante de F_1 e F_2 pode produzir também um momento de aproamento (*yaw*).

3.3. Alocação de empuxo nos propulsores

A modelagem da alocação de empuxo em função das forças comandadas leva em conta:

- a quantidade de propulsores na embarcação,
- o arranjo dos propulsores, ou seja, sua posição em relação ao centro de gravidade da embarcação,
- o ângulo de cada propulsor em relação a um referencial angular. Este é o ângulo de azimute,

A figura 3.4 ilustra um casco de um navio hipotético com quatro propulsores, com suas coordenadas indicadas.

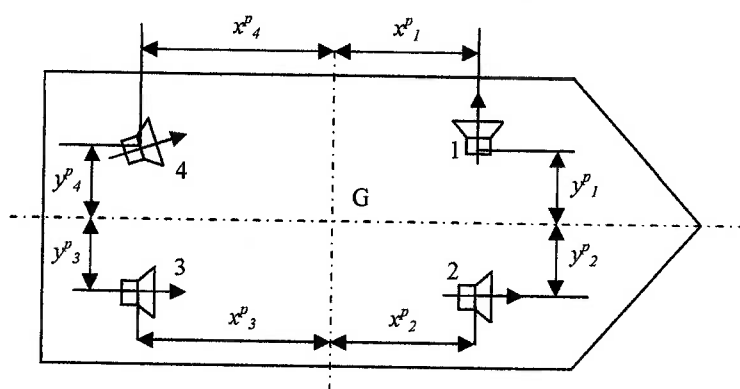


Figura 3.4 – Distribuição dos propulsores no casco da embarcação

No presente trabalho será assumido como linha de referência para ângulos de azimute a linha horizontal paralela à coordenada x_i , com sentido anti horário como positivo. A figura 3.5 mostra a força $T_{x_{1,i}}$, alinhada com a coordenada x_i que também é referência para o ângulo α^p_i . Na figura, o índice i indica o número do propulsor.

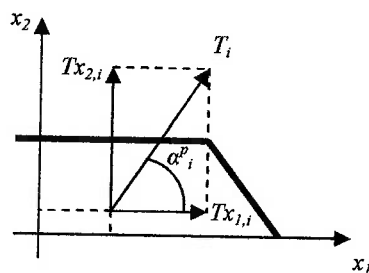


Figura 3.5 – Definições das forças para propulsores azimutais

3.4. Modelagem

As forças e momentos comandados são representadas pelo vetor:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_6 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Considerando-se o caso de equilíbrio estático a relação de \mathbf{F} com as componentes das forças e momentos de propulsão (\mathbf{T}) é linear e dada pela equação:

$$\mathbf{AT} = \mathbf{F} \quad (3.2)$$

sendo

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

e

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

A equação 3.2 representa a situação de equilíbrio estático da embarcação, onde tanto as componentes das forças de empuxo como os momentos comandados e produzidos são iguais. Mas nem sempre este é o caso. Muitas vezes, dependendo das forças comandadas, é possível equilibrar as forças nas direções das suas componentes mas não equilibrar o momento. Em outras situações pode ocorrer o contrário, ou seja, atender ao equilíbrio do momento, mas não equilibrar as forças comandadas com o empuxo produzido.

Outra situação possível freqüentemente é a ocorrência de múltiplas soluções, quando a potência comandada pelo controlador é menor que a potência instalada para propulsão, como apresentado no Apêndice.

Com um maior número de propulsores é possível obter um maior número de configurações para forças, que controlam a embarcação. Este fato permite introduzir outra grandeza envolvida na alocação de empuxo: o consumo de energia ou de potência nos propulsores.

3.4.1. Energia consumida pelos propulsores

No posicionamento dinâmico, um objetivo importante é a economia de combustível durante uma tarefa. Neste caso, a alocação de empuxo deve envolver a minimização de uma função objetivo sujeita a um conjunto de vínculos.

A potência consumida pelos propulsores pode ser avaliada pela seguinte expressão (SINDING, ANDERSEN, 1998):

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

Potência é definida como o produto da força pela velocidade e, neste caso, a equação 3.5 representa uma aproximação da potência para o propósito de alocação de empuxo, e o valor obtido por esta equação será considerado ao logo deste trabalho.

A equação 3.2 pode produzir um sistema indeterminado, como já mencionado, fornecendo várias configurações de forças, sendo que algumas delas podem produzir valores para a potência (equação 3.5) muito próximos.

3.5. Elementos da formulação do problema de minimização

A equação 3.2 isoladamente não representa todo o conjunto de restrições do problema de minimização. Ela é utilizada para determinação das forças de empuxo e momento da embarcação frente às forças comandadas, representando assim a situação ideal de ação sobre a embarcação. Como mencionado em (3.3), as equações obtidas a partir da equação 3.2 podem ter as parcelas do equilíbrio das componentes das forças satisfeitas, mas não ter satisfeita a parcela referente ao momento, ou vice versa. Além disso, apesar da equação 3.2 representar um vínculo de igualdade, ela

pode ter inúmeras soluções, ou, dependendo da disposição dos propulsores e do momento comandado, não ter nenhuma solução. Assim, a equação 3.2 pode ser reescrita da seguinte forma:

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

e assim um novo objetivo é definido, além da minimização da potência.

A solução do problema consiste, portanto, na determinação das componentes das forças que minimizem ΔF e P , além de atender às restrições funcionais apresentadas a seguir.

3.5.1. Saturação dos propulsores

A força de empuxo total disponível nos propulsores pode ser menor que a força comandada pelo controlador, o que indica que algum ou alguns propulsores estão produzindo seus empuxos máximos, quando se diz que saturaram. Individualmente, cada propulsor produz uma força de empuxo, cuja magnitude é dada pela equação seguinte:

$$T_i = \sqrt{Tx_{1,i}^2 + Tx_{2,i}^2}, \quad i = 1, \dots, n_{prop} \quad (3.7)$$

Cada propulsor possui uma capacidade de produção de empuxo, de modo que a seguinte relação deve ser satisfeita:

$$T_i \leq T_{máx,i}, \quad i = 1, \dots, n_{prop} \quad (3.8)$$

sendo $T_{máx}$ a força máxima de empuxo na saturação. No presente trabalho os propulsores serão considerados todos iguais, de forma a possuírem o mesmo valor para $T_{máx}$.

Como dito anteriormente, pode ocorrer que as forças comandadas sejam superiores à capacidade instalada para propulsão.

Quando isso acontece, mesmo que os propulsores tenham atingido seu valor de saturação, a embarcação não é adequadamente controlada pelas forças geradas nos propulsores e pode ficar à deriva, com possíveis conseqüências catastróficas. Neste caso, o momento produzido pela embarcação deve ser priorizado por questão de segurança.

3.5.2. Interferência entre dois propulsores

A interferência entre dois propulsores ocorre quando eles se encontram relativamente próximos e com inclinação entre suas linhas de ação abaixo de um ângulo limite. A figura 3.6 mostra dois propulsores com suas linhas de ação formando um ângulo α entre si.

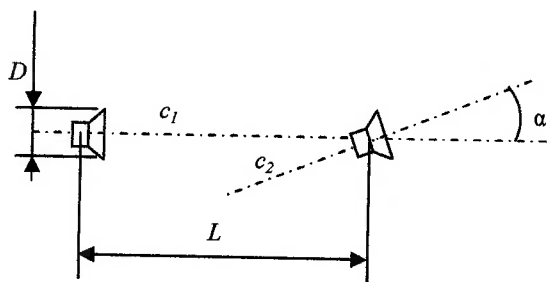


Figura 3.6– Interferência entre dois propulsores. O ângulo α é o ângulo de interferência entre eles, obtido pelas linhas de ação c_1 e c_2

O ângulo α é medido através da posição relativa entre estas duas linhas de ação, e seu valor é determinante na verificação da interferência entre os propulsores. Se existir interferência, a eficiência dos propulsores fica comprometida. Quanto à distância L , MOBERG; HELLSTRÖM (1983) concluíram que quando ela é maior que vinte vezes o diâmetro do propulsor, o efeito da interferência é irrelevante, ou seja, o efeito da interferência ocorre quando:

$$L < 20.D \quad (3.9)$$

onde L é a distancia entre os propulsores e D , o diâmetro do propulsor.

O cálculo da interferência deve levar em conta não só a linha de ação dos propulsores, mas também o sentido das suas esteiras. A figura 3.7 mostra duas situações críticas a respeito da interferência, onde as linhas de ação coincidem com a linha de união entre eles.

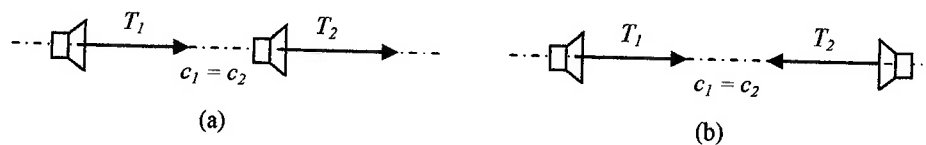


Figura 3.7 – Dois propulsores alinhados através das suas linhas de ação. (a) Linhas de ação no mesmo sentido, (b) Linhas de ação em sentidos opostos.

Quando não estão alinhados, dois propulsores podem estar próximos sem que haja interferência, como mostrado na figura 3.8:

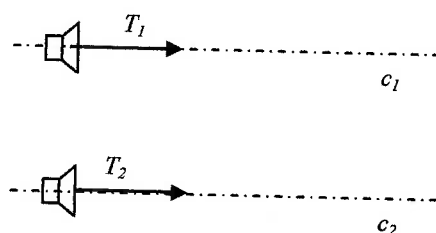


Figura 3.8 – Dois propulsores próximos que não interagem entre si.

Sendo assim, levando-se em conta uma disposição genérica dos propulsores como ilustrado na figura 3.9, é imprescindível considerar a linha que une os centros dos propulsores como base para o cálculo da interferência.

Assumindo que dois propulsores estejam alinhados conforme a figura 3.7, com a linha de ação coincidindo com a linha de união dos centros dos propulsores, é possível determinar o ângulo α (figura 3.6) através da equação:

$$\alpha = |\alpha^{p_1} - \alpha^{p_2}| \quad (3.10)$$

onde α^{p_1} e α^{p_2} são os ângulos de azimute, desde que pelo menos um destes ângulos seja nulo, e que o outro meça, no máximo, 180° .

Para que não haja interferência,

$$\alpha > \gamma \quad (3.11)$$

onde γ é o ângulo limite de interferência. Por exemplo, se $\gamma = 15^\circ$, significa que quaisquer valores de α acima de 15° não produzirão interferência considerável.

Se, por exemplo, os ângulos α^{p_1} e α^{p_2} forem iguais e medirem 90° , a aplicação da equação 3.10 produz $\alpha = 0$, indicando interferência máxima, de acordo com a figura 3.6. Isso mostra que a equação 3.10 não funciona para quaisquer valores de α^{p_1} e α^{p_2} . Torna-se, então, necessário determinar uma expressão genérica para o cálculo da interferência entre os propulsores.

Inicialmente, considere-se um par de propulsores como indicado na figura 3.7b, com suas esteiras na mesma direção e sentidos opostos. A aplicação da equação 3.10 fornece $\alpha = 180^\circ$ que, de acordo com a equação 3.11, não apresenta interferência, mas a figura claramente mostra que sim. Neste caso o ângulo de azimute é o ângulo formado pela linha de ação do propulsor em relação à linha que une os centros dos propulsores envolvidos na interferência, independentemente do sentido do empuxo. O cálculo da interferência é realizado, desta forma, pela equação:

$$\alpha = \alpha^{p_1} + \alpha^{p_2} \quad (3.10a)$$

desde que a linha que une os propulsores seja o sistema de referência para o ângulo de azimute.

A seguir será apresentado o cálculo do ângulo de azimute para um arranjo genérico entre dois propulsores. A figura 3.9 ilustra este arranjo. Na figura 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.

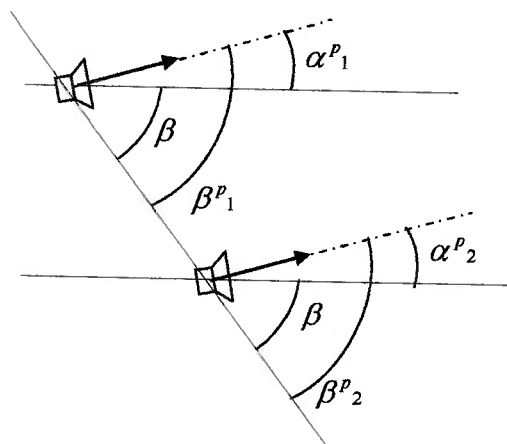


Figura 3.9 – Mudança de referencial para o ângulo de azimute.

Generalizando, dois propulsores quaisquer i e j possuem uma linha $c_{i,j}$ unindo-os. A linha $c_{i,j}$ produz um novo referencial angular para os ângulos de azimute, que será chamado de referencial relativo. A transformação de coordenadas, do sistema local para o sistema relativo é realizada adicionando-se ao ângulo de azimute o ângulo β , através das seguintes expressões:

$$\begin{aligned}\beta^{p_i} &= \alpha^{p_i} + \beta \\ \beta^{p_j} &= \alpha^{p_j} + \beta\end{aligned}\quad (3.12)$$

Havendo mais de dois propulsores, as interferências devem ser calculadas para cada dois propulsores.

Como é importante levar-se em conta o sentido do empuxo no cálculo na interferências (figura 3.7), a soma na equação 3.10 deverá considerar os ângulos no primeiro quadrante. Isso é verdade, pois se os propulsores estiverem com seus fluxos em sentidos opostos, o valor de α será superior a γ (ângulo limite de interferência) e mesmo assim ocorrerá interferência. A figura 3.7(b) ilustra este fato.

O ângulo de azimute em relação à linha $c_{i,j}$ para um propulsor pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\theta_i = k_1 (k_2 \cdot 180 - \beta^{p_i}) \quad i = 1, \dots, n_{prop} \quad (3.13)$$

onde:

$$k_1 = \begin{cases} -1, & \text{se } (0^\circ < \beta^p_i \leq 90^\circ) \text{ ou } (180^\circ < \beta^p_i \leq 270^\circ) \\ 1, & \text{para os demais ângulos} \end{cases}$$

e

$$k_2 = \begin{cases} 0, & \text{se } (0^\circ < \beta^p_i \leq 90^\circ) \\ 1, & \text{se } (90^\circ < \beta^p_i \leq 270^\circ) \\ 2, & \text{para os demais ângulos} \end{cases}$$

Desta forma, a equação 3.10a para dois propulsores por exemplo, pode ser reescrita como:

$$\alpha = \theta_1 + \theta_2 \quad (3.14)$$

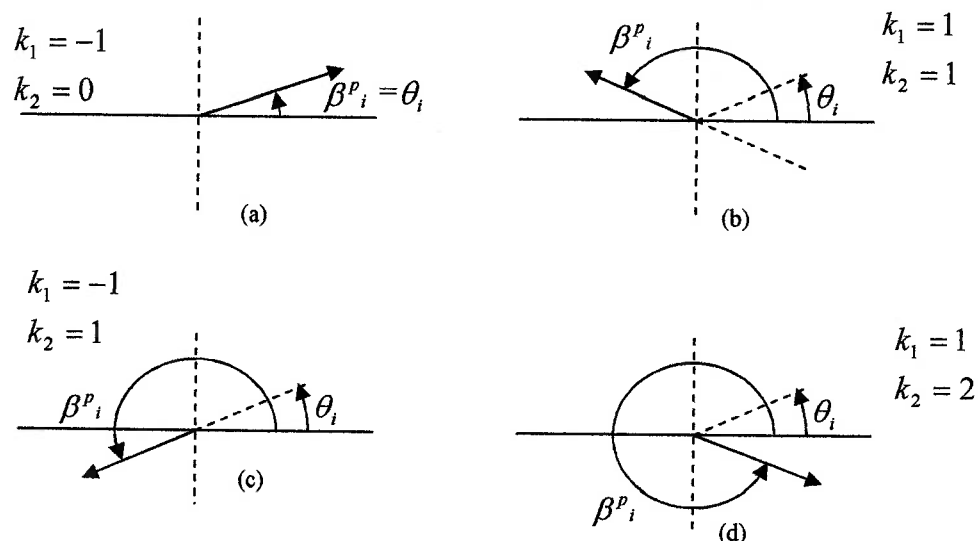


Figura 3.10 – Possíveis ângulos de azimute em relação ao referencial relativo c_{ij} e o ângulo θ_i equivalente no primeiro quadrante

Na figura 3.10 estão representados os ângulos de azimute relativos à linha que une dois propulsores e o ângulo θ_i equivalente no primeiro quadrante. Pode-se verificar que nos itens (b) e (d) da figura há uma reflexão do ângulo θ_i em relação ao eixo horizontal. Este fato é modelado pelos coeficientes k_1 e k_2 na equação 3.13.

3.5.3. Interação casco-propulsor

Da mesma forma que pode existir a interferência entre dois propulsores, é possível também que a esteira de um determinado propulsor, dependendo do arranjo

de propulsores, esteja direcionada para partes do casco, que dificultem ou não permitam 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.

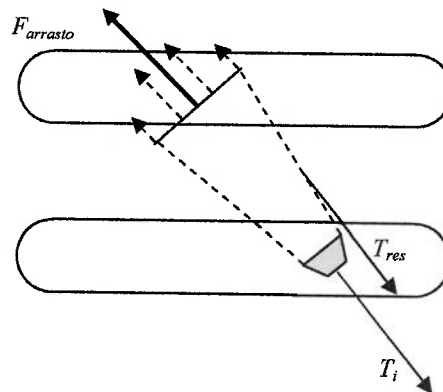


Figura 3.11 – Interação casco-propulsor (extraída e adaptada de SINDING; ANDERSEN, 1998)

A figura 3.11 ilustra este caso. A grandeza T_{res} é a força de empuxo resultante no propulsor, e $F_{arrasto}$ é a reação no casco do navio, que produz a perda de eficiência. Este fenômeno pode ser modelado pela seguinte expressão (SINDING, ANDERSEN, 1998):

$$T_{res,i} = \eta_{arrasto,i}(\theta_i) T_i \quad (3.15)$$

onde $\eta_{arrasto,i}(\theta_i)$ é o coeficiente de perda de eficiência dependente do azimute.

As três considerações apresentadas para a alocação de empuxo desempenham diferentes papéis de acordo com a estratégia utilizada para resolver o problema de otimização, podendo estar contempladas na função objetivo ou como restrições funcionais do problema. As duas estratégias e os métodos de otimização utilizados serão apresentados a seguir.

3.6. Formulação do problema de otimização

Nesta seção apresentam-se as formulações para otimização da alocação de empuxo utilizando Algoritmos Genéticos e utilizando o método SQP.

3.6.1. Formulação do problema pelo método dos Algoritmos Genéticos

3.6.1.1. Algoritmos genéticos com população binária

Na literatura, o Algoritmo Genético introduzido por Goldberg (GOLDBERG, 1989; SOARES, 1997) é conhecido como *Simple Genetic Algorithm*, ou SGA. Nele, trabalha-se com uma população de tamanho fixo e com indivíduos codificados com a estrutura binária. Uma vez definido o problema a ser otimizado, define-se a quantidade de indivíduos na população, o número de elementos (bits) de cada indivíduo e as probabilidades de cruzamento e mutação. O tamanho da população, estrutura, tamanho do indivíduo, seleção, análise da aptidão, cruzamento e mutação são os elementos do Algoritmo Genético.

Em algumas situações, o AG pode iniciar-se com uma população mais numerosa que diminui gradativamente, à medida que o algoritmo prossegue e a convergência vai se tornando mais acentuada (GEN; CHENG, 1997), ou as probabilidades de cruzamento e mutação têm seus valores adaptados ao longo das gerações. Estes casos não se enquadram no SGA proposto por GOLDBERG.

A elaboração da formulação do problema pelo método dos AG para o presente trabalho não se baseará no SGA proposto por GOLDBERG (1989). A formulação referente ao algoritmo usando população binária possui o número de indivíduos decrescente ao longo das gerações, e a formulação referente a população com indivíduos reais (ponto flutuante) possuem os valores dos limites de empuxo adaptados a cada geração. A figura 3.12 apresenta estas etapas.

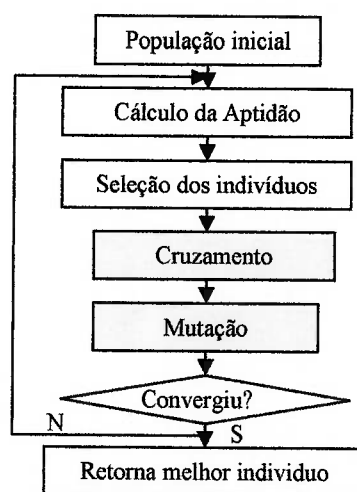


Figura 3.12 – Fluxograma representativo das etapas do SGA.

O cruzamento e a mutação são chamados operadores genéticos, pois permitem a alteração na estrutura dos cromossomos (SOARES, 1997).

Quando um problema de otimização é formulado duas categorias de restrições podem ser consideradas: restrições de variáveis e restrições funcionais. As restrições de variáveis são resolvidas diretamente na determinação da população inicial. Por exemplo, existindo limites para as forças de empuxo, as variáveis referentes a estas forças podem ser obtidas de forma a estarem contidas no intervalo entre estes limites.

As restrições funcionais incluem a combinação entre as variáveis por meio de funções, podendo ser de igualdade ou desigualdade, o que caracterizam as restrições funcionais. No presente trabalho, a formulação por algoritmos genéticos toma por hipótese que as variáveis livres ou funcionais sejam as componentes das forças de empuxo, e as demais grandezas associadas ao problema (potência, ângulo de azimute) são calculadas em função destas componentes. As restrições funcionais foram incorporadas à função objetivo através de funções de penalidades (MORALES; GARCIA, 2002). Estas penalidades serão apresentadas na subseção 3.5.2.

3.6.1.2. População inicial

As variáveis envolvidas na determinação da população inicial são as forças de empuxo e os ângulos de azimute. Com estes valores é possível determinar a potência consumida pelo SPD.

A determinação destas grandezas pode ser realizada a partir de duas alternativas:

- Alternativa A:**
- as forças de empuxo em cada propulsor são determinadas como elementos da população inicial, com seus valores na faixa compreendida entre 0 e o valor máximo admissível $T_{máx}$.
 - os ângulos de azimute são determinados também como elementos da população inicial, com seus valores contidos no intervalo $0^\circ \leq \alpha^p_i \leq 360^\circ$.
 - as componentes das forças de empuxo $Tx_{1,i}$ e $Tx_{2,i}$ são calculadas a partir dos dados gerados pela população inicial em cada geração do algoritmo genético.
- Alternativa B:**
- as componentes da força de empuxo $Tx_{1,i}$ e $Tx_{2,i}$ são determinadas como elementos da população inicial, como seus valores na faixa compreendida entre 0 e o valor máximo admissível $T_{máx}$.
 - os ângulos de azimute são calculados em cada geração do algoritmo.
 - a força de empuxo resultante é calculada em cada geração do algoritmo.

A escolha por uma das alternativas é livre, pois ambas possuem dois parâmetros, e um terceiro a ser calculado.

Uma vez feita a escolha por uma das alternativas, procede-se com a geração dos indivíduos (cromossomos) da população. Para o cálculo da aptidão, serão usados os valores dos cromossomos convertidos para real. A determinação do número de

bits em cada cromossomo dependerá da precisão requerida para seu valor correspondente em real. Considerando que F_{in} e F_{su} sejam respectivamente os limites inferior e superior para uma das componentes das forças de empuxo, e p_r seja a precisão desejada para o valor real correspondente, o número de bits n_{bits} deve satisfazer a equação (GEN; CHENG, 1997):

$$2^{n_{bits}-1} < (F_{su} - F_{in}) \cdot 10^{p_r} \leq 2^{n_{bits}} \quad (3.16)$$

O cálculo de n_{bits} é realizado pela expressão :

$$n_{bits} = \frac{\log[(F_{su} - F_{in}) \cdot 10^{p_r}]}{\log(2)} \quad (3.17)$$

Se n_{bits} resultar em um número não inteiro (o que geralmente é o caso), deve ser considerado o valor inteiro imediatamente superior como seu valor válido, uma vez que a quantidade de bits em uma expressão deve ser inteira.

Uma vez determinado n_{bits} do cromossomo a partir de p_r e de F_{su} e F_{in} , é possível determinar-se o valor do cromossomo em real, pela expressão:

$$x_r = F_{in} + (x_b)_{10} \cdot \frac{(F_{su} - F_{in})}{2^{n_{bits}} - 1} \quad (3.18)$$

sendo x_r o valor do cromossomo em real e x_b o valor do cromossomo em binário. Na equação 3.18, o termo $(x_b)_{10}$ representa o valor do cromossomo binário transformado em decimal, ou seja, na base 10.

Considerando-se que cada bit na cadeia de caracteres representativa do cromossomo seja representado por b_i , com $i = 1, \dots, n_{bits}$ e $b_i = [0;1]$, o cromossomo pode ser representado por:

$$x_b = (b_1 b_2 \dots b_{n_{bits}}) \quad (3.19)$$

que é a forma geral para cada indivíduo da população. Além disso, os dois elementos extremos possíveis

$$\underbrace{(00000000 \dots 00000000)}_{n_{bits} \text{ elementos}}$$

e

$$\underbrace{(11111111 \dots 11111111)}_{n_{bits} \text{ elementos}}$$

quando substituídos na equação 3.18 produzem justamente os valores dos limites inferior e superior F_{in} e F_{su} .

3.6.1.3. Cálculo da Aptidão

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

$$f_i = \frac{f_{obj,i}}{\sum_{i=1}^{n_{ind}} f_{obj,i}}, \quad i = 1, \dots, n_{ind} \quad (3.20)$$

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.

A equação 3.20 fornece um valor no intervalo $0 \leq f_i \leq 1$ que representa a ponderação de participação da função objetivo $f_{obj,i}$ em relação ao total de valores na população.

Em problemas de minimização, no entanto, o problema consiste em atribuir maior ponderação aos menores valores da função objetivo, ou seja, a ponderação é inversamente proporcional aos valores calculados para a função objetivo. Este é tipicamente o caso dos problemas de minimização. Para o cálculo da aptidão dos indivíduos da população para um problema de minimização, deve-se calcular a aptidão inversa da função, através da expressão (SOARES, 1997; GEN, CHENG, 1997):

$$f'_{obj,i} = \frac{1}{f_{obj,i} + \varepsilon} \quad (3.21)$$

O termo ε na equação 3.21 deve ser considerado quando a função objetivo $f_{obj,i}$ tiver seu valor nulo. Normalmente ε é um número muito pequeno, cujo propósito é evitar que o denominador em 3.21 seja anulado. Para ilustrar, será apresentado o exemplo gráfico de minimização da função quadrática $f = \mathbf{x}^T \mathbf{x}$, onde $\mathbf{f} = [f_{obj,1} \quad f_{obj,2} \quad \dots \quad f_{obj,n_{ind}}]$, além do gráfico da mesma função após a aplicação da equação 3.21:

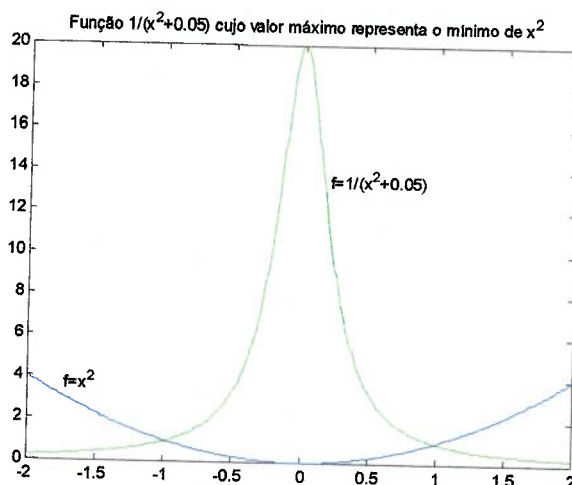


Figura 3.13 – Representação de uma função quadrática normal e transformada. A função transformada permite a determinação do valor mínimo da função original através do seu valor máximo.

No gráfico do exemplo foi utilizado $\varepsilon = 0,05$. Depois de calculado o valor da função através da equação 3.21, procede-se com sua normalização por meio da seguinte equação:

$$f'_i = \frac{f'_{obj,i}}{\sum_{i=1}^{n_{ind}} f'_{obj,i}}, \quad i = 1, \dots, n_{ind} \quad (3.22)$$

que nada mais é que a equação 3.20 com os valores da função objetivo calculados em 3.21.

3.6.1.4. Seleção

Em problemas de minimização, que é o foco do presente trabalho, a equação 3.22 apresenta maiores valores de aptidão para os menores valores da população, já normalizados.

Dada uma população com cada indivíduo possuindo um valor de aptidão, existem vários métodos para selecioná-los (CASTRO, 2001). O método utilizado no presente trabalho será o método de seleção por roleta. Este método toma os valores de f_i calculados na equação 3.20 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.

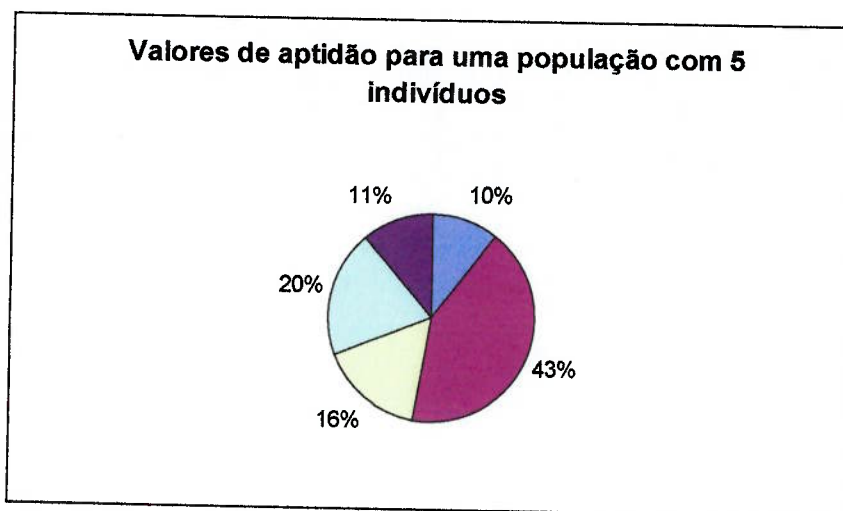


Figura 3.14 – Representação de uma distribuição de aptidões em forma de roleta.

A figura 3.14 mostra uma distribuição hipotética de aptidões, contendo 5 indivíduos. Na prática, o método da roleta funciona assim mesmo: como uma roleta, e a porcentagem indicada para cada indivíduo é a porcentagem da roleta “parar” naquele valor após um giro.

Matematicamente, a seleção de um elemento é realizada através de uma simulação da roleta:

$$\begin{aligned}
 p_{ac,1} &= 0 \\
 p_{ac,i} &= p_{ac,i} + f_i', \quad i = 1, \dots, n_{ind}
 \end{aligned}
 \tag{3.23}$$

$$\mathbf{p}_{ac} = \begin{bmatrix} p_{ac,1} \\ p_{ac,2} \\ \dots \\ p_{ac,n_{ind}} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

onde f_i' é a aptidão individual calculada pela equação 3.22.

Na equação 3.23, o termo $p_{ac,1}$ é iniciado com zero, e a partir daí passa a acumular os valores das aptidões calculados na equação 3.22. Os demais termos são calculados seqüencialmente, até o último valor da aptidão, de forma que $p_{ac,n_{ind}} = 1$.

Os valores calculados em (3.23) produzem o vetor \mathbf{p}_{ac} utilizado no algoritmo de seleção. O procedimento descrito produz um novo conjunto de indivíduos contendo os valores mais aptos a participarem da reprodução (GEN; CHENG, 1997). Quanto mais apto um indivíduo, maior o número dos seus descendentes.

3.6.1.5. Cruzamento e mutação

O processo de seleção não introduz indivíduos diferentes na população, apenas multiplica indivíduos existentes e elimina os menos aptos. Os indivíduos selecionados serão os genitores que servirão como pais para a nova geração (CASTRO, 2001; SOARES, 1997; COELHO, 2002).

Os novos indivíduos gerados no processo de reprodução são, então, recombinados. A recombinação pode levar em conta um ou mais pontos de cruzamento, dependendo do tamanho do indivíduo. A figura 3.15 ilustra o procedimento de cruzamento entre dois indivíduos.

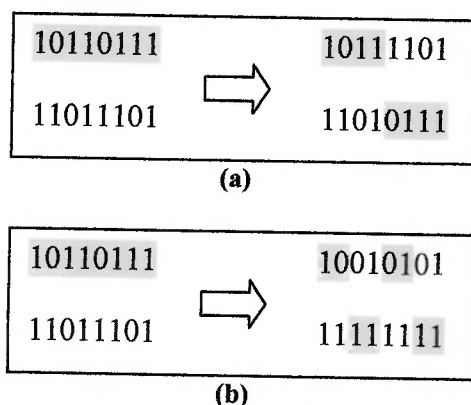


Figura 3.15 – Representação de pontos de cruzamento para dois cromossomos durante o cruzamento: (a) um único ponto, (b) múltiplos pontos.

Nem todos os indivíduos são considerados no processo de cruzamento. A quantidade de indivíduos envolvidos no cruzamento em relação ao total de indivíduos, depende da porcentagem de cruzamento (p_c). Se, por exemplo, a probabilidade de cruzamento for igual a 0,5 (50%), significa que metade dos indivíduos na população sofrerá cruzamento. Estes indivíduos são selecionados aleatoriamente, e o cruzamento ocorre entre dois indivíduos.

A mutação é utilizada para diversificar a população. Ela pode evitar, por exemplo, a ocorrência de um mínimo local. Assim como no cruzamento, a mutação acontece mediante um valor chamado de probabilidade de mutação (p_m) e é aplicada a todos os genes dos indivíduos de forma seqüencial, ou seja, se uma população tem 5 indivíduos, e cada indivíduo possui 20 bits (20 genes), a probabilidade de mutação é aplicada a $5 \times 20 = 100$ genes, uma vez que ela atua em cada bit separadamente, independente do indivíduo (GEN; CHENG, 1997).

3.6.1.6. Algoritmos genéticos com população real (ponto flutuante)

A manipulação de dados por algoritmos genéticos reais é parecida com a realizada com população binária. Na população binária há a transformação dos indivíduos binários em reais, e as operações genéticas ocorrem entre os bits de cada indivíduo. Na população real, as operações são realizadas diretamente sobre os valores dos indivíduos em reais, ou representados em ponto flutuante. COELHO

(2002) apresentou alguns critérios de cruzamento e mutação para população real, que será descrita a seguir:

3.6.1.6.1. Mutação uniforme

Seja $\mathbf{x}_r = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_q)$ um indivíduo, com q representando o tamanho da população. A mutação uniforme gera um novo indivíduo a partir de outro. Após ser selecionado um indivíduo x_r , escolhe-se aleatoriamente um elemento k para obtenção de um novo valor, tal que $\mathbf{x}_r' = (x_1, \dots, x_k', \dots, x_q)$, onde x_k' é um valor aleatório dentro dos limites de existência da população.

3.6.1.6.2. Mutação não-uniforme

Nesta modalidade de mutação o elemento x_k é selecionado para mutação, resultando em um vetor $\mathbf{x}_r' = (x_1, \dots, x_k', \dots, x_q)$ tal que:

$$x_k' = \begin{cases} x_k + \Delta(t, \max(k) - x_k), & \text{se } z = 0, \\ x_k + \Delta(t, x_k - \min(k)), & \text{se } z = 1 \end{cases} \quad (3.25)$$

onde z é um dígito binário aleatório (0 ou 1), $\min(k)$ e $\max(k)$ são os valores mínimo e máximo dos limites do parâmetro x_k' , respectivamente. A função $\Delta(t, y)$ (sendo $y = \max(k) - x_k$ ou $y = x_k - \min(k)$) retorna um valor no intervalo $[0, y]$ tal que a probabilidade de $\Delta(t, y)$ inicia em zero e é incrementada de acordo com o número de gerações t , tal que

$$\Delta(t, y) = y \cdot ra \cdot \left[1 - \frac{t}{n_{ger}} \right]^b \quad (3.26)$$

onde ra é um número gerado aleatoriamente no intervalo $[0;1]$, n_{ger} é o número máximo de gerações, e b é um parâmetro externo, atribuído pelo usuário, que determina o grau de dependência com o número de gerações. Esta propriedade leva o operador a efetuar uma busca uniforme no espaço inicial, quando t é pequeno e, mais localmente nas gerações posteriores.

A seguir serão apresentados os operadores de cruzamento para população real.

3.6.1.6.3. Operador de cruzamento simples

Um par de indivíduos é selecionado como sendo:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{rv} &= (x_1, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_q) \\ \mathbf{y}_{rv} &= (y_1, \dots, y_k, y_{k+1}, \dots, y_q) \end{aligned} \quad (3.27)$$

e são cruzados (recombinados) a partir do k -ésimo parâmetro. Os novos indivíduos resultantes deste cruzamento são:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{rv} &= (x_1, \dots, x_k, y_{k+1}, \dots, y_q) \\ \mathbf{y}_{rv} &= (y_1, \dots, y_k, x_{k+1}, \dots, x_q) \end{aligned} \quad (3.28)$$

ou seja, o cruzamento ocorre de forma análoga ao cruzamento com indivíduos da população binária.

3.6.1.6.4. Operador de cruzamento aritmético

Este operador define o cruzamento como uma combinação linear de dois vetores representativos da população:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{rv} &= (x_1, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_q) \\ \mathbf{y}_{rv} &= (y_1, \dots, y_k, y_{k+1}, \dots, y_q) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Após esta operação têm-se os descendentes descritos por:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}'_{rv} &= (\xi \cdot \mathbf{x}_{rv} + (1 - \xi) \cdot \mathbf{y}_{rv}) \\ \mathbf{y}'_{rv} &= (\xi \cdot \mathbf{y}_{rv} + (1 - \xi) \cdot \mathbf{x}_{rv}) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Nesta operação o parâmetro ξ , pertencente ao intervalo $[0;1]$, pode ser um valor constante ou variável, dependente do tamanho da população, escolhida pelo usuário.

3.6.1.6.5. Operador de cruzamento heurístico

Esse cruzamento gera apenas um (ou nenhum) novo indivíduo, através da extrapolação linear de dois indivíduos. Considerando novamente:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{rv} &= (x_1, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_q) \\ \mathbf{y}_{rv} &= (y_1, \dots, y_k, y_{k+1}, \dots, y_q) \end{aligned} \quad (3.27)$$

como indivíduos originais, após o cruzamento tem-se um indivíduo resultante factível regido pela expressão:

$$z_{rv} = v.(y_{rv} - x_{rv}) + y_{rv} \quad (3.30)$$

onde v é um número aleatório, tal que v esteja no intervalo $[0;1]$. Se a solução gerada não for factível, deve-se gerar um novo número aleatório para a obtenção de um novo indivíduo.

No presente trabalho o operador de cruzamento utilizado é o operador de cruzamento simples, e o de mutação, mutação uniforme, pela simplicidade de implementação.

3.6.1.7. Minimização da Função Objetivo

Nesta seção será apresentada a função objetivo a ser minimizada para o problema de alocação de empuxo proposto.

No procedimento de alocação de empuxo, o evento proibido é o valor da força de empuxo no propulsor ultrapassar o valor de saturação. As componentes das forças de empuxo nos propulsores são as grandezas geradas na população inicial e submetidas aos operadores genéticos ao longo das gerações. Em outras palavras, cada indivíduo da população contém as duas componentes da força de empuxo para cada propulsor. A força resultante será calculada levando em conta os indivíduos das duas populações, na ordem em que aparecerem, através da equação:

$$T_{ij} = \sqrt{Tx_{1,ij}^2 + Tx_{2,ij}^2}, \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, n_{ind} \\ j = 1, \dots, n_{prop} \end{matrix} \quad (3.31)$$

onde T_{ij} é o valor do empuxo correspondente aos indivíduos i no propulsor j , e $Tx_{1,ij}$ e $Tx_{2,ij}$ são as componentes da força de empuxo para o propulsor j .

Com os valores de T_{ij} calculados em (3.31), podem-se determinar os ângulos de azimute, as interferências entre propulsores e as interações casco-propulsor, além de verificar a existência de saturação em algum propulsor, como descrito na subseção (3.4.1).

Com estes valores determinados, procede-se com a otimização da alocação de empuxo, agora criando-se a função objetivo. A otimização consiste na minimização da diferença entre as forças comandadas e as forças de empuxo efetivamente

alocadas em cada propulsor (equação 3.6), ao mesmo tempo que se deseja minimizar o consumo de energia evitando a saturação (equação 3.8) e minimizar a ocorrência de interferências (equação 3.11). Com estas informações, determina-se a função objetivo a ser minimizada. Em outras palavras, o problema de alocação de empuxo consiste na minimização de uma função de custo, dado pela equação:

$$J = \Delta F_1^N k_{f1} + \Delta F_2^N k_{f2} + \Delta F_6^N k_{f6} + \sum_{\substack{m,n \\ m \neq n}} k_{prop} I_{mn}^N k_{mn} + \sum_{i=1}^{n_{prop}} k_{sat} S_i^N k_{s,i} + \sum_{i=1}^{n_{prop}} k_{cp} Q_i^N k_{Q,i} + P^N k_p \quad (3.32)$$

onde:

k_{f1}, k_{f2}, k_{f6} Fatores de ponderação para as diferenças de forças em *surge*, *sway* e de momento em *yaw*, respectivamente. As diferenças de forças são dadas pela equação 3.6.

k_{mn} Fator de ponderação para a interferência entre os propulsores.

k_{prop} Fator indicativo do nível de interferência para o par de propulsores mn atuando com interferência. A somatória indicada na equação representa a soma dos termos que produzem interferência entre os propulsores m e n . Se não houver interferência, este valor é nulo; caso contrário, este valor é proporcional à interferência, sendo máximo quando os propulsores estiverem alinhados.

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 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 . A somatória indicada na equação representa a soma dos termos referentes aos propulsores que produzem tal

	interação. Se não houver interação, este valor é nulo; caso contrário, este valor é proporcional ao nível de interação.
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 m e n que atuam com interferência, após normalização.
S_i	Força de empuxo normalizada no propulsor i , se houver saturação.
Q_i^N	Força de empuxo normalizada no propulsor i , quando houver interferência com o casco.
P^N	Potência consumida, após normalização.

Na equação 3.32, cada grupo de termos apresenta comportamento diferenciado. Esta equação foi desenvolvida com o propósito de fornecer um valor contemplando todos os indivíduos da população. Os valores mais elevados são descartados. Os termos desta equação podem-se dividir em três grupos:

- **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 .
- **Grupo 2** – Constituído pela média das forças nos propulsores atuando com interferência e na interação casco-propulsor: I_{mn}^N e Q_i^N .
- **Grupo 3** – Constituído pelas forças em propulsores que atingiram saturação. Seu termo é S_i .

Em todos os grupos são considerados como base os termos originais normalizados. Por exemplo, a potência do Grupo 1 leva em conta as potências calculadas para cada indivíduo normalizadas em relação à população. Sobre a população normalizada é aplicado o fator de ponderação. À cada grupo aplicam-se os

fatores de ponderação de forma diferente. A seguir, será apresentada uma descrição de cada grupo e como os fatores de ponderação atuam.

3.6.1.8. Grupo 1

Os elementos do Grupo 1 produzem valores proporcionais aos valores normalizados originais, de forma que o valor mínimo na população coincida com o mínimo produzido e o máximo na população produza o valor máximo um número de vezes correspondente ao fator de ponderação aplicado. A figura 3.16 ilustra a aplicação do fator de ponderação ao Grupo 1.

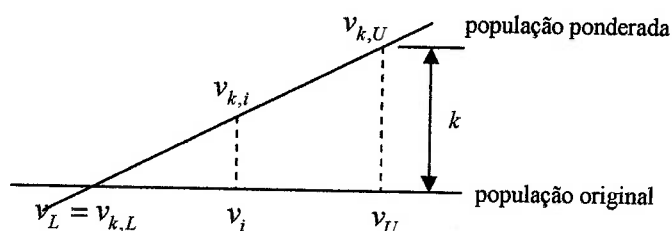


Figura 3.16 – Aplicação dos fatores de ponderação ao Grupo 1.

Os valores v_L e v_U são, respectivamente, os valores mínimo e máximo da população original, representando os termos do Grupo 1. Quando a ponderação for aplicada à ΔF_1^N , por exemplo, os valores de v na figura 3.16 representam os valores de ΔF_1^N , e assim por diante, para os demais termos do grupo. Considerando que k seja o valor da ponderação genérica para o Grupo 1, a obtenção de cada elemento da população ponderada é realizada pela expressão

$$v_{k,i} = \frac{k \cdot v_U - v_L}{v_U - v_L} \cdot (v_i - v_L) + v_L \quad (3.33)$$

onde k representa o fator de ponderação apropriado para cada termo do Grupo 1.

A figura 3.17 mostra o comportamento de uma população com 10 indivíduos, antes da ponderação com seus valores originais normalizados e após a ponderação, com uma fator de ponderação $k = 5$. Na figura é possível verificar que o menor valor na população original coincide com o menor valor na população ponderada (indivíduo 5) e que na população ponderada, o indivíduo 7 tem seu valor coincidindo

com o valor da ponderação, representando o maior indivíduo também na população original. Vale ressaltar que a população original nesta figura já está normalizada.

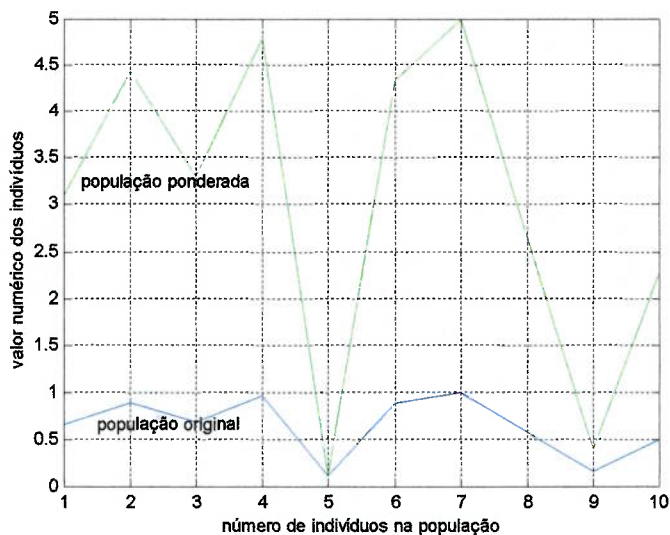


Figura 3.17 – Aplicação do fator de ponderação $k = 5$ a uma população com 10 indivíduos normalizada.

3.6.1.9. Grupo 2

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. Na equação 3.32 são considerados dois fatores de ponderação para cada caso: interferência e interação. No caso da interferência, o fator k_{mi} tem o mesmo efeito numérico que no Grupo 1 e o fator k_{prop} indica uma proporção de interferência, que varia entre 0 (sem interferência) e 1 (interferência máxima, propulsores alinhados e em contra fluxo). O mesmo ocorre para as ponderações k_{cp} e $k_{Q,i}$. A relação entre o ângulo de interferência e o fator k_{prop} é admitida linear, e pode ser representada pelo gráfico da figura 3.18.

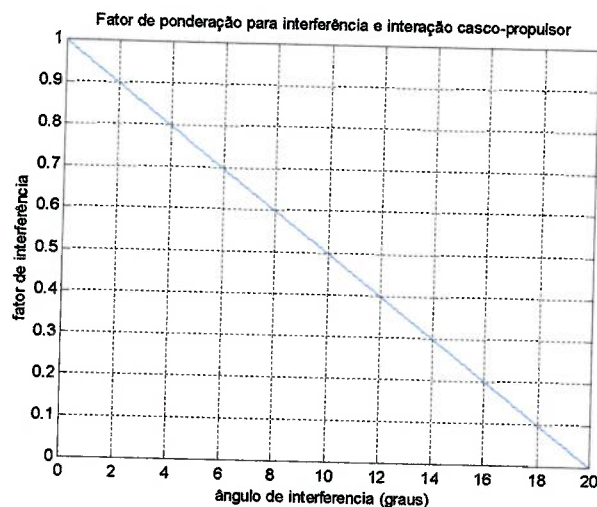


Figura 3.18 – Fator de ponderação k_{prop} proporcional ao ângulo de interferência e de incidência sobre o casco, respectivamente.

O valor da interferência, no entanto, é não linear e dependente da distância entre os propulsores e do seu diâmetro. Quando dois propulsores operam com interferência, sempre haverá uma degradação nos propulsores e conseqüentemente, na alocação de empuxo, que possuem, como causas principais:

- forças devido a bloqueios causados pela ação do outro propulsor,
- perda de eficiência nos propulsores, que ocorre quando o fluxo de água em um propulsor interfere no segundo.

Normalmente estes efeitos ocorrem simultaneamente. O efeito desta interação é mostrado nas figura 3.19a e 3.19b. Na figura 3.19a é apresentado o efeito da degradação em função da relação da distância pelo diâmetro (equação 3.9) e na figura 3.19b é apresentado a relação do ângulo pelo diâmetro.

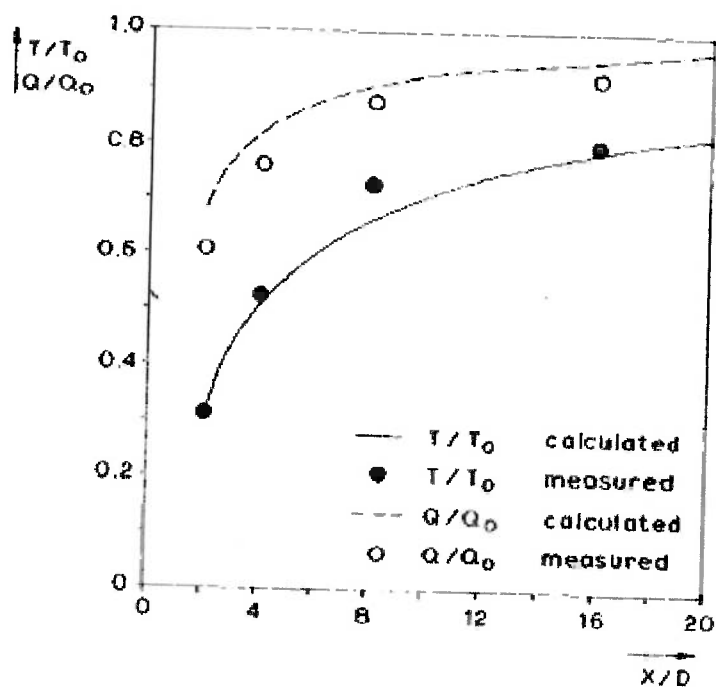


Figura 3.19a – Degradação dos propulsores quando submetidos a interferência, em função da distância (extraído de DIJK, AALBERS, 2001).

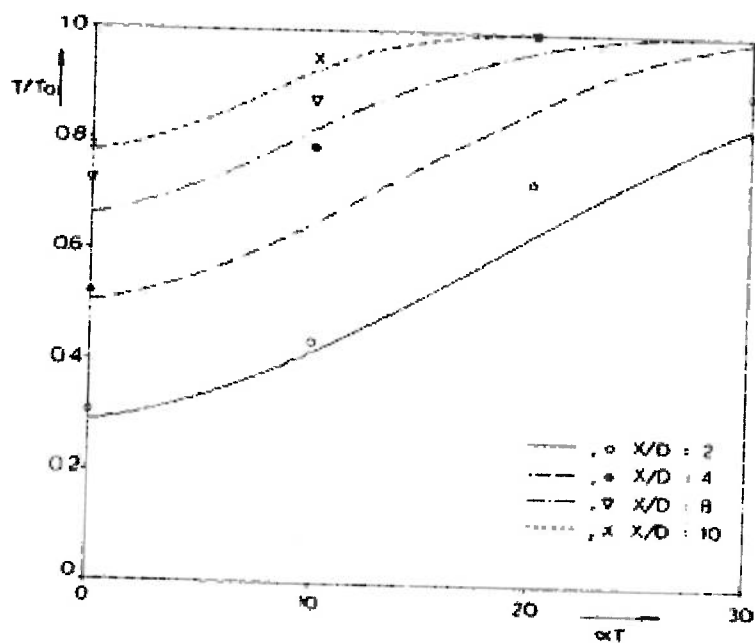


Figura 3.19b – Degradação dos propulsores quando submetidos a interferência, em função do ângulo de azimute (extraído de DIJK, AALBERS, 2001).

3.6.1.10. Grupo 3

No Grupo 3 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. O comportamento desta ponderação está indicado na figura 3.20.

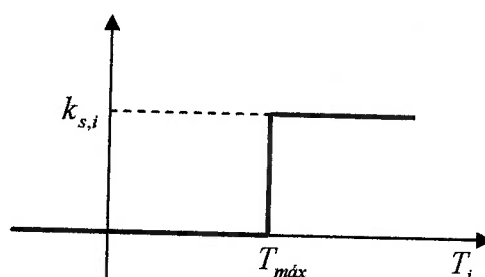


Figura 3.20 – Fator de ponderação para o caso de saturação, função do Grupo 3.

Os fatores de ponderação na equação 3.32 significam penalidades aplicadas a cada termo. Cada indivíduo na população, após a determinação dos termos resultantes, terá um valor para a função objetivo, formando um vetor de funções objetivo J , sendo

$$J = [I_{D1} \quad I_{D2} \quad \dots \quad I_{D,n_{md}}]^T \quad (3.34)$$

O vetor J será usado no cálculo da aptidão para posterior seleção e aplicação dos operadores genéticos. Com isso, quanto maiores os fatores de ponderação (ou maiores as penalidades), menor a probabilidade de o indivíduo ser escolhido na seleção.

Cada ponderação é aplicada isoladamente a cada termo da equação de acordo com a importância atribuída a ele no problema. Por exemplo, aplicar uma grande ponderação à potência significa penalizá-la porque, na população ponderada, seus valores tenderão a desaparecer, de forma que os indivíduos que produzem menor valor de potência serão os escolhidos. As forças e os ângulos de azimute convergirão, mas a diferença entre as forças comandadas e produzidas neste caso nos propulsores poderá ser grande. Ao contrário, priorizar as diferenças de forças pode produzir um

consumo elevado de potência. Isso significa que os fatores de ponderação devem ser escolhidos cuidadosamente.

3.6.2. 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), que por conveniência serão reproduzidas nesta seção.

$$\mathbf{AT} = \mathbf{F} \quad (3.2)$$

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

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

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

A função objetivo dada pela equação (3.5), foi extraída de SINDING, ANDERSEN (1998). TANNURI (2002) apresenta a função objetivo como um funcional a ser minimizado. Ele apresentou a equação 3.5 modificada, aproximada para um funcional quadrático, ou seja, ele é definido em função do quadrado das forças de empuxo, de forma a obter-se o vetor com os multiplicadores de Lagrange de forma linear. O funcional e os vínculos de igualdade foram definidos por:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{T}) &= \mathbf{T}^T \mathbf{T} \\ f(\mathbf{T}) &= \mathbf{AT} - \mathbf{F} \end{aligned} \quad (3.35)$$

A definição do vetor com os multiplicadores de Lagrange é realizada pela expressão

$$F(\mathbf{T}, \boldsymbol{\lambda}) = L(\mathbf{T}) + \boldsymbol{\lambda} f(\mathbf{T}) \quad (3.36)$$

cuja condição necessária para que a solução encontrada seja um ponto estacionário do funcional $L(\mathbf{T})$ é dada por:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{T}} = 0 \Rightarrow 2\mathbf{T} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}^T = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = 0 \Rightarrow \mathbf{A}\mathbf{T} - \mathbf{F} = 0 \end{cases} \quad (3.37)$$

sendo $F = F(\mathbf{T}, \boldsymbol{\lambda})$.

Após algumas manipulações algébricas chega-se a:

$$\boldsymbol{\lambda} = -2(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{F} \quad (3.38)$$

e

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}^T (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{F} \quad (3.39)$$

Além disso, para que a solução seja um ponto de mínimo, deve-se garantir que a matriz:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \mathbf{T}^2} \quad (3.40)$$

seja positiva definida no plano tangente às restrições. Como $\frac{\partial^2 F}{\partial \mathbf{T}^2} > 0$, esta condição é satisfeita, uma vez que $\frac{\partial^2 F}{\partial \mathbf{T}^2} = 2\mathbf{I}$, onde \mathbf{I} é a matriz identidade.

Esta situação é válida quando o número de variáveis é maior que o número de equações, quando é possível respeitar o vínculo de igualdade dado pela segunda expressão da equação (3.37). Em caso contrário, o problema passará a ser a minimização do resíduo entre a força comandada e a produzida pelos propulsores, ou seja,

$$\min R(\mathbf{T}) = |\mathbf{A}\mathbf{T} - \mathbf{F}| \quad (3.41)$$

que possui, como condição necessária,

$$\frac{\partial R}{\partial \mathbf{T}} = 0 \quad (3.42)$$

A minimização da potência pelo método SQP não é o principal foco do presente trabalho, e sua apresentação aqui é para balizar o método dos algoritmos genéticos. Por isso, o esforço realizado aqui é o de reproduzir seu resultado, considerando como funcional (ou função objetivo) a função representada pela equação (3.5), que é a expressão da potência consumida em função das forças de empuxo produzidas, além de levar em conta a interferência entre os propulsores e a interação casco-propulsor. Assim, a condição necessária assume a forma

$$\begin{aligned} L(\mathbf{T}) &= \sum_{i=1}^n |T_i|^{3/2} & (3.43) \\ f(\mathbf{T}) &= \mathbf{A}\mathbf{T} - \mathbf{F} \\ g_i(\mathbf{T}) &= T_i^2 - T_{\max}^2 \end{aligned}$$

onde \mathbf{T} inclui todas as forças produzidas pelos propulsores, como apresentado pela equação (3.3), $T_i^2 = T_{x_{1,i}}^2 + T_{x_{2,i}}^2$ e T_{\max} é o valor máximo do empuxo admissível para o propulsor i ($i=1, \dots, n$). Seguindo o procedimento convencional (BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 1993) define-se um vetor λ dos multiplicadores de Lagrange e a função lagrangeana $F(\mathbf{T}, \lambda) = L(\mathbf{T}) + \lambda^T f(\mathbf{T}) + \sum_{i=1}^n \mu_i g_i(\mathbf{T})$. A condição necessária para que a solução seja um ponto estacionário é

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{T}} = 0 \Rightarrow \frac{3}{2} \sqrt{|\mathbf{T}|} \cdot s + \mathbf{A}^T \lambda^T + 2\mu \mathbf{T} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \mathbf{A}\mathbf{T} - \mathbf{F} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \mu} = 0 \Rightarrow 2\mu \mathbf{T} = 0 \end{cases} \quad (3.44)$$

onde s representa o sinal do elemento correspondente no vetor \mathbf{T} , porque \mathbf{T} pode conter elementos com valores negativos, e $\mu_i \geq 0$. Para que seja um ponto de mínimo, verifica-se a condição necessária e suficiente, que neste caso produz:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \mathbf{T}^2} = \frac{3}{4\sqrt{|\mathbf{T}|}} \cdot s \quad (3.45)$$

A equação 3.45 mostra que, se houverem valores negativos para alguns elementos de \mathbf{T} , não se pode garantir que o ponto correspondente seja um mínimo.

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 (3.44).

Capítulo 4. Estudo de Caso

4.1. Introdução

Neste capítulo será apresentado um estudo de caso, aplicando ambos os métodos. Em seguida será apresentado um estudo comparativo entre eles para a verificação de qual método será melhor no processo de alocação de empuxo. Para o presente estudo de caso serão realizadas simulações considerando valores de forças comandadas aplicadas sobre a embarcação, tratadas como forças resultantes, ou seja, já levando em conta a ação das ondas, dos ventos, e de outras forças que afetam a embarcação. Os algoritmos utilizados nas simulações tratarão as forças ora como degrau, para testar a sua convergência, ora como ondas de forças, para verificar o comportamento dos propulsores durante a variação destas forças comandadas. Ao longo do capítulo serão apresentados os detalhes de cada simulação, em cada caso exposto.

4.2. Modelo para estudo

No capítulo anterior apresentou-se a modelagem da alocação de empuxo, levando em conta a disposição dos propulsores no casco da embarcação, a possível interferência entre dois propulsores, interação casco-propulsor e saturação dos propulsores. Apresentaram-se também dois métodos de otimização: um deles baseado no método dos algoritmos genéticos, e o outro baseado no método SQP.

Para a validação dos algoritmos, o estudo será aplicado a uma barcaça tipo BGL1, contendo 6 propulsores azimutais dispostos no casco conforme esquema apresentado na figura 4.1 (TANNURI, 2002):

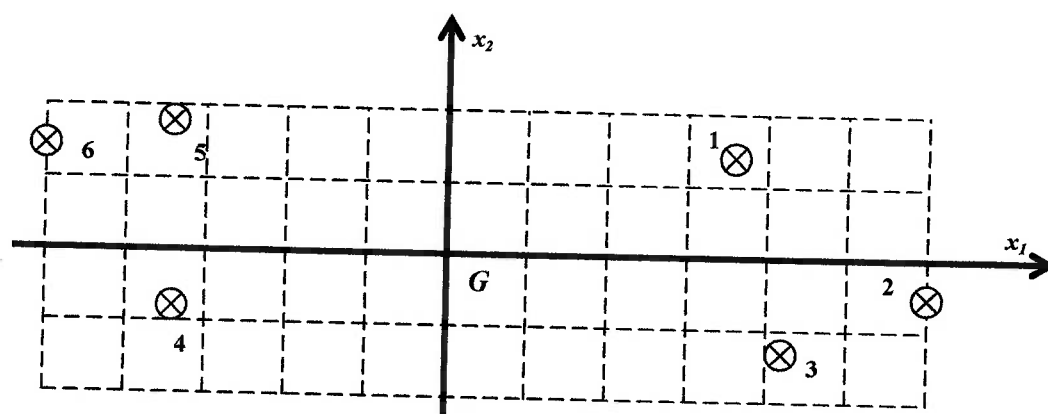


Figura 4.1 – Disposição dos propulsores no casco da barça BGL1 (extraída e adaptada de TANNURI, 2002).

Na figura 4.1, as coordenadas x_1 e x_2 representam, respectivamente, as direções das forças em *surge* e *sway*. Em relação ao centro de gravidade da barça (ponto G), as coordenadas de cada propulsor estão apresentadas na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – 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.

Com estes dados determina-se a interferência entre os propulsores a partir da equação 3.9, aqui reproduzida:

$$L < 20.D \quad (3.9)$$

o que significa que quando os propulsores possuírem uma distância relativa entre si menor que 40 metros haverá interferência considerável entre eles.

A partir da figura 4.1 calculam-se as distâncias entre os propulsores que sofrem interferência, e seus valores estão mostrados na tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Propulsores que sofrem interferência entre si, com suas distâncias.

Par de propulsores	distância (m)
1, 2	31,54
1, 3	27,27
2, 3	17,41
4, 5	27,59
4, 6	26,88
5, 6	17,10

Em relação ao centro de gravidade G , a barçaça BGL1 apresenta propulsores localizados próximos às extremidades direita (propulsores 1, 2 e 3) e esquerda (propulsores 4, 5 e 6). Levando em conta a equação 3.9, que apresenta a relação de distância entre os propulsores e seu diâmetro, verifica-se que as distâncias apresentadas na tabela 4.2 são as únicas levadas em conta no modelo da alocação de empuxo, e que os propulsores na proa estão suficientemente afastados dos propulsores da popa, de forma a não apresentar interferência. As distâncias entre os propulsores são determinadas em relação ao sistema de coordenadas locais da embarcação, que toma como origem o seu centro de gravidade G . Sendo assim, na coordenada referente ao avanço os propulsores que possuem coordenadas em x_1 positivas estão na proa, e os que possuem estas coordenadas negativas, na popa.

A interferência é considerada na alocação de empuxo, na ocasião do cálculo da potência. Havendo interferência, a eficiência dos propulsores envolvidos é reduzida, exigindo maior esforço nos propulsores para compensar esta perda, aumentando, conseqüentemente, a potência consumida. O mesmo efeito ocorre quando há interação casco-propulsor.

4.3. Considerações sobre as simulações e os dados de entrada

Os algoritmos usados nas simulações, como já exposto anteriormente, se baseiam em dois métodos: algoritmos genéticos e programação quadrática seqüencial (SQP). No método dos algoritmos genéticos serão apresentados resultados de dois algoritmos: um considerando população com indivíduos binários e outro, população com indivíduos reais. As particularidades verificadas em cada algoritmo (e portanto, em cada simulação) serão discutidas durante sua apresentação.

As forças comandadas serão aplicadas de duas formas:

- **linear** – a partir de um valor inicial para as forças F_1 (avanço), F_2 (deriva) e F_6 (guinada), seus valores aumentam progressivamente, na mesma proporção, até um valor máximo estipulado.
- **senoidal** – a variação das forças comandadas obedece a uma onda senoidal, também partindo de um valor inicial, atingindo um valor de pico pré-determinado e diminuindo em seguida.

Em ambos os casos, o intervalo total de forças é dividido em intervalos menores, ou subintervalos, cada qual analisado separadamente. A análise total dos subintervalos dará a descrição da alocação de empuxo para a embarcação.

4.3.1. Aplicação de forças lineares

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

$$T_{m\acute{a}x} = 285.000 \text{ N}$$

$$F_{1,min} = 0, F_{1,m\acute{a}x} = 1.000.000 \text{ N}$$

$$F_{2,min} = 0, F_{2,m\acute{a}x} = 1.000.000 \text{ N}$$

$$F_{6,min} = 0, F_{6,m\acute{a}x} = 60.000.000 \text{ N}$$

onde $T_{m\acute{a}x}$ 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 $F_{1,m\acute{a}x}$, $F_{2,m\acute{a}x}$ e $F_{6,m\acute{a}x}$ são as forças finais, no mesmo intervalo.

TANNURI (2002) utilizou esta faixa de valores em seu trabalho, dividindo-a em 500 partes, quando desenvolveu a modelagem de alocação de empuxo baseada no método SQP. No presente trabalho, para gerar um estudo comparativo, serão utilizados os mesmos parâmetros. Sendo assim, tomando como base a força F_1 , em cada iteração a força comandada é um múltiplo de $(1.000.000 - 0)/500 = 2000 \text{ N}$, ou seja, $F_{1,1} = 2000 \text{ N}$, $F_{1,2} = 4000 \text{ N}$, $F_{1,3} = 6000 \text{ N}$, e assim por diante. Assume-se aqui que $F_{1,0} = F_{min} = 0$.

Na figura 4.2 estão representadas as três forças comandadas linearmente.

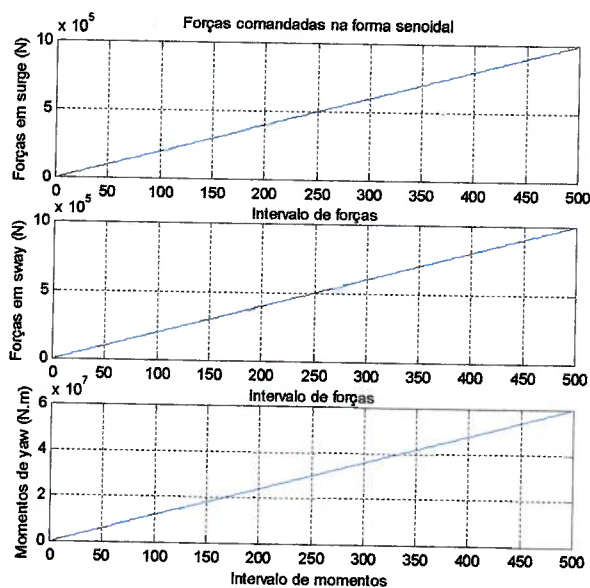


Figura 4.2 – Representação da variação de forças comandadas linearmente.

4.3.2. Aplicação de forças senoidais

As mesmas forças mínimas e máximas estipuladas para a aplicação linear são utilizadas aqui. A diferença é que a força, em cada coordenada oscila entre os valores máximo e mínimo senoidalmente. Este procedimento está ilustrado na figura 4.3:

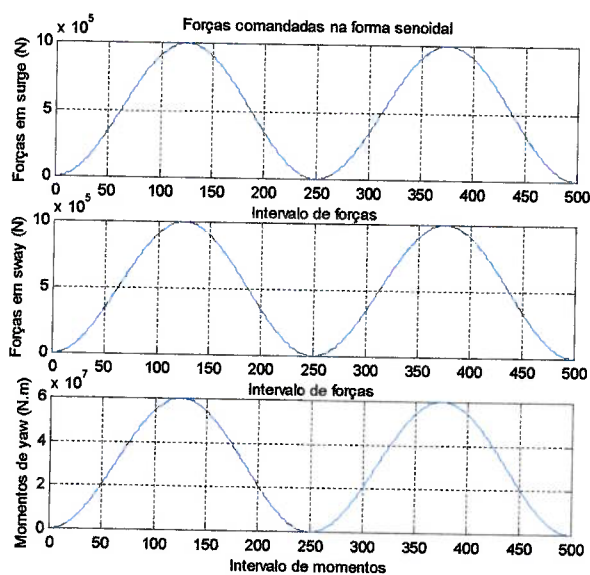


Figura 4.3 – Representação da variação de forças comandadas senoidalmente, em um único sentido.

É possível verificar na figura 4.3 que as forças comandadas oscilam em torno de valores positivos, ou seja, é considerado que sua aplicação ocorra sempre no mesmo sentido. Para esta forma de onda as forças são determinadas considerando:

$$F_{1,i} = 500.000 \operatorname{sen} \left(i \frac{\pi}{125} - \frac{\pi}{2} \right) + 500.000$$

$$F_{2,i} = 500.000 \operatorname{sen} \left(i \frac{\pi}{125} - \frac{\pi}{2} \right) + 500.000 \quad i = 1, 2, \dots, 500$$

$$F_{6,i} = 30.000.000 \operatorname{sen} \left(i \frac{\pi}{125} - \frac{\pi}{2} \right) + 30.000.000$$

Analogamente à força linear, $F_{1,1} = 157,9$ N, $F_{1,2} = 631,5$ N, e assim por diante, sendo que $F_{1,0} = F_{min} = 0$.

4.4. Solução por Algoritmos Genéticos com População Binária

4.4.1. Convergência do algoritmo

Na modelagem proposta neste trabalho estão envolvidos: componentes das forças de propulsão, ângulos de azimute, cálculo da diferença de forças e a potência consumida. Uma das características mais interessantes dos algoritmos genéticos é a garantia de convergência para o extremo global em modelos complexos (GEN, CHENG; 1997). A rapidez na convergência para um extremo global depende essencialmente dos valores considerados para a probabilidade de cruzamento e de mutação, além do tamanho da população. Os valores para probabilidade de cruzamento e mutação devem ser selecionados de forma a não produzir convergência para extremos que não sejam o global, ou convergência prematura (SOARES, 1997). No presente trabalho os valores para estes parâmetros foram determinados experimentalmente.

Na solução por algoritmos genéticos estão sendo considerados, ainda, dois termos que merecem destaque: **geração** e **iteração**. Uma geração é uma posição na execução do algoritmo, daí no termo “número de gerações” utilizadas para garantir a convergência. Em cada geração são aplicados os operadores genéticos, e a nova população é então usada na geração seguinte. Uma iteração é uma execução completa do algoritmo, ou seja, em cada iteração estão incluídas todas as gerações.

As iterações são usadas na elaboração do algoritmo genético quando se considera um intervalo de forças comandadas, como é o caso das forças representadas nas figuras 4.2 a 4.3.

Para testar a convergência do algoritmo, serão apresentadas várias simulações considerando valores diferentes de ponderações para cada grupo: 1, 2 e 3 na equação 3.27 (Seções 3.5.2.1, 3.5.2.2 e 3.5.2.3, respectivamente). Em cada simulação será apresentada uma tabela com os valores de ponderações atribuídos para cada grupo. Neste caso, considera-se um salto do tipo degrau nas forças comandadas e momentos. Os dados considerados nesta simulação são:

$$F_1 = 500.000 \text{ N}$$

$$F_2 = 500.000 \text{ N}$$

$$F_6 = 30.000.000 \text{ N.m}$$

$$p_c = 0,75$$

$$p_m = 0,001$$

$$n_{ind} = 20$$

$$n_{ger} = 100$$

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. O comprimento dos indivíduos é determinado pela equação 3.17, reproduzida aqui por simplicidade:

$$n_{bits} = \frac{\log[(F_{su} - F_{in})10^{p_r}]}{\log(2)} \quad (3.17)$$

Na equação 3.17 os termos F_{su} e F_{in} são os valores máximo e mínimo, respectivamente, para as forças de empuxo nos propulsores, quer sejam a força resultante ou uma das componentes da força, dependendo do propósito do indivíduo na população, e p_r é a precisão requerida para o indivíduo quando convertido para real. Considerando que $T_{máx} = 285.000 \text{ N}$, tem-se os valores:

$$F_{su} = 285.000 \text{ N}$$

$$F_{in} = -285.000 \text{ N}$$

e, além disso, a precisão requerida $p_r = 6$. Com estes dados, tem-se $n_{bits} = 39$.

No presente trabalho foram testados vários valores para p_c , p_m , n_{ind} e n_{ger} . O número de indivíduos (n_{ind}) foi escolhido de forma a ser o menor possível, ao mesmo tempo que produzisse uma boa convergência. Nos testes realizados, valores menores que 20 geravam resultados diferentes em diferentes execuções. Quando maior este número, melhores os resultados, porém mais lento o algoritmo. Desta forma determinou-se a população com 20 indivíduos. Da mesma forma, as probabilidades de cruzamento e mutação (p_c e p_m) foram selecionadas por produzirem boa uniformidade nos resultados, em diferentes execuções. O valor 100 para o número de gerações (n_{ger}) foi definido por ter sido considerado suficiente para se atingir boa convergência. Valores menores que 100, em diferentes execuções, apresentaram instabilidade nos resultados.

A cada geração do algoritmo genético são produzidos 20 indivíduos, conforme apontado anteriormente como dados de entrada. Porém, não interessa mostrar o valor de todos os indivíduos, porque nem todos convergem para o mesmo resultado. O que interessa é encontrar o valor ótimo dentre os indivíduos produzidos, mesmo que os demais sejam ruins. Os elementos ruins podem, em uma próxima geração, dar origem a um outro elemento melhor que o anterior, dependendo da sua carga genética.

4.4.1.1. Atribuição de ponderações para cada termo isoladamente

A seguir serão mostrados resultados da simulação para a minimização do índice de desempenho definido na equação 3.26, com diferentes ponderações para os termos. Para cada situação será apresentada uma tabela com as ponderações consideradas na simulação. Os resultados estão na figura 4.4.

Tabela 4.3 – 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_{mm}^N	Q_i^N	S_i
10	10	15	1	1	1	1

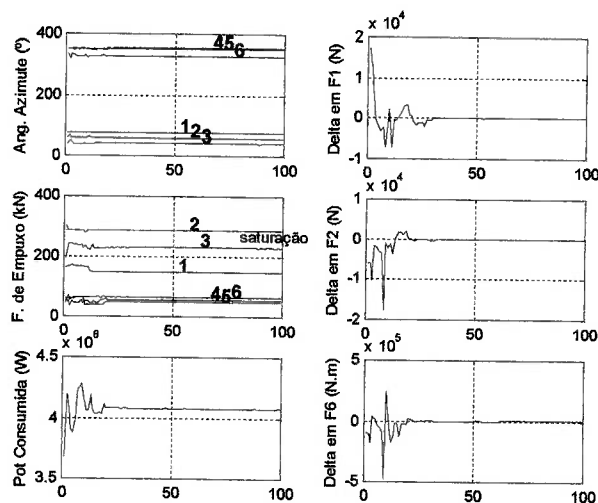


Figura 4.4 – Resultados da simulação com ponderação priorizando os termos do Grupo 1: ΔF_1^N , ΔF_2^N e ΔF_6^N .

Na figura 4.4 as maiores ponderações foram consideradas para os termos do grupo 1: ΔF_1^N , ΔF_2^N e ΔF_6^N fazendo com que as forças de empuxo sejam equilibradas pelas forças comandadas. A numeração mostrada nos gráficos de ângulos de azimuth e forças de empuxo se refere a cada um dos 6 propulsores. Na figura, verifica-se que o gráfico correspondente às forças de empuxo apresenta valor próximo a T_{max} (saturação) para o propulsor 2.

À medida que a potência vai sendo priorizada, o equilíbrio das forças torna-se enfraquecido. De fato, se não houvesse a restrição que trata do equilíbrio das forças comandadas e geradas nos propulsores, a menor potência seria calculada para pequenas forças de empuxo, independentemente das forças comandadas. Para ilustrar este fato, a simulação anterior será realizada com um valor de ponderação para a potência igual àqueles aplicados para os termos ΔF_1^N e ΔF_2^N :

Tabela 4.4 – Simulação da alocação de empuxo, com maior prioridade para a potência consumida.

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	10	1	1	1

Os resultados estão apresentados na figura 4.5:

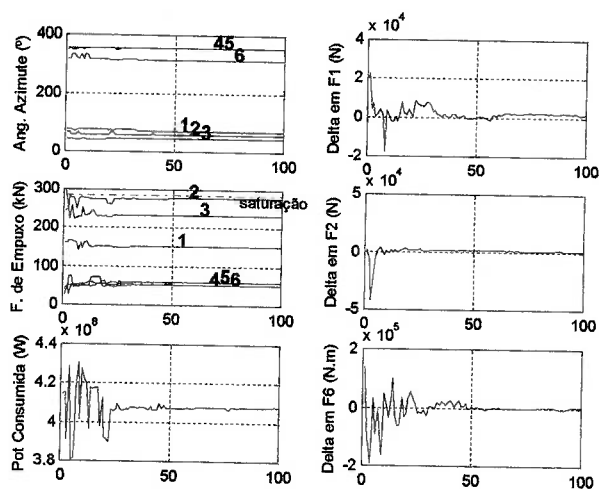


Figura 4.5 – Simulação com uma prioridade maior para a potência consumida.

Verificam-se nos gráficos do lado direito da figura 4.5 que a diferença entre as forças de empuxo e as forças comandadas começa a aumentar à medida que a potência consumida diminui, ou seja, priorizar o consumo de energia faz com que esta diferença aumente, o que não é interessante para o posicionamento, se ainda houver potência disponível nos propulsores. Isso significa que um valor elevado da ponderação para a potência faz com que seu valor diminua, mas não significa que a alocação de empuxo é ótima. Uma alocação ótima é aquela que consome a menor quantidade de potência possível mantendo o equilíbrio das forças para a embarcação. Em outras palavras, tentar equilibrar todas as forças (F_1 , F_2 e F_6) não garante que o consumo de potência seja o menor, mas uma potência simplesmente capaz de equilibrar as forças comandadas, o que é o mais importante em posicionamento dinâmico, em geral. A figura 4.5 apresenta a alocação de empuxo ótima, pois é o momento em que o equilíbrio entre as forças começa a se desfazer. Estas ponderações para forças e potências serão usadas nos próximos resultados.

Estes resultados foram apresentados para uma única força, chamada aqui de aplicação degrau. Os próximos resultados apresentarão as respostas dos propulsores para as forças continuamente aplicadas, conforme figuras 4.2 a 4.4 e com os valores de ponderações constantes na tabela 4.4.

4.4.1.2. Forças comandadas linearmente

A figura 4.6 apresenta a simulação para as forças aplicadas na forma linear, conforme figura 4.2. Nesta simulação serão mostrados os valores dos ângulos de azimute, das forças de propulsão para cada propulsor e da potência consumida durante a evolução das forças:

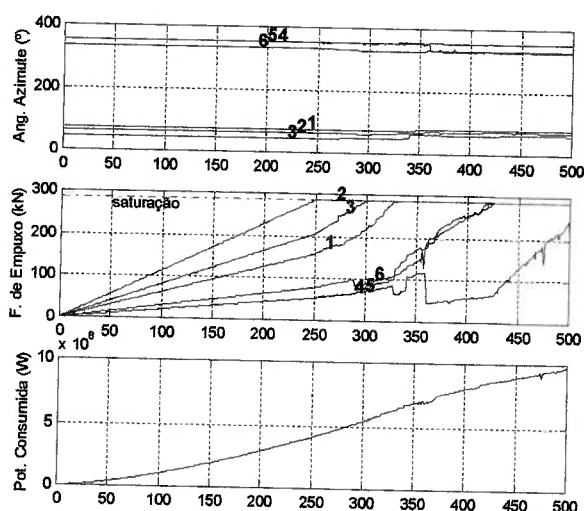


Figura 4.6 – Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para uma variação linear de forças usando algoritmos genéticos binários.

Na figura é possível verificar que, à medida que os propulsores atingem a saturação, os demais propulsores deixam de ter suas forças obedecendo à estrutura linear, aumentando ligeiramente seus valores. Isso ocorre para que o equilíbrio seja mantido, até que todos os propulsores saturem, quando então o equilíbrio deixa de ser respeitado. Os resultados obtidos consideram o limite de empuxo em cada propulsor. Sendo assim a potência máxima admissível por propulsor está associada ao empuxo produzido. Sendo máximo, a potência também será a máxima permitida.

A figura 4.7 mostra a evolução das forças comandadas e produzidas pelos propulsores. Pode-se verificar que, à medida que os propulsores saturam, a diferença entre as forças e os momentos aumenta.

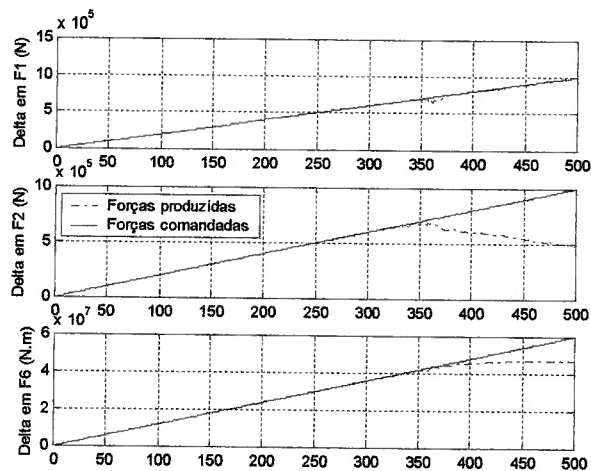


Figura 4.7 – forças comandadas e produzidas, para a forma linear com algoritmos genéticos binários.

4.4.1.3. Forças comandadas senoidalmente

A figura 4.8 apresenta a simulação da alocação de empuxo para uma onda de forças agindo senoidalmente sobre a embarcação, com sua representação mostrada na figura 4.3:

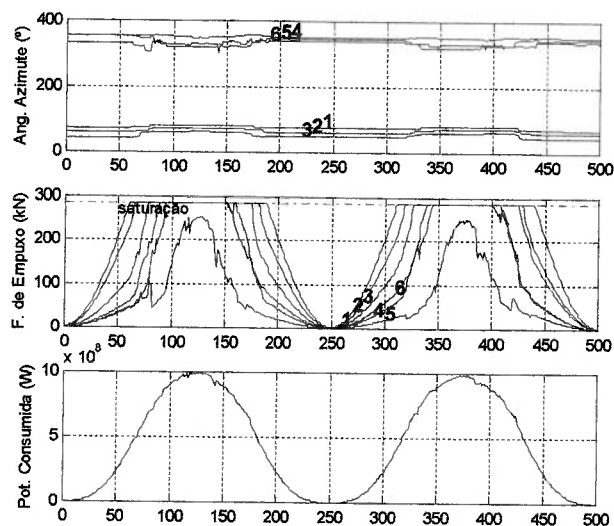


Figura 4.8 – Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para a aplicação senoidal.

Esta é uma forma alternativa de apresentação de forças comandadas. A simulação anterior é válida para análise da alocação de empuxo quanto à saturação

dos propulsores. A simulação realizada nesta subseção se aproxima mais de uma situação real, onde uma força externa (com a força das ondas, ventos, etc) tem seu valor oscilando sobre a embarcação. A diferença entre as forças está mostrada na figura 4.9. Assim como no caso das forças na forma linear, quando os propulsores saturam, a embarcação tende a sair da sua posição de equilíbrio (definida pelos *set points*)

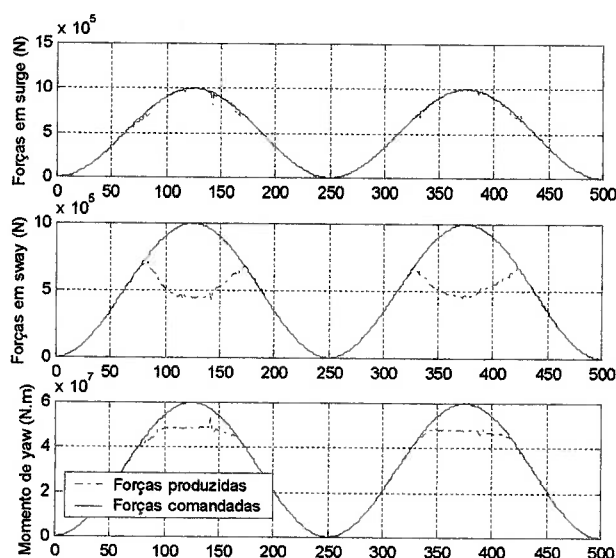


Figura 4.9 – Diferenças de forças comandadas e produzidas considerando a força senoidal.

4.5. Solução por Algoritmos Genéticos com População Real

As características das simulações dos algoritmos genéticos com população binária e população real são bastante semelhantes. Após a geração da população inicial, seus indivíduos são submetidos aos operadores genéticos com o objetivo de se obter indivíduos que produzam o equilíbrio estático da embarcação. A solução por algoritmos genéticos com indivíduos reais manipula os indivíduos diretamente, diferentemente da solução com população binária, que após a aplicação dos operadores genéticos existe a conversão dos indivíduos para real. O mesmo resultado produzido na figura 4.6 está mostrado na figura 4.10, com população real:

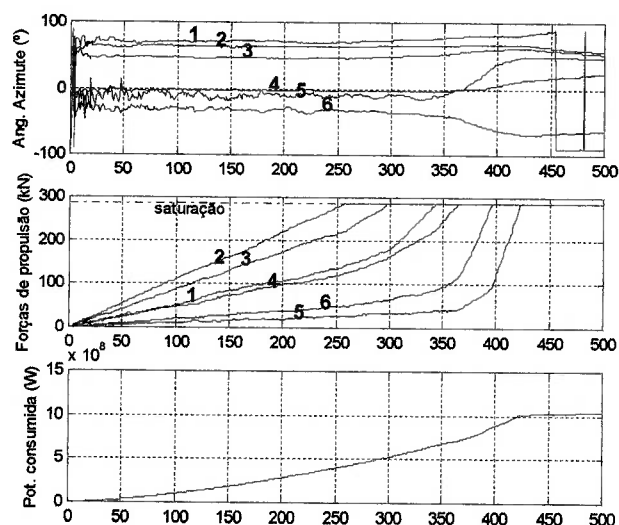


Figura 4.10 – Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para uma variação linear de forças usando algoritmos genéticos reais.

Em relação à figura 4.6, nesta simulação todos os propulsores saturaram após, aproximadamente, 420 iterações. Pela experiência realizada, os algoritmos genéticos contendo população binária produzem os valores reais, que no momento da saturação, são usados na sua verificação. A eliminação da saturação, portanto, é realizada através dos elementos reais, porém aplicada aos indivíduos binários, o que retarda o procedimento de eliminação da saturação, aumentando a diferença entre as forças antes mesmo que todos os propulsores saturam. Este efeito não é notado na segunda simulação (com indivíduos reais) porque a eliminação da saturação é realizada diretamente nos indivíduos da população e os mesmos são usados para gerar a nova população para a iteração seguinte.

Há ainda outro ponto que merece destaque. Entre as iterações 350 e 450, na figura 4.10, é possível verificar que o ângulo de azimute nos propulsores 4 e 5 dão um salto de 360° aproximadamente. Isso ocorre por questões de aproximação numérica. Por exemplo, quando o valor de um ângulo ultrapassa suavemente o valor de 360° significa que, geometricamente, iniciará um novo ciclo, porém na prática significa que o propulsor apresentou um pequeno azimute entre as duas iterações que produziram o salto.

Assim como as figuras 4.7 e 4.9, a figura 4.11 apresenta a comparação entre as duas forças (comandadas e produzidas). Na figura 4.10, verifica-se que aproximadamente na iteração 420 todos os propulsores saturam, e na figura 4.11 é possível verificar que a partir desta iteração as forças comandadas e produzidas se dispersam, nos três gráficos simultaneamente. No gráfico referente às forças em *sway*, verifica-se que a separação entre as forças aconteceu bem antes dessa iteração (efeito também verificado nas figuras 4.7 e 4.9), devido a maior dificuldade de controle nesta direção, já que as ponderações das forças em *surge* e *sway* são as mesmas, e as coordenadas dos propulsores em *surge*, bem maiores que em *sway* (ver tabela 4.1).

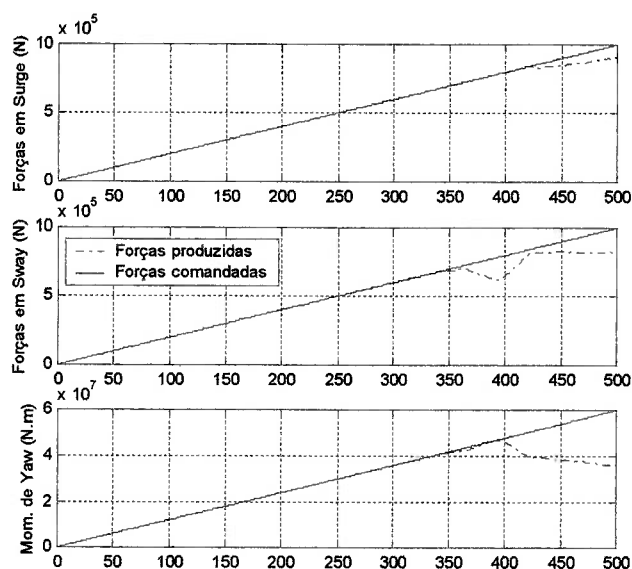


Figura 4.11 – Forças comandadas e produzidas, para a forma linear com algoritmos genéticos reais.

Seguindo a proposta apresentada inicialmente, para esta categoria de algoritmos genéticos (reais) também foi realizada uma simulação para forças comandadas obedecendo a forma senoidal. O resultado está na figura 4.12 abaixo:

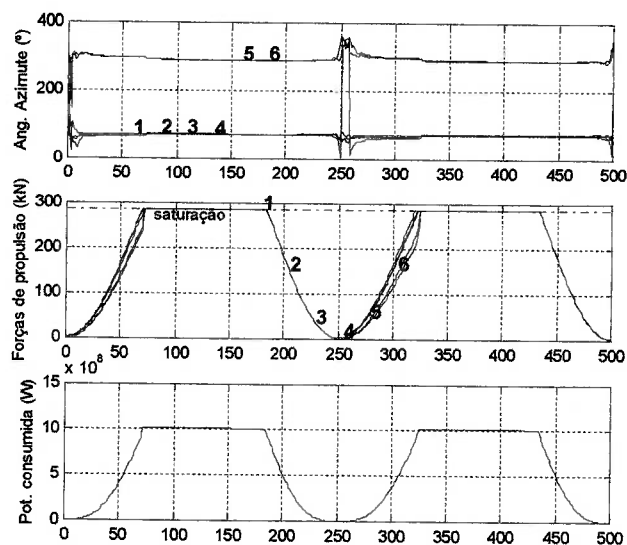


Figura 4.12 – Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para uma variação senoidal de forças usando algoritmos genéticos reais.

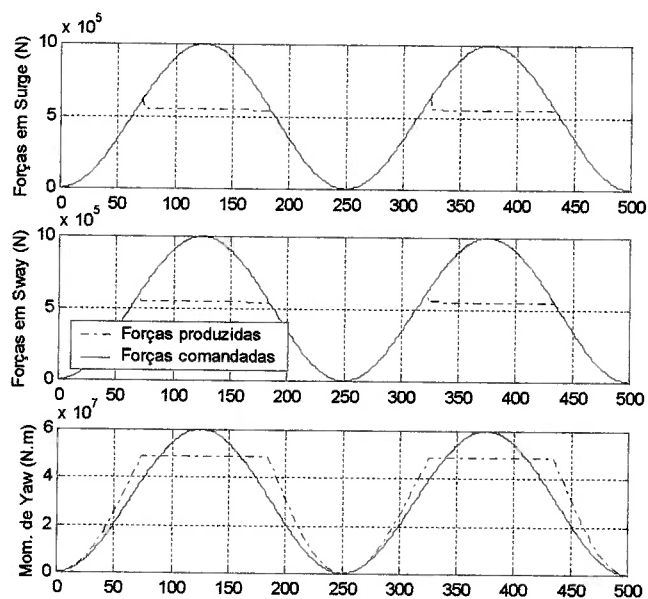


Figura 4.13 – Forças comandadas e produzidas, para a forma senoidal com algoritmos genéticos reais.

Entre as soluções apresentadas por algoritmos genéticos binários e reais, é possível verificar que na solução com população binária, os propulsores demoram mais para atingirem saturação do que na solução com população real. Pelas experiências realizadas, pode-se constatar que isso ocorre porque na população

binária os operadores genéticos são aplicados aos cromossomos binários, que só posteriormente são convertidos para real. Isso produz uma instabilidade na solução, de forma que os valores reais (após conversão) não representam os dados verídicos do SPD. Operando diretamente com os resultados, ou seja, com a população real, a possibilidade de obtenção de dados mais confiáveis é maior.

4.6. Solução pelo método SQP

O método SQP usado aqui considera como restrições funcionais o equilíbrio da embarcação, conforme equação 3.2, reproduzida a seguir:

$$\mathbf{AT} = \mathbf{F} \quad (3.2)$$

e como função objetivo a minimização da potência, dada pela equação 3.5, também reproduzida abaixo:

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

Neste procedimento não está contemplado o conceito de ponderações. Como o método dos algoritmos genéticos é um método probabilístico, sua convergência depende de tais ponderações. No método SQP, por ser um método determinístico, sua convergência é obtida por derivações sucessivas. Os dados para simulação são os mesmos considerados na seção 4.3, para possibilitar um estudo comparativo entre os métodos. Analogamente aos métodos baseados em algoritmos genéticos já apresentados, neste método serão apresentadas simulações considerando as duas formas de aplicação de forças comandadas: linear e senoidal.

4.6.1. Forma linear

A figura 4.14 apresenta a simulação para a alocação de empuxo na forma de onda linear.

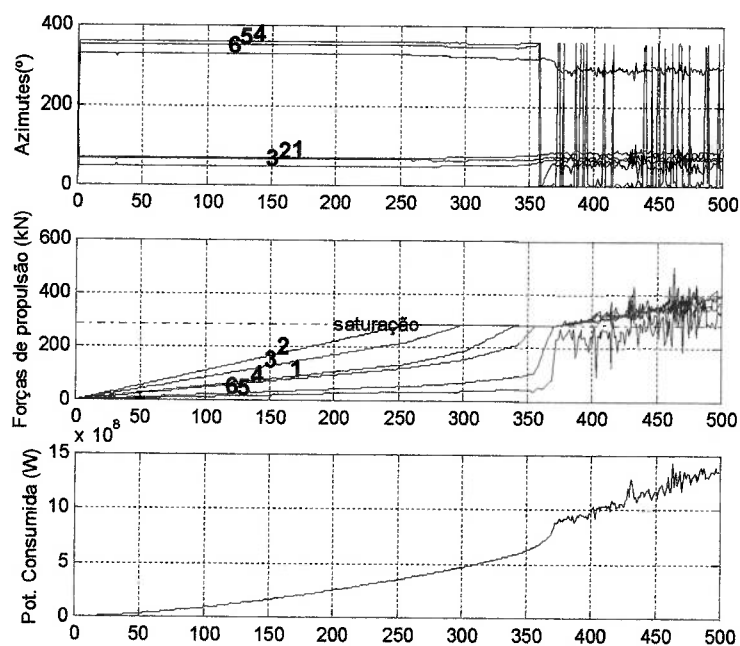


Figura 4.14– Ângulos de azimute, forças comandadas e potência consumida para uma variação linear de forças usando SQP.

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

$$\begin{cases} \sqrt{(T_{x1,i})^2 + (T_{x2,i})^2} \leq T_{máx,i} \\ T_i \leq T_{máx,i} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, n_{prop} \quad (4.1)$$

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.

O método da Programação Quadrática Seqüencial (SQP) trata o problema original como sendo dividido em subproblemas de Programação Quadrática com vínculos lineares obtidos por linearização (BAZAARA; TANNURI, 2002). A abordagem para este problema é a descrita a seguir.

Enquanto não houver saturação, ou quaisquer vínculos de desigualdades, pode-se obter a solução analítica do problema de minimização:

$$\min_T L(T) \quad \text{sujeito a } \mathbf{AT} = \mathbf{F} \quad (4.2)$$

sendo $L(\mathbf{T})$ definido na equação 3.37, por se tratar do caso de minimização de um funcional quadrático sujeito a um vínculo de igualdade linear.

A condição necessária satisfeita para a solução do problema de minimização é dada pela equação 3.44:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{T}} = 0 \Rightarrow \frac{3}{2} \sqrt{|\mathbf{T}|} \cdot s + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}^T + 2\boldsymbol{\mu} \mathbf{T} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = 0 \Rightarrow \mathbf{A} \mathbf{T} - \mathbf{F} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\mu}} = 0 \Rightarrow 2\boldsymbol{\mu} \mathbf{T} = 0 \end{cases} \quad (3.44)$$

Como já mencionado na seção 3.5.3 (onde a condição necessária foi apresentada) esta formulação é válida enquanto houver propulsor não saturado. Quando todos os propulsores saturarem, a formulação não é mais válida, por não representar o comportamento correto da alocação de empuxo. De fato, na figura 4.15 é possível verificar que o vínculo de desigualdade (equação 4.1) não é mais respeitado. Mesmo assim, o vínculo linear $\mathbf{A} \mathbf{T} = \mathbf{F}$ permanece válido, como é possível verificar na figura 4.16:

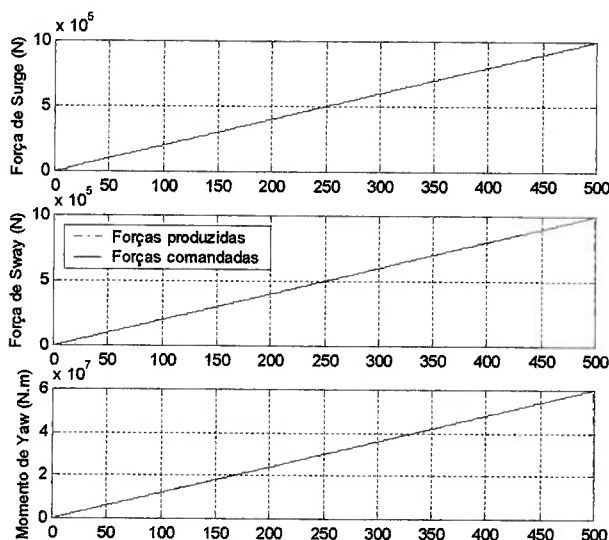


Figura 4.15– Forças comandadas e produzidas, para a forma linear usando SQP.

Em relação à figura 4.11, por exemplo, verifica-se que, teoricamente, a embarcação permanece 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. Em outras palavras, a partir do momento em que todos os propulsores saturam, o método perde a validade. Na forma senoidal é possível verificar o mesmo comportamento.

4.6.2. Forma senoidal

A seguir será apresentada a simulação pelo método SQP para um conjunto de forças comandadas obedecendo a forma senoidal. A figura 4.16 apresenta, como nos casos anteriores, os ângulos de azimute, as forças de propulsão e a potência consumida. Na figura 4.17 estão mostradas as forças comandadas em relação às forças produzidas. Percebe-se, neste caso, que as forças também permanecem as mesmas, mesmo quando todos os propulsores saturam, da mesma forma que a apresentada usando a forma linear.

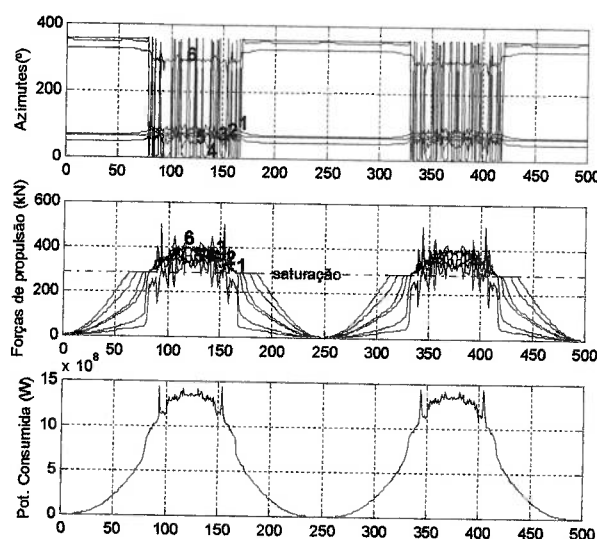


Figura 4.16– Ângulos de azimute, forças de empuxo e potência consumida par a forma senoidal do método SQP.

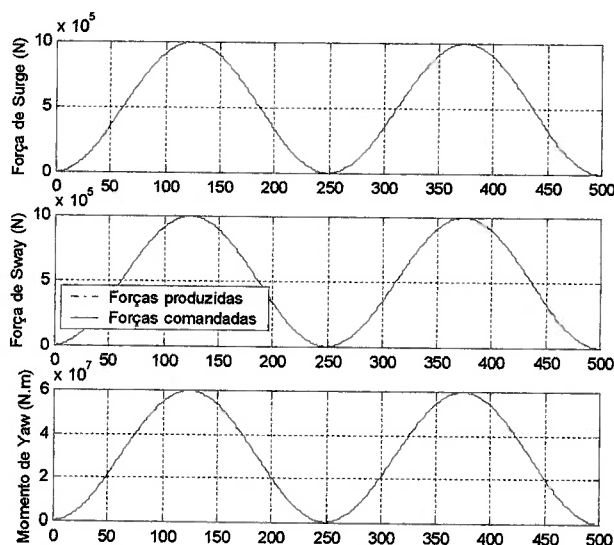


Figura 4.17– Forças comandadas e produzidas pelos propulsores para o método SQP na forma senoidal.

4.7. Comparação entre os métodos

Nas seções anteriores foram apresentados os resultados das simulações para a alocação de empuxo, usando dois métodos diferentes: algoritmos genéticos e programação quadrática seqüencial, sendo que o método dos algoritmos genéticos foi executado em duas formas diferentes: com indivíduos binários e com indivíduos reais. Todos eles possuem o mesmo propósito e apresentam, com pequenas variações, os mesmos resultados. Nesta seção será apresentado um estudo das diferenças entre os métodos, e quais vantagens e desvantagens apresentam na alocação de empuxo.

A tabela 4.6 apresenta os valores de potência consumida em algumas iterações do algoritmo, levando em conta os pontos mais críticos, como valor máximo da potência, potência considerada antes de algum propulsor saturar, com partes dos propulsores ou todos os propulsores saturados:

Tabela 4.5 – Valores da potência consumida pelo sistema propulsor em diferentes iterações dos algoritmos, na forma linear.

	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	$9,977842.10^8$	$9,735836.10^8$	$1,352443.10^9$

Tabela 4.6 – Valores da potência consumida pelo sistema propulsor em diferentes iterações dos algoritmos, na forma senoidal.

	AG		SQP
	binário	real	
	Potência consumida calculada (W)		
tempo (seg.)	1230	205	55
iteração 63	$4,145669.10^8$	$7,091087.10^8$	$3,623784.10^8$
iteração 95	$8,643503.10^8$	$1,007614.10^9$	$1,452693.10^9$
iteração 125	$1,003128.10^9$	$1,007169.10^9$	$1,332869.10^9$
iteração 175	$6,162486.10^8$	$1,006658.10^9$	$5,482508.10^8$

Para os dados de entrada do algoritmo, na forma linear, o ponto 125 foi tomado aleatoriamente, como meio de comparação entre os três métodos. O ponto 250 é o ponto próximo ao início a primeira saturação, ou seja, próximo da iteração onde o primeiro propulsor satura. A partir daí os demais propulsores saturam. Analogamente, o ponto 375 é um ponto contendo propulsores saturados e não saturados, e o ponto 500 é o ponto final, onde todos os propulsores se encontram saturados. No caso da forma senoidal os pontos pesquisados têm o mesmo propósito. O ponto 125 corresponde ao ponto 500 na forma linear; o ponto 63, ao ponto 250 e assim por diante.

Analisando as tabelas 4.5 e 4.6 é fácil perceber que o método SQP é o mais rápido de todos, e o método baseado em AG com população binária, o mais lento.

As experiências realizadas no presente trabalho permitiram constatar que os resultados obtidos por algoritmos genéticos, levando em conta as porcentagens de cruzamento e mutação, tamanho da população e do indivíduo (no caso de população binária) apresentaram convergência, mas são levemente diferentes em diferentes execuções, o que não ocorre com o método SQP. Isso acontece porque o método dos AG, sendo probabilístico, trabalha com múltiplos indivíduos e a seleção do melhor

deles nem sempre resulta no mesmo valor. Mesmo assim, o comportamento entre os resultados obtidos por algoritmos genéticos, tanto lineares como senoidais são bastante próximos. Por exemplo, os valores da potência quando todos os propulsores estão saturados mantiveram bem próximos, indicando a potência máxima consumida pelo conjunto de propulsores, em torno de 10^9 W.

As variações calculadas para a potência máxima entre os métodos e formas de onda estão apresentadas na tabela 4.7:

Tabela 4.7 – Comparação entre os métodos.

		Forma Linear		
		AG (bin)	AG (real)	SQP
Forma Senoidal	AG (bin)	0,52%	2,94%	34,82%
	AG(real)	0,93%	3,33%	34,28%
	SQP	25,14%	26,96%	1,46%

Comparativamente, os melhores resultados (os que apresentam valores de potência mais próximos) estão entre os algoritmos genéticos, tanto com população binária como com população real, nas duas formas, e entre os métodos SQP, também nas duas formas. A comparação entre os diferentes métodos resultou em grandes divergências, como pode ser observado na tabela. Enquanto restarem propulsores sem saturar, o método SQP se mostrou mais interessante, pelo tempo de execução e exatidão dos resultados, mas, a partir do momento que todos os propulsores saturam, as restrições de igualdade (lineares) são mantidas, mas as restrições de desigualdade (não lineares) deixam de ser respeitadas, como já mencionado anteriormente neste capítulo. A restrição não linear, que trata da saturação nos propulsores, é a que deve ser priorizada, porque os propulsores não têm condições de fornecer mais empuxo do que são capazes. A restrição de posicionamento, apesar de também ter que ser respeitada, naturalmente deixa de ser quando os propulsores saturam. Isso quer dizer que, pelos resultados obtidos, o método SQP permitiu a violação das restrições referentes à saturação, enquanto o método dos Algoritmos Genéticos não, mais especificamente os algoritmos genéticos reais.

4.7.1. Considerações sobre saturação no método dos AG

Quando os indivíduos (contendo as componentes das forças de empuxo) são produzidos pelo algoritmo, a eliminação daqueles resultados acima da saturação é realizada por meio da aplicação de ponderações adequadas para tais termos. As experiências realizadas mostraram que, apesar da aplicação das ponderações para este caso, ainda assim existiam indivíduos que ultrapassavam tal valor, e a produção de empuxo que esteja acima da saturação deve ser evitada. Para evitar que os propulsores produzam forças de empuxo acima da saturação, um procedimento específico foi aplicado. Este procedimento será descrito a seguir.

Considerando os 6 propulsores utilizados neste capítulo, tem-se a força de empuxo em cada um deles:

$$\mathbf{T} = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4 \quad T_5 \quad T_6] \quad (4.3)$$

onde \mathbf{T} é o vetor contendo todos os empuxos T_i com i sendo o número do propulsor. Quando algum propulsor T_k ultrapassa o valor da saturação, $T_{máx}$, é calculado o resíduo de forças para estes propulsores:

$$d_{sat} = \sum_k (T_k - T_{máx}), \quad k = \text{n}^\circ \text{ do propulsor sobresaturado} \quad (4.4)$$

onde d_{sat} representa, então, o resíduo de empuxo dos propulsores que ultrapassaram a saturação. Os valores do empuxo nos propulsores não saturados são somados:

$$d_{nsat} = \sum_p T_p, \quad p = \text{n}^\circ \text{ do propulsor não saturado} \quad (4.5)$$

onde d_{nsat} é a soma das forças de empuxo dos propulsores que ainda não saturaram.

Os propulsores que ultrapassaram a saturação terão seus valores iguais a $T_{máx}$ (máximo admissível para o propulsor) e os demais devem ter seus valores aumentados de forma a manter a somatória das coordenadas de forças constante, atendendo assim a restrição de igualdade que trata do equilíbrio das forças. Por isso, o resíduo total d_{sat} deve ser somado a d_{nsat} e posteriormente distribuído uniformemente entre os propulsores que não saturaram. Para isso, é calculado um fator de proporcionalidade, dado pela equação:

$$f_p = \frac{d_{sat} + d_{nsat}}{d_{sat}} \quad (4.6)$$

sendo f_p o fator de proporcionalidade mencionado. Este fator é então aplicado a cada propulsor não saturado:

$$T_k = T_k \cdot f_p \quad (4.7)$$

Se mesmo após a execução da equação 4.7 algum propulsor não saturado ultrapassar o limite de saturação, o procedimento é repetido, até que todos os propulsores estejam no limite ou abaixo da saturação. Se todos os propulsores saturarem, eles terão como força de empuxo o valor $T_{máx}$ e o equilíbrio da embarcação deixará de existir.

4.7.2. Considerações sobre a interferência entre os propulsores

A interferência entre dois propulsores produz perda de eficiência entre eles, exigindo um maior consumo de potência para compensar o empuxo requerido. Foi considerado no presente trabalho que o empuxo máximo admissível por propulsor representa também a potência máxima que ele pode fornecer. Isso quer dizer que, em caso de interferência, os propulsores são mais solicitados para produzir o mesmo empuxo.

Os resultados produzidos anteriormente não sofreram processo de interferência entre propulsores. Para gerar um resultado com interferência será apresentada a seguir uma nova simulação considerando algoritmos genéticos reais, com os seguintes parâmetros, considerando uma aplicação linear de onda de forças:

$$T_{máx} = 285.000 \text{ N}$$

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

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

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

O resultado da simulação é apresentado a seguir:

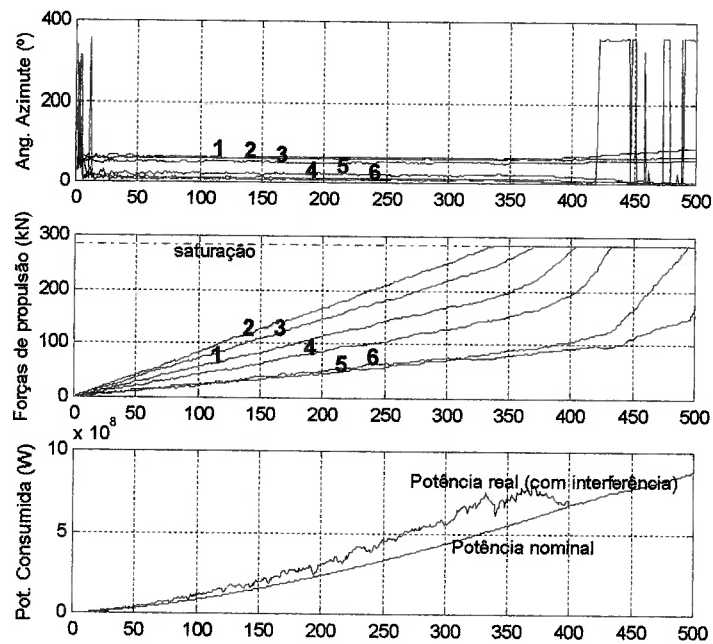


Figura 4.18– Acréscimo de potência na ocorrência de interferência entre propulsores.

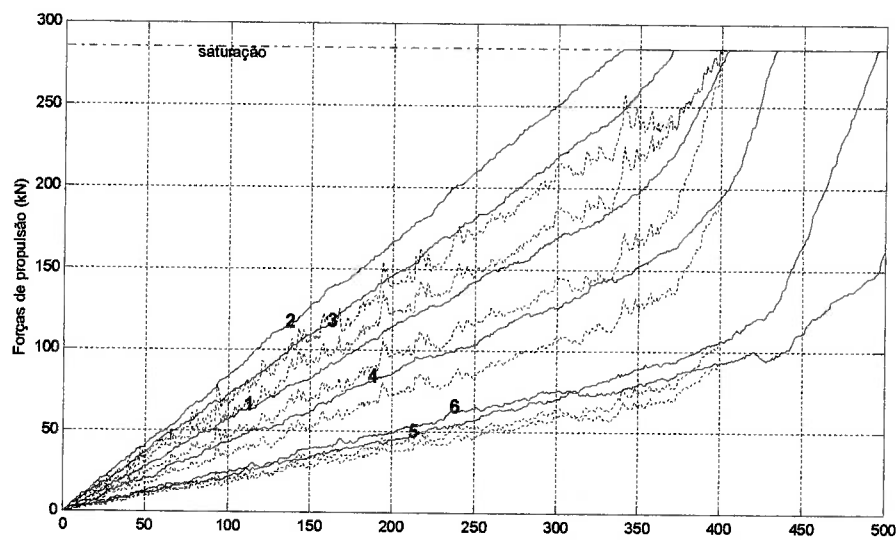


Figura 4.19– Redução no efeito das forças produzidas nos propulsores na ocorrência de interferência.

A figura 4.18 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 4.19 estão as forças nominais e as forças reduzidas. Neste sentido, forças reduzidas significam aquelas forças que, quando produzidas, estando sob interferência, produzem o mesmo efeito que as forças nominais.

Neste exemplo foi considerado que, quando a interferência é máxima (propulsores com suas esteiras na mesma direção) a perda de eficiência é de 20%. À medida que as esteiras se afastam a interferência passa a não ser mais significativa.

A representação da interferência foi realizada no presente trabalho apenas para a simulação com algoritmos genéticos reais, porém os demais métodos produzirão os mesmos resultados.

Capítulo 5. Comentários e Conclusões

No presente trabalho foi realizado um estudo sobre otimização da alocação de empuxo. Para tanto, foi desenvolvido um algoritmo baseado no método dos algoritmos genéticos, para minimizar uma função de custo envolvendo termos contendo ponderações para diferenças de forças, potência consumida, interferência entre propulsores, interação casco-propulsor e saturação. O algoritmo desenvolvido foi elaborado em duas partes: uma parte considerando população binária e outro, população real. 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 testar a diferença entre as forças comandadas e produzidas nos propulsores, os testes foram realizados de duas formas. Um deles considerou um conjunto de forças comandadas com valores fixos, em seguida foi considerada uma variação progressiva destas forças, com variação linear e senoidal. Em cada iteração considera-se que cada geração é independente da outra, sendo criada uma população inicial em cada uma delas.

Para avaliar a interferência entre os propulsores foi desenvolvido um procedimento geométrico para verificar sua ocorrência, baseado na soma dos ângulos de incidência dos propulsores em relação à linha de esteira dos dois propulsores considerados neste processo.

Os resultados obtidos com o algoritmo baseado em Algoritmos Genéticos foram comparados aos resultados obtidos em uma simulação realizada através do método da Programação Quadrática Seqüencial (SQP), que foi reproduzido de outro trabalho (TANNURI, 2002), incluindo as interferências e a forma senoidal de ondas de forças. 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. No caso dos algoritmos genéticos com população binária, o método SQP se mostrou cerca de 24 vezes mais rápido e, com população real, cerca de 4 vezes. Porém, no método SQP, 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 permanência destes resultados em iterações distintas.

Referências Bibliográficas

ARORA, J. S., **Introduction to Optimum Design**, International Edition, McGraw-Hill, Inc., 1989.

BACKMAYER, R., WHITCOMB, L., NAKAMURA, M., GROSENBAUGH, M., **Unsteady Three-Axis Force, Torque and Flow Dynamical Modeling and Experiments with Marine Thrusters**, The 10th International Symposium on Unmanned, Untethered Submersible Technology, Durham, 1997.

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

CAMPONOGARA, E., **Métodos de Otimização: Teoria e Prática**, Florianópolis, 2003. Dissertação – Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

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.

CAVALCANTI, J. H. F., ALSINA, P. J., FERNEDA, E., **Posicionamento de um Pêndulo Invertido usando Algoritmos Genéticos**, SBA Controle & Automação, Vol. 10, n^o 1, 1999, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

CHIPPERFIELD, A. J., FLEMING, P. J., FONSECA, C. M., **Genetic Algorithm Tools for Control Systems Engineering**, Adaptative Computing in Engineering Design and Control, Plymouth, UK, 1994.

CHOI, B. G., YANG, B. S. **Optimum Shape Design of Rotor Shafts Using Genetic Algorithm**, School of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University, South Korea, 1998.

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

DIAS, A. H. F., VASCONCELOS, J. A., **Multiobjective Genetic Algorithms Applied to Solve Optimization Problems**, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, n^o 2, 2002.

DIJK, R. R. V., AALBERS, A. B., **The use of Hydrodynamics do Improve DP**, Dynamic Positioning Committee, Wageningen, 2001.

DOLEN, M., KAPLAN, H., SEIREG. A., **Discrete Parameter –Nonlinear Constrained Optimization of a Gear Train Using Genetic Algorithms**, Middle East Technical University, Turkey; Atılım University, Turkey; University of Wisconsin-Madison, Madison, 2000.

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.

FOSSSEN, T. I., **Guidance and Control of Ocean Vehicles**, John Wiley & Sons, 1994.

FOSSSEN, T. I., JOHANSEN, T. A., BERGE, S. P., **Constrained Nonlinear Control Allocation with Singularity Avoidance using Sequential Quadratic Programming**, 2002.

FOSSSEN, T. I., JOHANSEN, T. A., FUGLSETH, T. P., TONDEL, P., **Optimal Constrained Control Allocation in Marine Surface Vessels with Rudders**, Department Of Engineering Cybernetics, Norwegian, 2003.

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

GIRARD, A. R., **Relative Dynamic Positioning of Ships and/or Offshore Platforms Using Nonlinear Dynamic Surface Control**, Ocean Engineering Graduate Group, The University of California, Berkeley, 2003.

GIRARD, A. R., SOUSA, J. B., HEDRICK, J. K., **Dynamic Positioning Concepts and Strategies for the Mobile Offshore Base**, University of California, Berkeley, 2001.

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.

HAMIDA, S. B., PETROWSKI, A., **The need for Improving the exploration operators for constrained optimization problems**, Ecole Polytechnique, France, 2000.

HILLIER, F. S., LIEBERMAN, G. J., **Introduction to Operations Research**, 6^o Edição, McGraw-Hill, Inc., 1995.

KIM, M. H., **Nonlinear Control and Robust Observer Design for Marine Vehicles**, Virginia, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2000.

KOOREN, T., QUADVLIEG, F., AALBERS, A., **The Rotor Tug**, 2000.

LAUDVAL, T., SORENSEN, A., ADNANES, STRAND, J. P., HANSEN, J. F.,

- SORDALEN, O. J., **Marintromics® Optimizing Marine : power and automation systems through industrial IT**, Asea Brown Boveri, 2000.
- LAUVDAL, T., ADNANES, A. K., **Optimizing and Evaluating the Performance of Power and Thruster Plant in DP Vessels with an Integrated Vessel Simulator**, Dynamic Positioning Conference, 2000.
- LIANG, C. C., CHENG, W. H., **The optimum control of thruster system for dynamically positioned vessels**, Department of Mechanical Engineering, Da-Yeh University, Journal of Ocean Engineering, 2004.
- MASLIAH, M. R., MILGRAM, P., **Measuring the Allocation of Control in a 6 Degree-of-Freedom Docking Experiment**, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Canadá, 2000.
- McKINVEN, A., **Cable Laying Vessels: A Review of Classification, Statutory and Station Keeping Aspects**, Dynamic Positioning Committee, Canadá, 2001.
- MOBERG, S.; HELLSTRÖM, S. A., **Dynamic Positioning of a four-collum semi submersible. Model tests of interaction forces and a philosophy about optimum strategy when operating thrusters**, Proceeding of Second International Symposium on Ocean Engineering and Ship Handling, Swedish Maritime Research Centre SSPA, p. 443-480, 1983.
- 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.
- NARCISO, M. G., LORENA, L. A. N., **Uso de Algoritmos Genéticos em Sistemas de Apoio a Decisão para Alocação de Recursos no campo e na Cidade**, Unicamp; LAC/INPE, 2002.
- OFFSHORE TECHNOLOGY, Estados Unidos. Disponível em <www.offshore-technology.com> . Acesso realizado em 06/09/2004.
- OLIVEIRA, A. C. M., LORENA, L. A. N., **Algoritmos Evolutivos para Problemas de Otimização Numérica com Restrições**, Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.
- PACHECO, M. A. C., **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações**, Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada, Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 1999.
- PETROBRAS Petróleo Brasileiro S.A., Brasil. Disponível em <www.petrobras.com.br>. Acesso realizado em 06/09/2004.
- Revista Mar & Mar, publicação MARESBRAZIL, disponível em <<http://www.maresbrazil.com/9/tecnica02.html>>. Acesso realizado em 07/10/2004.

RUNARSSON, T. P., YAO, X., **Stochastic Ranking for Constrained Evolutionary Optimization**, IEEE Transactions On Evolutionary Computation, Vol. 4, nº 3, 2000.

SCHOTTEL, Alemanha. Disponível em <www.schottel.de> Acesso realizado em 12/09/2004.

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.

SØRDALEN, O. J., **Thrust Allocation**, The Royal Norwegian Embassy, Singapore, 2004.

SØRENSEN, A. J., ADNANES, A. K., **High Performance Thrust Allocation Scheme in Positioning of Ships Based on Power and Torque Control**, Dynamic Positioning Conference, Houston, 1997.

SOUSA, J. B., FRAGA, S. L., MARTINS, A., PEREIRA, F. L., **A Control Framework For a Remotely Operated Vehicle**, Laboratório de Sistemas e Tecnologias Subaquáticas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2002.

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.

VAN DIJK, R. R. Th., AALBERS, A. B., **The use of Hydrodynamics to Improve DP**, Dynamic Positioning Conference, Wageningen, 2001.

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

YANG, J. M., HWANG, C. N., **Optimization of Corrugated Bulkhead Forms by Genetic Algorithm**, Journal of Marine Science Technology, Vol. 10, nº 2, pp. 146-153, 2002.

Bibliografia não citada

- BACHMAYER, R., WHITCOMB, L. L., GROSENBAUGH, M. A., **An Accurate Four-Quadrant Nonlinear Dynamical Model for Marine Thrusters: Theory and Experimental Validation**, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 25, nº 1, 2000.
- COELHO, L. S., COELHO, A. A. R., **Algoritmos Evolutivos em Identificação e Controle de Processos: Uma Visão Integrada e Perspectivas**, Departamento de Automação e Sistemas, UFSC, 2001.
- COOK, R. D., MALKUS, D. S., PLESHA, M. E., **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**, 3th Edition, John Wiley & Sons, Canada, 1989.
- GIRARD, A. R., HEDRICK, J. K., **A Hierarchical Control Architecture for Mobile Offshore Bases**, University of California at Berkeley, Canadian, 2004.
- GIRARD, A. R., SOUSA, J. B., HEDRICK, J. K., **Dynamic Positioning Concepts and Strategies for the Mobile OffShore Base**, University of California at Berkeley, Canadian, 2003.
- GIRARD, A., MISENER, J., SOUSA, J., HEDRICK, J. K., **Control and Evaluation of Mobile Offshore Base Operations**, University of California at Berkeley, Canadian, 2004.
- HAMIDA, S. B., PETROWSKI, A., **The Need of Improving the exploration operators for constrained optimization problems**, 1999.
- HSU, L., LIZARRALDE, F., COSTA, R. R., CUNHA, J. P. V. S., **Avaliação Experimental da Modelagem e Simulação da Dinâmica de um Veículo Submarino de Operação Remota**, Revista Controle e Automação, vol. 11, COPEE/UFRJ, EE/UFRJ, FEN/UERJ, Rio de Janeiro, 2000.
- JOHANSEN, T. A., FOSSEN, T. I., **Efficient Optimal Constrained Control Allocation via Multiparametric Programming**, Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 28, nº 3, 2005.
- JOHNSON, R. C., **Mechanical Design Synthesis – Creative Design and Optimization**, 2º Edição, Robert E. Krieger Publishing Company Inc., 1971.
- LIANG, C. C., CHENG, W. H., **An Effective Control System of Thrust and Moment Modulation for a Dynamically Positioned Vessel**, Marine Geodesy, Volume 22, nº 4, Taiwan, 1999.
- LIANG, C. C., CHENG, W. H., **The optimum control of thruster system for dynamically positioned vessels**, Department of Mechanical Engineering, Da-Yeh University, Taiwan, 2002.

LORIA, A., FOSSEN, T. I., PANTELEY, E., **A Separation Principle for Dynamic Positioning of Ships: Theoretical and Experimental Results**, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, n° 2, 2000.

OMERDIC, E., ROBERTS, G., **Control Allocation for Over-Actuated Thruster-Propelled Underwater Vehicles**, University of Limerick, Ireland, 2004.

ROMÃO, W., NIEDERAUER, C. A. P., MARTINS, A., TCHOLAKIAN, A., PACHECO, R. C. S., **Algoritmos Genéticos e Conjuntos Difusos Aplicados ao Controle de um Processo Térmico**, Escola de Engenharia de Produção, UFSC, 1999.

SØRENSEN, A. J., LEIRA, B., STRAND, J. P., LARSEN, C. M., **Optimal setpoint chasing in dynamic: positioning of deep-water and interventions vessels**, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 11, n° 13, Norway, 2001.

TANIMURA, Y., HIROYASU, T., MIKI, M., **Discussion on Distributed Genetic Algorithms for Designing Truss Structures**, Doshisha University, Kyoto, Japan, 2002.

TRIANAFYLLOU, M. S., HOVER, F. S., **Maneuvering and Control of Marine Vehicles**, Department of Ocean Engineering – Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 2002.

Apêndice – Configurações de Alocação de Empuxo

Neste Apêndice será apresentado um modelo de alocação de empuxo básico, com o objetivo de demonstrar como diferentes valores de forças de empuxo podem equilibrar estaticamente a embarcação, com gasto distinto de energia:

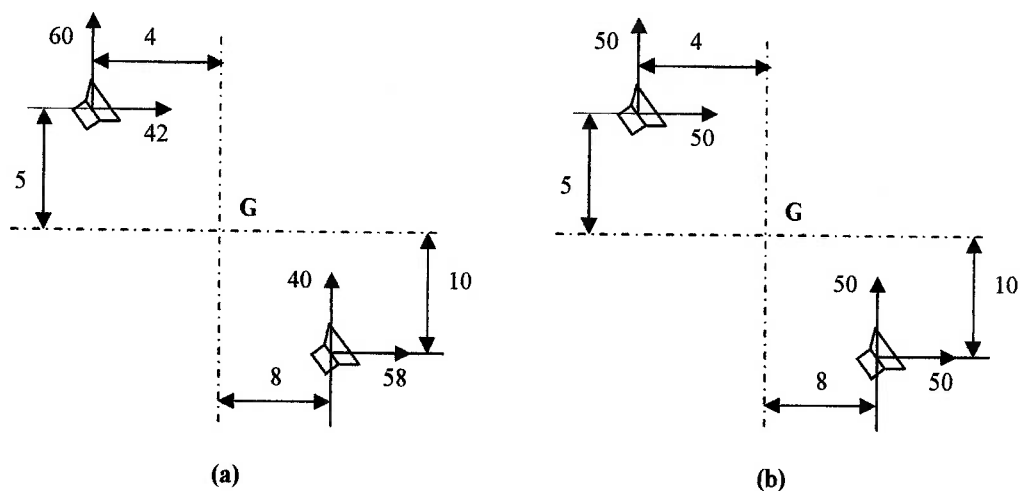


Figura A1.1 – Diferentes configurações de forças com mesmos valores para forças totais e momentos.

A figura A1.1 apresenta uma disposição hipotética de dois propulsores montados conforme as coordenadas mostradas:

$$\begin{aligned} x_{1,1} &= 4 & x_{2,1} &= 5 \\ x_{1,2} &= 8 & x_{2,2} &= 10 \end{aligned}$$

onde $x_{i,j}$ representa a coordenada i do propulsor j . Além disso, nesta disposição estão apresentadas duas configurações diferentes para as forças, conforme mostrado na tabela A1.1:

Tabela A1.1 – Duas configurações de forças para uma disposição de dois propulsores.	
Configuração 1	Configuração 2
$\begin{cases} Tx_{1,1} = 42 \\ Tx_{2,1} = 60 \end{cases} \quad \begin{cases} Tx_{1,2} = 58 \\ Tx_{2,2} = 40 \end{cases}$	$\begin{cases} Tx_{1,1} = 50 \\ Tx_{2,1} = 50 \end{cases} \quad \begin{cases} Tx_{1,2} = 50 \\ Tx_{2,2} = 50 \end{cases}$

A soma das forças ao longo de x_1 e x_2 e o cálculo do momento nas duas configurações está mostrado na tabela A1.2:

Tabela A1.2– Cálculo da soma das forças nas direções x_1 e x_2 e dos momentos nas duas configurações de forças do exemplo.
Configuração 1
$\begin{cases} Tx_{1,1} + Tx_{1,2} = 42 + 58 = 100 \\ Tx_{2,1} + Tx_{2,2} = 60 + 40 = 100 \\ -Tx_{1,1} \cdot x_{2,1} - Tx_{2,1} \cdot x_{1,1} + Tx_{1,2} \cdot x_{2,2} + Tx_{2,2} \cdot x_{1,2} = \\ -42 \cdot 5 - 60 \cdot 4 + 58 \cdot 10 + 40 \cdot 8 = 450 \end{cases}$
Configuração 2
$\begin{cases} Tx_{1,1} + Tx_{1,2} = 50 + 50 = 100 \\ Tx_{2,1} + Tx_{2,2} = 50 + 50 = 100 \\ -Tx_{1,1} \cdot x_{2,1} - Tx_{2,1} \cdot x_{1,1} + Tx_{1,2} \cdot x_{2,2} + Tx_{2,2} \cdot x_{1,2} = \\ -50 \cdot 5 - 50 \cdot 4 + 50 \cdot 10 + 50 \cdot 8 = 450 \end{cases}$

Na tabela A1.2 é possível verificar que para uma mesma embarcação é possível obter os mesmos resultados finais com diferentes intensidades de forças individuais, ou seja, os mesmos propulsores, mesmo gerando diferentes empuxos equilibram a embarcação.

Para as duas configurações de empuxo, cujos valores de forças e coordenadas estão representados na figura A1.1, e considerando $k = 1$, o consumo de energia é:

$$P = |Tx_{1,1}|^{3/2} + |Tx_{2,1}|^{3/2} + |Tx_{1,2}|^{3/2} + |Tx_{2,2}|^{3/2}$$

$$\text{Configuração 1: } P_1 = 42^{3/2} + 60^{3/2} + 58^{3/2} + 40^{3/2} = 1.431,64 \text{ W}$$

Configuração 2: $P_2 = 4.(50)^{3/2} = 1.414,21 \text{ W}$

Pelo exposto, a configuração de forças dada pela figura A1.1(b) é a que produz o menor consumo de energia total, e deveria ser a solução.

De fato, estas duas soluções não são as únicas. Para se obter um maior número de soluções, desenvolveu-se um algoritmo considerando as coordenadas dos propulsores mostradas na figura A1.1 e com as forças em *surge* e *sway* variando no intervalo [0;100 N], variando de 1 em 1 N, e com momento de *yaw* igual a 450 N.m (os mesmos resultados da tabela A1.2). Os resultados estão sumarizados na tabela A1.3:

Tabela A1.3– Resultados da execução de um algoritmo para produzir várias configurações de propulsores.

Propulsor 1		Propulsor 2		Potência (W)
$Tx_{1,1}$ (N)	$Tx_{1,2}$ (N)	$Tx_{2,1}$ (N)	$Tx_{2,2}$ (N)	
10	100	90	0	1885,44
14	95	86	5	1787,04
18	90	82	10	1704,35
22	85	78	15	1633,82
26	80	74	20	1574,13
30	75	70	25	1524,50
34	70	66	30	1484,42
38	65	62	35	1453,55
42	60	58	40	1431,65
46	55	54	45	1418,56
50	50	50	50	1414,21
54	45	46	55	1418,56
58	40	42	60	1431,65
62	35	38	65	1453,55
66	30	34	70	1484,42
70	25	30	75	1524,50
74	20	26	80	1574,13
78	15	22	85	1633,82
82	10	18	90	1704,35
86	5	14	95	1787,04
90	0	10	100	1885,44

O resultado para a menor potência consumida é o mesmo obtido pelo cálculo manual apresentado na Configuração 2 com os dados da tabela A1.2.

Para um maior número de propulsores o número de soluções aumenta consideravelmente. A atribuição de ponderações para os termos passa a ser

fundamental par a determinação da solução ótima, ou seja, a que produz a menor potência.