

## **24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore**

Rio de Janeiro, 15 a 19 de Outubro de 2012

### **Procedimento de otimização aplicado ao projeto de embarcações de planeio**

**ESPAÇO RESERVADO**  
**(identificação dos autores na versão final)**

#### **Resumo:**

Tradicionalmente, o projeto de embarcações é feito de maneira iterativa. Nesse processo tanto as características que descrevem a solução como os seus atributos de desempenho são calculados sequencialmente e de forma recorrente até que a solução convirja para uma região viável, ou seja, até que todas as restrições de projeto sejam satisfeitas. Uma desvantagem relevante dessa abordagem é que ela, em geral, não permite ao projetista explorar todo o espaço das soluções viáveis e, na maioria dos casos, não garante que se consiga obter a solução ótima do ponto de vista dos critérios de projeto estabelecidos. Para tentar minimizar essas desvantagens, no caso do projeto de embarcações de planeio, apresenta-se nesse trabalho uma metodologia na qual o problema do projeto conceitual/preliminar é tratado como um problema de otimização multiobjetivo. Nesta metodologia parâmetros da descrição geométrica do casco constituem o conjunto de variáveis de projeto. A geometria da embarcação é construída, parametricamente, em um programa CAD, a partir de algumas curvas básicas, a partir das quais é possível gerar a superfície do casco de planeio. Com base na geometria desenvolvida determina-se um conjunto de características geométricas da embarcação a partir do qual se construiu um modelo de síntese, que permite avaliar alguns dos atributos de desempenho fundamentais da embarcação na fase preliminar de projeto.

#### **1 Introdução**

O avanço na capacidade e desempenho de processamento dos computadores induziu um grande desenvolvimento das técnicas de representação matemática da superfície do casco, dos métodos de análise de desempenho e comportamento de navios e embarcações e dos métodos e técnicas para solução numérica de problemas de otimização, o que propiciou e vem propiciando mudanças importantes na maneira como o projeto de embarcações é conduzido, principalmente nas fases preliminares de projeto.

Dentre os diversos tipos de veículos aquáticos, as embarcações de planeio são talvez o mais difundido e utilizado pela população em geral, a qual é atraída, principalmente, por sua alta velocidade.

Dentre elas, destacam-se as embarcações típicas de recreio como iates e lanchas. Esse tipo de embarcação também é largamente utilizado em aplicações militares, como a guarda costeira, e no transporte de pessoas.

Durante as últimas décadas, surgiram diferentes publicações que tratam do problema de projeto de embarcações de planeio. Blount e Fox propuseram um procedimento iterativo para escolha das dimensões principais da embarcação e do propulsor a fim de minimizar a potência necessária da planta propulsora (BLOUNT e FOX, 1976). Entretanto o procedimento faz uso de diagramas e tabelas que inviabilizaram sua automatização.

Inspirado pelo trabalho de Blount e Fox, Radojic desenvolveu um procedimento automatizado para determinação das dimensões principais do casco de uma embarcação de planeio e de sua planta

propulsora, visando, novamente, a minimização da potência instalada (RADOJCIC, 1990). O modelo de síntese proposto pelo autor introduziu a alteração de desempenho do propulsor devido à inclinação do eixo propulsor e critérios de cavitação. Porém, outros atributos de desempenho como estabilidade, comportamento no mar e estimativas de pesos não foram incluídos.

Um procedimento de projeto mais completo foi proposto em (CALKINS, 1983). O autor divide o processo de síntese em diversos módulos de desempenho. Além das características principais da geometria do casco da embarcação, são propostas estimativas de pesos, propulsão, comportamento no mar e estabilidade estática e dinâmica. Também é proposta a realização do projeto estrutural e de estimativas de custos de operação. Entretanto, muitos dos módulos ainda não haviam sido desenvolvidos e o autor baseou seu modelo de síntese na clássica espiral de projeto, tornando o processo sequencial, o que inviabiliza a utilização de algorítmicos de otimização.

Em outro trabalho mais recente, Calkins aprimorou o módulo de geração da geometria do casco da embarcação (CALKINS, SCHACHTER e OLIVEIRA, 1999). Nesse artigo, a geometria é representada a partir das linhas principais do casco, como a linha da quilha, a linha da quina e a linha do convés. Essas linhas, por sua vez, são parametricamente modeladas a partir de um conjunto de parâmetros geométricos.

O projeto de sistemas complexos, como uma embarcação, é tipicamente multidisciplinar e deve atender a um conjunto de objetivos. Durante o projeto deve ser realizado o balanceamento de diferentes atributos de desempenho. Em muitos casos esses atributos são conflitantes. Apesar disso, nenhum dos autores citados acima trata o problema de projeto como um processo de otimização multiobjetivo.

O trabalho de (SIMÕES e ANDRADE, 2010) trata o projeto preliminar de embarcações de planeio dessa maneira, porém a forma do casco é representada de maneira muito simples, através de prismas e pirâmides.

O presente artigo também propõe o desenvolvimento de um procedimento computacional que permita tratar o projeto preliminar de embarcações de planeio como um processo de otimização multiobjetivo.

Primeiramente, foi desenvolvido um modelo de síntese onde os principais atributos da embarcação, como resistência e

comportamento no mar, são determinados a partir dos parâmetros e variáveis de projeto. Em seguida foi construído um modelo paramétrico da geometria do casco. As superfícies que definem essa geometria são construídas automaticamente a partir das linhas básicas do casco e de algumas propriedades longitudinais de suas balizas. Finalmente, uma técnica de otimização multiobjetivo foi aplicada ao modelo de síntese por meio de um algoritmo de natureza evolutiva. Um exemplo de aplicação dessa metodologia será explorado nas seções finais desse artigo.

## 2 Modelo de síntese

Como já dito anteriormente, foi desenvolvido um modelo de síntese onde os principais atributos de desempenho da embarcação, como resistência ao avanço, comportamento no mar e estabilidade, são determinados a partir dos parâmetros e variáveis de projeto. A Figura 1 apresenta, de maneira resumida, como o modelo de síntese foi estruturado

Inicialmente, a geometria do casco da embarcação é construída, em um programa CAD ("*Computer Aided Desing*"), a partir das variáveis de projeto. Dessa geometria são calculadas algumas restrições geométricas e atributos de conforto, relacionados a áreas e volumes internos do casco.

Em seguida, é realizada a análise hidrostática da embarcação, de onde são extraídos os valores do deslocamento ( $\Delta$ ), posição longitudinal do centro de carena ( $LCB$ ) e altura metacêntrica ( $GM$ ). Os valores de  $\Delta$  e  $LCB$ , são utilizados como, respectivamente, o peso e posição longitudinal do centro de gravidade da embarcação. Aqui é feita a hipótese que o casco já foi modelado com sua atitude desejada na posição estática.

Na avaliação de desempenho em águas calmas são determinados os valores de resistência ao avanço e do ângulo de *trim* ( $\tau$ ). Também é verificado se a lancha é dinamicamente estável em relação à *Porpoising*. Essa instabilidade dinâmica está relacionada ao surgimento de movimentos no plano longitudinal da embarcação (*heave* e *pitch*) mesmo sem a presença de ondas.

Determinado a atitude da lancha em águas calmas, é, então, avaliado seu desempenho em ondas. Nessa etapa são calculadas as acelerações verticais da embarcação na proa ( $a_{bow}$ ) e no centro de gravidade ( $a_{CG}$ ), a pressão devido à *slamming* ( $p_{bxx}$ ) e a resistência adicional em ondas ( $R_{AW}$ ).

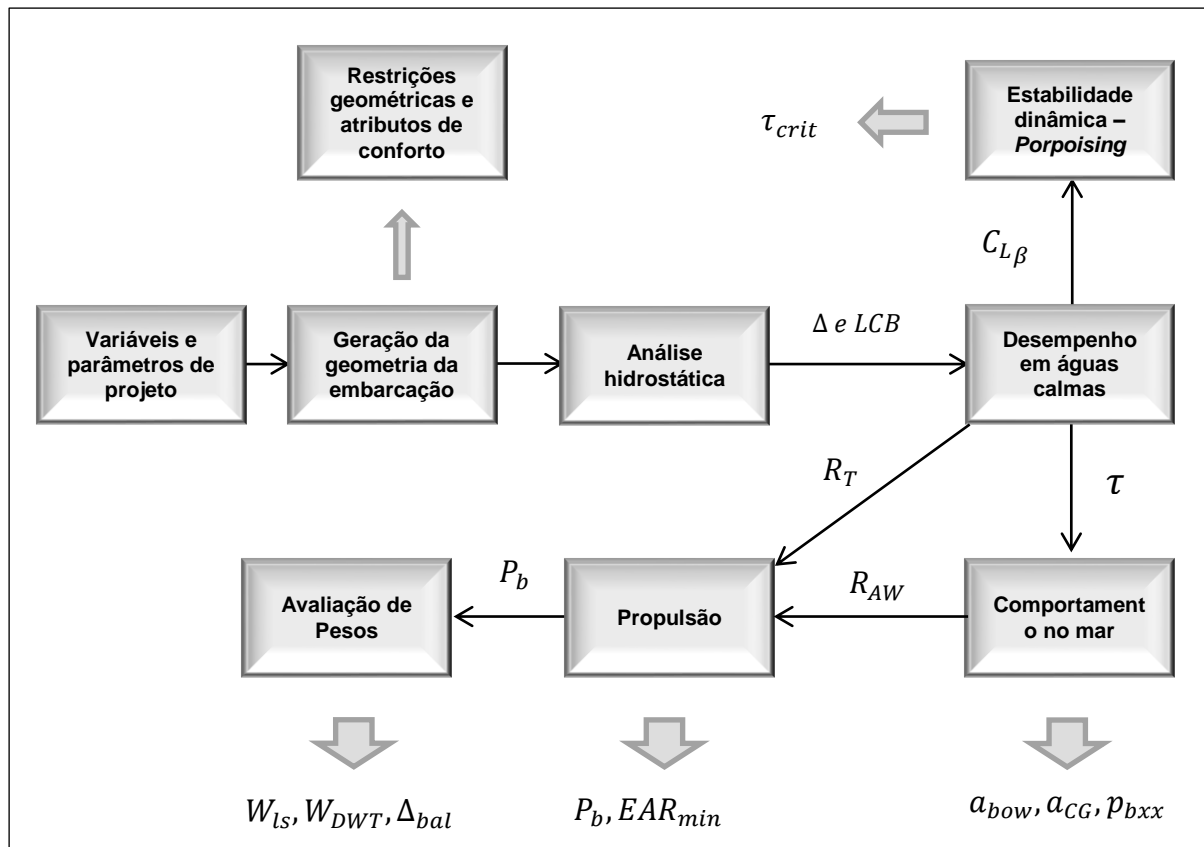


Figura 1 - Estrutura do modelo de síntese

No módulo de propulsão, é determinada a potência para lancha atingir a velocidade máxima de projeto. Também são determinadas as características limites de operação do propulsor para atender ao critério de cavitação proposto.

Finalmente, é realizada uma avaliação de pesos da embarcação. Como a avaliação do peso do casco pode ser diferente do seu deslocamento, foi criado um parâmetro auxiliar para representar essa diferença, o peso de lastro ( $\Delta_{bal}$ ). Esse parâmetro será tratado como uma restrição do projeto para evitar que o peso estimado para embarcação não se torne muito distante do peso de seu volume deslocado.

Para elaboração do modelo de síntese foram desenvolvidos alguns módulos de análise de desempenho. A seguir, encontra-se uma lista dos módulos de desempenho desenvolvidos:

1. Desempenho em águas calmas:
  - a. Regime de planeio;
  - b. Regime de pré-planeio;
2. Comportamento no mar;
3. Propulsão:

- a. Propulsores;
- b. Desempenho em escoamento inclinado;
- c. Coeficientes propulsivos;
- d. Integração casco – hélice;
4. Estabilidade longitudinal – *Porpoising*;
5. Pesos.

### 3 Módulos de análise de desempenho

#### 3.1 Desempenho em águas calmas

O módulo de desempenho em águas calmas para o regime de planeio foi desenvolvido a partir das equações de Savitsky para caso geral, isto é, sem que as forças atuantes na embarcação passem, necessariamente, pelo centro de gravidade (SAVITSKY, 1964). Também foram adicionadas as parcelas de resistência devido à formação de *spray* e ao atrito do casco com o ar (SAVITSKY, DELORME e DATLA, 2007) e a parcela de resistência dos apêndices (BLOUNT e FOX, 1976).

Sendo assim, a resistência ao avanço da embarcação, no regime de planeio, pode ser expressa por:

$$R_T = R_T(\Delta, V, LCG, VCG, \beta_{LCG}, b_x, f, \epsilon, A_f) \quad (1)$$

Onde:

$\Delta$  - deslocamento da embarcação;  
 $V$  - velocidade de avanço da embarcação;  
 $LCG$  - posição longitudinal do centro de gravidade;  
 $VCG$  - posição vertical do centro de gravidade;  
 $\beta_{LCG}$  - ângulo de *deadrise* no  $LCG$ ;  
 $b_x$  - boca da quina no  $LCG$ ;  
 $f$  - braço da força propulsora em relação ao centro de gravidade;  
 $\epsilon$  - ângulo de inclinação do eixo propulsor em relação à quilha;  
 $A_f$  - área frontal da embarcação.

As análises do regime de pré-planeio são realizadas utilizando as equações encontradas em (SAVITSKY e BROWN, 1976). Essas equações foram desenvolvidas através da análise de regressão de 118 modelos retirados de séries sistemáticas de embarcação de planeio e semi-deslocamento. A resistência, antes do início do planeio, pode ser expressa por:

$$R_T^{pre} = R_T^{pre} \left( \frac{L_{WL}}{\nabla^{\frac{1}{3}}}, \frac{\nabla}{b_x^3}, i_x, \frac{A_T}{A_x} \right) \quad (2)$$

Onde:

$L_{WL}$  - comprimento de linha d'água da embarcação;  
 $\nabla$  - volume deslocamento pela embarcação;  
 $i_x$  - meio ângulo de ataque na linha d'água;  
 $A_T$  - área seccional do *transom*;  
 $A_x$  - máxima área seccional;

### 3.2 Comportamento no mar

No módulo de comportamento no mar são realizadas as estimativas de resistência adicional em ondas ( $R_{AW}$ ), aceleração vertical ( $a_{xx}$ ) e pressão devido à *slamming* ( $p_{b_{xx}}$ ).

As análises são baseadas no trabalho de (SAVITSKY e BROWN, 1976) e nas modificações propostas para equações de aceleração encontradas em (ABS, 2008). Sendo assim:

$$R_{AW} = R_{AW}(\Delta, V, \beta_{LCG}, b_x, L_{OA}, \tau, H_s) \quad (3)$$

$$a_{xx} = a_{xx}(\Delta, V, \beta_{LCG}, b_x, L_{OA}, H_s) \quad (4)$$

$$p_{b_{xx}} = p_{b_{xx}}(\Delta, V, \beta_{LCG}, b_x, L_{OA}, H_s) \quad (5)$$

Onde:

$L_{OA}$  - comprimento total da embarcação;  
 $\tau$  - ângulo de *trim*;  
 $H_s$  - altura significativa do espectro de mar.

### 3.3 Propulsão

No módulo de propulsão é estimado o valor da potência necessária ( $P_b$ ) para que a embarcação navegue em uma dada velocidade:

$$P_b = P_b(R_T, V, \epsilon, N_p, prop, w, t) \quad (6)$$

Onde:

$N_p$  - número de propulsores;  
 $prop$  - propulsor utilizado;  
 $w$  - coeficiente de esteira;  
 $t$  - coeficiente de redução da força propulsora.

Os propulsores devem conter a informação sobre as curvas de empuxo ( $K_T$ ), torque ( $K_Q$ ) e eficiência do propulsor ( $\eta_0$ ). Foram implementados dois tipos de propulsores: GawnBurril (RADOJCIC, 2009) e Série B (CARLTON, 2007), porém outros propulsores podem ser facilmente adicionados.

É importante destacar que foi implementada a correção das curvas do propulsor em função do ângulo de inclinação do eixo do motor (HADLER, 1966).

Os coeficientes de redução da força propulsora ( $t$ ) e de esteira ( $w$ ) foram retirados do trabalho de (HADLER e HUBBLE, 1971).

$$t = t(F_\nabla, \epsilon) \quad (7)$$

$$w = w(F_\nabla, \epsilon) \quad (8)$$

### 3.4 Porpoising

Nesse módulo é calculado o valor limite do ângulo de *trim* que a embarcação pode adquirir antes de tornar instável em relação a *porpoising*.

Utilizando as curvas encontradas no trabalho de (SAVITSKY, 1964), foi elaborada uma regressão polinomial para os valores desse ângulo de *trim* crítico:

$$\tau_{crit} = -1.7181 + 11.3419 \sqrt{\frac{C_{L\beta}}{2}} + 82.3869 \frac{C_{L\beta}}{2} + 0.1896\beta - 0.0016\beta^2 - 0.3125\beta \sqrt{\frac{C_{L\beta}}{2}} \quad (9)$$

Onde:

$C_{L\beta} = \frac{\Delta}{\frac{1}{2}\rho V^2 b_x^2}$  - coeficiente de sustentação.

### 3.5 Pesos

As estimativas de pesos são realizadas baseadas no trabalho de (GRUBISIC, 2008). O autor criou um modelo para estimativas de pesos de embarcações rápidas de pequeno porte, desenvolvido a partir de 34 embarcações de diferentes tipos de serviço e material de construção, com comprimento variando de 10 a 60 m.

O peso da embarcação pode expresso da seguinte maneira:

$$W_G = W_G \left( \begin{matrix} \Delta_{FL}, L_{pp}, L_{OA}, L_{WL}, B, \\ D_x, H, N_{wtb}, W_M \end{matrix} \right) \quad (10)$$

Onde:

$\Delta_{FL}$  – deslocamento totalmente carregado;

$L_{pp}$  – comprimento entre perpendiculares;

$B$  – máxima boca moldada;

$D_x$  – pontal a meia nau da embarcação;

$N_{wtb}$  – número de anteparas estanques;

$W_M$  – peso do(s) motor(es)<sup>1</sup>.

### 4 Representação geométrica do casco da embarcação

Dentre as tarefas a serem realizadas durante as fases iniciais de projeto, a definição da geometria do casco da embarcação é, sem dúvida, uma das mais trabalhosas. Tendo em vista o baixo número de informações conhecidas durante essas etapas e ao grande número de possíveis soluções para a geometria que podem ser propostas.

Sendo assim, tradicionalmente, o projeto de novas embarcações é realizado a partir da alteração da forma de embarcações já existentes ou de formas encontradas em séries sistemáticas.

Com o avanço da capacidade de desempenho dos computadores, novas formas de representação da geometria do casco surgiram e continuando surgindo. Entretanto, muitas delas dependem da especificação das coordenadas dos pontos que formam a geometria da embarcação, as quais ainda não são conhecidas durante as fases iniciais do projeto.

Para contornar essa dificuldade, alguns autores propõem a utilização de modelos simplificadas da geometria do casco. O

trabalho de (CALKINS, SCHACHTER e OLIVEIRA, 1999), por exemplo, apresenta uma maneira de representar as linhas principais do casco de uma embarcação de planeio a partir de um conjunto de parâmetros chave, determinados durante as etapas iniciais de projeto.

No presente trabalho, a geometria da embarcação foi, parametricamente, modelada em um programa CAD a partir de algumas curvas básicas do casco e de curvas que definem algumas propriedades geométricas das balizas ao longo de seu comprimento. Além de permitir, automaticamente, alterar e analisar inúmeras soluções para a geometria da embarcação em curto espaço de tempo, essa abordagem evita que a geometria tenha que ser construída através da técnica tradicional de especificação das coordenadas dos pontos que formam as balizas a cada modificação das variáveis de projeto.

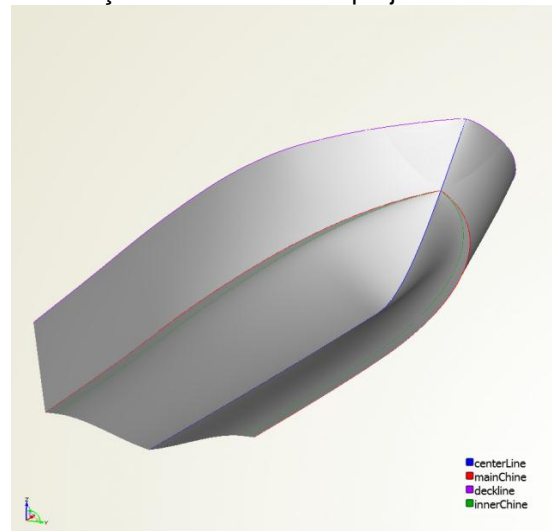


Figura 2 - Geometria da embarcação

Para construção do modelo foram utilizadas as linhas do convés, quilha, e quina. Também é utilizada uma curva contínua para representar a distribuição do ângulo de *deadrise* e do ângulo da baliza na posição da quina ao longo do comprimento da embarcação.

Essas linhas, por sua vez, foram modeladas parametricamente em função das variáveis e parâmetros do projeto. A Figura 2 apresenta uma visão tridimensional da geometria do casco e das curvas utilizadas para sua construção. Maiores detalhes sobre a parametrização dessas linhas serão vistos no exemplo de aplicação do procedimento.

A Figura 3 mostra como a geometria do casco foi topologicamente dividida três regiões: o fundo do casco, a sua lateral e um trecho plano do fundo entre as duas superfícies. Essa

<sup>1</sup> Alternativamente pode ser utilizada a potência do motor, porém as estimativas foram mais satisfatórias utilizando diretamente seu peso.

divisão é necessária para que as quinas sejam bem definidas.

É possível construir uma única superfície para representação da geometria, porém, nas regiões das quinas, a mudança de curvatura seria contínua, e não discreta como é típico desse tipo de embarcação.

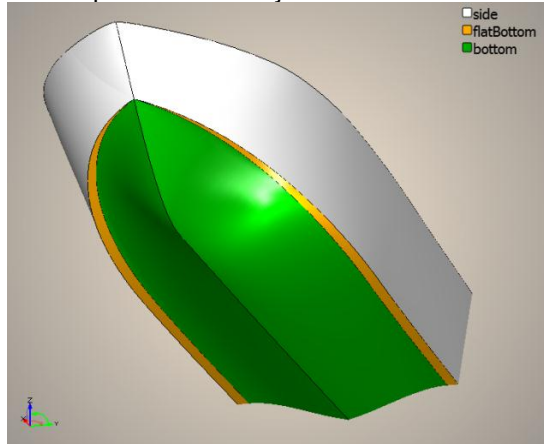


Figura 3 - Topologia da superfície do casco

A geometria do casco foi construída no programa FRIENDSHIP-Framework utilizando a técnica de “meta surfaces”. A partir dessa técnica é possível construir uma superfície baseado apenas na definição matemática das balizas do casco.

Considere, por exemplo, a superfície do fundo do casco (Figura 3). Essa superfície é delimitada pela linha da quilha e pela quina interna (Figura 2). Dada uma posição longitudinal  $x$ , é possível calcular, a partir dessas curvas, as posições inicial e final da baliza que passa por essa posição. Além disso, é possível adicionar outras informações à descrição matemática da baliza, como o ângulo que ela forma com um dos eixos do sistema de coordenadas na posição inicial ou final.

Definida a descrição matemática das balizas a superfície é construída sem a interação direta do projetista, o que permite automaticamente gerar uma geometria carenada para o casco da embarcação.

A mesma metodologia pode ser facilmente aplicada a outros tipos de embarcações, é preciso apenas definir a descrição matemática

das balizas ou, alternativamente, das linhas d'águas.

## 5 Exemplo de aplicação

O modelo de síntese e otimização foi aplicado para modificar o casco de uma embarcação de comprimento fixo. O modelo geométrico foi baseado em uma embarcação genérica de referência, cujas propriedades se basearam em dados típicos de embarcação de mesmo porte fornecidos pelo estaleiro Vellroy Estaleiros do Brasil Ltda.

Durante o procedimento de síntese do novo casco a linha do convés, o motor e o propulsor não foram alterados. Além disso, alguns parâmetros utilizados no modelo de síntese foram mantidos idênticos aos da lancha de referência, como pode ser visto na Tabela 1.

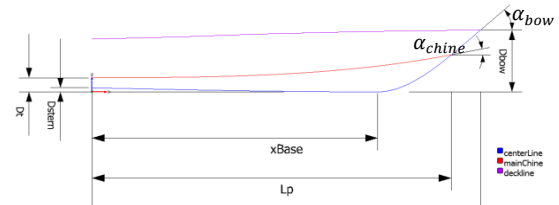


Figura 4 - Variáveis do projeto relacionadas ao plano de centro

### 5.1 Descrição do problema de projeto

#### 5.1.1 Variáveis

As variáveis de projeto estão diretamente relacionadas à geometria do casco da embarcação. Como dito anteriormente, a geometria da embarcação foi construída a partir das curvas básicas que definem o casco da lancha. Essas curvas, por sua vez, foram parametricamente modeladas em função das variáveis de projeto no programa FRIENDSHIP-Framework. As variáveis de projeto estão definidas nas figuras 4, 5 e 7.

A Figura 6 mostra as propriedades das balizas que são controladas longitudinalmente, o ângulo de *deadrise* ( $\beta$ ) e o ângulo que a seção chega à quina ( $\alpha_{bot}$ ). Os parâmetros que controlam a variação dessas propriedades ao longo do comprimento do casco estão definidos na Figura 7.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no modelo de síntese

Idênticos à embarcação de referência	Derivados da geometria	Calculados pelos módulos de desempenho
$V, VCG, f, \epsilon, L_{OA}, H_S, N_p,$ $prop, L_{pp}, N_{wtb}, W_M$	$LCG, \beta_{LCG}, b_x, A_f, L_{WL},$ $\nabla, i_x, \frac{A_T}{A_x}, \Delta_{FL}, B, D_x$	$\tau, R_T, w, t, C_{L\beta}$

$\beta_T$

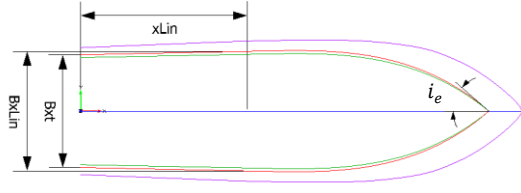


Figura 5 - Variáveis relacionadas ao plano de topo

Além das variáveis já apresentadas, foram acrescentadas outras três variáveis: O coeficiente de área de planeio ( $C_{Ap}$ ), o fator de escala da quina interna ( $\lambda_{chine}$ ) e o calado máximo da embarcação ( $H$ ). O coeficiente de área de planeio é definido por:

$$C_{Ap} = \frac{A_p}{B_{xLin} * L_p} \quad (11)$$

Onde:

$A_p$  – área de planeio da embarcação, delimitada pela quina externa (em vermelho) na Figura 5;

$B_{xLin}$  e  $L_p$  – estão definidos nas figuras 4 e 5.

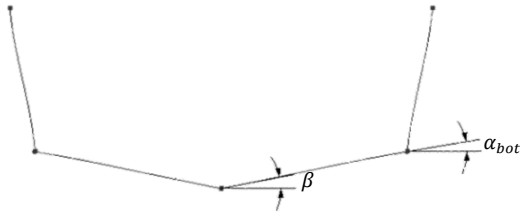


Figura 6 - Propriedades das balizas

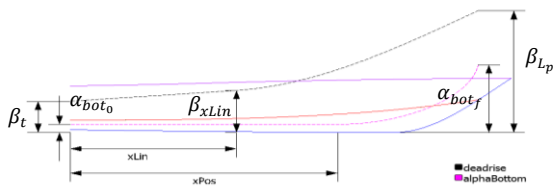


Figura 7 - Variáveis relacionadas à  $\beta$  e  $\alpha_{bot}$

A quina interna possui as mesmas coordenadas longitudinal e vertical ( $x$  e  $z$ ) da quina externa. A coordenada transversal ( $y$ ) é multiplicada pelo fator de escala  $\lambda_{chine}$ .

### 5.1.2 Restrições

As restrições do problema foram divididas em dois grupos: geométricas e operacionais. As primeiras estão diretamente ligadas a limites de construção da geometria do casco, adequação a padrões estéticos de mercado e a não deterioração dos atributos de conforto

da lancha de referência, como área de planeio (relacionada à área disponível dos pisos internos da embarcação) e volume interno. O segundo grupo de restrições estão relacionados a características operacionais, como atendimento do critério de cavitação e não desenvolvimento de *porpoising*.

Vale ressaltar que a embarcação de referência respeita todas as restrições propostas.

As restrições geométricas são:

$$A_p \geq A_{p_0} \quad (12)$$

$$B_{xt} \leq B_{xLin} \quad (13)$$

$$B_x^{max} \leq 0.95 B_{deck}^{max} \quad (14)$$

$$\frac{B_{xt}}{B_x^{max}} \geq 0.85 \quad (15)$$

$$D_t \geq D_{stern} \quad (16)$$

$$\frac{D_x^{min}}{D_t} \geq 0.75 \quad (17)$$

$$\nabla \geq \nabla_0 \quad (18)$$

$$x_{base} \leq L_p \quad (19)$$

Onde:

$A_{p_0}$  – área de planeio da lancha de referência;

$B_x^{max}$  – máxima boca na quina;

$B_{deck}^{max}$  – máxima boca na linha do convés;

$D_x^{min}$  – altura mínima da quina;

$\nabla_0$  – volume interno da lancha de referência;

As restrições (12) e (18) foram introduzidas para que não houvesse deterioração dos atributos de conforto em relação à embarcação de referência.

As restrições operacionais são:

$$0.9 LCB_0 \leq LCB \leq 1.1 LCB_0 \quad (20)$$

$$\Delta \geq W_G - W_M \quad (21)$$

$$GM \geq 0 \quad (22)$$

$$\tau \leq \tau_{crit} \quad (23)$$

$$EAR \geq EAR_{min} \quad (24)$$

Onde:

$LCB_0$  – posição longitudinal do centro de carena do casco de referência, m;

$LCB$  – posição longitudinal do centro de carena do novo casco, m;

$\Delta$  – deslocamento, tons;

$W_G$  – peso total da embarcação, tons;

$W_M$  – margem da estimativa de peso, tons;

$GM$  – altura metacêntrica, m;

$\tau$  – ângulo de *trim*, graus;

$\tau_{crit}$  – ângulo de *trim* a partir do qual se observa *porpoising*, graus;

$EAR$  – razão de área expandida do propulsor;



$EAR_{min}$  – mínima área expandida do propulsor para respeitar o critério de cavitação.

A restrição (20) foi introduzida para que a posição do centro de carena, e consequentemente do centro de gravidade, não fosse muito alterada em relação à embarcação de referência. Alterações muito elevadas do valor de  $LCB$  implicariam mudanças significativas no arranjo típico de lanchas de mesmo porte da estudada, o que não era objetivo nesse caso.

### 5.1.3 Objetivos

Como já dito anteriormente, o projeto de sistemas complexos, como embarcações, é tipicamente multidisciplinar e deve atender a um conjunto de objetivos. Sendo assim, nesse trabalho, o problema de projeto foi tratado através de um procedimento de otimização onde os objetivos são a redução da potência necessária para navegar na velocidade máxima de projeto e a redução da aceleração vertical na proa da embarcação.

A redução da potência tem impacto direto no consumo de combustível, o que pode diminuir significativamente os custos operacionais da embarcação ou aumentar sua autonomia. Por outro lado, mantida a mesma motorização, a lancha pode atingir velocidades mais elevadas, um dos principais atributos relacionados a embarcações de recreio.

Atributos como conforto, segurança e integridade estrutural estão diretamente relacionados à aceleração dos movimentos da embarcação. A redução da aceleração vertical aumenta o conforto dos passageiros e reduzem as cargas as quais a estrutura está sujeita.

## 5.2 Procedimento de otimização

O processo de otimização foi realizado por meio do emprego do algoritmo genético NSGAII (*"Non-dominated Sorting Genetic Algorithm"*). Detalhes do algoritmo não serão vistos nesse trabalho, pois fogem de seu escopo, porém eles podem ser encontrados no trabalho de (DEB ET ALL, April 2002).

Os algoritmos genéticos foram criados baseados na famosa teoria da evolução de Darwin. Neles são selecionados alguns indivíduos do espaço de variáveis (população), nos quais a função objetivo é avaliada. Esses indivíduos são, então, classificados segundo o valor do atributo calculado. São realizados cruzamentos dessa população, nos quais aqueles mais bem

classificados têm mais chance de se relacionar, e uma nova geração é formada. Além dos cruzamentos, alguns dos indivíduos da nova geração são criados através da mutação da população anterior. O procedimento de seleção, cruzamento e mutação prossegue, e a cada geração, os indivíduos da população apresentam melhor desempenho, conduzindo o problema a melhores soluções.

Enquanto não for atingido o número máximo de gerações ou o critério de parada do algoritmo uma nova população é gerada.

A cada avaliação requerida pelo algoritmo de otimização o conjunto de variáveis representando o indivíduo analisado é então enviado ao modelo de síntese, que após a geração do casco e o cálculo dos atributos de desempenho, retornam essas informações ao algoritmo de otimização.

Devido ao número elevado de restrições do problema, o algoritmo de otimização encontrou muita dificuldade para gerar soluções viáveis, uma vez que o processo de criação de indivíduos é aleatório. Sendo assim, antes de iniciar o processo de otimização, propriamente dito, foi realizado um projeto de experimentos (*"Design of Experiments - DOE"*) a fim de encontrar um conjunto de soluções viáveis que pudessem ser utilizadas como a população inicial do algoritmo.

### 5.2.1 Determinação da população inicial – Projeto de Experimentos

No presente trabalho, o algoritmo utilizado nos experimentos foi o Sobol (BRATLEY e FOX, 1988), o qual gera uma sequência quase randômica de pontos e garante uma boa dispersão desses no espaço de variáveis. Foram gerados cem mil indivíduos, dos quais apenas cerca de 3% eram viáveis segundo as restrições de projeto.

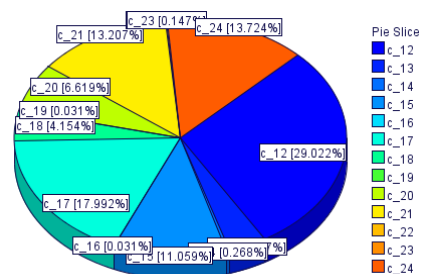


Figura 8 - Restrições de projeto violadas

A Figura 8 apresenta uma comparação entre o número de vezes que cada restrição foi violada nas soluções obtidas utilizando a técnica de projeto de experimentos. As duas restrições mais violadas estão relacionadas a



características geométricas do casco (restrição (12) – área de planeio e restrição (17) – altura mínima da quina). Em seguida, aparecem duas restrições operacionais relacionadas ao critério de cavitação (24) e a restrição de peso em lastro (21). Por outro lado, as restrições (14), (16), (19), (22) e (23) apresentaram pouca influência no problema.

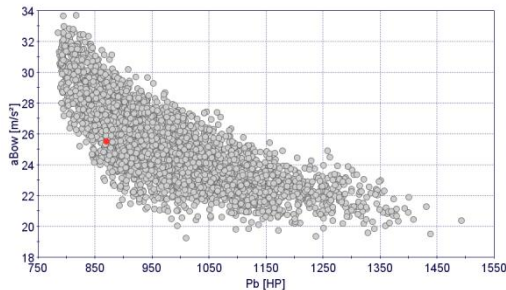


Figura 9 - Soluções viáveis obtidas a partir da técnica de projeto de experimentos

A Figura 9, apresenta o valor das funções objetivo das soluções viáveis obtidas a partir da técnica de projeto de experimentos. O ponto em vermelho representa a embarcação de referência. Como pode ser visto na figura, foram obtidas soluções que melhoram ambos os desempenhos da lancha de referência, entretanto muitas das soluções obtidas estavam desbalanceadas em relação ao peso estimado e seu deslocamento. Essa diferença é medida através do parâmetro peso em lastro (*ballast*).

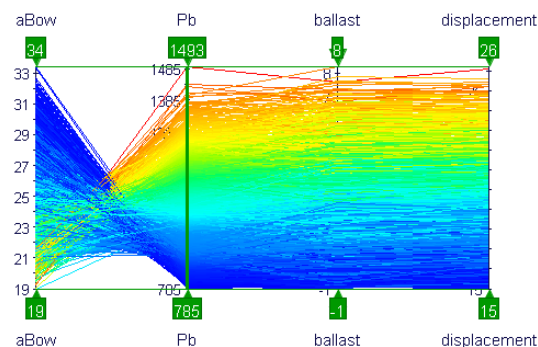


Figura 10 - Gráfico da coordenada paralelas das soluções viáveis

A Figura 10 mostra, por meio de um gráfico em coordenadas paralelas, a correlação existente entre as respostas de potência, aceleração, peso em lastro e deslocamento das soluções obtidas através do DOE.

Cada linha do gráfico representa uma das soluções, que foram ordenadas, através da escala de cores, em relação à resposta de potência. Duas análises merecem ser destacadas. Em primeiro lugar, é notável o compromisso entre potência e aceleração, isto

é, as soluções com elevado valor de potência tendem a ter baixo valor de aceleração e vice versa. Em segundo lugar, muitas das soluções apresentam peso em lastro muito elevado, e consequentemente, deslocamento elevado, isso explica os altos valores de potência encontrados.

A fim de corrigir o desbalanceamento entre o peso estimado e deslocamento, o calado das soluções encontradas através do DOE (soluções verdes - Figura 11) foi corrigido para que essa diferença não ultrapassasse 50 kg. As soluções obtidas após a correção estão representadas em azul na mesma figura.

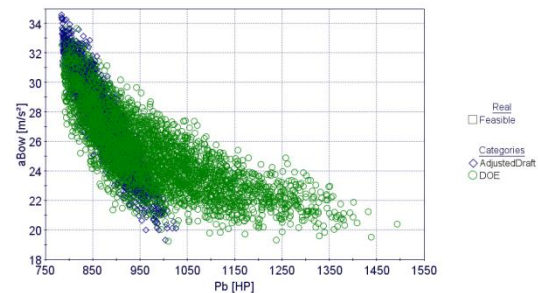


Figura 11 - Soluções obtidas após a correção de calado

A redução do peso em lastro acarretou na redução do deslocamento das lanchas, reduzindo também a faixa de deslocamento. O interessante é que houve um ligeiro aumento na faixa de aceleração vertical.

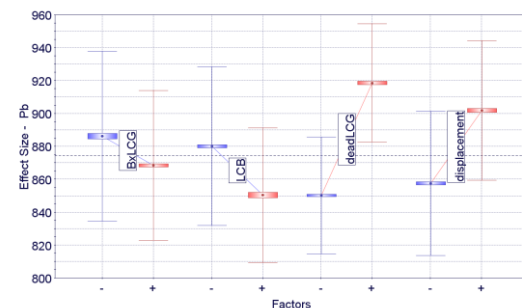


Figura 12 - Efeitos na resposta de potência

A Figura 12 mostra um gráfico com os efeitos dos principais parâmetros geométricos da embarcação na resposta de potência. O gráfico é elaborado da seguinte maneira: para cada fator, as soluções são divididas em dois grupos a partir da mediana, isto é, forma-se um grupo com as soluções com os maiores valores do fator (+) e outro com os menores valores (-). Em seguida é tomada a média da resposta em cada um desses grupos. A média do grupo (-) é representada em azul, já a do grupo (+) em vermelho. A distância entre os valores médios de cada grupo está

diretamente correlacionada com a influência que esse parâmetro tem no atributo analisado.

A análise da Figura 12 mostra o aumento da boca da embarcação causa uma redução de sua potência, isso acontece devido ao aumento da área de sustentação do casco. Por outro lado, maiores valores do ângulo de *deadrise* e do deslocamento acarretam em uma elevação da potência demandada pela embarcação. O efeito desses fatores na resposta de aceleração é exatamente o contrário, como pode ser verificado na Figura 13.

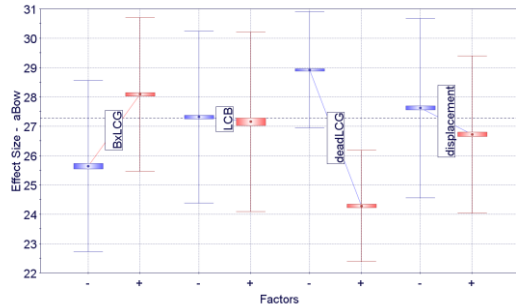


Figura 13 - Efeitos na resposta de aceleração

As análises realizadas no parágrafo acima comprovam mais uma vez o compromisso entre as respostas de potência e aceleração, uma vez que os parâmetros geométricos apresentam efeitos antagônicos nos dois atributos de desempenho. Além disso, o ângulo de *deadrise* mostrou ter grande influência no desempenho da lancha, influenciando mais nas respostas do que o próprio peso do casco.

Existe um limite em que não é possível melhorar um dos objetivos das soluções sem deteriorar o desempenho da embarcação no outro objetivo. As soluções presentes nesse limite são conhecidas como solução não-dominadas e a região formada por elas é chamada de fronteira de Pareto.

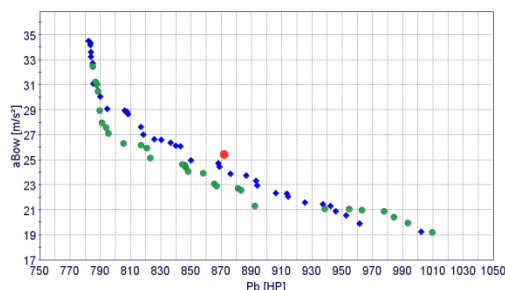


Figura 14 - Soluções não-dominadas obtidas através do DOE

A Figura 14 mostra o valor das funções objetivo das soluções não-dominadas obtidas através do DOE, representadas novamente

em verde, e a partir da correção de calado (losangos azuis). O ponto em vermelho representa a lancha de referência. A correção do calado causou uma pequena redução do desempenho das embarcações obtidas anteriormente. Entretanto, o principal objetivo do projeto de experimentos era determinar um conjunto de soluções viáveis para ser utilizado como população inicial do algoritmo NSGAI. Nas próximas seções, serão apresentados os resultados obtidos através do procedimento de otimização.

## 5.2.2 Resultados do procedimento de otimização

Foram selecionados 80 indivíduos das soluções obtidas após a correção do calado das embarcações determinadas através do DOE. Esse conjunto foi, então, utilizado como população inicial para o algoritmo de otimização.

Antes de prosseguir, é importante destacar que a restrição de peso em lastro (21) foi reformulada a fim de que a diferença entre o peso estimado e o deslocamento das soluções obtidas durante o procedimento de otimização não ultrapasse 100 kg. Sendo assim, a nova restrição de peso em lastro é definida por:

$$|\Delta - W_G| \leq 0.1 \quad (25)$$

O procedimento de otimização foi executado, para uma população de 80 indivíduos até que no máximo 600 gerações fossem atingidas. O critério de parada do algoritmo foi atingido após 511 gerações, indicando que a fronteira encontrada na não podia ser mais melhorada.

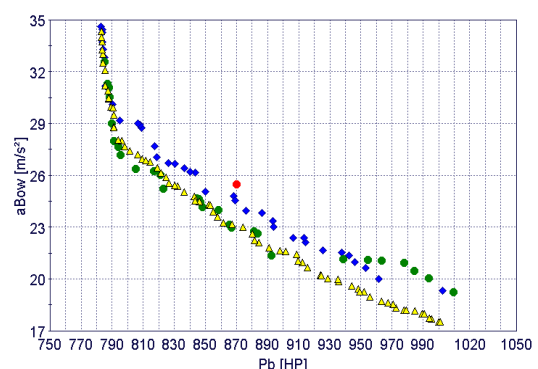


Figura 15 - Comparação entre as diferentes fronteiras de Pareto

Na Figura 15, é feita uma comparação entre as fronteiras de Pareto obtidas. As soluções em verde e azul, respectivamente, representam as obtidas através do DOE de referência e após a correção do calado. O

ponto vermelho representa a lancha de referência e os triângulos amarelos as embarcações encontradas utilizando o procedimento de otimização.

Na nova fronteira, aparecem soluções com desempenho visivelmente melhor que o da população inicial (losangos azuis). Além disso, existe um número razoável de soluções (13) que apresentam melhor resposta das duas funções objetivo em relação à embarcação de referência.

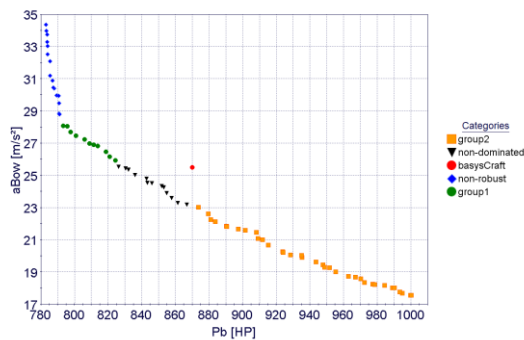


Figura 16 - Categorias das soluções presentes na fronteira de Pareto

As soluções da fronteira de Pareto foram divididas em quatro categorias. Na extremidade esquerda da fronteira, aparecem embarcações com valores similares de potência, mas com grande variação da resposta de aceleração, essas embarcações foram classificadas como “não-robustas”. As soluções com melhor desempenho em ambos os atributos em relação à lancha de referência foram classificadas como “não dominadas”, representando as soluções mais promissoras a serem exploradas. As embarcações restantes foram categorizadas em outros dois

grupos, como podem ser observados na Figura 16.

A Figura 17 mostra, na forma de um diagrama de coordenadas paralelas, a correlação entre as principais características geométricas (boca medida na quina e ângulo de *deadrise* na posição do centro de gravidade, deslocamento, posição longitudinal do centro de carena e calado) e os atributos de desempenho (potência, aceleração vertical na proa e ângulo de *trim*) das embarcações presentes na fronteira de Pareto. As cores representam a divisão em categorias exposta na Figura 16.

É interessante destacar que a categorização por cores é bem visível no valor do ângulo de *deadrise*, mostrando que essa característica geométrica tem grande influência no problema, o que já havia sido observado anteriormente. Além disso, as soluções “não-robustas” (linhas azuis) apresentam os maiores valores de boca e os menores valores de ângulo de *deadrise*, o que explica a elevada resposta de aceleração e baixa potência.

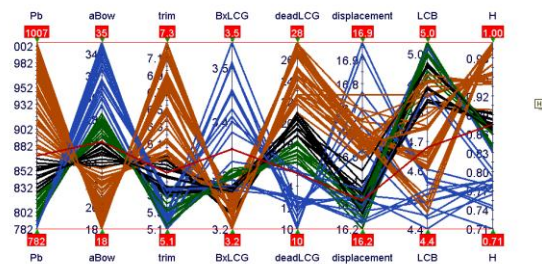


Figura 17 - Características geométricas das embarcações da fronteira de Pareto

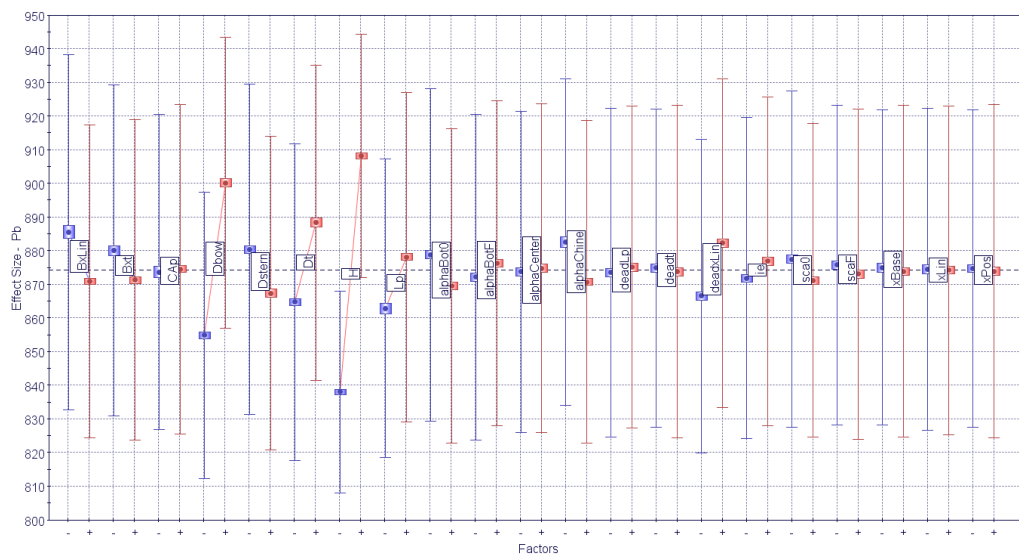


Figura 18 - Efeitos das variáveis na resposta de potência

Sendo assim, as variáveis que apresentaram maior impacto nessa resposta foram selecionadas para serem analisadas com maior profundidade. As variáveis selecionadas foram:

- $B_{xlin}$ ;
- $B_{xt}$ ;
- $D_{bow}$ ;
- $D_{stern}$ ;
- $D_t$ ;
- $H$ ;
- $L_p$ ;
- $\alpha_{bot0}$ ;
- $\alpha_{chine}$ ;
- $\beta_{xlin}$ .

Sendo assim, foi elaborado um diagrama de coordenadas paralelas para as variáveis selecionadas. O diagrama encontra-se na

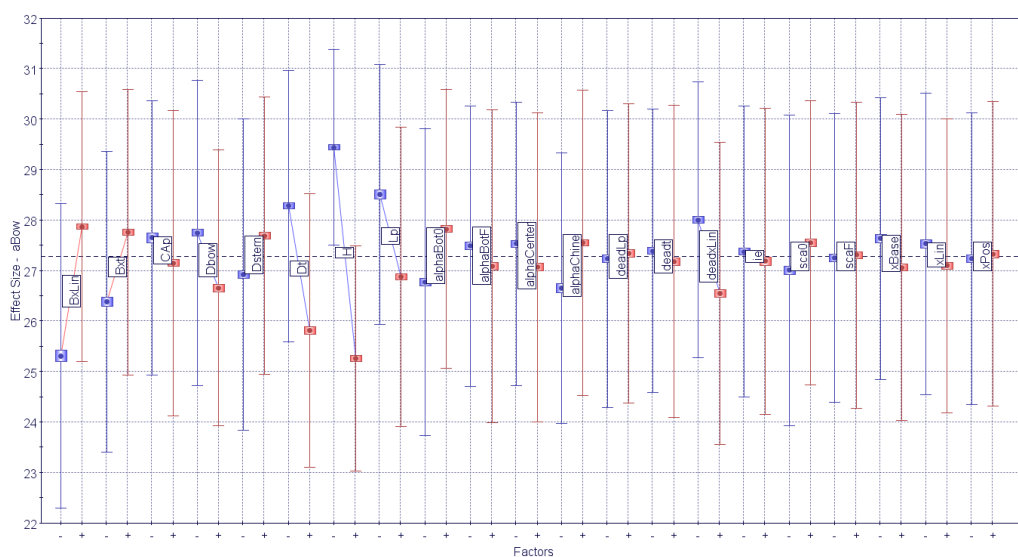


Figura 21 - Efeitos das variáveis na resposta de aceleração

Figure 1: Evolution of 12 parameters over 18 generations. The graph shows that most parameters converge to a stable value by generation 10. The parameters and their final values are: BxLin (3.20), Bxt (3.27), CAp (3.30), Dbow (3.20), Dstern (3.20), Dt (3.20), H (3.20), Lp (3.20), alphaBo (14.0), alphaCh (14.0), t0 (14.0), and deadLi (13.0).

Como o procedimento de otimização foi utilizado para modificar a geometria do casco de uma embarcação já existente sem que seus atributos de desempenho fossem deteriorados, apenas as soluções “não-dominadas” serão analisadas a partir desse ponto.

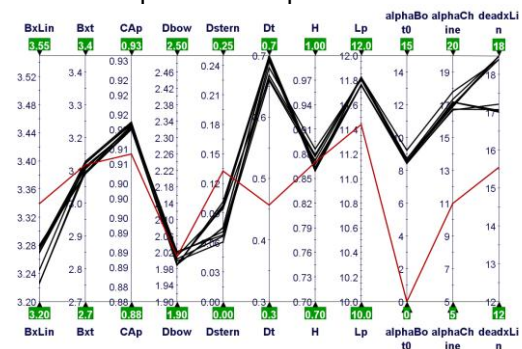


Figura 20 - Comparação entre as variáveis das  
solução "não-dominadas" e da lancha de  
referência



A Figura 20 apresenta novamente um diagrama de coordenadas paralelas das principais variáveis, porém apenas as soluções “não-dominadas” (linhas pretas) e a embarcação de referência (linha vermelha) aparecem nessa figura.

As variáveis  $B_{xt}$ ,  $D_{bow}$  e  $H$  mantiveram-se muito próximas ao valor da lancha de referência, porém as demais variáveis se afastaram dos valores de referência. As novas lanchas possuem boca ligeiramente mais larga ( $B_{xlin}$ ), quina mais comprida ( $L_p$ ), maior ângulo de *deadrise* ( $\beta_{xlin}$ ) e a elevação da quilha na posição do *transom* foi reduzida ( $D_{stern}$ ). Além disso, a elevação da quina na posição do *transom* ( $D_t$ ) e o ângulo no final da quina ( $\alpha_{chine}$ ) aumentaram significativamente.

Na Figura 22, é possível observar uma vista tridimensional da geometria de três das embarcações da categoria “non-dominadas”, são elas: as soluções nos limites esquerdo e direito da fronteira, ou seja, as soluções que tem desempenho em potência e aceleração, respectivamente, similares à lancha de referência e uma solução no interior da

fronteira. As três soluções possuem geometria parecidas entre si, o que já era esperado devido à pequena faixa de variação dos parâmetros geométricos dessa categoria.

## 6 Conclusões e recomendações

Nesse artigo apresentou-se um modelo de síntese e otimização para embarcações de planeio. O modelo de síntese é constituído, basicamente, de um modelo paramétrico da geometria do casco e por diferentes módulos para análise de desempenho, como: resistência ao avanço, comportamento no mar, pesos e estabilidade dinâmica longitudinal.

O modelo paramétrico permite a geração automática de superfícies que representam muito bem a forma do casco de embarcações típicas de planeio, como pode ser visto na Figura 22.

Um exemplo de aplicação foi explorado nas seções finais do artigo. O modelo de síntese e otimização foi utilizado para propor uma nova geometria do casco de uma embarcação de recreio, sem deteriorar seus atributos de desempenho.

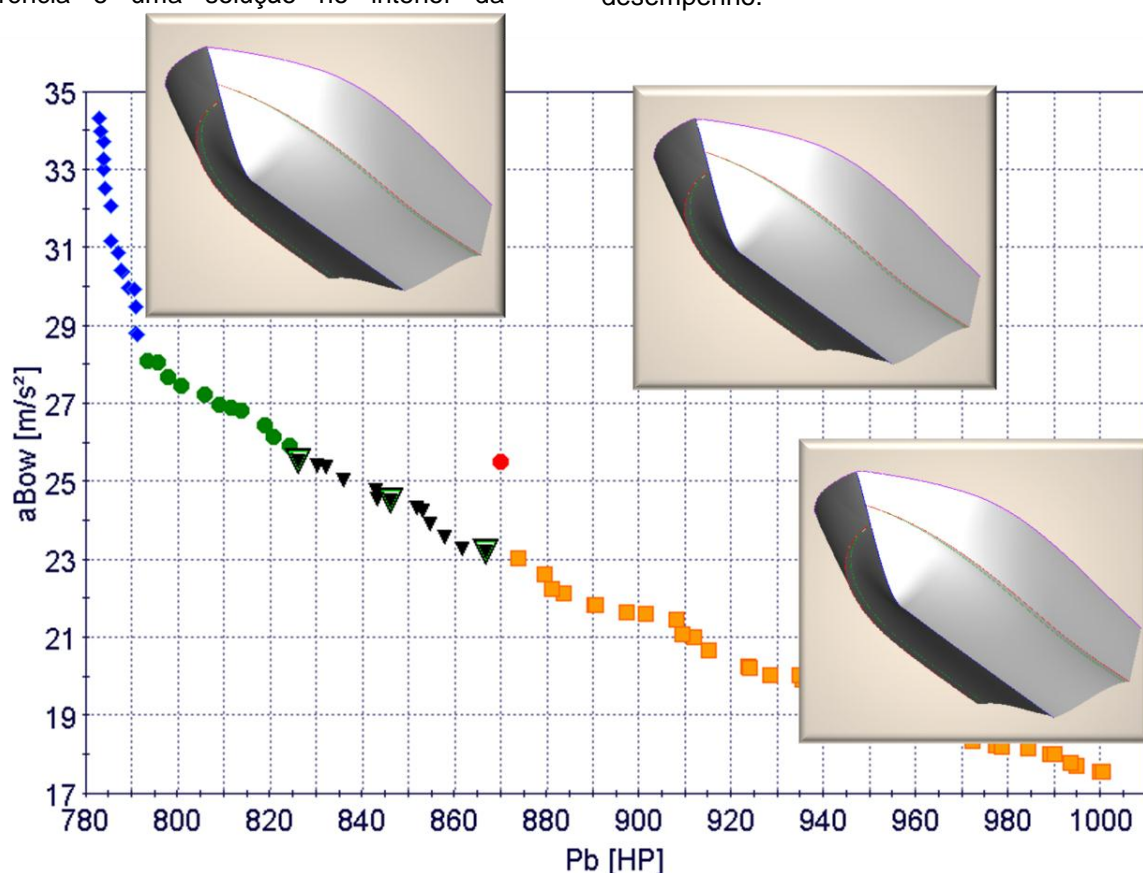


Figura 22 - Geometria do casco das embarcações “não-dominadas”<sup>2</sup>

<sup>2</sup> A geometria à boreste representa a embarcação de referência, enquanto que a geometria à bombordo os novos casco propostos nesse trabalho.

Durante o procedimento, algumas características geométricas não foram alteradas, como: o motor, o propulsor, o ângulo do eixo do motor e a linha do convés.

Os resultados do procedimento de otimização, representados pela fronteira de Pareto, mostram o compromisso entre as respostas de aceleração e potência. Caso o único objetivo considerado fosse, por exemplo, a minimização da aceleração vertical, a embarcação resultante do processo de otimização demandaria uma potência muito elevada. Isso mostra que o problema de projeto de embarcações desse tipo deve ser tratado não apenas do ponto de vista de um único objetivo, mas a partir de múltiplos objetivos.

Foram encontradas soluções que melhoram, ao mesmo tempo, tanto o desempenho de potência como o de aceleração em relação à lancha de referência (triângulos pretos na Figura 22). Além disso, algumas das variáveis que definem essas soluções possuem valores significativamente diferentes os valores de referência.

Como dito anteriormente, algumas das características da embarcação não foram alteradas. Seria interessante adicionar o projeto do propulsor e a seleção do ângulo e posição do eixo do motor no procedimento de otimização, a fim de verificar o efeito da variação dessas propriedades nos atributos analisados. Além disso, outros módulos de desempenho, como estabilidade dinâmica transversal, arranjo, dimensionamento estrutural podem ser facilmente adicionados ao modelo futuramente.

Os módulos de análise em águas calmas e comportamento no mar utilizam apenas alguns parâmetros geométricos da embarcação, como ângulo de *deadrise* e boca na posição do centro de gravidade, para realizarem as estimativas de desempenho.

Apesar dos resultados serem satisfatórios para realização de estimativas de desempenho durante as fases iniciais de projeto, seria interessante que toda a geometria do casco pudesse ser utilizada nas análises. Isso pode ser feito através de métodos de faixas que consideram a teoria de impacto de cunhas na superfície da água. Exemplos dessas metodologias podem ser encontrados em (SAVANDER, SCORPIO e TAYLOR, 2002), para desempenho em águas calmas, e em (ARRIBAS e FERNÁNDEZ, 2005), para comportamento no mar.

Finalmente, é necessário que sejam realizados testes em modelos de escala reduzida, para verificar se os resultados

estimados através dos módulos de desempenho desenvolvidos nesse trabalho apresentam aderência com os valores reais das respostas de potência e aceleração.

## 7 Agradecimentos

Os autores do trabalho agradecem ao estaleiro Vellroy Estaleiros do Brasil Ltda pelo apoio oferecido durante o desenvolvimento da pesquisa, cujos resultados foram apresentados nesse artigo.

## Bibliografia

ABS. Slamming Impact Design Loads on Large High Speed Naval Craft. **International Conference on innovative approaches to further increase speed of fast marine vehicles, moving above, under and in water surface, SuperFAST'2008**, 2008.

ARRIBAS, F. P.; FERNÁNDEZ, J. A. C. Strip theories applied to the vertical motions of high speed crafts. **Ocean Engineering**, November 2005.

BLOUNT, D. L.; FOX, D. L. Small-Craft Power Prediction. **Marine Technology**, 13, 1976.

BRATLEY, P.; FOX, B. L. Implementing Sobol's Quasirandom Sequence Generator. **ACM Transactions on Mathematical Software**, 14, n. pages 88-100, 1988.

CALKINS, D. E. An Interactive Computer-Aided Design Synthesis Program for Recreational Powerboats. **Transactions SNAME**, 91, n. pp. 49-67, 1983.

CALKINS, D. E.; SCHACHTER, R. D.; OLIVEIRA, L. T. An automated computational method for planing hull form definition in concept design. **Ocean Engineering**, 1999.

CARLTON, J. S. **Marine Propeller and Propulsion**. [S.l.]: Elsevier, 2007. ISBN 978-07506-8150-6.

DEB ET ALL. Fast Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, n. pp. 182-197, April 2002.

GRUBISIC, I. Reliability of Weight Prediction in the Small Craft Concept Design. **Apresentado no HIPER'08 - Itália**, n. disponível em , 2008.

HADLER, J. B. The Prediction of Power Performance on PLaning Craft. **Trans. SNAME**, 74, 1966.

HADLER, J. B.; HUBBLE, E. N. Prediction of the Power Performance of the Series 62 Planing Hull Forms. **SNAME Transactions**, 79, 1971.

RADOJCIC, D. An Engineering Approach to Predicting the Hydrodynamic Performance of



Planing Craft Using Computer Techniques. **RINA**, 1990.

RADOJCIC, D. Fifty Years of the Gawn-Burrill KCA Propeller Series. **Transactions Rina**, 151, n. Part B2, Intl J Small Craft Tech, 2009.

SAVANDER, B. R.; SCORPIO, S. M.; TAYLOR, R. K. Steady Hydrodynamic Analysis of Planing Surfaces. **Journal of Ship Research**, 46, n. pp. 248-279, 2002.

SAVITSKY, D. Hydrodynamic Design of Planing Hulls. **Marine Technology**, 1964.

SAVITSKY, D.; BROWN, P. W. Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water. **Marine Technology**, 13, 1976.

SAVITSKY, D.; DELORME, M. F.; DATLA, R. Inclusion of Whisker Spray Drag in Performance Prediction Method for High-Speed Planing Hulls. **Marine Technology**, 44, 2007.

SIMÕES, F.; ANDRADE, B. L. R. Modelo de Síntese e Otimização para o Projeto Preliminar de Embarcações de Planeio. in: **SOBENA 2010 - 23o Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore**, Rio de Janeiro, 2010.