

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

DIOGO KRAMEL

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DE UM CASCO DE VELEIRO ATRAVÉS DE UMA  
ABORDAGEM INTEGRADA AERO-HIDRODINÂMICA

Joinville  
2016

Diogo Kramel

OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DE UM CASCO DE VELEIRO ATRAVÉS DE UMA  
ABORDAGEM INTEGRADA AERO-HIDRODINÂMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Thiago Pontin Tancredi, Dr.

Joinville

2016

Diogo Kramel

**OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DE UM CASCO DE VELEIRO ATRAVÉS DE UMA  
ABORDAGEM INTEGRADA AERO-HIDRODINÂMICA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, e aprovado pela comissão examinadora e pelo curso de graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 01 de dezembro de 2016.

---

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Lucas Weihmann, Dr.  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Bernardo Luis Rodrigues de Andrade, Dr.  
Membro  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Videoconferência)

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Florindo Kramel e Carin Voigt Kramel, pelo apoio constante na realização de minhas ambições e sobretudo por serem os maiores exemplos de pessoa, os moldes do que fui e do que serei.

Ao meu professor e orientador, Thiago Pontin Tancredi, pelas incansáveis horas que dispôs a sanar minhas dúvidas, pela confiança depositada quando deixei de cumprir com prazos e mais do que tudo, pela forma sempre entusiasmada de me instigar a sempre buscar excelência.

Aos meus amigos, por serem o reduto de sanidade na minha vida, pelas lamúrias ouvidas e os consolos dados.

A CD-adapco, Friendship Systems e Bentley, por disponibilizarem em forma integral os *softwares* Star-CCM+®, CAESES® e o pacote MAXSURF®, sem os quais este trabalho não seria possível.

*“When one sleeps on the floor, one need not to worry about falling out of bed”*

Anton Szandro LaVey



## RESUMO

Este estudo apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para o projeto de veleiros através de uma abordagem focada na melhora das dimensões e curvaturas do casco. A primeira etapa é a criação de um modelo paramétrico da superfície do casco, composto por curvas definidas por parâmetros específicos, que descrevem com simplicidade e precisão o formato do casco. Este processo é conduzido utilizando-se o programa CAESES®. Os componentes hidrodinâmicos e aerodinâmicos são inseridos na análise através do uso do programa Star-CCM+®. Neste, o casco gerado anteriormente é acoplado a modelagem da vela, que juntos compõe o objeto de análise aplicado a uma dada condição de vento e mar. Ao final, tem-se a velocidade desempenhada pelo veleiro para certas condições externas. Além da velocidade final desempenhada, o *seakeeping* também é analisado através dos índices MSI – *Motion Sickness Incidence* e SM – *Subjective Motion*. Tanto a velocidade final quanto o resultado do MSI e SM serão os objetivos do modelo, que emprega Redes Neurais Artificiais e técnicas de otimização direcionadas a maximizar a velocidade e minimizar os índices de *seakeeping*. Ao final do projeto, obtém-se não apenas uma melhoria do casco analisado, tanto em termos de *seakeeping* quanto de velocidade, apresentando uma melhoria de 2,68% no primeiro e 20% no segundo. Porém, mais relevante ainda é a contribuição para um entendimento mais vasto sobre a aplicação de uma metodologia integrada para análise simultânea dos aspectos hidrodinâmicos e aerodinâmicos de forma ágil, precisa e robusta.

**Palavras-chave:** Veleiro. Parametrização. Otimização. Redes Neurais.

## ABSTRACT

This study presents the development of a methodology for the design of sailboats through an approach focused on the improvement of hull dimensions and curvatures. The first step is the creation of a parametric model of the hull's surface, made of curves defined by specific parameters that describe with simplicity and precision the shape of the hull. This process is conducted using CAESSES® software. The hydrodynamic and aerodynamic components are inserted into the analysis using Star-CCM+®. The hull generated previously is coupled to the sail, which together composes the object of analysis applied to a given wind and sea condition. In the end, the speed reached by the sailboat for certain external conditions. In addition to the final velocity performed, seakeeping is also analyzed through the indexes MSI - Motion Sickness Incidence and SM - Subjective Motion indices. Both the final speed and the result of the MSI and SM will be the objectives of the model, which uses Artificial Neural Networks and optimization techniques applied to maximizing speed and minimizing seakeeping rates. At the end of the project, there is an improvement of the hull analyzed, in terms of seakeeping and speed, showing an improvement of 2.68% in the first and 20% in the second. However, the more relevant contribution is a broader understanding of the application of an integrated methodology for the simultaneous analysis of hydrodynamic and aerodynamic aspects in an agile, precise and robust way.

**Keywords:** Sailboat. Parametrization. Optimization. Neural Network.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espiral de projeto de um veleiro.....	11
Figura 2 – Representação das principais dimensões de um veleiro.....	15
Figura 3 – Forças atuantes sobre um veleiro.....	18
Figura 4 – Forças atuantes sobre um veleiro.....	19
Figura 5 – Momentos atuantes sobre um veleiro.....	20
Figura 6 – Funcionamento de um VPP.....	22
Figura 7 – Forças aerodinâmicas sobre uma vela.....	24
Figura 8 – Curvas básicas para modelagem de casco nu de um veleiro.....	30
Figura 9 – Representação das curvas básicas um veleiro.....	30
Figura 10 – Projeto convencional e através de parametrização.....	31
Figura 11 – Projeto paramétrico.....	32
Figura 12 – Fronteira de Pareto para embarcação de planeio.....	35
Figura 13 – Função com mínimos e máximos locais.....	37
Figura 15 – Plano de linhas do YD-40.....	27
Figura 16 – Parâmetros dimensionais.....	29
Figura 17 – Inclinação do casco.....	31
Figura 18 – Linhas paramétricas principais.....	38
Figura 19 – Linhas paramétricas secundárias.....	40
Figura 20 – Superfície do casco.....	42
Figura 21 – Feature utilizada na geração do casco.....	43
Figura 22 – Curvatura do casco.....	44
Figura 23 – Adição de apêndices.....	44
Figura 23 – Modelagem das velas.....	45
Figura 24 – Casco final.....	46
Figura 25 – Variações das restrições (extraído do programa) .....	55
Figura 26 – Variações de restrições (extraído do programa) .....	56
Figura 27 – Distribuição da variação do comprimento.....	56
Figura 28 – Variação da curvatura de casco.....	57
Figura 29 – Embarcação em seu domínio.....	59
Figura 30 – Comparativo entre malhas.....	60
Figura 31 – Fronteiras aplicadas ao modelo.....	61
Figura 32 – Diagrama polar gerado pelo programa.....	64
Figura 33 – Simulação do casco orginal (sem variação nas dimensões) .....	65
Figura 34 – Velocidade mensura para a embarcação modelo (extraído do programa).....	65
Figura 35 – Resíduos para o mesmo instante da simulação (extraído do programa).....	66
Figura 36 – Operação de otimização.....	69
Figura 37 – Relação dos parâmetros no MSI.....	70
Figura 38 – Relação dos parâmetros no SM.....	71
Figura 39 – Relação dos parâmetros na velocidade.....	71
Figura 40 – Relação do parâmetros de distância da popa.....	72
Figura 41 – Relação entre MSI e velocidade.....	73
Figura 42 – Comparativo entre cascos.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetro utilizados.....	41
Tabela 2 – Descrição dos parâmetros utilizados.....	43
Tabela 3 – Valores de inclinação do casco adotados.....	49
Tabela 4 – Faixa de valores para cada parâmetro.....	51
Tabela 5 – Faixa de valores para cada parâmetro.....	54
Tabela 6 – Parâmetro utilizados.....	54
Tabela 7 – Parâmetros utilizados.....	55
Tabela 8 – Modelos matemáticos utilizados na simulação.....	62
Tabela 9 – Resultados para análise.....	67
Tabela 10 – Soluções multimodais do estudo.....	72
Tabela 11 – Comparativo entre cascos.....	75

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>9</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
<b>1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 O PROJETO DE VELEIROS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 DEFINIÇÃO DO CASCO .....</b>	<b>15</b>
2.2.1 Dimensões principais .....	15
2.2.2 Coeficientes de forma e razões geométricas .....	16
<b>2.3 FORÇAS E MOMENTOS ATUANTES .....</b>	<b>17</b>
2.3.1 Forças atuantes.....	17
2.3.2 Momentos atuantes .....	18
<b>2.4 PROGRAMA DE PREDIÇÃO DE VELOCIDADE .....</b>	<b>18</b>
<b>2.5 PROPRIEDADES HIDROSTÁTICAS E AERODINÂMICAS .....</b>	<b>18</b>
2.5.1 Propriedades hidrostáticas .....	18
2.5.2 Propriedades hidrodinâmicas.....	19
2.5.3 Propriedades aerodinâmicas.....	20
<b>2.6 EQUAÇÕES GOVERNANTES.....</b>	<b>21</b>
2.6.1 Modelo turbulento.....	21
2.6.2 U-RANS.....	22
2.6.3 Modelo turbulento K-ε.....	23
2.6.4 Condições de superfície livre.....	23
<b>2.7 SEAKEEPING.....</b>	<b>24</b>
2.7.1 Motion Sickness Incidence (MSI) .....	24
2.7.2 Subjective Motion (SM) .....	25
<b>2.8 PARAMETRIZAÇÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>2.9 MODELAGEM GEOMÉTRICA .....</b>	<b>29</b>
2.9.1 Splines.....	29
2.9.2 NURBS .....	29
<b>2.10 CAESSES® .....</b>	<b>29</b>
<b>2.11 STAR-CCM+® .....</b>	<b>30</b>
<b>2.12 OTIMIZAÇÃO .....</b>	<b>31</b>
2.12.1 Otimização multiobjectivo.....	31
2.12.2 Técnicas Heurísticas Multiobjectivos .....	32
2.12.3 Algoritmos genéticos .....	33
2.12.4 Redes neurais artificiais .....	34
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
<b>4 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 EMBARCAÇÃO MODELO .....</b>	<b>37</b>
4.1.1 Parâmetros.....	38
<b>4.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA .....</b>	<b>39</b>
4.2.1 Descrição de forma da embarcação .....	39
4.2.2 Curvas paramétricas.....	41
4.2.3 Geração das superfícies.....	46
4.2.4 Inclusão de apêndices e vela.....	48

4.2.5	Análise Hidrostática.....	49
4.2.6	Restrições dimensionais do casco.....	12
<b>4.3</b>	<b>GERAÇÃO DE CASCOS PARA ANÁLISE.....</b>	<b>13</b>
4.3.1	Geração dos cascos.....	13
<b>4.4</b>	<b>MODELAGEM CFD DO SISTEMA EM STAR-CCM+®.....</b>	<b>16</b>
4.4.1	Geometria.....	17
4.4.2	Domínio.....	17
4.4.3	Malha.....	18
4.4.4	Condições de fronteira.....	19
4.4.5	Solvers.....	21
4.4.6	Movimento de corpo rígido.....	22
4.4.7	Execução da simulação.....	22
4.4.8	Convergência do modelo.....	23
4.4.9	Resultados da simulação.....	23
<b>4.5</b>	<b>OBJETIVOS USADOS NA OTIMIZAÇÃO.....</b>	<b>25</b>
4.5.1	Velocidade desempenhada.....	25
4.5.2	Seakeeping.....	26
<b>4.6</b>	<b>REDES NEURAIS.....</b>	<b>27</b>
<b>4.7</b>	<b>OTIMIZAÇÃO.....</b>	<b>627</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
5.1	SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS.....	29
5.2	MULTIMODALIDADE.....	31
5.3	FRONTEIRA DE PARETO.....	32
5.4	COMPARATIVO COM CASCO ORIGINAL.....	33
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>38</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Velejar é uma atividade antiga que se desenvolveu através da prática de velejadores e da experiência de projetistas em constante busca por melhor desempenho e segurança. A fabricação e o desenvolvimento tecnológico dessas embarcações foram impulsionados por práticas recreativas e especialmente por regatas de prestígio como a America's Cup. Competições como essa demandaram, ao longo dos anos, investimentos em pesquisa para aumentar o desempenho desses veleiros, resultando na otimização do peso, da forma e materiais empregados (LAZAR *et al.*, 2007).

A prática da vela não cresceu apenas em desempenho, mas também em popularidade. Segundo Rossi (2006), o Brasil possui uma costa marítima privilegiada, além de inúmeras represas e rios, tornando o país muito favorável à prática de esportes náuticos. Como consequência, o mercado de embarcações, sejam de cruzeiro ou competição, tem crescido nos últimos anos em razão do aumento da popularidade desta atividade.

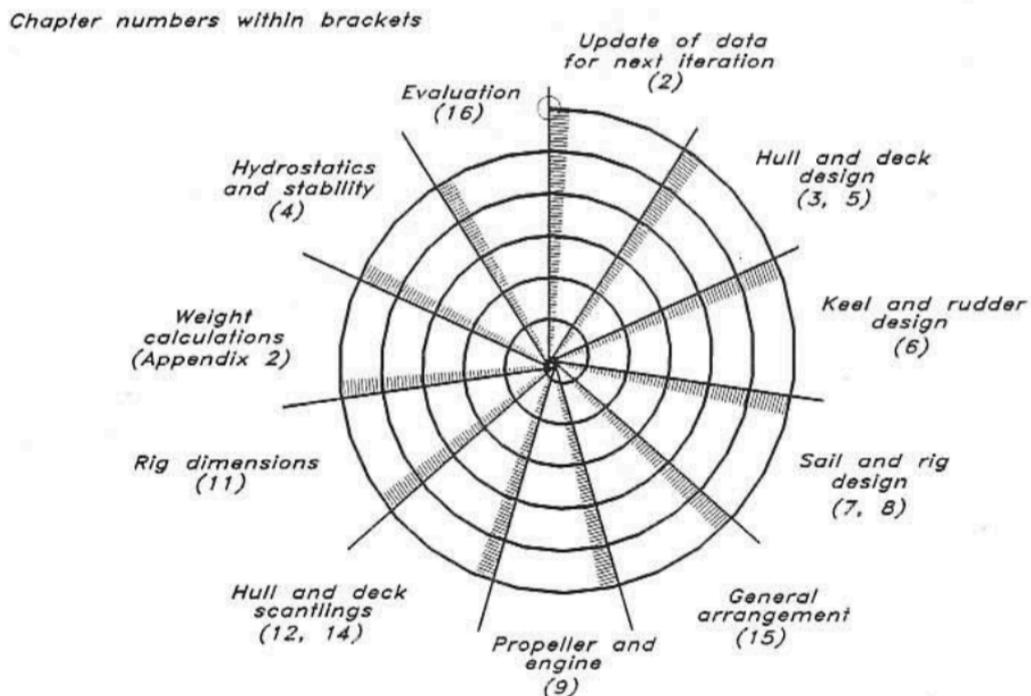
Nesse contexto, o aumento da demanda e da complexidade dos requisitos exigidos tem demandado novos esforços da engenharia na área naval, especialmente na etapa de projeto. Tradicionalmente, o projeto de embarcações é um processo iterativo e sequencial, usualmente representado por uma espiral. Cada volta na espiral passa por pontos que representam parâmetros da embarcação a serem calculados. Cada etapa é analisada de forma isolada, conforme a espiral converge para um ponto central, aproximando-se de uma solução hipotética ideal (LAMB, 2003). Ao final, o entendimento de qual é a melhor solução global, depende da análise do projetista, baseado em critérios pré-definidos. A Figura 1 apresenta um modelo de espiral para veleiros.

Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos recentes, realizar uma análise precisa de desempenho durante as etapas iniciais de projeto, assim como a busca por uma solução ideal, permanece um processo que demanda muito recurso humano e financeiro. O investimento nesses recursos pode ser minimizado ao propiciar mudanças no projeto logo nos estágios iniciais, fato esse corroborado por Beck (1999), que afirma que o custo envolvido em mudanças de projeto tende a crescer exponencialmente conforme o projeto se desenvolve.

Todavia, aumentar a qualidade do desenvolvimento de projetos, não deve servir apenas para reduzir custos, mas também para aumentar a qualidade final. A análise do comportamento em diferentes condições de mar, sob diferentes operações, tem recebido ainda mais atenção conforme as exigências do público têm aumentado (RICHARDT *et al.*, 2005). Segundo Kinney (1983), as quatro

principais características buscadas pelo público em um veleiro são: navegabilidade, acomodações espaçosas, estética e alta velocidade.

Figura 1 - Espiral de projeto de um veleiro



Fonte: Larsson e Eliasson (2000).

Na perspectiva de demandas cada vez mais rigorosas, tanto por parte dos usuários quanto dos próprios armadores, novas abordagens de projeto têm surgido. Com o progresso tecnológico e a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no comportamento de embarcações, se torna cada vez mais simples relacionar diferentes características geométricas com as forças que atuam sobre os veleiros, dessa forma, projetistas podem quantificar e qualificar a performance esperada a partir de um número restrito de parâmetros da embarcação. Esse processo é conhecido como parametrização. Além de estimar com antecedência a performance da embarcação, o projetista pode, através da parametrização, antecipar as limitações de projeto para as fases iniciais. Outra vantagem desse processo é facilitar a relação com dificuldades exógenas, tais como tempo limitado, restrições econômicas e tecnológicas, que reduzem severamente a possibilidade de longas e precisas investigações da performance da embarcação, assim como da elaboração de um número maior de alternativas de projeto (FASSARDI *et al.*, 2006).

Em métodos paramétricos a abordagem da modelagem do casco acontece de forma

diferenciada. Ao invés de um grande número de pontos em coordenadas cartesianas, a modelagem paramétrica especifica curvas longitudinais que irão gerar o formato do casco. Dessa forma, a otimização do formato do casco pode ser trabalhada através da mudança de parâmetros geométricos, permitindo inclusive análises integradas de fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD) (ZHANG *et al.*, 2008).

As mudanças podem então ser propagadas ao longo do projeto da embarcação devido a fácil manipulação desses dados. Essa característica não gera apenas facilidade no decorrer do projeto, como também permite que novas soluções sejam exploradas em busca de formas mais próximas da solução ideal.

A ferramenta utilizada para a parametrização do casco de embarcações foi a plataforma CAESES®, uma ferramenta CAD/CFD/CAE para simulação focada em projetos dirigida a simulação, que figura entre os mais avançados sistemas de modelagem paramétrica atuais, amplamente usado em aplicações náuticas.

Além da modelagem em casco, foram consideradas as forças exercidas sobre a embarcação. Para a estimativa da velocidade desempenhada pela embarcação através dos ventos incidentes, é utilizado o programa Star-CCM+®, uma plataforma computacional difundida no ambiente da engenharia. Para a análise de *seakeeping*, o programa MAXSURF Motions® será utilizado em virtude de sua disponibilidade, assim como a qualidade dos resultados.

A simulação nestes dois ambientes computacionais irá gerar o insumo necessário para o uso de algoritmos genéticos. Estes algoritmos, quando aplicados no programa modeFRONTIER®, permitem que um processo de otimização seja executado direcionado a melhora das funções objetivo.

Por fim, o presente trabalho busca, através das ferramentas e técnicas já citadas, otimizar o formato de casco de embarcações do tipo veleiro. Através da implementação de algoritmos genéticos direcionados a otimização é possível investigar soluções que proporcionem melhor desempenho quando aplicados as forças e momentos exercidos pelo ambiente no qual a embarcação se encontra.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo de síntese que permita obter melhorias da curvatura de casco de veleiros através de uma investigação dos efeitos hidrodinâmicos e aerodinâmicos exercidos sob a embarcação.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Investigar as metodologias já utilizadas nos estudos paramétricos deste segmento de embarcação;
- Desenvolver um modelo paramétrico de veleiro para modelagem geométrica;
- Representar de forma precisa o desempenho do veleiro através de análises CFD em Star-CCM+®;
- Realizar comparativos entre as soluções propostas e estimativas de desempenho do casco inicial;
- Apresentar melhorias significativas no projeto do casco estudado;
- Definir diretrizes precisas para a reprodução deste experimento e apontar pontos de melhoria para estudos futuros.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A composição desta monografia é feita por cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 2 – Fundamentação teórica: nesta seção os principais conceitos necessários para o pleno entendimento do trabalho são explorados.
- Capítulo 3 – Metodologia: neste capítulo são apresentados os métodos e ferramentas aplicados no desenvolvimento do trabalho.
- Capítulo 4 – Desenvolvimento: o próximo capítulo apresenta com maior detalhamento a aplicação de cada etapa apresentada na metodologia, especificando as configurações adotadas e justificativas das decisões tomadas.
- Capítulo 5 – Resultados: os resultados encontrados na etapa de desenvolvimento, em especial de otimização, são apresentados e compõe o objeto de análise do Capítulo 6.
- Capítulo 6 – Conclusões: a partir dos resultados levantados, conclusões e apontamentos são tecidos avaliando as informações obtidas e analisando pontos que podem ser melhorados em estudos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente seção compõe a revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento do estudo de otimização proposto. Primeiramente, serão apresentadas quais as principais características de embarcações do tipo veleiro e a influência da forma do casco no seu desempenho, além da descrição das principais forças atuantes sobre o conjunto. A partir desta etapa, será possível explorar a questão da parametrização e os principais estudos já realizados nesta área. Além da parametrização, as propriedades hidrodinâmicas e hidrostáticas serão discutidas juntamente com as equações governantes que modelam o sistema. Por último, para prover um melhor entendimento sobre o processo de otimização, diferentes abordagens sobre este conceito serão apresentadas.

### 2.1 O PROJETO DE VELEIROS

O projeto de veleiros leva em consideração muitos fatores, sendo o principal deles o uso que será dado a embarcação. De acordo com Larsson e Eliasson (2000), os veleiros podem ser divididos em duas categorias: competição e cruzeiro. Os veleiros de competição devem considerar também a classe em que competirão, definindo conseqüentemente o tamanho, tripulação, tipo e tamanho de vela. Já os veleiros do tipo cruzeiro levam em conta características como segurança, estabilidade e performance para que seja possível cruzar longas distâncias em condições adversas.

Quando se trata do projeto de veleiros, diferentes abordagens podem ser tomadas. De acordo com Henry e Miller (1965), a primeira etapa é a escolha do tipo de veleiro, seguida do cálculo das principais características da embarcação, como deslocamento e coeficientes de forma, auxiliado por relações entres parâmetros através de gráficos apresentados pelo autor. Dessa forma, essa abordagem é altamente dependente da habilidade e experiência do projetista, e fundamentada especialmente em dados estatísticos.

Em contrapartida, Larsson e Eliasson (2000) adotam uma abordagem mais sistemática sobre o projeto de veleiros, resultado do uso da espiral de Evans, já apresentada na seção anterior. Nesta abordagem, o foco é a determinação sequencial de propriedades da embarcação através do uso, principalmente, de formulações empíricas. Graças a aplicação direta de conceitos hidrostáticos e hidrodinâmicos, o projetista tem mais empoderamento e aparato técnico na elaboração da embarcação.

Entre as publicações mais recentes, destaca-se Fossati (2009), que em sua obra explora o projeto de veleiros com enfoque no seu desempenho. Através da utilização de ferramentas mais recentes, como análises CFD, sua obra contempla análises precisas não apenas nos aspectos hidrodinâmicos, como especialmente aerodinâmicos.

## 2.2 DEFINIÇÃO DO CASCO

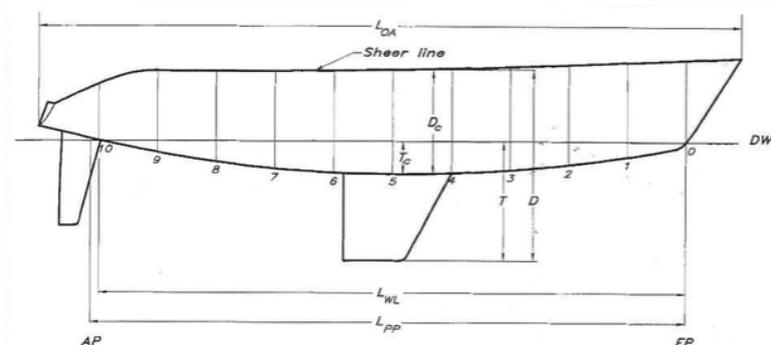
O projeto do casco de uma embarcação é realizado através de diferentes dimensões para a determinação de seu formato. Além disso, é possível realizar diferentes análises através de coeficientes geométricos e razões entre medidas. Estas técnicas são intensivamente empregadas por autores como Perry (2008) e Larsson e Eliasson (2000).

### 2.2.1 Dimensões principais

As dimensões capazes de descrever o formato do casco de um veleiro são semelhantes aquelas encontradas na literatura naval para navios em geral. Estas definições fazem parte do Dictionary of Ship Hydrodynamics, desenvolvido pelo International Towing Tank Conference (ITTC).

Para Perry (2008), as medidas essenciais para a construção geométrica de um casco para veleiros são o comprimento entre perpendiculares ( $L_{PP}$ ), calado ( $T$ ), pontal ( $D$ ) e comprimento total ( $L_{OA}$ ), cujas definições podem ser vistas na Figura 2.

Figura 2 – Representação das principais dimensões de um veleiro



Fonte: Larsson e Eliasson (2000).

### 2.2.2 Coeficientes de forma e razões geométricas

Através de relações entre as dimensões, defini-se diversos atributos da embarcação, os quais permite ao projetista estabelecer diversas conclusões. De acordo com Fossati (2009), há três características geométricas que influenciam a formação de onda de uma embarcação. Elas são o coeficiente prismático ( $C_P$ ), coeficiente volumétrico ( $C_V$ ) e a razão entre boca (B) e calado (T).

O coeficiente prismático longitudinal descreve a distribuição de volume ao longo da forma do casco através da razão entre o deslocamento ( $\nabla$ ) e a razão da área máxima ( $A_X$ ) e o comprimento da linha d'água ( $L_{WL}$ ) (LARSSON; ELIASSON 2000), conforme a Equação 1. Quando seu valor é baixo, o formato do casco tende a ser afunilado na popa e na proa. Se o valor aumenta, o casco tende a ser mais cheio e pode chegar a ter corpo médio paralelo em parte da embarcação (LAMB, 2003). Os veleiros costumam possuir valores de  $C_P$  entre 0,5 e 0,56, denotando assim sua característica adelgada (PERRY, 2008).

$$C_P = \frac{\nabla}{A_X * L_{WL}} \quad (1)$$

Outro parâmetro importante é o coeficiente volumétrico. Seu valor é calculado pela razão entre o deslocamento ( $\nabla$ ) e o valor do comprimento (L) ao cubo, conforme mostrado pela Equação 2, representando assim a a característica delgada do barco, influenciando em especial a manobrabilidade (LAMB, 2003).

$$C_V = \frac{\nabla}{L^3} \quad (2)$$

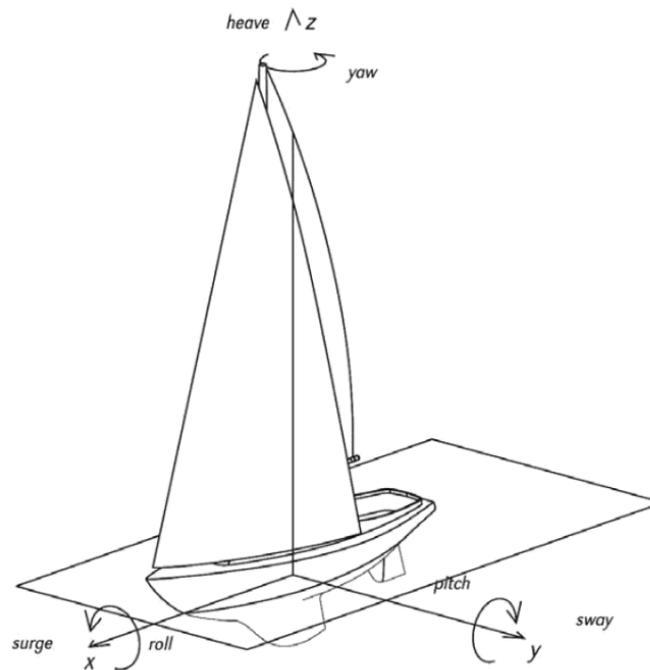
Por último, a razão entre boca e calado possui alta influência na resistência residual, que aumenta com o valor de B/T. Entretanto, se o seu valor diminuir, a estabilidade transversal pode tornar-se um problema (LAMB, 2003).

## 2.3 FORÇAS E MOMENTOS ATUANTES

O veleiro é um sistema intrincado que interage, simultaneamente, com dois fluídos: água e ar. Esta interação possibilita o movimento do veleiro em seis graus de liberdade. Os seis movimentos fundamentais, representados na Figura 3, são (FOSSATI, 2009):

- Surge: longitudinal ao longo do eixo X;
- Sway: longitudinal ao longo do eixo Y;
- Heave: longitudinal ao longo do eixo Z;
- Roll: rotação no eixo X;
- Pitch: rotação no eixo Y;
- Yaw: rotação no eixo Z.

Figura 3 – Forças atuantes sobre um veleiro



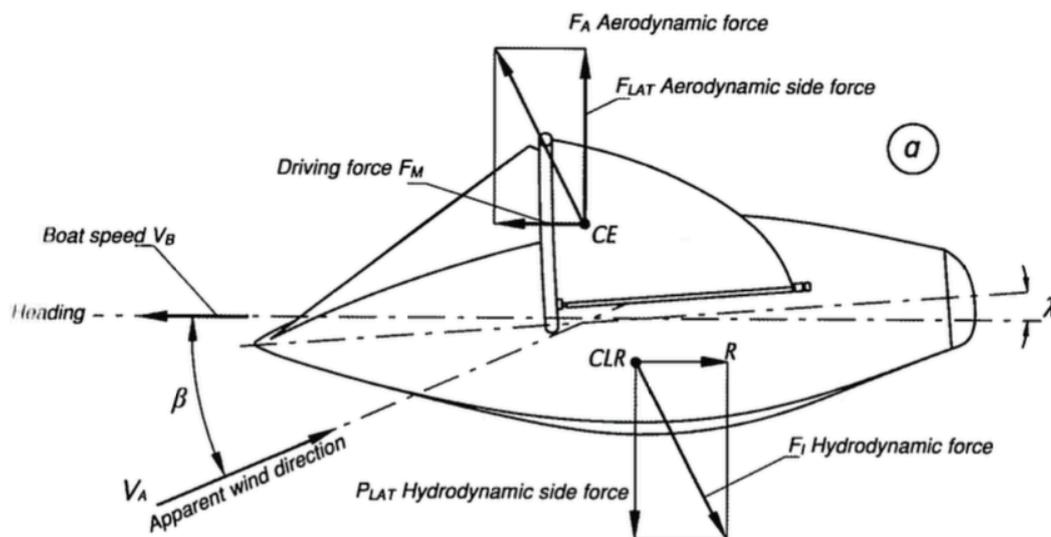
Fonte: Fossati (2009).

Sendo assim, é essencial o pleno entendimento físico da interação ente o trinômio embarcação-ar-água, a fim de identificar o papel dos parâmetros geométricos da embarcação, objeto de estudo neste trabalho, em função das forças atuantes.

### 2.3.1 Forças atuantes

Existem duas forças atuantes principais sobre um veleiro. A primeira delas é a força aerodinâmica, resultado da ação do vento sobre a vela, e que induz o veleiro ao movimento. Em resposta a esta força, uma força é imposta ao corpo submerso quando este desliza na água (LARSSON *et al.*, 2013). A Figura 4 apresenta a atuação destas duas forças.

Figura 4 – Forças atuantes sobre um veleiro



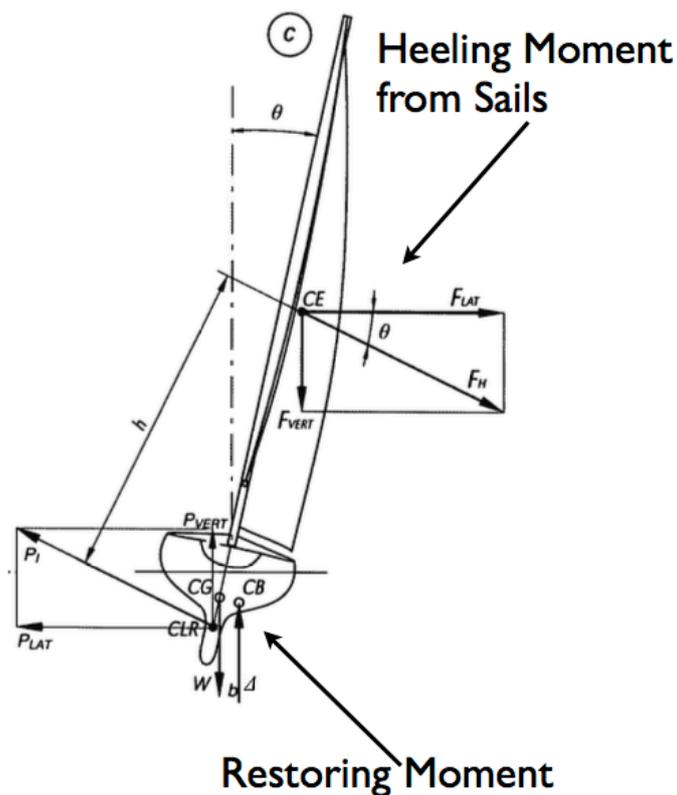
Fonte: Fossati (2009).

A resultante da força aerodinâmica ( $F_A$ ) pode ser simplificada como uma força aplicada no centro geométrico da área vélica (CE). Esta força, quando decomposta, gera duas componentes. A primeira é a força motora ( $F_M$ ) que impulsiona a embarcação para frente, enquanto a segunda, a força aerodinâmica lateral ( $F_{LAT}$ ) projeta a embarcação lateralmente. Como reação, uma força hidrodinâmica ( $F_I$ ) surge sobre o casco, contrabalanceando os efeitos hidrodinâmicos, e que pode ser considerada aplicada no centro de resistência lateral (CLR). A deriva é contraposta pela força hidrodinâmica lateral ( $P_{LAT}$ ) enquanto a resistência ( $R$ ) é consequência da resistência ao avanço imposta pela água.

### 2.3.2 Momentos atuantes

Segundo Larsson e Eliasson (2000), as forças aerodinâmicas e hidrodinâmicas geram respectivamente o momento de adernamento e o momento restaurador. A Figura 5 representa a atuação destes momentos através da visão no plano frontal de um veleiro.

Figura 5 – Momentos atuantes sobre um veleiro



Fonte: Fossati (2009).

O momento restaurador provocado pela parte submersa atua no sentido contrário ao momento de adernamento, que por sua vez é resultado da pressão aerodinâmica, fazendo assim o veleiro se aprumar (FOSSATI, 2009).

Apesar deste comportamento não ser totalmente preciso, especialmente por desconsiderar efeitos como o da quilha, ele serve como ótima aproximação para esta aplicação. Ao final, o momento de adernamento sobre a vela é balanceado pelo momento restaurador das forças de flutuação e peso.

## 2.4 PROGRAMA DE PREDIÇÃO DE VELOCIDADE

Um Programa de Predição de Velocidade (Velocity Prediction Program –VPP) é um programa de predição de velocidade através do qual é possível estimar a velocidade desempenhada pelo veleiro e seu adernamento em uma determinada condição de operação, utilizando para tanto, equações de equilíbrio longitudinal, lateral e de momentos (ROSSI, 2006).

Os VPPs vêm se tornando uma ferramenta indispensável para projetistas de veleiros, fabricantes e velejadores. Seu uso permite estimativas de desempenho sem a utilização de modelos em escala ou protótipos, diminuindo consideravelmente o custo para pesquisa e desenvolvimento de veleiros (PELLE *et al.*, 2006).

O modo de operar pode variar entre cada um dos modelos de VPP, entretanto, todos possuem dois elementos em comum (FOSSATI, 2009): um modelo matemático do barco e um algoritmo para a solução das equações de movimento.

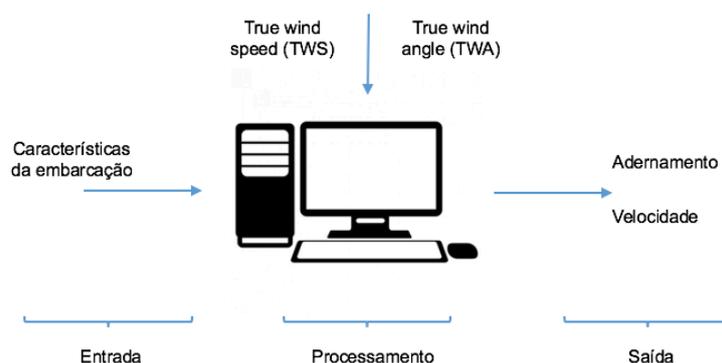
Para o desempenho pleno do modelo matemático, é essencial a posse das seguintes informações:

- As características geométricas do casco;
- As características geométricas dos apêndices;
- As características geométricas do plano de velas;
- A velocidade real do vento (TWS);
- O ângulo da velocidade verdadeira do vento.

Ao final, usualmente, apenas os resultados de velocidade e adernamento são apresentados, desconsiderando-se as outras três formas de movimento, ou seja, o veleiro tem apenas três graus de liberdade: surge, yaw e heel. O funcionamento do VPP, portanto, dá-se comumente como apresentado na Figura 6.

A etapa de processamento dessas informações é complexa e pode ser desempenhada de diferentes formas, porém invariavelmente ela é um processo iterativo cíclico. Devido a quantidade maior de incógnitas em relação ao número de equações, duas hipóteses devem ser adotadas. Assume-se que as forças aerodinâmicas balanceiam a resistência hidrodinâmica, enquanto o momento de adernamento é balanceado pelo momento restaurador (FOSSATI, 2009).

Figura 6 – Funcionamento de um VPP



Fonte: Adaptado de Fossati (2009).

## 2.5 PROPRIEDADES HIDROSTÁTICAS E AERODINÂMICAS

De acordo com Larsson e Eliasson (2000), a forma do casco é basicamente definida em razão de suas propriedades hidrostáticas e hidrodinâmicas, subordinadas as forças aerodinâmicas exercidas sobre a vela e a porção emersa do casco.

### 2.5.1 Propriedades hidrostáticas

As propriedades hidrostáticas se apresentam quando o barco se encontra na posição estática, ou seja, sem ondas sobre a superfície molhada. A estabilidade gerada pelas propriedades hidrostáticas pode ser dividida em estabilidade longitudinal e transversal.

A estabilidade transversal é impactada quando o centro de gravidade e o centro de flutuação não estão sobre a mesma linha vertical (LARSSON *et al.*, 2000). A distância horizontal entre estas forças, que forma um par de momentos, aumenta conforme o adernamento, podendo levar o veleiro ao emborcamento.

De forma análoga, a estabilidade longitudinal advém da diferença do centro de aplicação da força peso e do centro de flutuação, porém, a distância neste caso refere-se ao sentido longitudinal do barco. Este par de momentos é capaz de imprimir uma inclinação longitudinal ao veleiro, gerando um ângulo entre popa e proa, chamado trim.

## 2.5.2 Propriedades hidrodinâmicas

Diante da complexidade do comportamento hidrodinâmico, torna-se necessário realizar simplificações e aproximações, não apenas para aplicar o presente estado de arte da hidrodinâmica, mas também para alcançar um processo de projeto mais prático (MILGRAM, 1997). Para tanto, os efeitos hidrodinâmicos podem ser decompostos em resistência sobre o casco, que atua contra a embarcação, e forças de sustentação, que atuam perpendicularmente em relação ao vetor velocidade, provendo sustentação ao barco (FOSSATI, 2009).

Quando se trata da resistência imposta ao casco, pode-se dividi-la em duas componentes principais: resistência viscosa e residual. A primeira é essencialmente composta pela resistência friccional, que se origina da interação entre a superfície do casco e água, portanto, predominante em baixas velocidades. De outro lado, a resistência residual, formada significativamente pela resistência de onda, aumenta exponencialmente com o aumento de velocidade, visto que ela é resultado da energia dispensada na formação de ondas (LARSSON, 2000).

Os valores de resistência costumam ser representados em função do número de Froude, um valor adimensional que padroniza a comparação entre diferentes embarcações. Este valor é dado pela razão entre a velocidade ( $v$ ) e a raiz do produto do comprimento na linha d'água ( $L_{wl}$ ) multiplicado pela aceleração da gravidade ( $g$ ), conforme a Equação 3.

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L_{wl}}} \quad (3)$$

Para Fossati (2009), a resistência friccional, maior parcela da resistência total a baixas velocidades, pode ser expressa como apresentado na Equação 4.

$$R_A = \frac{1}{2} \rho V_B^2 C_{RA} AW \quad (4)$$

Onde  $\rho$  representa a densidade do fluido,  $V_B$  é a velocidade do barco, a área molhada é  $AW$ , e  $C_{RA}$  é um coeficiente determinado pelo International Towing Tank Conference (ITTC).

Como o presente trabalho busca estabelecer um processo de melhoria em uma certa condição de uso, sendo esta em velocidades maiores, o foco maior será a redução da resistência residual, que é proporcional a velocidade na segunda potência.

A resistência residual depende em suma da forma do casco. Para o cálculo da sua magnitude, pode-se utilizar o modelo empírico apresentado pela Delft University of

Technology em 2008, determinado a partir de uma série sistemática construída com o ensaio de diversos modelos em escala de veleiros. O valor da resistência residual é calculado através de equações que associem constantes, dimensões e coeficientes geométricos, conforme apresenta a Equação 5.

$$\frac{R_W}{\nabla \cdot \rho \cdot g} = a_0 + \left( a_1 \frac{LCB}{LWL} + a_2 C_P + a_3 \frac{\nabla^{\frac{2}{3}}}{AWP} + a_4 \frac{BWL}{LWL} \right) \frac{\nabla^{\frac{1}{3}}}{LWL} + \left( a_5 \frac{LCB}{LCF} + a_6 \frac{BWL}{T_c} + a_7 C_m \right) \frac{\nabla^{1/3}}{LWL}$$

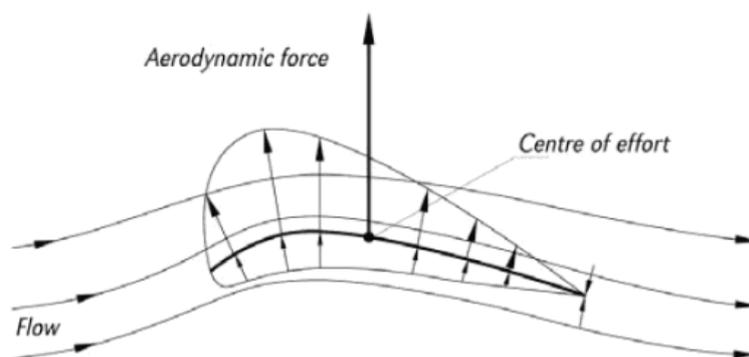
(5)

De acordo com Larsson (2000), podem existir variações entre 10% e 20% ao alterar-se os valores dos parâmetros. Entre eles, destacam-se LCB e  $C_P$ , utilizados por Fossati (2009) em seu estudo de otimização. Estes dois parâmetros são escolhidos pois são capazes de indicar se o volume é bem distribuído ao longo do casco.

### 2.5.3 Propriedades aerodinâmicas

O efeito aerodinâmico agindo sobre a vela pode ser representado como uma força individual agindo sobre um ponto que costuma variar dependendo da velocidade e do ângulo de ataque do fluido, sendo, portanto, muito complexo precisar sua exata posição (FOSSATI, 2009). A Figura 7 representa este sistema de forças.

Figura 7 – Forças aerodinâmicas sobre uma vela



Fonte: Fossati (2009).

Um modelo para análise aerodinâmica foi proposto por G. Hazen em 1980. Este modelo é utilizado como base na maioria do VPPs atuais, com eventuais melhorias para casos

específicos. Neste modelo, a sustentação e o arrasto viscoso de cada vela são determinados em função do ângulo do vento aparente. No modelo original, cinco ângulos são fornecidos: 27°, 50°, 80°, 100° e 180°. Valores intermediários são dados pela interpolação através de splines. Para o cálculo do arrasto ou a sustentação, a área de cada vela é multiplicada pelos coeficientes fornecidos por Hazen. Após a soma destes valores, ocorre a divisão pela área vélica total, fornecendo o coeficiente para a estrutura completa. Simplificações são feitas neste processo, entretanto, os valores ao final são muito precisos (LARSSON *et al.*, 2013).

## 2.6 EQUAÇÕES GOVERNANTES

Para Jacquin (2005), simulações numéricas de fluido em embarcações são um dos grandes desafios da comunidade envolvida com estudos hidrodinâmicos. A maior dificuldade reside em resolver um problema tridimensional com fronteiras turbulentas instáveis com separação de fluido conectada a efeitos de superfície livre e a topologia da embarcação (apêndices).

### 2.6.1 Modelo turbulento

As formas convectivas das equações de Reynolds Averaged Navier-Stokes são representadas através de transformações parciais do espaço cartesiano ( $x1, x2, x3$ ) para espaço curvilíneo ( $\xi1, \xi2, \xi3$ ) que acompanha a superfície livre e a superfície do casco a cada iteração. O momento médio das equações de transporte pode ser escrito na forma da Equação 7.

$$u_{,i}^{\alpha} + (a_i^j (u^i - u_g^i) - v_{eff} f^i - a_k^i v_{t,i} a_k^j) u_{,j}^{\alpha} + \frac{1}{\rho} a_{\alpha}^k p_{,k} - v_{eff} g^{ij} u_{,ij}^{\alpha} - a_k^i v_{t,i} a_j^{\alpha} u_{,j}^k + q^{\alpha} = 0 \quad (7)$$

Esta definição inclui os componentes da velocidade ( $u^i$ ), pressão ( $p$ ), efeitos gravitacionais ( $\rho g x^3$ ) e energia cinética turbulenta ( $2/3 \rho k$ ).

Já a conservação de massa é expressa através da equação de continuidade clássica apresentada na Equação 8.

$$a_i^j u_{,j}^i = 0 \quad (8)$$

## 2.6.2 U-RANS

Os mais recentes estudos CFD usam a solução numérica de equações U-RANS para o estudo dinâmico do fluido e os campos de pressão envolvidos. Este método permite capturar, desde que dado intervalos suficientemente pequenos, o comportamento instável do fluido.

Uma descrição matemática pode ser vista na Equação 9.

$$\bar{U} = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T U(t) dt, \quad U = \bar{U} + u'' \quad (9)$$

Para as equações U-RANS, as equações RANS ainda são utilizadas, todavia, mantém-se o termo transiente, como pode ser visto nas Equações 10 e 11.

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i'' u_j''}}{\partial x_j} \text{ with } \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

$$\bar{U}_i = \bar{U}_i(x, y, z, t), \bar{P} = \bar{P}(x, y, z, t) \text{ and } \overline{u_i'' u_j''} = \overline{u_i'' u_j''}(x, y, z, t) \quad (11)$$

Portanto, os resultados para o método U-RANS são instáveis. As componentes de sua resposta podem ser denotadas pela velocidade média desenvolvida  $\langle U \rangle$ , uma velocidade flutuante  $u'$  e uma flutuação turbulenta  $u''$  (DAVIDSON, 2015), como mostra a Equação 12.

$$U = \bar{U} + u'' = \langle \bar{U} \rangle + u' + u'' \quad (12)$$

## 2.6.3 Modelo turbulento K-ε

Este modelo que define a turbulência é dado por duas equações que solucionam uma equação de transporte para um sistema com energia cinética turbulenta  $k$  e a taxa de dissipação  $\epsilon$ . Usualmente, este modelo é utilizado quando há a presença de um forte vórtice. O equacionamento citado acima é mostrado nas Equações 13, 14 e 15.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{U}_j k}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_{k+\rho\varepsilon} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{U}_j \varepsilon}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P_k - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (14)$$

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

Este modelo ainda é ajustado com uma abordagem de camada dupla (*Two-Layer Approach*). Esta abordagem proporciona uma flexibilidade maior no tratamento das fronteiras, ou seja, as células próximas as fronteiras permanecem dentro da região algorítmica da camada limite. Nesta abordagem, a camada próxima das fronteiras definidas como *wall* tem a taxa de dissipação turbulenta  $\varepsilon$  e a viscosidade turbulenta  $\mu$  definida como função da distância da fronteira do tipo *wall*.

#### 2.6.4 Condições de superfície livre

As condições de superfície livre são compostas pela condição cinemática, a condição dinâmica tangencial e a condição dinâmica normal. A condição cinemática advém da hipótese de continuidade e expressa que as partículas do fluido se comportem como definido pela Equação 16.

$$h_{,i} + (b_i^j (u^i - u_g^i) h_{,j})_{(i,j) \in \{1,2\}} - u^3 = 0 \quad (16)$$

No qual o termo  $b^i$  é a contravariante bi-dimensional baseada apenas na discretização da superfície livre.

As condições dinâmicas são dadas pela continuidade da deformação da superfície. Tomando a pressão como constante acima da superfície livre, a condição dinâmica é dada pela Equação 17.

$$p - \rho g h - 2 \frac{\rho \nu_{eff}}{\|a^3\|^2} a_i^3 a_j^3 a_j^k u_{,k}^i - \frac{\gamma}{r} = 0 \quad (17)$$

Sendo  $r$  a curvatura média da superfície e  $\gamma$  o coeficiente de tensão da superfície. Por último, a condição dinâmica tangencial é dada pela combinação linear de primeira ordem das acelerações, como mostra a Equação 18.

$$a_{ai} g^{j3} u_{,j}^i = 0 \quad (18)$$

## 2.7 SEAKEEPING

O *seakeeping* representa o comportamento dinâmico da embarcação no mar. Graças a sua avaliação é possível não apenas fornecer maior conforto a tripulação e passageiros, mas também minimizar acontecimentos catastróficos em condições adversas de mar.

### 2.7.1 Motion Sickness Incidence (MSI)

O índice MSI avalia uma reação orgânica inerente do corpo humano, através da aceleração vertical da embarcação, resultando no enjoo dos tripulantes. A formulação matemática do MSI foi desenvolvida por O'Hanlon e McCauley (LLOYD, 1989) e utiliza como parâmetros a magnitude da onda, a frequência da aceleração vertical e o tempo de exposição. O índice é calculado, portanto, pela Equação 19, que por sua vez é definida pelas Equações 20 e 21.

$$MSI = 100\varphi(z_a)\varphi(z_t) \quad (19)$$

$$z_a = 2,128\log(\ddot{s}_3) - 9,277\log(f) - 5,809[\log(f)]^2 - 1,851 \quad (20)$$

$$z_t = 1,134z_a + 1,989\log(t) - 2,904 \quad (21)$$

Onde:

$\ddot{s}_3$  é a magnitude RMS da aceleração vertical

$f$  é frequência da aceleração vertical

$t$  é o tempo de exposição em minutos

## 2.7.2 Subjective Motion (SM)

O índice SM mede a dificuldade em cumprir tarefas, sendo a tripulação experiente e capacitada, sob a ação do movimento vertical da embarcação.

O estudo que serviu de base para esse índice foi idealizado por Shoenberger e avalia a severidade do movimento tomada como base um movimento senoidal com aceleração 0,6g e frequência de 1Hz, representado na escala como 10 (NAKANISHI *et al*, 2010)

Este índice mede a severidade do movimento com uma escala de 0 a 30, como indicam os valores contidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Intervalos para Escala SM

<b>Índice</b>	<b>Intervalo</b>
Moderate	0-5
Serious	5-10
Severe: necessary to hang on	10-15
Hazardous	15=20
Intolerable	20-30

Fonte: Nakanishi (2010).

Para a medição deste índice, a Equação 22 pode ser utilizada.

$$SM = A \left( \frac{\ddot{s}_3}{g} \right)^{1,43} \quad (22)$$

$$A = [1 - \exp(-1,65w_e^2)(75,6 - 49,6 \ln(w_e) + 13,5(\ln(w_e))^2)] \quad (14)$$

Onde:

$\ddot{s}_3$  é a magnitude RMS da aceleração vertical

$w_e$  é frequência da aceleração vertical

## 2.8 PARAMETRIZAÇÃO

Nos estágios iniciais do projeto conceitual e preliminar é necessário desenvolver uma definição consistente da embarcação a ser projetada através de poucos parâmetros geométricos.

Esta descrição pode ser otimizada levando em conta estudos paramétricos já realizados (LAMB, 2003).

De acordo com Harries e Abt (1999), o projeto de um casco nu pode ser feito a partir de 12 curvas. Cada curva é definida a partir de até 13 diferentes parâmetros, que representam informações da posição, integração e diferenciação do formato do casco. A Figura 8 apresenta as 12 curvas básicas para parametrização do casco.

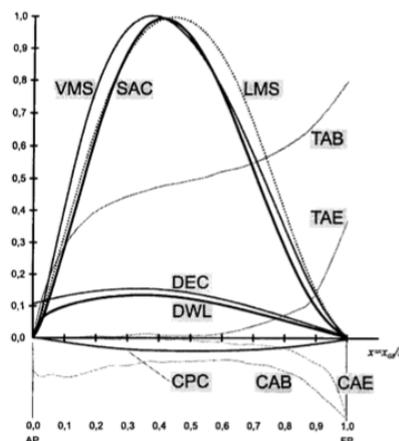
Figura 8 – Curvas básicas para modelagem de casco nu de um veleiro

1	Sectional area curve	SAC	1	Curve of tangent angles at beginning	TAB
2	Design waterline	DWL	2	Curve of tangent angles at end	TAE
3	Flat of side curve	FOS	3	Curve of curvatures at beginning	CAB
4	Center plane curve	CPC	4	Curve of curvatures at end	CAE
5	Flat of bottom curve	FOB	5	Curve of vertical moments of sectional area	VMS
6	Deck	DEC	6	Curve of lateral moments of sectional area	LMS

Fonte: Harries e Abt (1999).

Estas curvas são apresentadas na Figura 9 em um gráfico bidimensional adimensionalizado para o tamanho total da embarcação no eixo das abcissas. As curvas que representam propriedades da embarcação, como a SAC, mostram sua variação longitudinalmente. Aquelas que representam propriedades geométricas contidas no plano diametral são representadas sem alteração, como a linha da quilha (CPC), enquanto as curvas não contidas neste plano são planificadas para o plano gráfico, como a linha do convés (DEC) e da linha d'água (DWL).

Figura 9 – Representação das curvas básicas um veleiro



Fonte: Harries e Abt (1999).

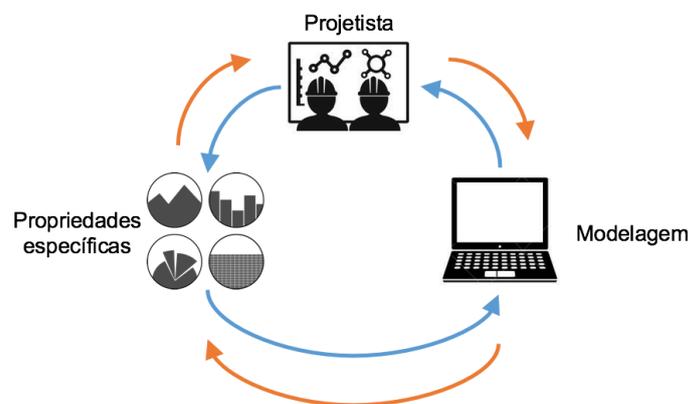
De acordo com Harries e Abt (2001), os parâmetros devem ser muito bem estabelecidos para permitir ao projetista focar no resultado. Estes parâmetros, segundo os mesmos autores, podem ser de três tipos:

- Diferencial: parâmetros de forma como tangentes e curvaturas;
- Posicional: parâmetros de forma como pontos a serem interpolados;
- Integral: parâmetros de forma como área, volume e informações sobre centroide.

Para entender as vantagens do uso de programas como CAESES®, a Figura 10 pode ser observada. Nas setas laranjas, o ciclo convencional de projetos mostra como o programa CAD fornece resultados ao projetista, que modificando o projeto sucessivamente, é capaz de ajustá-lo a uma solução ideal. No ciclo azul, o processo é feito em sentido contrário e o projetista pode manipular as propriedades do projeto em busca de uma geometria que as atenda.

O resultado disso é reflexo direto no processo de otimização da forma do casco. Este processo visa a suavização da curvatura das *B-splines* geradas em busca de propriedades específicas da embarcação melhores.

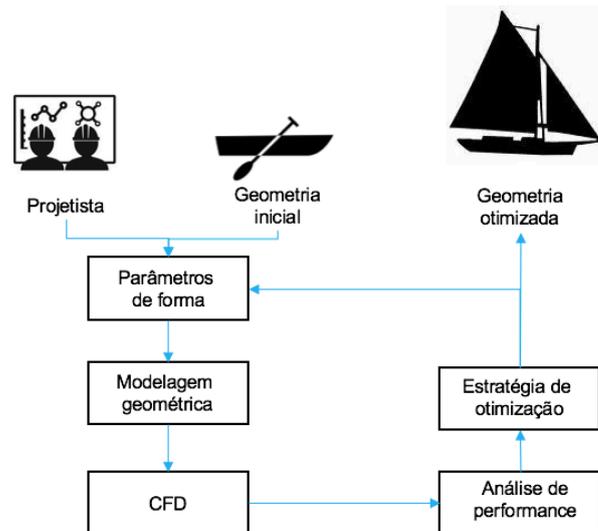
Figura 10 – Projeto convencional e através de parametrização



Fonte: Autor (2016).

A final, a abordagem sobre estes problemas, na perspectiva do projetista, torna-se um processo semelhante ao apresentado na Figura 11. A modelagem geométrica é realizada com base nos parâmetros de forma, análises são realizadas (utilizando o próprio programa, ou não), posteriormente uma estratégia de otimização é adotada. Ao final do processo, o resultado pode alimentar este ciclo em busca de soluções ainda melhores.

Figura 11 – Projeto paramétrico



Fonte: Autor (2016).

## 2.9 MODELAGEM GEOMÉTRICA

A modelagem geométrica é utilizada em diversos campos e em diversas aplicações da computação gráfica, tais como sistemas de design em engenharia e arquitetura, e na representação de dados obtidos através de fenômenos químicos, físicos e geológicos. Os objetos projetados são compostos de curvas e superfícies que podem ser matematicamente modelados.

### 2.9.1 Splines

As splines são curvas construídas através de uma sequência de pontos através de aproximação ou interpolação. Na construção de splines cúbicas, a curva ou superfície será uma função polinomial de terceiro grau, com continuidade em relação à posição, à tangente e a curvatura nos pontos de junção de seus segmentos.

A partir desse conceito, inúmeros tipos de splines foram criados. Entretanto, o uso de curvas paramétricas do tipo *B-splines* tem se tornado unanimidade nas pesquisas de modelagem de cascos (HARRIES, 1999; ABT et al., 2001). Estas curvas possuem características ideais para manipulação, além de uma formulação matemática simples e flexível (BARBARINI, 2007). As curvas *B-spline* são curvas que apresentam controle local, ou seja, a alteração de um ponto de controle não altera os demais pontos da curva.

Este tipo de curva será utilizado no presente trabalho para a modelagem do casco. Esta escolha é endossada pelo seu vasto uso nas literaturas mais recentes, tais como Abt *et al.* (2001) e Harries *et al.* (2003).

### 2.9.2 NURBS

Este é um modelo matemático usado na geração de superfícies, especialmente em programas gráficos. Estas superfícies são desenvolvidas a partir de curvas do tipo *B-spline*, as quais é adicionado uma variável adicional para obter-se coordenadas homogêneas (BARBARINI, 2007).

### 2.10 CAESES®

Os programas tradicionais CAD são caracterizados por empregar curvas matemáticas definidas e superfícies que podem ser manipuladas através de uma interface gráfica do usuário (Graphical User Interface – GUI). Uma vez que um casco é modelado nestes programas, torna-se difícil realizar mudanças drásticas, pois é a própria superfície que é armazenada. Em contrapartida, sistemas como CAESES® são totalmente baseados em princípios paramétricos, nos quais os vértices de todas as curvas *B-spline* são criadas a partir de uma otimização geométrica (ABT *et al.*, 2001), pois apenas os parâmetros de geração são armazenados, sendo o casco reconstruído a cada parâmetro modificado.

A técnica mais comum utilizada na arquitetura naval para modelar cascos, segundo Harries (1998), acontece em três etapas:

- Projeto paramétrico das curvas básicas longitudinais que definem o casco, de acordo com algumas poucas seções transversais;
- Modelagem paramétrica das seções advindas das curvas básicas;
- Geração de superfícies que interpolam ou se aproximam destas curvas.

Todas as curvas e superfícies são geradas através de *B-splines* geometricamente calculados para cumprirem os parâmetros de forma desejados. Graças a essa abordagem, grande flexibilidade e alta qualidade podem ser alcançadas (MAISONNEUVE, 2000).

Além destas características, o CAESES® integra de forma dinâmica ferramentas de análise CFD como o SHIPFLOW®, úteis na análise de comportamento de mar, e de otimização, visando a otimização de forma através de análise multi-objetivo.

Outra vantagem da construção do modelo em CAESES® é a possibilidade de realizar análises com *Features*, que são rotinas utilizadas para análises internas, e também para integração com programas auxiliares externos.

### 2.11 STAR-CCM+®

Uma forma de enxergar a simulação Fluidodinâmica Computacional – CFD, de acordo com Kostalas (2015), é a configuração de um sistema que descreve o fenômeno físico para que seja resolvido as equações que descrevem este modelo. Na área naval, este recurso costuma ser usado no projeto de casco e propulsores, em análise de vibrações e transferência de calor. Ainda de acordo com Kostalas (2015), seu uso pode poupar muito tempo e gasto quando comparado a experimentos com modelos físicos, além de ser muito mais flexíveis e preciso que fórmulas empíricas

O programa escolhido para desempenhar as análises CFD é o Star-CCM+® pois usa RANS instáveis e modelos integrados de resolução para superfície da água e ondas geradas. O Star-CCM+® é um programa computacional de mecânica contínua que realiza simulações físicas direcionadas a engenharia de problemas considerando o fluido tanto viscido quanto inviscido. No que se refere a criação da malha, este se mostra muito versátil quando utiliza malha poliédrica com convergência adaptativa de células híbridas, diminuindo o esforço do usuário no processo de refino da malha.

### 2.12 OTIMIZAÇÃO

A otimização de projetos na engenharia naval é uma área de grande interesse, visto que o desenvolvimento de metodologias aplicáveis no desenvolvimento de produtos reduz drasticamente o tempo de lançamento de um novo produto no mercado, além de propiciar um maior entendimento da relação entre as variáveis de projeto e o desempenho específico desejado (ABT et al., 2001).

Grande parte dos problemas que envolvem o processo de otimização apresentam diversas metas que devem ser atingidas simultaneamente. De forma geral, estas características são conflitantes e não há uma solução que permita a otimização completa de todas as metas

(TICONA, 2003). Estes casos, muito comuns no campo da engenharia naval, são denominados problemas de otimização multiobjectivo por tratarem da minimização ou maximização simultânea de objetivos delimitados por restrições.

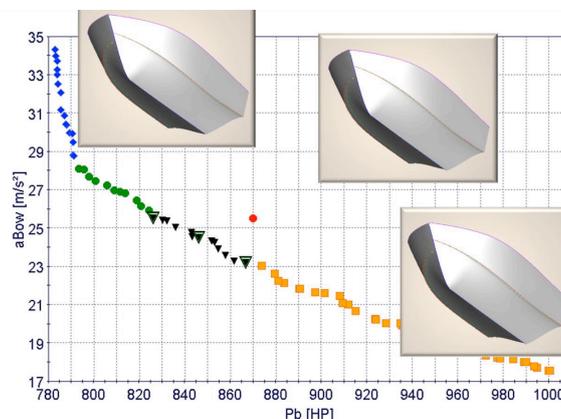
A tomada de decisão cabe então ao analista que pondera os objetivos e escolhe uma entre as soluções eficientes geradas (ARROYO, 2002). Esta escolha acontece através da análise do conjunto de soluções ótimas, denominado fronteira de Pareto, através de um processo automático e dirigido (TANCREDI, 2008). Porém, conforme a quantidade de objetivos que se deseja alcançar é aumentada, a dificuldade em encontrar uma solução pareto-ótima cresce exponencialmente (PEREIRA, 2004).

### 2.12.1 Otimização multiobjectivo

Para Fonseca e Fleming (1995), a principal característica que diferencia a otimização mono-objetivo da otimização multiobjectivo é fato da última raramente admitir uma simples solução. A solução será então formada por um conjunto de soluções pareto-ótimas, todas consideradas equivalentes, caso não haja informação referente à importância dada a cada objetivo (TANCREDI, 2008). Esta relação pode ser vista na Figura 12, resultado do mesmo processo aplicado por Nakanishi *et al.* (2012).

Dois procedimentos devem ser criticamente levados em consideração na solução de problemas do tipo multiobjectivos. Estes são a busca por soluções e a tomada de decisões (HORN, 1997). No primeiro caso, o conjunto de soluções é direcionado para o encontro de soluções pareto-ótimas. Já o segundo problema consiste na utilização adequada de um critério para a escolha de uma solução a partir do conjunto de pareto-ótimo.

Figura 12 – Fronteira de Pareto para embarcação de planeio



Fonte: Nakanishi (2012)

De acordo com Arroyo (2012), os métodos multiobjectivos podem ser classificados em três categorias:

- Método a-priori: quando a tomada de decisão ocorre antes da busca;
- Método a-posteriori: quando a tomada de decisão ocorre depois da busca;
- Método iterativo: a tomada de decisão ocorre durante a busca.

### **2.12.2 Técnicas Heurísticas Multiobjectivos**

Técnicas heurísticas construtivas são métodos que objetivam gerar uma solução, elemento por elemento, a partir de uma ou mais regras específicas para um dado problema de otimização. Estas regras variam de acordo com o problema a ser resolvido (SOUZA, 2000).

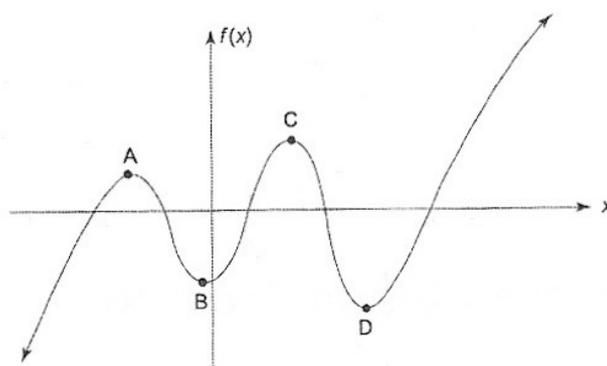
Seu maior uso se dá para a construção de uma solução inicial, pois geralmente são rápidos. A solução obtida não é necessariamente satisfatória, portanto, demandam um refinamento após a construção. Tendo em vista esta característica, Ehrgott e Gandibleux (2000) indicam a utilização desta técnica para obter uma aproximação inicial do conjunto pareto-ótimo de forma rápido.

### **2.12.3 Algoritmos genéticos**

Os algoritmos genéticos foram criados com o intuito de combinar conceitos evolutivos, como mutação e seleção natural, apresentados por Charles Darwin, com teoria computacional. Este processo tem início com a geração de uma população formada por indivíduos, possíveis soluções no espaço de busca, que são combinados entre si gerando novos indivíduos, para aumentar a biodiversidade (PANTUZA, 2011).

Para Arroyo (2012), os algoritmos genéticos são métodos flexíveis e têm a capacidade de produzir soluções de qualidade em problemas complexos e de grande porte, consumindo um tempo computacional razoável. Por tal motivo, são geralmente aplicados quando o espaço de busca é muito grande, visto que a busca não ficará presa em um mínimo ou máximo local, em caso de uma função semelhante aquela apresentada na Figura 13. Ao mesmo tempo, o algoritmo genético não analisa todos os pontos do domínio, contudo, permite a análise de diferentes pontos de forma simultânea (GOLDBERG, 1989).

Figura 13 – Função com mínimos e máximos locais



Fonte: Arora (2004).

Os operadores genéticos que compõem os algoritmos genéticos são inspirados na teoria da evolução Darwinista e, de acordo com Tancredi (2008), são:

- Seleção para reprodução: especifica o processo de seleção dos melhores indivíduos baseado na aptidão de sobrevivência, gerando um ou mais descendentes na geração a seguinte;
- Cruzamento: processo em que duas soluções (pais) são escolhidas para a geração de novas soluções (filhos);
- Mutação: processo em que o operador gera uma alteração aleatória em uma parcela dos indivíduos que permitem explorar todo o espaço de busca;
- Elitismo: no elitismo as melhores soluções são passadas para as próximas gerações de forma automática.

#### 2.12.4 Redes neurais artificiais

Redes Neurais Artificiais (RNA) são sistemas paralelos distribuídos, constituído de unidades (nós) de processamento simples que simulam um neurônio biológico, e por isso são chamados de neurônio artificial, capazes de aplicar funções matemáticas simples a dados recebido em sua entrada (PÁDUA, 2000).

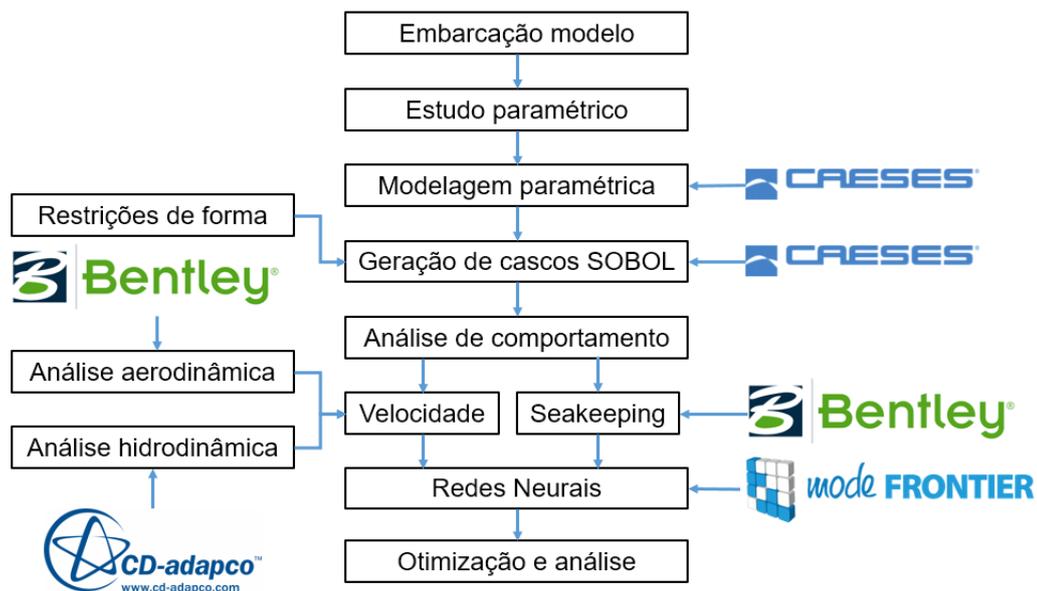
De acordo com Tancredi (2008), trabalha-se com a Fronteira de Pareto obtida através de polinômios interpoladores, ou outra técnica estatística para se aproximar da fronteira, gerando a partir desta aproximação, mais pontos que pertençam a fronteira e aumentem sua diversidade.

### 3 METODOLOGIA

A fundamentação teórica para os processos desempenhados nesta seção foi conduzida anteriormente para melhorar o entendimento sobre a aplicação de cada um dos métodos utilizados. Estes conceitos subsidiam a construção da metodologia aplicada e descrita nesta seção.

A representação gráfica dos principais procedimentos desempenhados nessa sessão é apresentada através de seis etapas na Figura 14.

Figura 14 – Desenvolvimento da metodologia



Fonte: Autor (2016).

O trabalho tem início com a definição da embarcação que será utilizada para a aplicação dos passos seguintes da metodologia. De posse da embarcação, um estudo é realizado sobre os aspectos dimensionais a fim de defini-la em termos de parâmetros. Os pontos e curvas geradores do casco são desenvolvidos através modelagem em CAESES® através de princípios paramétricos. A partir de então, seus parâmetros podem ser variados em busca de uma melhor solução de projeto através da criação de 30 cascos gerados em Sobol, que irão compor o *Design of Experiments* (DOE) deste estudo. Estes cascos são então submetidos as mesmas condições de mar e vento, que compõe o sistema de forças e momentos aero e hidrodinâmicos, analisados

de forma pelo programa Star-CCM+®. Sob as mesmas condições de mar, os cascos são novamente analisados, porém utilizado o programa MAXSURF Motions® para determinar os índices que mensuram *seakeeping*. Este sistema robusto é responsável por extrair os objetivos de análise, velocidade e *seakeeping*, com precisão. O processo de otimização acontece nesta etapa através de algoritmos genéticos e redes neurais artificiais. Ao final, um comparativo é realizado entre o projeto inicial da embarcação e a solução encontrada.

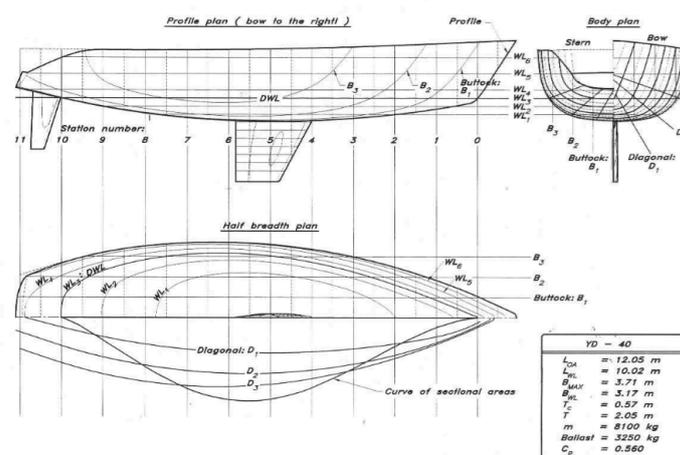
## 4 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, as etapas descritas anteriormente na metodologia serão apresentadas de forma sequencial, mesmo que sua aplicação seja iterativa. Na primeira etapa o modelo geométrico será construído para que, na segunda parte do desenvolvimento, as simulações computacionais aplicadas sejam detalhadas e os dados coletados sirvam de subsídio para a análise de otimização empregada. Após a conclusão do desenvolvimento, os resultados serão apresentados e discutidos nas seções seguintes.

### 4.1 EMBARCAÇÃO MODELO

O processo de melhoria de curvatura do casco conduzido neste trabalho requer o uso de uma embarcação modelo para a validação da metodologia aplicada. Para tanto, o veleiro escolhido foi o YD-40. Este veleiro oceânico de 40 pés foi projetado por Larsson e Eliasson, em seu icônico livro, com o objetivo de ter desempenho equivalente a veleiros de competição e ser tripulado por um mínimo de 2 pessoas. A Figura 15 apresenta o plano de linhas do casco e seus principais parâmetros.

Figura 15 – Plano de linhas do YD-40



Fonte: Larsson e Eliasson (2000).

O veleiro escolhido conta com dois apêndices principais, uma quilha fixa e leme, que serão devidamente incluídos na análise devido a influência crítica que desempenha na medida

da resistência ao avanço. Entretanto, as dimensões dos apêndices serão mantidas fixas e sua forma não será modificada, visto que variações dimensionais implicam em mudar o desempenho das funções a qual foram designadas, e tal estudo demandaria um esforço maior do que o proposto por este trabalho.

A mastreação projetada por Larsson e Eliasson (2000) é composta de uma vela principal e um spinnaker com áreas de 35,5 m<sup>2</sup> e 36,3 m<sup>2</sup>, resultando em uma área vélica de 71,8 m<sup>2</sup>. Mais detalhes podem ser vistos na Anexo A.

A escolha desta embarcação advém da boa descrição geométrica disponível do casco, assim como as análises de desempenho já realizadas por Larsson através de métodos convencionais, o que permite realizar um comparativo ao final do projeto.

#### 4.1.1 Parâmetros

Alguns parâmetros possuem valores fixos e não serão alterados ao longo do processo, visto que servem apenas para a construção do modelo, como por exemplo, a configuração do convés que não representa em si uma definição de projeto nas etapas iniciais. Já os demais parâmetros, devem ser modificados e serão responsáveis pelo desenvolvimento do processo de otimização, como é o caso dos parâmetros dimensionais mostrados na Figura 5.

Os valores utilizados referentes a embarcação modelo foram extraídos de Larsson (2000). A lista destes parâmetros é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetro utilizados

<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
Deslocamento volumétrico moldado	7,63m <sup>3</sup>
Comprimento total	12,05m
Comprimento da linha d'água	10,02m
Boca máxima	3,71m
Boca na linha d'água	3,17m
Pontal	2,07m
Calado	0,57m
Coefficiente prismático	0,56

Fonte: Autor (2016).

## 4.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA

Através da modelagem paramétrica é possível criar um modelo generalizado capaz de, através de mudanças dimensionais, descrever diferentes tipos de cascos de veleiros. Este modelo será desenvolvido tendo em mente os recursos e limitações do CAESES®, usado como ferramenta principal neste trabalho.

Esta etapa consta de três processos: entendimento de quais dimensões descrevem o casco em sua totalidade, definição das curvas que irão descrever os cascos e construção da superfície a partir destas curvas.

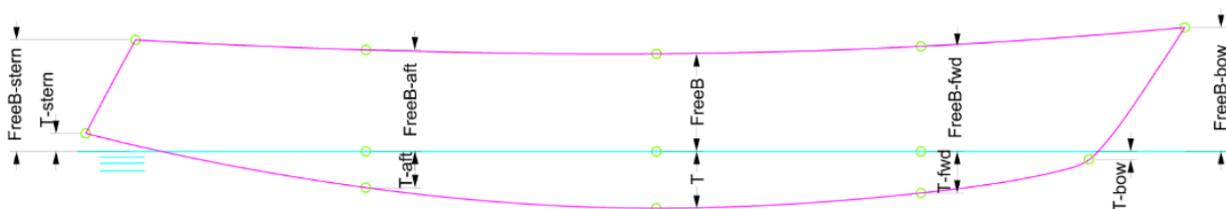
### 4.2.1 Descrição de forma da embarcação

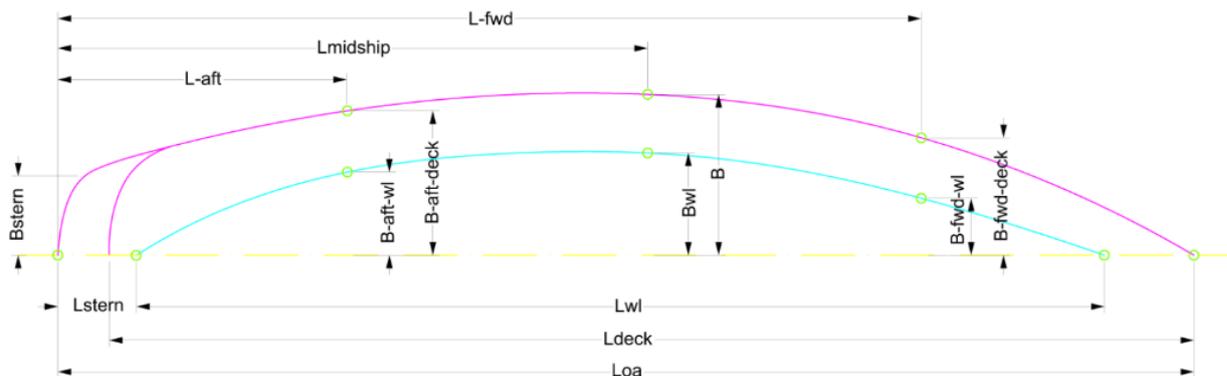
O entendimento de descrição da embarcação engloba tanto os aspectos dimensionais primários da embarcação, quanto a mudança de curvatura no casco ao longo de seu comprimento e altura.

É importante ressaltar que os parâmetros foram escolhidos buscando representar as características que influenciam fisicamente a avaliação aerodinâmica ou hidrodinâmica do casco, descartando-se, portanto, refinamentos de caráter estético que poderiam poluir a análise feita.

Para a representação das dimensões do casco, os parâmetros apresentados na Figura 16 foram definidos. Foi adotada a linha d'água como referência para as medidas das obras vivas e mortas. Visando tornar a análise mais refinada, também foram incluídos pontos intermediários entre a seção a meia nau e a proa e popa. Através destas duas seções extras, um estudo mais profundo sobre a curvatura do casco pode ser executado.

Figura 16 – Parâmetros dimensionais





Fonte: Autor (2016).

A descrição de cada parâmetro apresentado na Figura 7 é listada na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição dos parâmetros utilizados

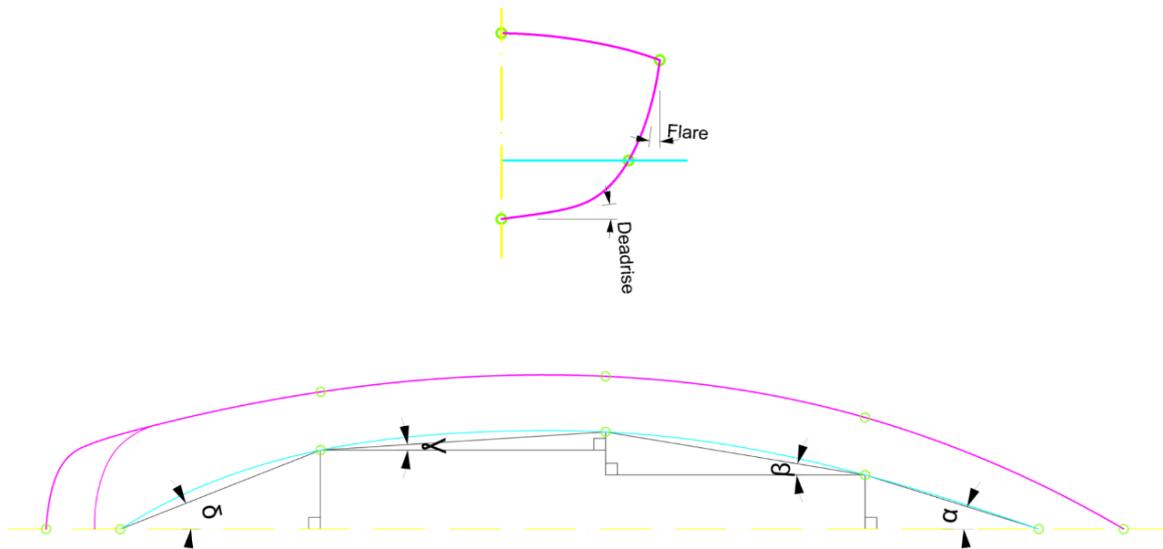
Parâmetro	Descrição	Parâmetro	Descrição
Loa	Comprimento total	Lwl	Comprimento da linha d'água
Lstern	Comprimento da linha d'água a popa	FreeB	Borda livre à meia-nau
Ldeck	Comprimento do convés	FreeB-bow	Borda livre na proa
L-aft	Distância do ponto intermediário a ré	FreeB-stern	Borda livre na popa
Lmidship	Distância da seção à meia-nau	FreeB-aft-deck	Borda livre intermediária a ré
L-fwd	Distância do ponto intermediário a vante	FreeB-fwd-deck	Borda livre intermediária a vante
Bstern	Boca na popa transom	T	Calado à meia-nau
B-aft-wl	Boca intermediária a ré na linha d'água	T-bow	Calado na proa
B-fwd-wl	Boca intermediária a vante na linha d'água	T-stern	Calado na popa
B-aft-deck	Boca intermediária a ré no convés	T-aft	Calado na intermediária a ré
B-fwd-deck	Boca intermediária a vante no convés	T-fwd	Calado na intermediária a vante

Fonte: Autor (2016).

Já a Figura 17 indica as inclinações do casco que serão aqui analisadas. No sentido transversal do casco, tem-se a inclinação na linha de fundo do casco (*Deadrise*) em relação a um plano horizontal e a inclinação do casco na altura do convés (*Flare*) em relação a um plano vertical.

No sentido longitudinal, será analisada a inclinação nos pontos da linha d'água ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ). Este ângulo é o ângulo agudo de um triângulo retângulo que tem como vértices dois pontos da linha d'água consecutivos.

Figura 17 – Inclinação do casco



Fonte: Autor (2016).

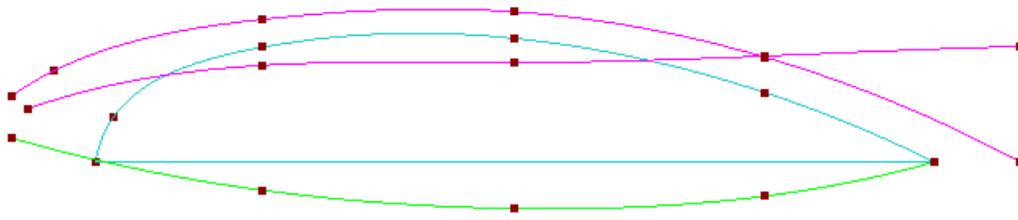
#### 4.2.2 Curvas paramétricas

A partir da definição dos parâmetros, é possível estabelecer curvas construtivas para o casco que utilizem apenas tais parâmetros como coordenadas espaciais. Para a geração do casco foram utilizados dois tipos de curvas com finalidades específicas, todas construídas no mesmo plano (XZ), conforme mostra a Figura 18. O primeiro grupo de curvas visa a descrição básica do formato do casco e é composto por três curvas, oriundas de cinco curvas iniciais, sendo estas:

- Linha da quilha no plano XZ (verde)
- Linha d'água no plano XY (ciano)
- Linha d'água no plano XZ (ciano)
- Linha do convés no plano XY (magenta)
- Linha do convés no plano XZ (magenta)



Figura 18 – Linhas paramétricas principais

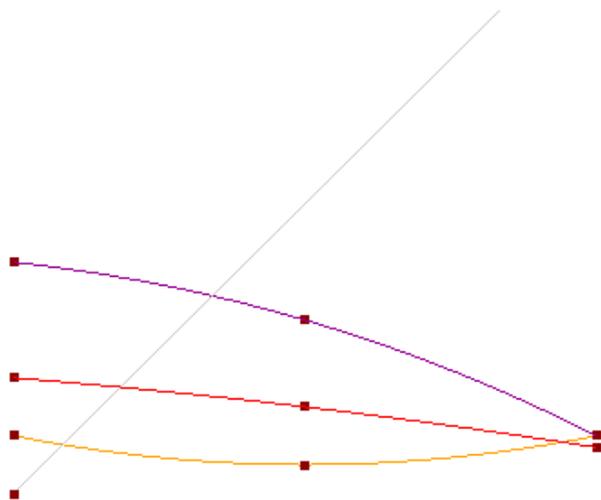


Fonte: Autor (2016).

O segundo grupo de curvas, apresentado na Figura 19, é formado por curvas auxiliares, relacionadas em especial a curvatura do casco, que representam geometricamente propriedades importantes na definição do casco:

- a) *Flare* (vermelho)
- b) *Deadrise* (laranja)
- c) Variação do coeficiente de seção mestra (violeta)
- d) Coordenada X de proporcionalidade do casco (cinza)

Figura 19 – Linhas paramétricas secundárias



Fonte: Autor (2016).

A curva na cor violeta define a variação da esbeltes do casco através da mudança do coeficiente de seção mestra ao longo do casco, sendo maior na popa e diminuindo gradativamente em direção à proa. Já as curvas na cor vermelha e laranja indicam a variação *Flare* e *Deadrise*, respectivamente. Os três pontos que as compõe correspondem aos ângulos na proa, meia-nau e popa, medidos em graus (seus valores foram proporcionalmente ajustados por um fator de 100 para que sua forma fosse melhor visualizada, visto que o comprimento de cada curva é de 1 unidade de medida).

Comumente, utilizam-se curvas do tipo B-splines para as curvas que definem a inclinação e esbeltes do casco, com o intuito de garantir uma suavidade na alteração das propriedades ao longo do comprimento do casco. Todavia, para poder avaliar a influência de um valor específico de *deadrise* ou *flare*, é necessário conhecer o valor exato de seu ângulo. Como as curvas são formadas apenas por três pontos, consegue-se manter a suavidade utilizando uma curva interpoladora simples. Já as curvas principais, mostradas na Figura 9, foram obtidas através da função *Generic Curve* do CAESSES®, que gera uma curva a partir de coordenadas de outras duas ou três curvas.

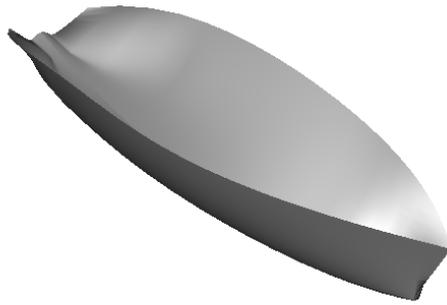
A partir deste conjunto de 9 curvas, consegue-se construir 3 curvas (quilha, linha d'água e convés) que descrevem o casco com simplicidade e precisão. Em razão da pequena quantidade de pontos empregada para descrever cada curva, o modelo final do casco conta com apenas 31 parâmetros que o definem.

#### 4.2.3 Geração das superfícies

Para a geração da superfície NURBS, faz-se com que este passe pelas três curvas geradas, respeitando as inclinações de casco citadas anteriormente. O resultado é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Superfície do casco





Fonte: Autor (2016).

Para tanto, uma Feature teve que ser desenvolvida para esta operação. A função que define o funcionamento da Feature é mostrada na Figura 21.

Figura 21 – Feature utilizada na geração do casco

```

point keel(xpos1,0,keel_z)
point mid1(xpos1,0.4*deck_y,keel_z-tan(deadrise)*keel_z)
point wl(xpos1,waterline_y,waterline_z)
point mid2(xpos3,deck_y-(deck_z-keel_z)*tan(flare),0.6*deck_z)
point deck(xpos2,deck_y,deck_z)

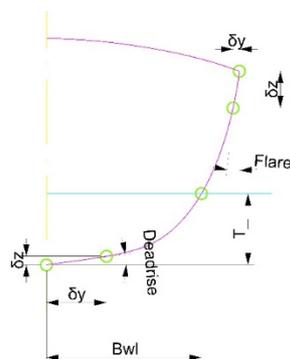
nurbscurve section ([keel,mid1,wl,mid2,deck])
section.setWeights([1,w,1])

```

Fonte: Autor (2016).

Para a construção do *Flare* e do *Deadrise*, a Feature desenvolvida faz com que a superfície interpole cinco pontos, dos quais dois indicam a inclinação na altura do convés e do fundo, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Curvatura do casco



Fonte: Autor (2016).

Para os ângulos iniciais de Deadrise e Flare, foram adotados os valores na Tabela 3 baseados no projeto da embarcação escolhida como modelo.

Tabela 3 – Valores de inclinação do casco adotados

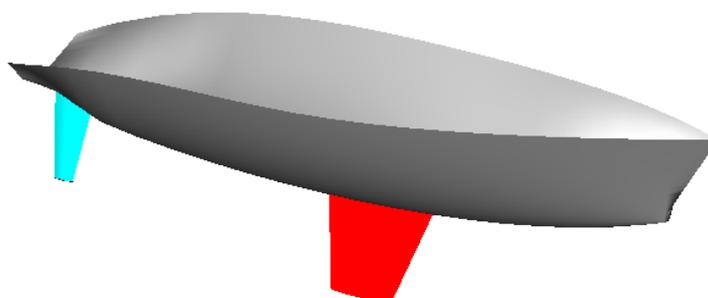
Descrição	Valor	Descrição	Valor
Deadrise na proa	10°	Flare na proa	20°
Deadrise a meia-nau	5°	Flare a meia-nau	15°
Deadrise na popa	10°	Flare na popa	8°

Fonte: Autor (2016).

#### 4.2.4 Inclusão de apêndices e vela

Os apêndices foram incluídos na modelagem para tornar mais precisa a análise da resistência ao avanço. Suas dimensões não serão variadas, visto que isso implicaria na mudança de comportamento da embarcação. O resultado é mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Adição de apêndices

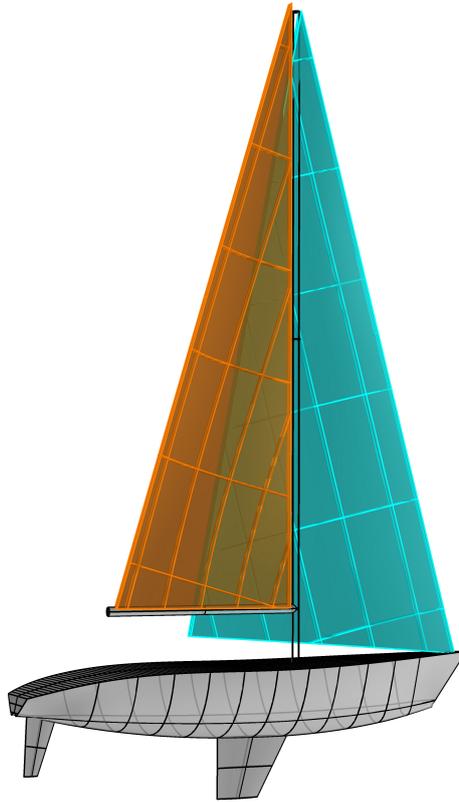


Fonte: Autor (2016).

A vela é modelada em Rhinoceros3D®, visto que os parâmetros que envolvem sua modelagem não serão avaliados neste projeto e, portanto, não necessitam ser alterados ao longo do processo. A modelagem leva em conta o dimensionamento projetado por Larsson (2000), incluindo a própria configuração da mastreação, com uma vela principal e a genoa. A modelagem da curvatura da vela é realizada através de três *splines* dentro da área vélica com três pontos de controle da curvatura, como

mostra a Figura 24. A modelagem das velas, incluindo dimensões, curvatura e diâmetro do mastro form obtidoas através de Larsson (2000) e informações contidas no trabalho de Alza (2012).

Figura 24 – Modelagem das velas

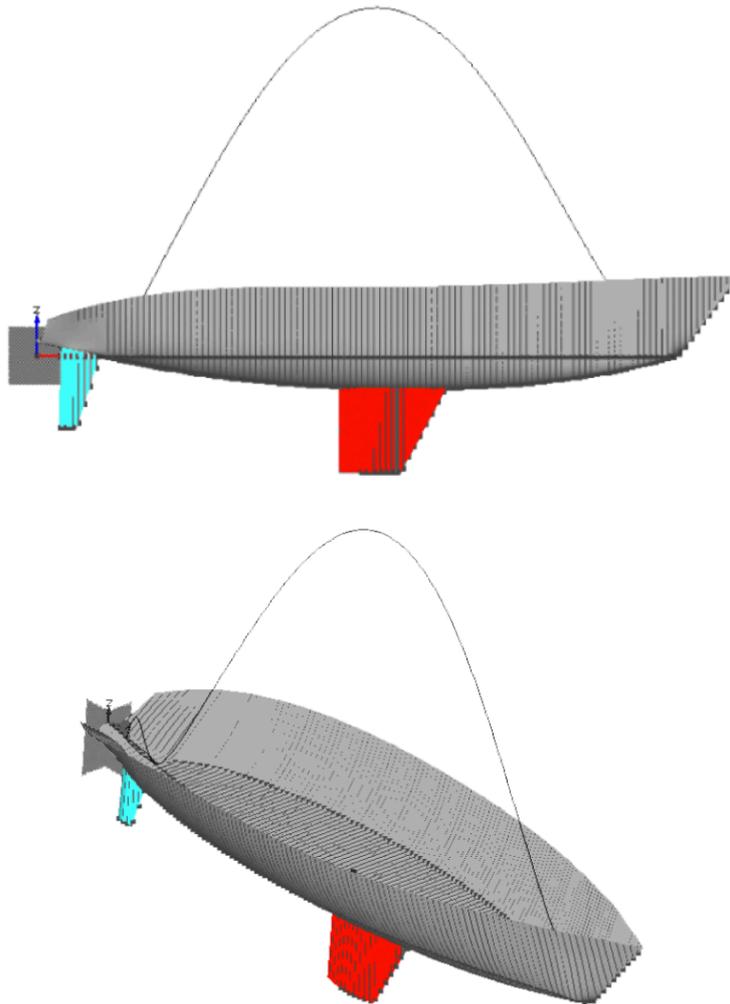


Fonte: Autor (2016).

#### 4.2.5 Análise Hidrostática

Após a construção do casco, foi realizado um pós-processamento transformando o casco em um grupo de offsets com distanciamento entre si de 10 centímetros, formando 62 balizas do casco. Esta etapa é necessária para que o programa possa realizar os cálculos hidrostáticos. A Figura 25 mostra o resultado desta última etapa da modelagem geométrica.

Figura 25 – Casco final



Fonte: Autor (2016).

Através dos cálculos hidrostáticos realizado pelo próprio CAESES®, pode-se extrair as propriedades mostradas no Tabela 4. Os valores apresentados são referentes ao casco original, ainda sem variação na dimensão através do Sobol.

Tabela 4 – Faixa de valores para cada parâmetro

Parâmetros	Valor inicial
Deslocamento	5,029 m <sup>3</sup>
Momento de Inércia Transversal	5,806 m <sup>4</sup>
Momento de Inércia Longitudinal	97,193 m <sup>4</sup>
Área da seção da linha d'água	17,195 m <sup>2</sup>
Centro da área da seção da linha d'água	5,591 m

Centro de Flutuação Transversal	-0,198 m
Centro de Flutuação Longitudinal	5,839 m
SAC	6,025 m

Fonte: Autor (2016).

A partir destas informações é possível obter mais dados para subsidiar as análises de desempenho que compõem o modelo de síntese proposto. Para o cálculo do GM, primeiramente, o Raio Metacêntrico (BM) é calculado através da Equação 20, que relaciona o Momento de Inércia da área de linha d'água e o Deslocamento.

$$\overline{BM} = \frac{I_t}{\nabla} \quad (20)$$

A partir do valor de BM, basta estabelecer BG para encontrar-se GM. O BG é calculado subtraindo-se o centro de gravidade KG (obtido pelo cálculo de pesos e centros efetuado por Larsson, ficando de acordo com seus cálculos na altura da linha da água) e o centro de flutuação KB, obtido através do próprio programa. A Equação 21 é então aplicada.

$$\overline{GM} = \overline{BM} - \overline{BG} = \overline{BM} - (\overline{KG} - \overline{KB}) \quad (21)$$

É importante observar que nesse modelo, considera-se que a alteração da superfície do casco não resulta em variação significativa da posição vertical do centro de massa, admitindo-se que este mantenha o valor originalmente proposto por Larsson.

Com os dados disponíveis, também é possível calcular o trim da embarcação. O primeiro passo é calcular o Raio Metacêntrico Longitudinal –  $\overline{BM}_L$  através da divisão do Momento de Inércia Longitudinal e o Deslocamento volumétrico, como mostra a Equação 22.

$$\overline{BM}_L = \frac{I_l}{\nabla} \quad (22)$$

O valor de  $\overline{GM}_L$  pode ser aproximado par ao valor de  $\overline{BM}_L$ , tornando possível calcular o valor de MCT 1cm – Momento para alterar o trim em 1cm, como mostra a Equação 23.

$$MCT \ 1cm = \frac{W * \overline{GM}_L}{100L} \quad (23)$$

Por fim, o trim aproximado é obtido através dos valores de calado, centro longitudinal de gravidade e flutuação, como mostra a Equação 24.

$$Trim = \frac{D*(LCG-LCB)}{MCT} \quad (24)$$

#### 4.2.6 Restrições dimensionais do casco

As restrições implementadas no modelo têm o objeto de evitar deformações anômalas no casco, assim como antever um desempenho ou comportamento não desejado.

Para tanto, duas restrições dimensionais foram implementadas entre as dimensões de boca e comprimento, para que o comprimento na linha d'água não exceda o comprimento total, assim como mostra as Equações 25 e 26.

Além destas, uma análise de GM e Trim foi utilizada como restrição, eliminando embarcações com GM negativo ou nulo, portanto, instáveis ou em equilíbrio instável, mostrado na Equação 27, e também aquelas com Trim negativo, fator não usual na condição operação de veleiros.

$$B_{wl} < B_{max} \quad (25)$$

$$L_{wl} < L_{max} \quad (26)$$

$$GM > 0 \quad (27)$$

$$Trim > 0 \quad (28)$$

Outra restrição diz respeito a curvatura do casco no sentido longitudinal regulada através dos pontos intermediários. O objetivo dessa restrição é assegurar que o casco ainda tenha uma curvatura orgânica. Logo, os o ângulo de inclinação na primeira porção do casco deve ser maior que a segunda, e a terceira menor que a quarta, como mostra as Equações 29 e 30.

$$A > \beta \quad (29)$$

$$\gamma < \delta \quad (30)$$

Outras restrições de forma advêm do uso do VPP (explicado em mais detalhes adiante) baseado na série DSYHS - Delft Systematic Yacht Hull. Esta série só é válida para certos intervalos de relação dimensional, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Faixa de valores para cada parâmetro

Parâmetro	Limite mínimo	Limite máximo
$L_{wl}/B_{wl}$	2,73	5,00
$B_{wl}/T_c$	2,46	19,38
$L_{wl}/\nabla^{1/3}$	4,34	8,50
$C_P$	0,53	0,60
$B_{wl}/T_c$	0,65	0,78
$A_w/\nabla^{2/3}$	3,78	12,67

Fonte: Autor (2016).

## 4.3 GERAÇÃO DE CASCOS PARA ANÁLISE

### 4.3.1 Geração dos cascos

O modelo de casco é variado utilizando a sequência de Sobol proposto por (Bratley e Fox, 1988) cuja implementação está disponível dentro do próprio CAESES®. Através deste, é possível gerar mudanças nos parâmetros de forma quasi-aleatória com baixa discrepância.

Para tanto, deve-se estabelecer faixas de variação da amostra. O critério adotado é 10% de variação para cada grau de liberdade do parâmetro. A porcentagem máxima de variação dos principais parâmetros é mostrada a Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetro utilizados

Descrição	Margem
Deslocamento volumétrico moldado	33%
Comprimento total	10%
Comprimento da linha d'água	10%
Boca máxima	10%
Boca na linha d'água	10%
Calado	10%

Calado moldado	10%
Área da seção molhada	21%
Pontal	10%

Fonte: Autor (2016).

Ao todo foram gerados 40 cascos diferentes, dos quais 25 são válidos por atenderem as restrições estabelecidas de boca, comprimento, GM e inclinação do casco.

A Tabela 7 mostra os limites de variação dos principais parâmetros dimensionais.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados

Parâmetro	Mínimo	Valor	Máximo
Deslocamento volumétrico	13,735	20,53	27,325
Comprimento total	10,845	12,05	13,255
Comprimento da linha d'água	9,018	10,02	11,022
Boca máxima	3,339	3,71	4,081
Distância da boca até a popa	4,59	5,10	5,61
Boca na linha d'água	2,853	3,17	3,487
Distância da boca até a popa	4,50	5,00	5,50
Calado	0,513	0,57	0,627
Área da seção molhada	21,11	29,69	32,294
Pontal	1,845	2,05	2,255

Fonte: Autor (2016).

Na Figura 26 temos o resultado do Sobol para diferentes cascos, apresentando a variação nas dimensões.

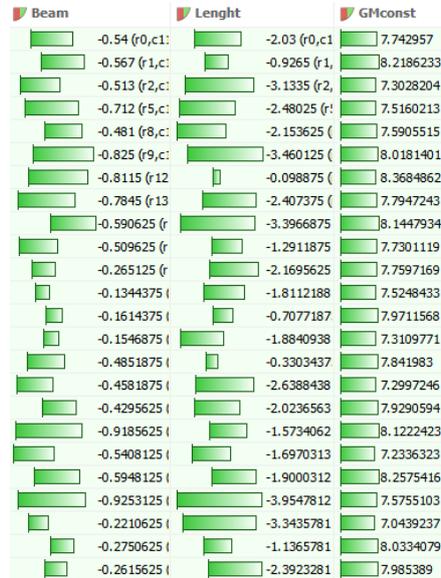
Figura 26 – Variações das restrições (extraído do programa)

	Bmax	Cp	Bwl	Loa	Lwl	Tc	T_	T_	Bwl_long	Bmax_long	Weight_mid	Alpha
Sobol_01_des0000	3.71	0.56	3.17	12.05	10.02	0.57	2.05	2.05	5.01	5	0.4	0.05
Sobol_01_des0001	3.8955	0.504	3.3285	11.4475	10.521	0.5415	2.1525	2.1525	4.755	4.75	0.45	0.025
Sobol_01_des0002	3.5245	0.616	3.0115	12.6525	9.519	0.5985	1.9475	1.9475	5.265	5.25	0.35	0.075
Sobol_01_des0005	3.80275	0.476	3.09075	11.74875	9.2685	0.58425	2.20375	2.20375	5.3925	4.875	0.325	0.0125
Sobol_01_des0008	3.849125	0.63	3.368125	11.296875	9.14325	0.591375	2.075625	2.075625	4.94625	5.1875	0.4125	0.01875
Sobol_01_des0009	4.034625	0.462	3.209625	13.104375	9.64425	0.562875	2.178125	2.178125	5.20125	4.9375	0.4625	0.09375
Sobol_01_des0012	3.941875	0.602	3.130375	10.995625	10.89675	0.548625	2.126875	2.126875	5.32875	5.0625	0.3875	0.03125
Sobol_01_des0013	3.756375	0.546	2.971875	12.803125	10.39575	0.577125	2.229375	2.229375	4.56375	4.8125	0.3375	0.05625
Sobol_01_des0020	4.0578125	0.581	3.4671875	12.727813	9.331125	0.5379375	1.9090625	1.9090625	5.488125	4.90625	0.30625	0.053125
Sobol_01_des0022	3.5013125	0.637	2.9916875	12.125312	10.834125	0.5664375	2.2165625	2.2165625	5.233125	4.65625	0.45625	0.078125
Sobol_01_des0023	3.4549375	0.483	3.1898125	12.878438	10.708875	0.5593125	2.0884375	2.0884375	4.659375	5.46875	0.39375	0.084375
Sobol_01_des0031	3.3737812	0.5075	3.2393438	12.238281	10.427062	0.58603125	1.9539062	1.9539062	5.1853125	5.078125	0.309375	0.0203125
Sobol_01_des0034	3.5592813	0.5635	3.3978438	11.635781	10.928062	0.55753125	1.8514062	1.8514062	4.9303125	4.828125	0.359375	0.0953125
Sobol_01_des0039	3.5129062	0.4655	3.3582188	11.183906	9.2998125	0.57890625	1.9795312	1.9795312	4.8665625	5.140625	0.321875	0.0515625
Sobol_01_des0043	3.6056563	0.5495	3.1204688	10.882656	10.552313	0.56465625	2.0307812	2.0307812	5.5040625	5.015625	0.496875	0.0890625
Sobol_01_des0046	3.4201562	0.6055	2.9619688	12.690156	10.051312	0.59315625	1.9282812	1.9282812	4.7390625	4.765625	0.446875	0.0140625
Sobol_01_des0048	3.7679688	0.6125	3.3384063	12.012344	9.9886875	0.56821875	1.9667187	1.9667187	5.4721875	5.359375	0.478125	0.0859375
Sobol_01_des0053	3.8607188	0.4725	2.9421563	12.313594	10.740188	0.55396875	1.9154688	1.9154688	5.0896875	4.734375	0.353125	0.0484375
Sobol_01_des0055	3.4433437	0.5425	2.9025313	11.560469	9.8634375	0.60384375	2.1973437	2.1973437	5.0259375	4.921875	0.390625	0.0921875
Sobol_01_des0056	3.8143438	0.6545	3.2195313	12.765469	10.865438	0.54684375	1.9923437	1.9923437	4.5159375	5.421875	0.490625	0.0421875

Fonte: Autor (2016).

A Figura 27 em contrapartida mostra a distribuição das variações dentro dos limites das restrições.

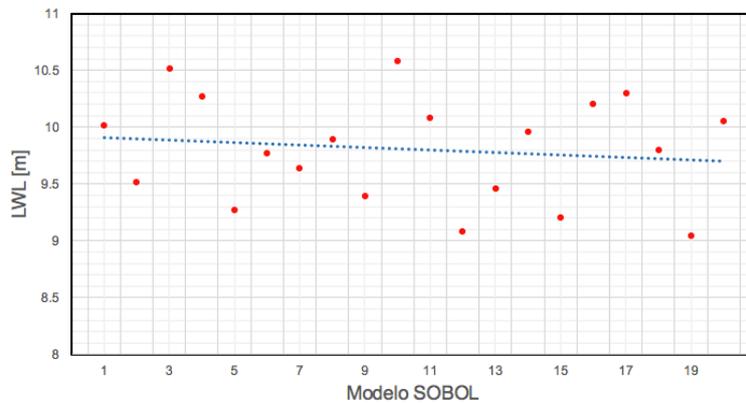
Figura 27 – Variações de restrições (extraído do programa)



Fonte: Autor (2016).

Ao final, foi realizada a verificação da aleatoriedade da distribuição das variações. Mostrando-se satisfatório mesmo para um tamanho relativamente pequeno da amostra. Como exemplo, a Figura 28 mostra a distribuição da variação do comprimento, no qual a curva azul representa uma curva de tendência linear.

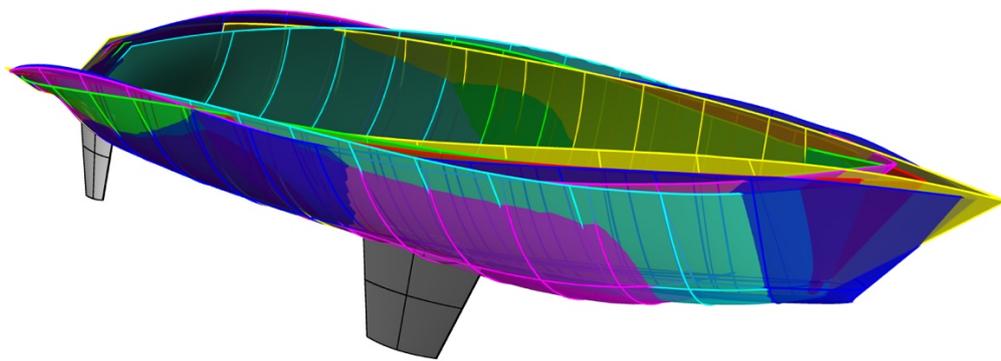
Figura 28 – Distribuição da variação do comprimento



Fonte: Autor (2016).

A variação do casco para os cinco primeiros cascos em Sobol pode ser vista na Figura 29, na qual cada casco é assinalado com uma cor de superfície. Nota-se, por exemplo, que o casco em amarelo possui uma forma mais adelgada a vante, já o casco magenta é mais bojudo a vante enquanto o casco azul possui a mesma característica a ré.

Figura 29 – Variação da curvatura de casco



Fonte: Autor (2016).

#### 4.4 MODELAGEM CFD DO SISTEMA EM STAR-CCM+®

Os objetivos que serão analisados, velocidade e *seakeeping*, são de caráter dinâmico e muito sensíveis a interação da embarcação com os fluídos na forma hidro e aerodinâmica, dessa forma, possibilitando a leitura das diferentes curvaturas de casco na influência nos objetivos.

A modelagem do problema foi realizada através do uso da versão comercial do Star-CCM+® na edição 9.02. Para tanto, o modelo desenvolvido em CAESSES®, já anexado a modelagem da vela, é importado para o ambiente do Star-CCM+®, passando antes por um tratamento em Rhinoceros3D®, no qual cria-se o volume da fronteira de análise, posteriormente dividida nos fluídos ar e água. Este sistema complexo permite que sejam simulados simultaneamente os efeitos aero e hidrodinâmicos agindo na embarcação. Esta, que inicialmente encontra-se em repouso, tem sua os seus seis graus de liberdade ajustados pelo *solver* do programa. A seguir, o procedimento para desenvolvimento deste sistema será descrito com mais detalhes.

Em razão do gasto computacional exigido, é necessário que seja fornecida uma condição inicial para uma convergência mais rápida do sistema. Esta condição inicial é obtida através do programa MAXSURF VPP®, que define o valor de cada componente deste sistema de forças através da criação de um gráfico de curvas polares. Este gráfico correlaciona a velocidade e o ângulo de incidência do vento (dados como entrada) e indica um valor de velocidade VMG – Velocity Made Good sob tais condições, provendo também os ângulos de *yaw* e *roll*, que serão aplicados a embarcação para a convergência do sistema.

#### 4.4.1 Geometria

A comunicação entre diferentes plataformas requer cuidado nas etapas de importação e exportação. Os cascos gerados em Sobol no CAESES® são individualmente exportados como OpenNURBS no formato 3DM, compatível com Rhinoceros3D®. Já importado no Rhinoceros3D®, a geometria será tratada adicionando o convés através da ferramenta *Loft* e ajustando a geometria da vela. Visto que o problema modelado inibe planos de simetria em qualquer plano, o conjunto de superfícies que representa a embarcação será transformada em um volume único através de uma operação booleana realizada no próprio Rhinoceros3D®. A geometria é analisada através da ferramenta *ShowEdges* a procura de arestas e descontinuidades do sólido, que impediriam a geração de uma malha precisa. Estando o volume pronto, este é importado no Star-CCM+® utilizando uma vez mais o formato 3DM.

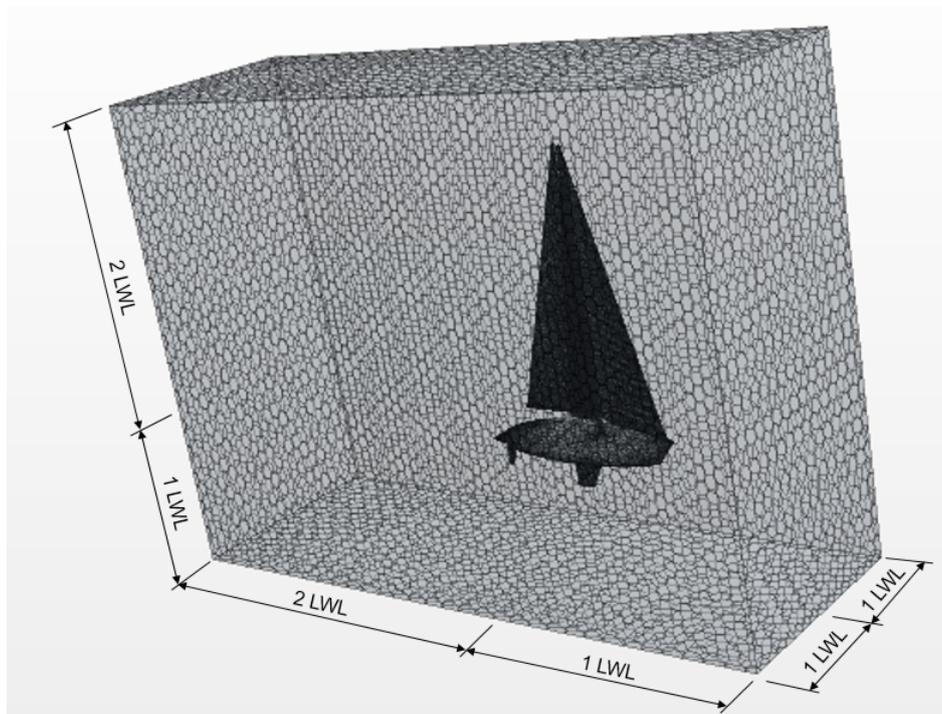
#### 4.4.2 Domínio

O domínio do sistema é uma definição crucial para a convergência da análise. Um domínio muito pequeno pode interferir no desenvolvimento do fluido sobre o objeto de estudo, enquanto um domínio muito grande pode impossibilitar a convergência da solução.

Para um dimensionamento inicial do domínio, será utilizado as dimensões sugeridas por Knudsen (2013). Em seu estudo, o comprimento da linha d'água é utilizado como medida padrão. A simulação obteve o melhor desempenho para um domínio com 2 LWL a ré da embarcação, e 1 LWL a vante, tanto a bombordo quanto boreste foi utilizado 1 LWL. Abaixo da linha d'água é utilizado 1 LWL enquanto acima são usadas 2 LWL. A Figura 30 apresenta o domínio estudado.

Um domínio maior a ré e acima da linha d'água permite que o fluido ar não seja interferido pelos limites do domínio, permitindo que o fluido sem distúrbio seja capturado na região de pressão da vela.

Figura 30 – Embarcação em seu domínio



Fonte: Autor (2016).

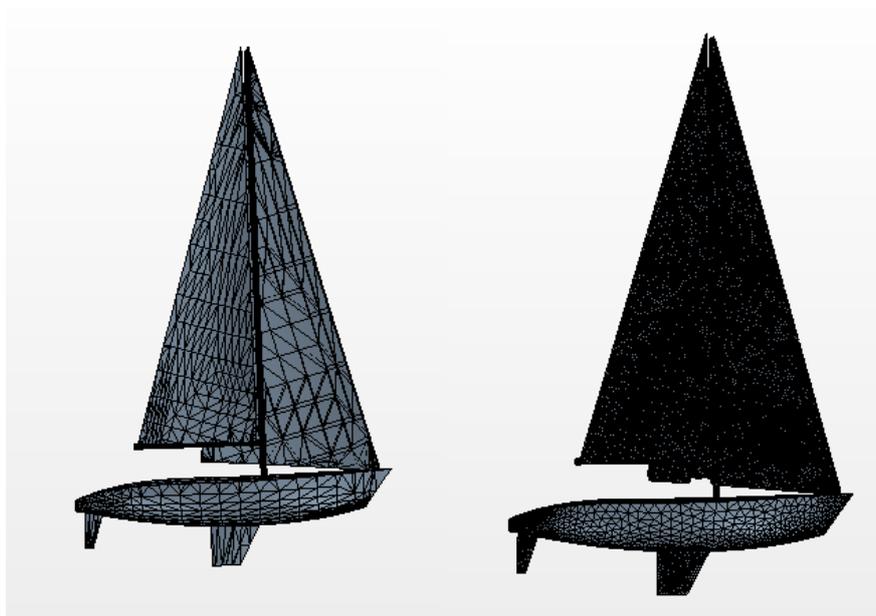
#### 4.4.3 Malha

A importação da geometria para o Star-CCM+® ocorre através da importação da embarcação como um único sólido formado por uma única superfície. Para garantir uma melhor qualidade na malha, a malha inicial automática é substituída por uma nova malha, visto que o Star-CCM+® possibilita um controle em seu refinamento. O tamanho dos elementos da malha é melhorado por controles locais através do aumento de elementos.

O volume de controle também por um um tratamento na malha, aumentando a quantidade de células discretizadas no entorno da embarcação para proporcionar uma melhor precisão nos resultados, por captar com precisão o comportamento turbulento da água. Para tanto, outra malha é gerada no entorno da embarcação, na forma de uma *overset mesh*. O comparativo entre as malhas

pode ser visto na Figura 31. A primeira malha é composta por 4772 elementos, enquanto a segunda possui 72938 elementos, ambos triangulares.

Figura 31 – Comparativo entre malhas



Fonte: Autor (2016).

#### 4.4.4 Condições de fronteira

Comumente, são utilizados quatro tipos de fronteira em uma modelagem CFD. Estas são as superfícies de: *outlet*, *inlet*, *wall* e *simetry*. Todavia, como a modelagem deste problema não possui simetria em nenhum plano, serão utilizadas apenas as três primeiras. A Figura 32 apresenta as fronteiras utilizadas. A cor magenta indica a fronteira do tipo *outlet*, as cinzas são a do tipo *inlet* e o casco corresponde as fronteiras do tipo *walls*.

##### 4.4.3.1 Inlet

Nas fronteiras do tipo *Inlet* são definidas as características de mar para o fluido água e as condições de vento para o ar. A intensidade da turbulência e valores de viscosidade são mantidos padrão.

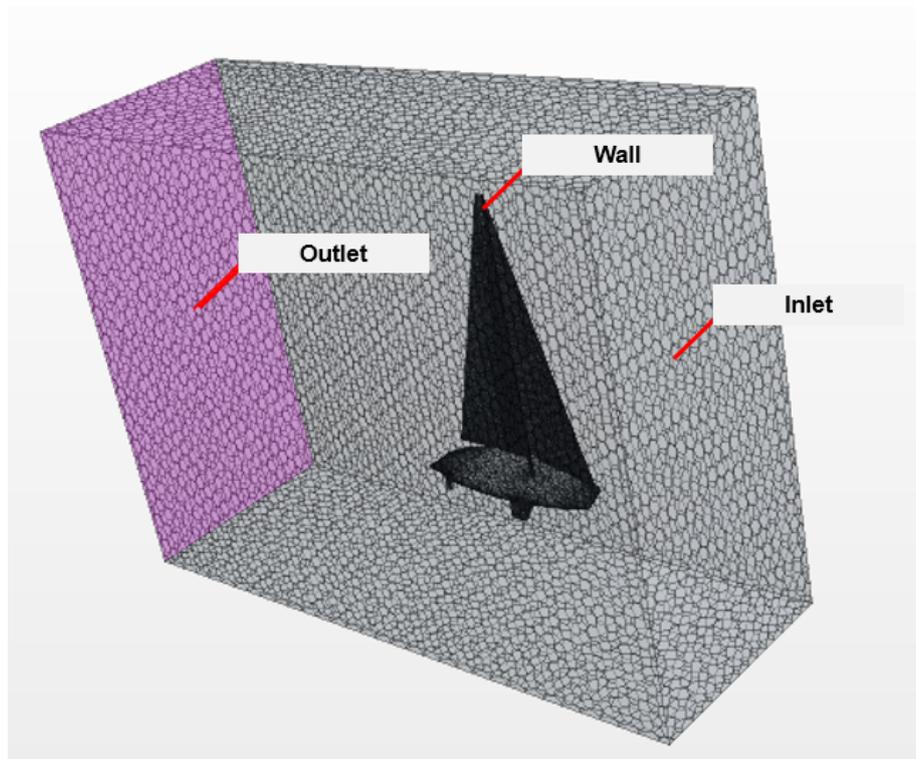
#### 4.4.3.2 Outlet

Esta fronteira serve para o escape de pressão do fluido. As características nesta fronteira são definidas como as mesmas da fronteira *Inlet*, tanto em termos de pressão como em termos hidrostáticos.

#### 4.4.3.3 Wall

As fronteiras do tipo *Wall* são definidas com uma condição de anti-escorregamento. Esta condição é aplicada pelo *solver* do programa nas paredes do sólido analisado (a embarcação), no qual as forças do fluido agem. Portanto, será sobre esta superfície que as forças do fluídos serão medidas pelas equações de movimento a cada iteração.

Figura 32 – Fronteiras aplicadas ao modelo



Fonte: Autor (2016).

#### 4.4.5 Solvers

Diferentes *solvers* são necessários para resolver um problema de tamanha complexidade que envolve fenômenos físicos complexos como turbulência, vorticidade e gravidade. A configuração principal do sistema utilizou um *solver* U-RANS (Unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes) k-ε com um tratamento da superfície livre VOF (Volume of Fluid) para um fluido incompressível em estado instável. A Tabela 8 apresenta os modelos utilizados na simulação.

Tabela 8 – Modelos matemáticos utilizados na simulação

Modelo matemático	Definição
Implicit Unsteady	Escoamento transiente
Eulerian Multiphase	Fases Eulerianas de interação de fluidos
VOF – Volume of Fluid	Modelagem da superfície livre
VOF Waves	Modelo de ondulação, correnteza e vento
Turbulent	Regime turbulente
K-ε Turbulence	Turbulência como função de Reynolds
Gravity	Gravidade

Fonte: CD-Adapco (2013)

O modelo de escoamento transiente modela o comportamento do escoamento ao longo do tempo. Visto que o fenômeno é transiente, o comportamento do fluido pode ser modelado como explícito ou implícito. A forma implícita trata a solução da integral da função transiente de forma implícita, realizando iterações a cada passo (intervalo de tempo para resolução) da solução. Quando se trata o problema de forma explícita, realiza-se uma aproximação do método implícito, não necessitando de um processo iterativo de solução a cada passo.

O uso das fases eulerianas possibilita descrever o comportamento do fluido de forma quase contínua. Tratando-se de um sistema composto de um volume entre dois fluidos imiscíveis (água e ar), o uso da modelagem multifásica euleriana se faz necessário.

O módulo VOF define a interação dos fluidos a cada passo da solução. O comportamento destes fluidos é determinado através das definições de onda e sendo imposta pelo módulo VOF Waves. O modelo escolhido de onda é o de quinta ordem (*Fifth Order*).

#### 4.4.6 Movimento de corpo rígido

A embarcação, sob ação de ondas e vento, pode movimentar-se transladando e rotacionando no espaço nas três direções do plano cartesiano, conferindo ao sistema seis graus de liberdade. O módulo do Star-CCM+® que permite tal comportamento é o *Dynamic Fluid Body Interaction*, que faz o sólido ser interpretado como um corpo rígido.

O movimento de corpo rígido depende do comportamento do mar e da incidência do vento. O mar é configurado pelo modelo *VOF Waves* do Star-CCM+®. O deslocamento de ambos fluídos ocorre longitudinalmente ao volume da fronteira. A condição de mar escolhida possui altura de onda de 0,8 metros, profundidade de 15 metros e uma velocidade de vento de 10 m/s. Para que a condição imposta seja condizente com os valores reais, o diagrama de Bowers (1975) é utilizado, o qual é visto no Anexo B. Para tanto, supõe-se que haja uma pista disponível (fetch) de 10km desenvolvida após um período de 100 min.

#### 4.4.7 Execução da simulação

A correta configuração dos parâmetros da simulação permite que a solução seja alcançada com menor gasto computacional. Para o presente estudo, adotou-se um passo (*time step*) de 0,05s, com um número máximo de iterações internas (*inner iterations*) de 10, com um tempo de análise (*total physical time*) de 25,0s. Portanto, no intervalo de 25,0s determinado, serão realizadas 500 passos e 5000 iterações internas.

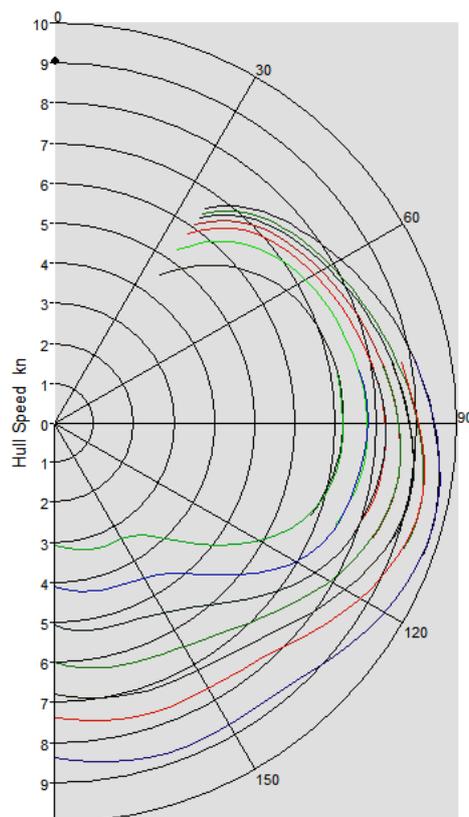
Durante a simulação, o programa permite que determinados parâmetros sejam monitorados a cada passo da simulação. Os resultados do monitoramento são apresentados na próxima sessão com a análise dos resultados, abrangendo parâmetros de rotação, translação e pressão.

A convergência da simulação é um fator delicado neste estudo, em razão da dificuldade em prever o comportamento da simulação e o custo computacional *a priori*. A transição do regime transiente para o regime permanente depende do refino da malha, da geometria e do intervalo determinado do passo.

#### 4.4.8 Convergência do modelo

Em razão das limitações computacionais disponíveis e da complexidade do problema, a embarcação teve seu posicionamento alterado para atender estimativas de adernamento e deriva prévias. Para tanto, o programa MAXSURP VPP® foi utilizado para gerar o Diagrama Polar da embarcação, mostrado na Figura 33. Para tanto, foi necessário apenas definir o as dimensões das velas, presentes no Anexo 1 do trabalho.

Figura 33 – Diagrama polar gerado pelo programa

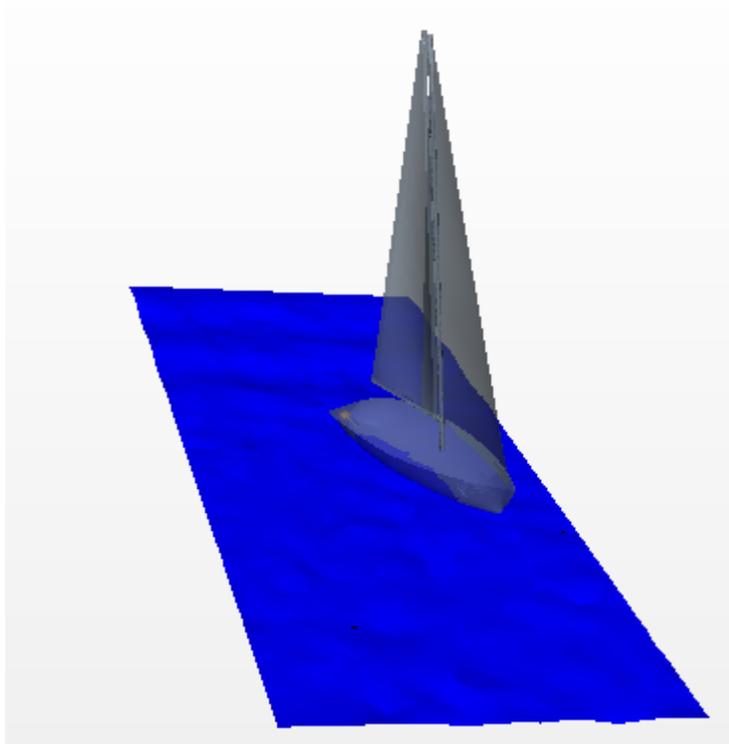


Fonte: Autor (2016).

#### 4.4.9 Resultados da simulação

A simulação convergiu de forma eficiente apesar da complexidade imposta ao modelo, em especial graças as condições iniciais impelidas. A Figura 34 mostra o resultado gráfico da simulação para o primeiro casco gerado no instante de 15 segundos, quando o sistema passa a convergir.

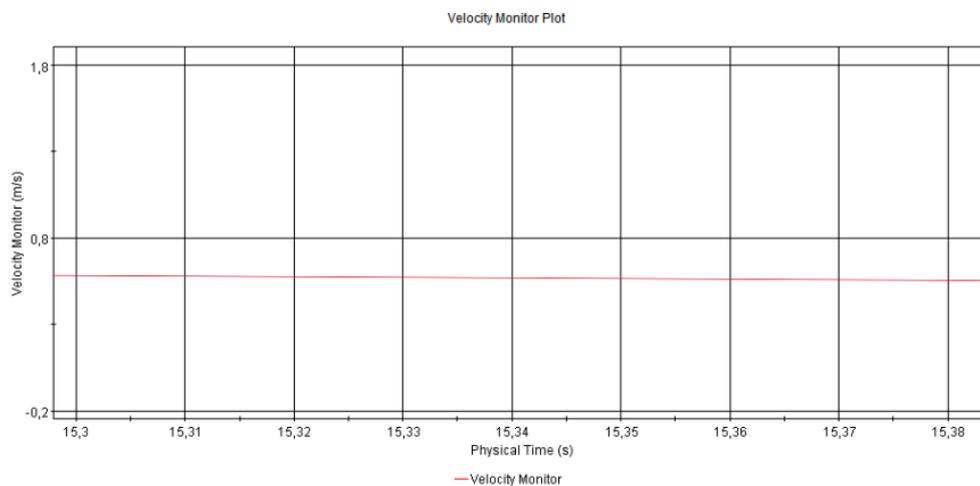
Figura 34 – Simulação do casco original (sem variação nas dimensões)



Fonte: Autor (2016).

O valor é medido através do gráfico de velocidade criado para acompanhar a embarcação durante a simulação, como mostra a Figura 35. A velocidade medida é a velocidade absoluta e não a relativa ao fluido, que possui por si uma velocidade já determinada e invariável.

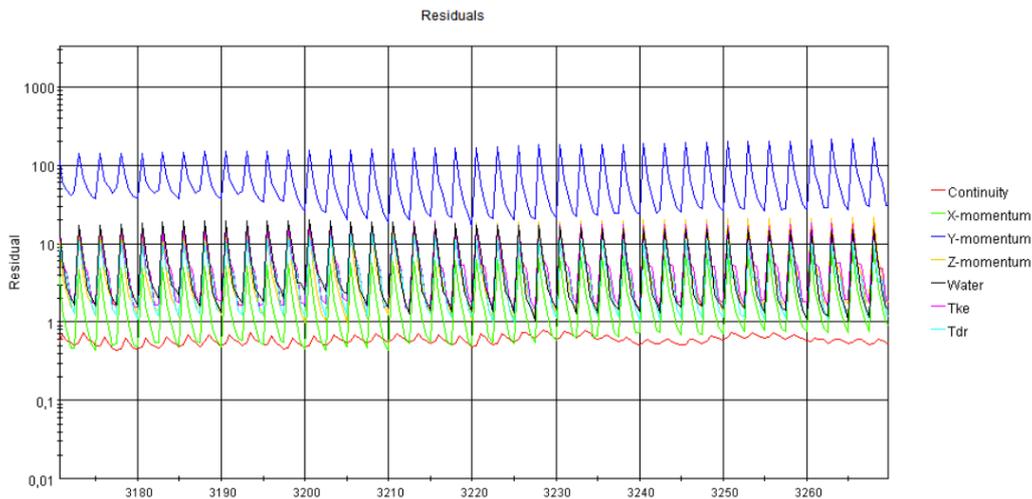
Figura 35 – Velocidade mensurada para a embarcação modelo (extraído do programa)



Fonte: Autor (2016).

Pode-se também medir os resíduos numéricos para o mesmo instante mostrado na Figura 35, no qual a valor de velocidade foi tomado. O gráfico de resíduos é mostrado na Figura 36.

Figura 36 – Resíduos para o mesmo instante da simulação (extraído do programa)



Fonte: Autor (2016).

## 4.5 OBJETIVOS USADOS NA OTIMIZAÇÃO

### 4.5.1 Velocidade desempenhada

O primeiro objetivo a ser considerado na análise é a velocidade desempenhada pela embarcação a partir das análises hidrodinâmicas e aerodinâmicas resultantes do modelo construído em Star-CCM+® apresentando anteriormente. Como resultado, as velocidades são encontradas para todos os cascos operando em cada uma das condições. A Tabela 6 mostra os resultados para os 20 cascos e é apresentada no item 4.5.3.

O valor obtido para velocidade pelo programa Star-CCM+® foi cerca de 17% menor que o valor encontrado pelo MAXSURF VPP®. Essa diferença pode ter duas origens. A primeira, faz referência a precisão maior da análise CFD obtida em Star-CCM+® somada as condições de onda impostas, diferentemente do VPP que realizada seus cálculos para um mar sem ondas.

#### 4.5.2 Seakeeping

A partir dos resultados obtidos no programa MAXSURF Motions® é possível obter-se o desempenho em relação a dois critérios de conforto: *Motion Sickness Incidence* (MSI) e *Subjective Motion* (SM).

Nesta análise, eles servem como *trade-off* ao objetivo de velocidade desempenhada, impedindo que a solução final seja óbvia em uma perspectiva de engenharia, como por exemplo, determinando que a esbeltes deve ser indefinidamente aumentada para melhorar seu desempenho em relação a velocidade, fato que não ocorre, pois, os índices de *seakeeping* tendem a diminuir conforme o volume do casco aumenta.

Para o cálculo do MSI e SM foi utilizado um espectro de mar JONSWAP de altura significativa de 0,8m e período de 6s, que representa um mar típico na região destinada ao projeto. A incidência considerada para o estudo é ortogonal ao avanço. Foi na proa que o índice MSI foi medido, localizado no ponto mais a vante e 2,05m acima da linha d'água.

O resultado de todos os procedimentos realizados até o momento pode ser visto na Tabela 9. Nela constam os três objetos de análise.

Tabela 9 – Resultados para análise

Casco	V [nós]	MSI [%]	SM [%]
01	5,43	6,641	2,105
02	5,36	1,839	4,387
03	5,51	1,811	4,218
04	5,45	5,522	1,863
05	5,21	1,698	3,693
06	5,43	4,893	1,73
07	5,34	4,996	1,747
08	5,36	5,07	1,77
09	5,28	4,756	1,703
10	5,48	5,471	1,861
11	5,32	4,843	1,717
12	5,29	5,295	1,823
13	5,37	4,913	1,736

14	5,35	5,03	1,757
15	5,29	5,181	1,79
16	5,38	5,097	1,777
17	5,41	5,097	1,777
18	5,34	5,666	1,901
19	5,23	4,128	1,562
20	5,48	5,226	1,797

---

Fonte: Autor (2016).

#### 4.6 REDES NEURAIAS

Uma vez construído o modelo de síntese e analisado um conjunto de dados exploratório, pode-se, com os resultados obtidos, construir a superfície de resposta.

É importante observar que o conjunto de embarcações selecionadas para o treinamento das redes neurais possui valores de dimensões principais variados, de sorte a varrerem uma larga faixa de valores. Este fato é importante, pois, assim como qualquer modelo preditivo, os resultados obtidos para interpolações são mais precisos do que àqueles obtidos para extrapolações.

Desta maneira, foram treinadas uma rede com 31 entradas (correspondentes as dimensões da embarcação) e 3 saídas (velocidade desempenhada, SM e MSI). A topologia utilizada em cada uma das redes consiste em 2 camadas intermediárias contendo 8 neurônios cada.

Embora o uso de uma única camada seja suficiente para representar superfícies contínuas, assim como discutido por Tancredi (2007), experiências recentes têm mostrado que o uso de 2 camadas intermediárias acelera o processo de convergência do treinamento.

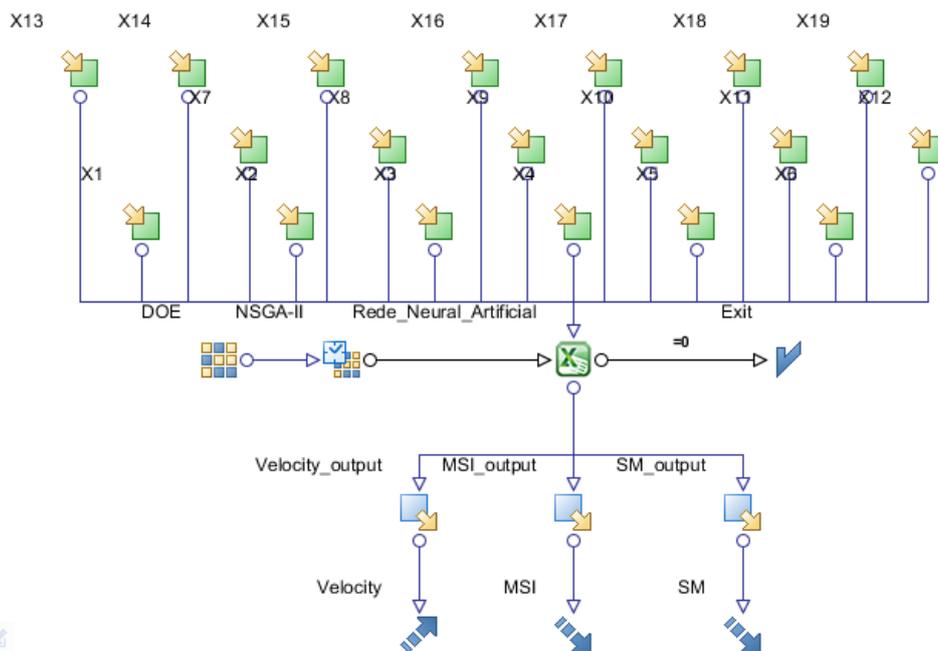
#### 4.7 OTIMIZAÇÃO

Definido o modelo matemático do problema que representa o problema de engenharia proposto, utilizou-se o algoritmo evolutivo de otimização NSGA-2, originalmente proposto por Deb et al. (2000). Este algoritmo tem sido amplamente utilizado para tratar problemas com múltiplos objetivos, como o proposto no modelo desenvolvido.

Foram gerados ao todo 30 indivíduos com 3000 gerações. O ambiente desenvolvido utilizando o programa modeFRONTIER® é mostrado na Figura 37. Os ícones em verdes nomeados com a letra

X mais uma numeração entre 1 e 20 correspondem as variáveis de entrada do modelo, já os ícones em azul representam os objetivos analisados que são medidos pelo modelo, seguidos de ícones em formato de flecha que indicam se o objetivo deve ser maximizado ou minimizado. O ícone do Microsoft Excel® indica qual aplicativo é utilizado para resolver o algoritmo genético, enquanto os ícones a sua esquerda configuram a Rede Neural Artificial aplicada ao modelo.

Figura 37 – Operação de otimização



Fonte: Autor (2016).

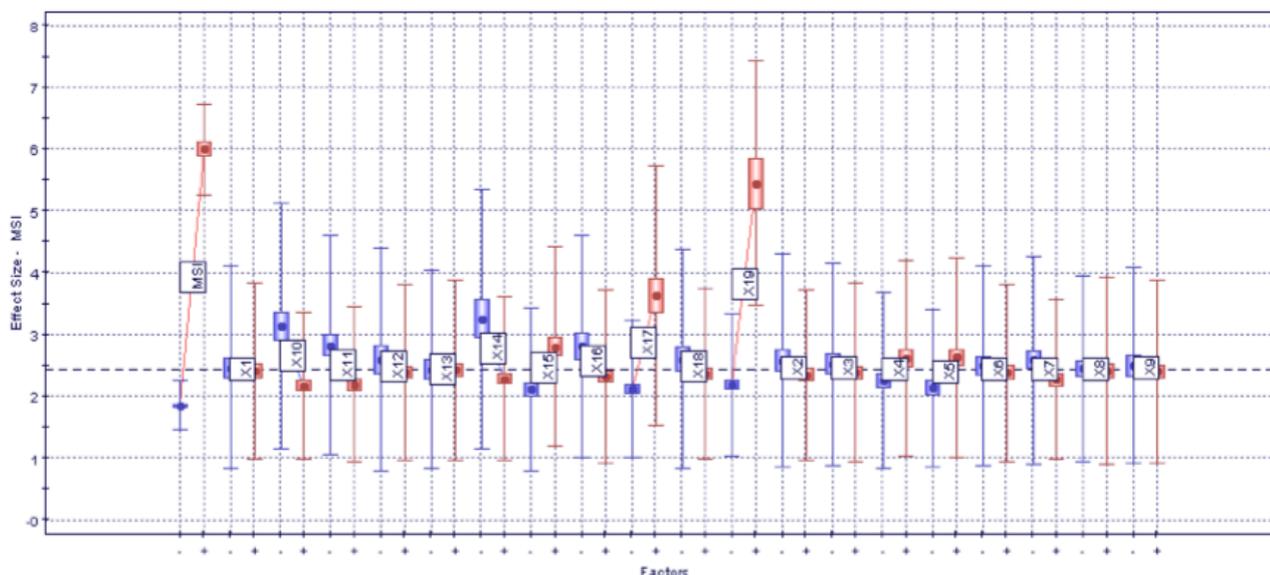
## 5 RESULTADOS

### 5.1 SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS

Em busca de um entendimento maior sobre a influência dos parâmetros nos objetivos de análise, realiza-se uma análise de sensibilidade com elementos da Fronteira de Pareto. Os gráficos presentes nesta seção foram extraídos do próprio programa modeFRONTIER®. De acordo com Tancredi (2014), as variáveis de projeto são estudadas a partir da linha mediana pontilhada, onde a distância dos intervalos dos parâmetros até a mediana indica a influência sobre o atributo analisado. O gráfico é gerado a partir do DoE, utilizando apenas as gerações viáveis incluídas ou não na Fronteira de Pareto.

Primeiramente, analisemos a influência dos parâmetros sobre o índice MSI, mostrada na Figura 38. Os parâmetros que possuem maior influência são X14 e X17, que indicam respectivamente os valores de calado a ré e a vante da embarcação, sendo que o aumento do calado a ré aumenta o valor de MSI, enquanto o aumento a vante faz com que este diminua. Outro parâmetro de grande influência é X19 que indica o trim da embarcação, mostrando sua influência negativa no valor final do objetivo.

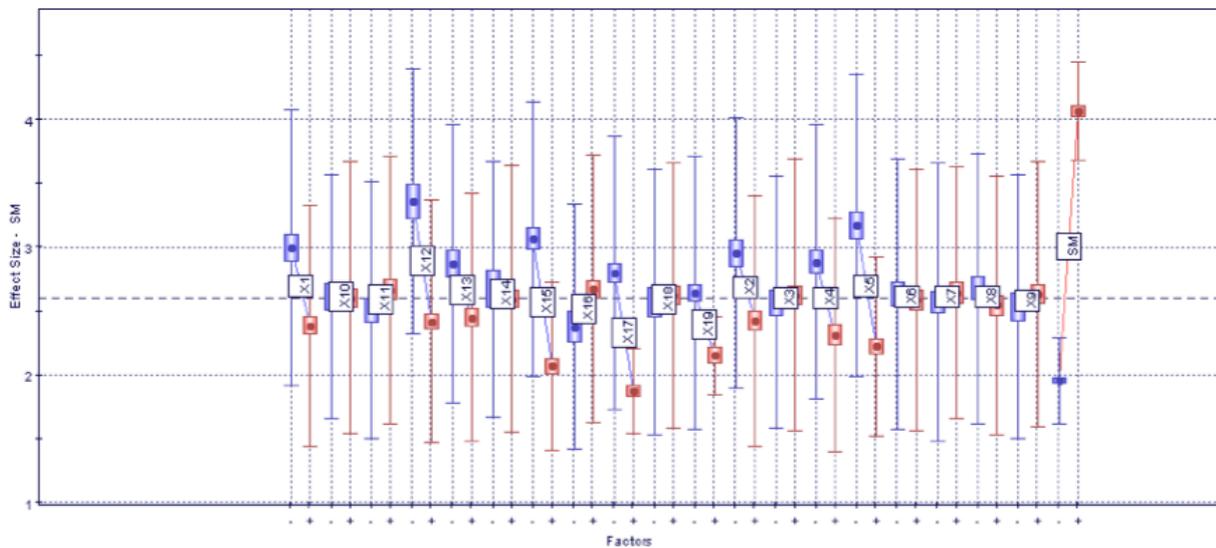
Figura 38 – Relação dos parâmetros no MSI



Fonte: Autor (2016).

A próxima análise, referente a influência no índice SM, mostra resultados diferentes. Os principais parâmetros são X1, X5, X12, X15, que indicam a boca a vante no convés, a boca a ré na linha d'água, o comprimento da linha d'água e calado a ré, como mostra a Figura 39. A influência de parâmetros posicionados próximos a proa e a popa são resultados da influência dos pontos escolhidos para análise deste índice, localizados nos pontos extremos da proa e popa que são os pontos naturalmente onde os índices são maiores.

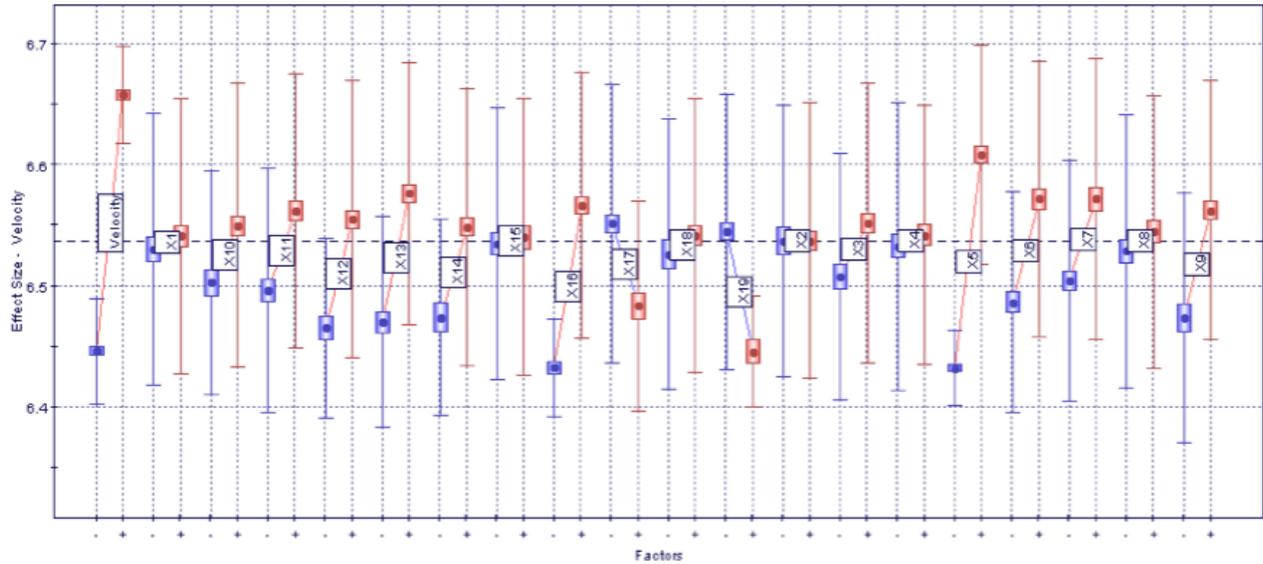
Figura 39 – Relação dos parâmetros no SM



Fonte: Autor (2016).

A análise dos parâmetros no resultado da velocidade apresenta uma influência muito mais homogênea dos parâmetros no objetivo, como mostra a Figura 40. Todavia, os parâmetros de maior destaque são X5, X6, X7 e X13, que representam, nesta ordem, boca a meia-nau, boca a ré, boca a vante e comprimento da linha d'água, que influenciam diretamente a resistência ao avanço e, portanto, a velocidade final.

Figura 40 – Relação dos parâmetros na velocidade



Fonte: Autor (2016).

## 5.2 MULTIMODALIDADE

Uma investigação é realizada sobre a multimodalidade da Fronteira de Pareto. A multimodalidade indica se há mais de uma solução para um mesmo ponto. A região analisada se encontra na região central da Fronteira de Pareto. Dentro dela, três pontos com variação menor que 0,02 entre si são selecionados e seus parâmetros dimensionais comparados na Tabela 10. A diferença entre os parâmetros indica que para mesmos objetivos, pode haver cascos muito diferentes entre si.

Tabela 10 – Soluções multimodais do estudo

Parâmetro	Casco 01	Casco 02	Casco 03	Diferença
Bbow	0,362	0,412	0,362	13,81%
Bmax	1,754	1,856	1,754	5,82%
Btransom	0,876	0,788	0,787	11,31%
Bwl	1,416	1,604	1,414	13,44%
Baft	0,953	1,010	0,976	5,98%
Bfwd	0,894	0,893	0,829	7,84%
Laft	3,191	3,112	3,090	3,27%
Lfwd	8,827	9,273	8,818	5,16%

Lmidship	5,900	6,338	6,112	7,42%
Loa	12,125	12,098	12,125	0,22%
Lstern	10,812	10,812	9,904	9,17%
Lwl	10,959	11,000	10,960	0,37%
Tbow	0,103	0,097	0,108	11,34%
Tfwd	0,434	0,440	0,435	1,38%
Tstern	0,280	0,288	0,281	2,86%
T	0,606	0,597	0,597	1,51%
Taft	0,314	0,316	0,316	0,64%
MSI	5,600	5,600	5,599	0,02%
Velocidade	2,102	2,102	2,101	0,05%

---

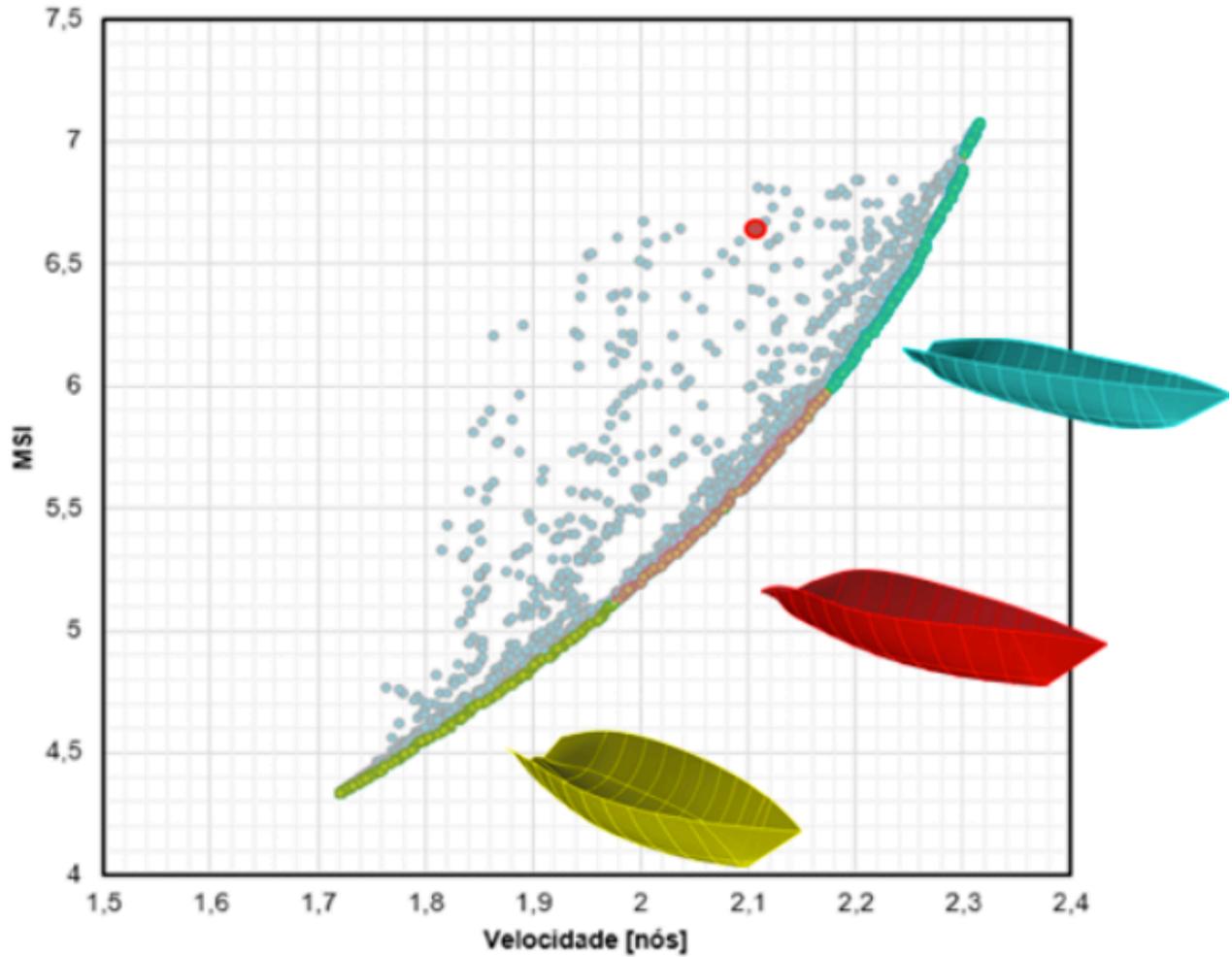
Fonte: Autor (2016).

### 5.3 FRONTEIRA DE PARETO

Para efeitos de avaliação do projeto, foi selecionado os cascos contidos na curva de pareto. A fronteira de pareto indica o limite em que não se pode melhorar um dos objetivos das soluções sem prejudicar o desempenho da embarcação no outro objetivo. A Fronteira de Pareto para os dois objetivos de análise é mostrada no gráfico contido na Figura 42. Os pontos azuis correspondem aos objetivos das 3000 gerações. Já a Fronteira foi dividida em três segmentos de mesmo tamanho, representados por cores diferentes, dos quais cascos foram selecionados para representar a mudança de forma para cada região.

Para efeitos de comparação, o casco projetado por Larsson é indicado através de um ponto de um vermelho no gráfico da Figura 41. Nota-se que a embarcação projetada se encontra há uma considerável distância da Fronteira de Pareto. De acordo com esta relação, a mudança de dimensões e curvatura pode fazer melhorar os objetivos aproximando-se da Fronteira de Pareto.

Figura 41 – Relação entre MSI e velocidade

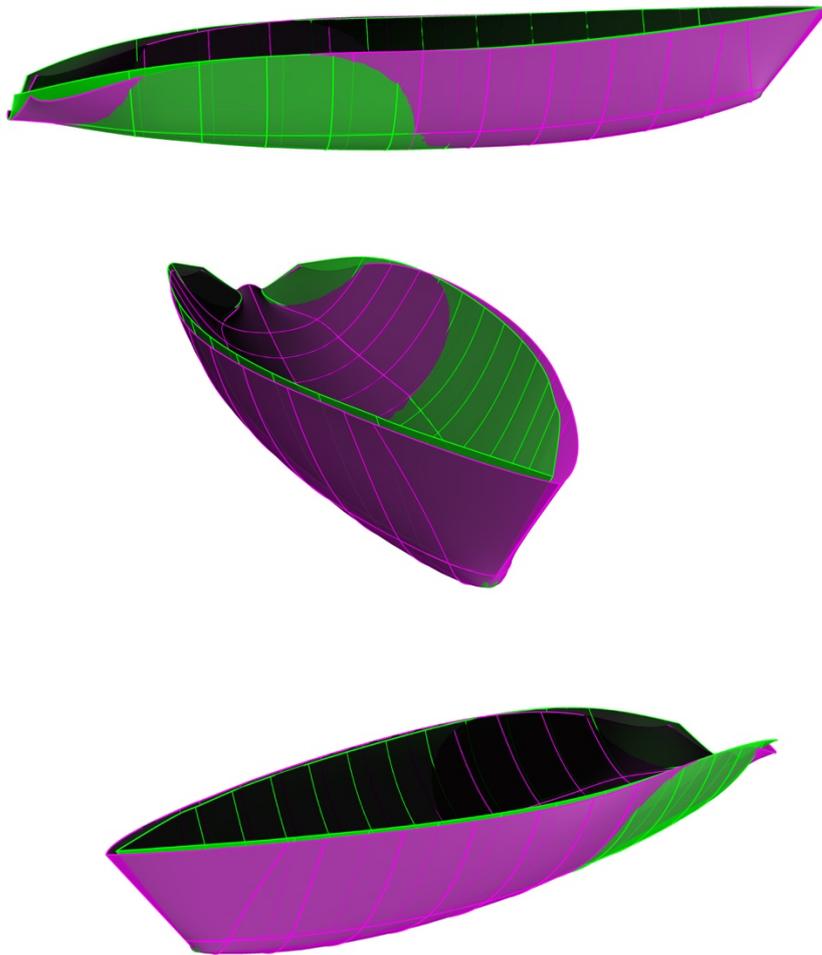


Fonte: Autor (2016).

#### 5.4 COMPARATIVO COM CASCO ORIGINAL

O casco ótimo (em magenta) obtido através do processo de otimização foi comparado com o casco original (em verde) concebido por Larsson e Eliasson. Primeiramente, analisemos a mudança nas dimensões básicas, vistas no gráfico apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Comparativo entre cascos



Fonte: Autor (2016).

É visível que há uma mudança significativa na mudança do formato do casco, especialmente na esbeltez do casco e na curvatura entre a meia-nau e a proa. O casco aumenta seu coeficiente de bloco a vante, enquanto mantém sua esbeltez a ré. Tal comportamento se deve a análise conjunta do *seakeeping* como objetivo do projeto. A quilha se comporta de forma semelhante, aumentando seu calado a vante, e diminuindo a ré, como foi mostrado pela análise da influência de parâmetros realizado anteriormente. Todavia, apesar desta mudança, a velocidade desempenhada tende a aumentar.

Sob as mesmas condições determinadas anteriormente, os dois cascos são simulados e os resultados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparativo entre cascos

Requisito	Larsson	Otimização	Diferença
Velocidade	6,64	6,87	+3,46%
MSI	6,61	5,13	-22,43%
SM	2,10	1,69	-19,33%

Fonte: Autor (2016).

É importante observar que os resultados da Tabela 11 foram obtidos diretamente das ferramentas de análise utilizadas e não da rede neural, a qual foi utilizada apenas para indicar as soluções ótimas, conforme procedimento proposto por Tancredi (2008).

A diferença nos resultados mostra claramente que se obteve uma significativa melhoria, especialmente nas características de *seakeeping* da embarcação projetada.

## 6 CONCLUSÕES

A crescente sofisticação dos programas computacionais e do poder de processamento disponíveis para simulação, possibilita que análises cada vez mais profundas sejam realizadas sobre a influência dos parâmetros de projeto em resultados esperados pelos projetistas.

Este trabalho se propôs a apresentar um modelo para melhoria de desempenho de um veleiro, obtendo resultados significativos, mesmo aplicado a um veleiro cujo projeto passou por todas as fases da espiral de projeto e encontra-se em seu estado de arte. Porém, a aplicação desta metodologia em uma embarcação em estágios preliminares de projeto pode gerar mudanças ainda mais significativas nos resultados alcançados.

O desenvolvimento do modelo parametrizado em CAESSES® permitiu que mudanças na forma do projeto fossem realizadas de forma rápida e vasta, abordando todos os parâmetros dimensionais da embarcação. Todavia, um modelo mais robusto, envolvendo um número maior de pontos na descrição do casco pode ser desenvolvido para que o efeito da quantidade de pontos seja avaliado em detrimento da resposta final, assim como possibilitando a investigação de formas e curvas menos orgânicas no casco.

Mais importante que o aumento na quantidade de parâmetros investigados, é uma análise sobre as margens de variação que foram mantidas em 10% neste trabalho. Uma maior margem pode possibilitar mudanças ainda maiores nos resultados da otimização.

Quando se compara as mudanças dimensionais obtidas com as mudanças de curvaturas, é possível notar que a curvatura do casco, em especial a sua distribuição volumétrica, mudou significativamente no casco otimizado. Este resultado reforça a importância deste estudo e de outras investigações na área, visto que a definição da curvatura do casco é uma área pouco consolidada e carente de métodos de síntese que correlacionem o desempenho da embarcação com a curvatura de seu casco.

A influência dos parâmetros estudada neste trabalho indicou a relevância de certas dimensões de forma no desempenho final da embarcação, em especial aqueles referentes a forma da linha de quilha. Estudos mais profundos podem ser conduzidos com o objetivo de mensurar com mais precisão a influência destes parâmetros no aumento ou diminuição dos objetivos de estudo.

Por fim, entende-se que os procedimentos aqui apresentados, juntamente com outras peças da literatura, podem servir de base para a melhoria da solução de problemas multidisciplinares na engenharia.

## REFERÊNCIAS

- ABT, C.; BADE, S.D.; BIRK, L.; HARRIES, S. *Parametric Hull Form Design – A Step Towards One Week Ship Design*. 8<sup>th</sup> International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures. PRADS 2001, Shanghai.
- ALZA, P. I. *Numerical and Experimental Studies of Sail Aerodynamics*. Dissertação de Mestrado, Universida Politécnica de Madrid, Madrid, 2012.
- ARROYO, J. E. C. *Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo*. Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, SP, 2002.
- BARBARINI, L. H. M. *Síntese de cascos de embarcações através de métodos de otimização aplicados a curvas b-splines*. Dissertação de Mestrado, Universidade Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BECK, K. *Extreme Programming Explained*. 1. Ed. Boston: Addison-Wesley, 1999.
- CIORTAN, C.; SOARES, C. G. Short communication Computational study of sail performance in upwind condition. *Ocean Engineering*, v. 34, 2007.
- Davidson, L. *Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling. Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling*. Department of Applied Mechanics, Division of Fluid Dynamics, 2015.
- EHRGOTT, M.; GANDIBLEUX, X. *A survey and annotated bibliography of multicriteria combinatorial optimization*. Willey, Forthcoming, 2000.
- FASSARDI, C. D.; HOCHKIRCH, K. *Sailboat Design By Response Surface Optimization*. In: High Performance Yacht Design Conference, 2006, Auckland.
- FONSECA, C.M.; FLEMING, P.J. *Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization*. Anais do Fifth International Conference on Genetic Algorithms, p. 416–423, San Mateo, USA. 1993.
- FOSSATI, F. *Aero-Hydrodynamics and the Performance of Sailing Yachts*. 1a Edição. Editora International Marine/McGraw-Hill, 2009.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley Longman, 1989.
- HARRIES, S. *Parametric Design and Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms*. Dissertação de Mestrado, Technische Universität Berlin; Mensch & Buch Verlag, 1998.
- HENRY, R. G.; MILLER, R. T. USN. *Sailing Yacht Design, An Appreciation of a Fine Art*. 1a Edição, Editora Cornell Maritime Press, Maryland - US, 1965.

- HORN, J. *Handbook of Evolutionary Computation*, v. 1, Oxford University Press, Oxford, England, 1997.
- KINNEY, F. S. *Skene's Elements of Yacht Design*. 8. Ed. New York: Dodd, Mead & Co., 1983.
- KNUDSEN, S. S. *Sail Shape Optimization with CFD*. Dissertação de Mestrado, Technical University Of Denmark, Kongens Lygby, 2003.
- KOSTALAS, K.; PLUTO, A. *A CFD Investigation of Sailing Yacht Forebodies in Head Seas*. Dissertação de Mestrado, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2015.
- LAMB, T. *Ship Design and Construction*. Hanover: Sheridan Books, 2003.
- LARSSON, L.; ELIASSON, R. *Principles of Yacht Design*. 2. Ed. Londres: Adlard Coles Nautical, 2000.
- LARSSON, L.; ELIASSON, R, ORYCH, M. *Principles of Yacht Design*. 4. Ed. Londres: Adlard Coles Nautical, 2013.
- LAZAR, M. S.; LÉNÉ, F.; TURBÉ, N. Modelling and optimization of sails. *Computers and Structures*, v. 86, 2008.
- MAISONNEUVE, J.J.; HARRIES, S.; MARZI, J.; RAVEN, H. C.; VIVIANI, U.; PIIPPO, H. *Towards optimal design of ship hull shapes*, 2000.
- MILGRAM, J. *Hydrodynamics in Advanced Sailing Design*. Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, 1997.
- NAKANISHI, H. C.; RAMOS, A. A.; CARVALHO, P. L. F; MALTA, E. B.; SAMPAIO, C. M.; ANDRADE, B. *Metodologia para dimensionamento de uma embarcação para o transporte de gás comprimido GNV*. 23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, Rio de Janeiro, 2010.
- NAKANISHI, H. C.; PALHARES, F. L.; ANDRADE, B. L. R.; TANCREDI, T. P. *Procedimento de otimização aplicado ao projeto de embarcações de planeio*. 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, Rio de Janeiro, 2012.
- PADUA, A. *Redes Neurais Artificiais-Teoria e Aplicações*. Rio de Janeiro, LTC, 2000.
- PANTUZA, G. *Métodos de otimização multiobjectivo e de simulação aplicados ao problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto*, 2011.
- PEREIRA, G. W. *Aplicação da técnica de recozimento simulado em problemas de planejamento florestal multiobjectivo*. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004.
- PERRY, R. H. *Yacht Design According to Perry*. 2008.

RICHARDT, T.; HARRIES, S.; HOCHKIRCH, K. *Maneuvering Simulations for Ships and Sailing Yachts using FRIENDSHIP-Equilibrium as an Open Modular Workbench*. 2005

ROSSI, S. R. G. *Projeto de veleiro de pequeno porte em plástico rotomoldado*. 2006. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

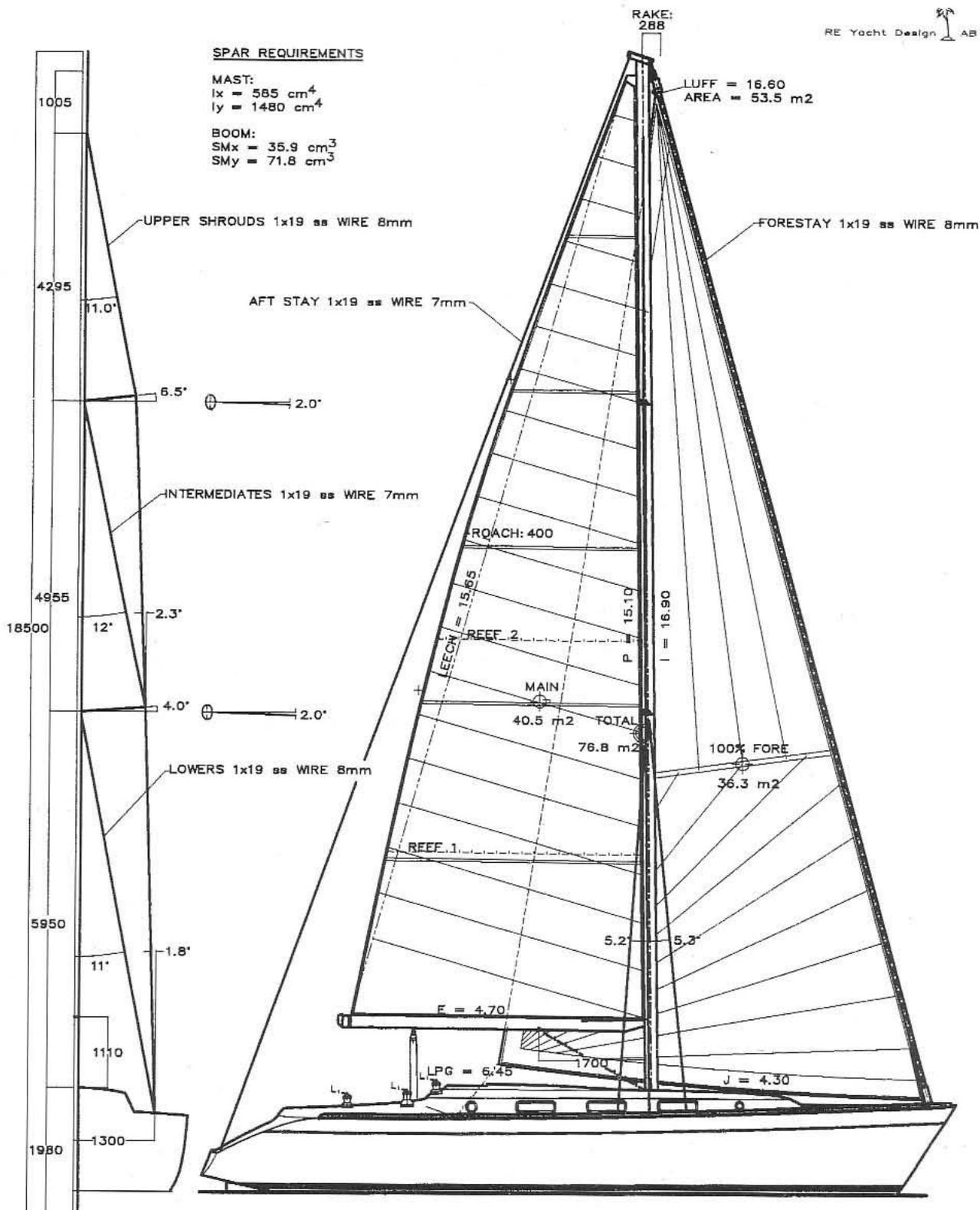
SOUZA, M. J. F. *Programação de horários em escolas: uma aproximação por metaheurísticas*. Tese de doutorado, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

TANCREDI, T. P. et al. *Projeto de platform supply boats baseado em otimização multiobjetivo*. Congresso Nacional De Transporte Aquaviário, Construção Naval E Offshore. Rio de Janeiro. SOBENA. Rio de Janeiro. 2014.

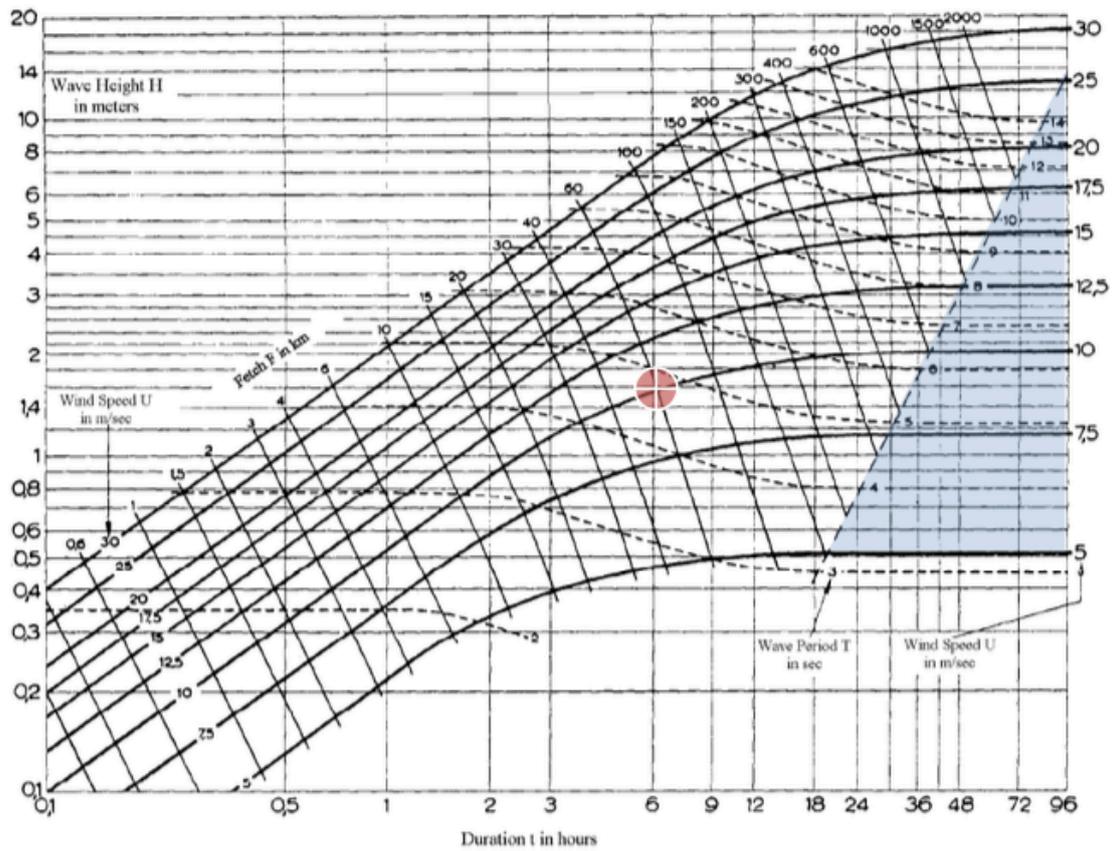
TICONA, W. G. C. *Algoritmos evolutivos multiobjetivo para a reconstrução de árvores filogenéticas*. Tese de doutorado, ICMC, USP, São Carlos, SP, 2003.

ZHANG, P.; ZHU, D.; LENG, W. Parametric Approach to Design of Hull Forms. *Journal of Hydrodynamics*, v. 60, n. 6, p. 804-810, 2008.

# ANEXO A – Mastreação YD-40



## ANEXO B – Relação entre velocidade do vento e onda para um mar plenamente desenvolvido



Fonte: Bowers (1975)