

nota final

9 (nove)

HM

FABIO HENRIQUE MACHADO SALLA

## Otimização da configuração de embarcações à vela

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Engenheiro.

Dez  
Emílio C. Nelli Silva

São Paulo  
2005

FABIO HENRIQUE MACHADO SALLA

# Otimização da configuração de embarcações à vela

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Engenheiro.

Área de concentração:  
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Livre Docente Emilio  
Carlos Nelli Silva

São Paulo  
2005

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011126

**FICHA CATALOGRÁFICA**

**Salla, Fabio Henrique Machado**

**Otimização da configuração de embarcações a vela / Fabio Henrique Machado Salla. -- São Paulo, 2005.**

**66 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.**

**1. Embarcações (Otimização) 2. Embarcações a vela I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.**

## RESUMO

Este trabalho emprega ferramentas de otimização para resolver o problema de predição de velocidades de embarcações a vela e, a partir deste resultado, obter as características de projeto ou de navegação ótimas a fim de maximizar a velocidade do veleiro. Os métodos de otimização não linear mostram-se compatíveis com o modelo numérico implementado a partir de equações semi-empíricas disponíveis na literatura. A solução obtida pelo programa de predição de velocidades ( VPP – Velocity Prediction Program ) para uma embarcação já existente mostra-se correta tanto qualitativamente quanto quantitativamente. Isto certifica as alterações sugeridas pela etapa de otimização das características dos veleiros, que atualmente podem ser modificadas durante a navegação e de forma automática e não somente na fase de projeto e construção.

# ABSTRACT

This work employs optimization tool to solve the velocity prediction problem of a sailing boat and to figure the optimal project characteristics or navigation configuration in order to maximize the boat speed. The non-linear optimization methods were successful in solving the numerical model implemented from semi empirical equation available in the literature. The solution given by the Velocity Prediction Program (VPP) for an existent boat agrees with the behavior and the velocities expected. This certifies the optimal values proposed by the optimization module of the program. Those values apply for the project and construction of the boat, and also to the navigation, once there are automatics devices that can change those boats while sailing.

# Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1. INTRODUÇÃO .....	8
1.1 CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE UM VELEIRO .....	8
1.2 DINÂMICA DE FUNCIONAMENTO .....	11
1.3 DESENVOLVIMENTOS RECENTES .....	12
1.4 OTIMIZAÇÃO DE VELEIROS .....	14
2. OBJETIVOS .....	16
3. JUSTIFICATIVA .....	18
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	20
4.1 MODELO AERODINÂMICO .....	21
4.2 MODELO HIDRODINÂMICO .....	24
4.3 MODELO DE ESTABILIDADE .....	28
4.4 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO .....	30
4.5 DEFINIÇÃO DOS PROBLEMAS .....	33
4.5.1 Solução do VPP .....	33
4.5.2 Otimizações isoladas .....	34
4.5.3 Otimizações conjuntas .....	35
5. RESULTADOS .....	35
5.1 MODELO DE FORÇAS .....	36
5.2 PROGRAMA DE PREDIÇÃO DE VELOCIDADE - VPP .....	41
5.2.1 Determinação do valor inicial .....	47
5.3 OTIMIZAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DOS VELEIROS .....	48
5.3.1 Otimização dos parâmetros do casco .....	48
5.3.2 Otimização das dimensões do mastro .....	52
5.3.3 Otimização do velame para uma regata .....	55
5.3.4 Otimização casco e velame para regata .....	59
5.3.5 Otimização do ângulo de adernamento .....	63
6. CONCLUSÃO .....	65
7. REFÊRENCIAS .....	66

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1 – Diferentes cascos de veleiros (trimaram, catamaram e monocascos).....	9
Figura 1.1.2 – Configuração típica de veleiros.....	10
Figura 1.3.1 – Veleiro Mari-Cha IV.....	13
Figura 1.4.1 - Espiral de projeto clássico.....	14
Figura 2.1 - Exemplos de gráficos de VPP's comerciais. Curvas para velocidades diferentes de vento. Velocidade do barco na dimensão radial.[Hochkirch].....	16
Figura 4.1 – Esquema simplificado de forças aerodinâmicas e hidrodinâmicas.....	20
Figura 4.1.1 – Coeficientes aerodinâmicos das velas segundo regra IMS.....	22
Figura 4.1.2 – Composição do vento aparente.....	23
Figura 4.3.1 – Composição do momento de adernamento – binário entre forças laterais aerodinâmicas e forças laterais hidrodinâmicas.....	29
Figura 4.3.2 – Curva de estabilidade típica.....	29
Figura 4.3.3 – Distanciamento entre os centros de flutuação e de gravidade devido ao adernamento do veleiro.....	30
Figura 4.2.1 – Representação de mínimo global e local [Silva].....	33
Figura 5.1.1 - Convés e plano vélico do Flash165.....	37
Figura 5.1.2 – Comportamento das forças aerodinâmicas.....	37
Figura 5.1.3 – Resistência viscosa do casco e apêndices hidrodinâmicos.....	38
Figura 5.1.4 – Resistência residual para a região de deslocamento ( $F_n < 0,45$ ) e para a região de planeio ( $F_n > 0,45$ ).....	38
Figura 5.1.5 – Predominância da resistência residual sobre a resistência viscosa em velocidades elevadas.....	39
Figura 5.1.6 – Alta eficiência dos apêndices hidrodinâmicos para pequenos ângulos de deriva.....	40
Figura 5.1.7 Cúva de estabilidade para o veleiro Flash165.....	40
Figura 5.2.1 – VPP para o Flash165 considerando somente forças longitudinais.....	42
Figura 5.2.2 – Gráfico polar de velocidades para o veleiro Flash165 considerando forças longitudinais e laterais inclusive seus momentos.....	43
Figura 5.2.3 – Região distorcida do gráfico de velocidade coincide com a região não nula da função objetivo.....	44
Figura 5.2.4 – VPP resolvido para todas as forças com algoritmo de alívio de velas.....	45
Figura 5.3.1.1 Gráfico de velocidades para intensidade do vento real de 8 m/s e 2 m/s para o casco original e para cascos otimizados.....	51
Figura 5.3.1.2 – Variação da posição longitudinal do centro de flutuação ótima.....	52
Figura 5.3.2.1 - Gráfico polar de velocidades para intensidades do vento real de 8 m/s e 10 m/s para o velame original e para velames otimizados.....	53
Figura 5.3.2.2 – Comportamento das dimensões do velame ótimo para intensidade do vento real de 10 m/s.....	54
Figura 5.3.5.1- Andernamento desejável para baixas velocidades.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.2.3.1 – Comparação de desempenho entre veleiros otimizados e o veleiro original para regata do tipo “Barla-Sota” .....	57
Tabela 5.3.4.1 – Dimensões dos veleiros otimizados em comparação ao veleiro original. ....	60
Tabela 5.3.4.2 – Comparação de desempenho entre os veleiros ótimos e o veleiro original em regatas tipo “Barla-Sota” .....	61
Tabela 5.3.4.3 – Veleiros otimizados em regata fora da faixa de ventos para a qual foram otimizados .....	62



## 1. INTRODUÇÃO

As embarcações à vela, de origem milenar, continuam sendo aprimoradas e atualmente utilizam os mesmos recursos e tecnologias empregadas nas indústrias automobilística, aeronáutica e aeroespacial. Entre estes recursos está a operação automática de seus dispositivos, cujas decisões de controle são tratadas neste trabalho utilizando ferramentas de Otimização.

Tanto os veleiros quanto os conceitos de otimização são introduzidos nesta seção. Discute-se a concepção atual dos veleiros e sua mecânica de funcionamento e são apresentadas as recentes evoluções presentes nos modelos mais modernos.

### 1.1 Configuração típica de um veleiro

Veleiros são embarcações cuja força de propulsão provém da ação do vento sobre suas velas. Apesar de geralmente contar com um motor auxiliar, este é voltado apenas às manobras e situações de ausência de vento, desenvolvendo velocidades inferiores a aquelas obtidas quando velejando.

A dependência quanto ao vento restringe-se somente a sua existência, e não a sua direção. Incapazes de deslocar-se diretamente contra o vento, os veleiros atingem destinos nesta direção realizando rotas alternadas (“zig-zag”) com ângulos de apenas  $27^\circ$  em relação à direção do vento.

Dentre as diferentes configurações de veleiros, este trabalho trata apenas da mais difundida atualmente, chamada de “Monocasco em Sloop”. Em contrapartida aos monocascos existem os multicascos, divididos em catamarans (dois cascos) e trimarans (três cascos). Sobre estes diferentes modelos é fato que para o mesmo comprimento do barco, os trimarans são mais rápidos, seguidos pelos catamarans e os monocascos por

último. A mesma relação vale para o custo destes modelos (trimarans mais caros). Já para o espaço interno, os monocascos são mais amplos até a faixa de 10 metros de comprimento, quando os catamarans apresentam mais espaço, sendo pior aproveitados os trimarans.

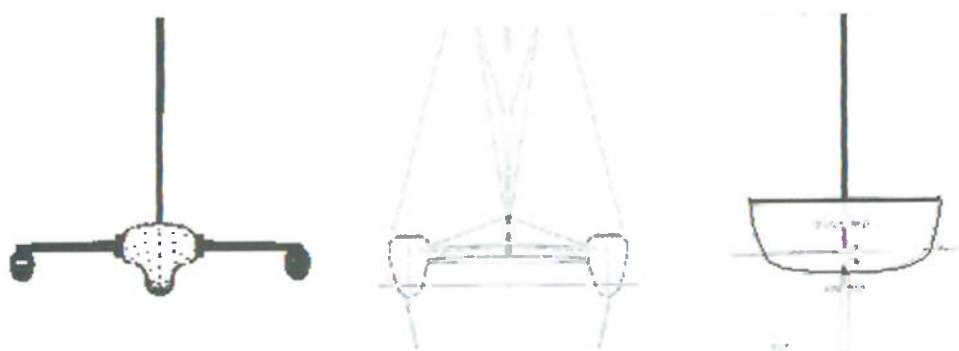


Figura 1.1.1 – Diferentes cascos de veleiros (trimaram, catamaram e monocascos).

O desempenho superior dos trimarans e catamarans é altamente dependente do baixo peso da embarcação. Os monocascos, por serem menos sensíveis ao peso, permitem a sua construção direcionada simultaneamente para competições e passeios (incluindo acomodações internas, provisões e tancagem de água e diesel, ou seja, peso), com bom desempenho em ambos os propósitos. Isto contribui para a predominância dos monocascos sobre as outras variações.

Independentemente do casco, a mastreação em “sloop” é notadamente a mais utilizada. Composta somente por um mastro, este tipo de armação carrega duas velas triangulares, responsáveis pelo ótimo desempenho no contra-vento. Em ventos a favor, com incidência entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$  em relação à linha de centro do barco, a vela de proa (parte da frente do barco) pode ser substituída por uma vela do tipo “balão”, maior e mais leve.

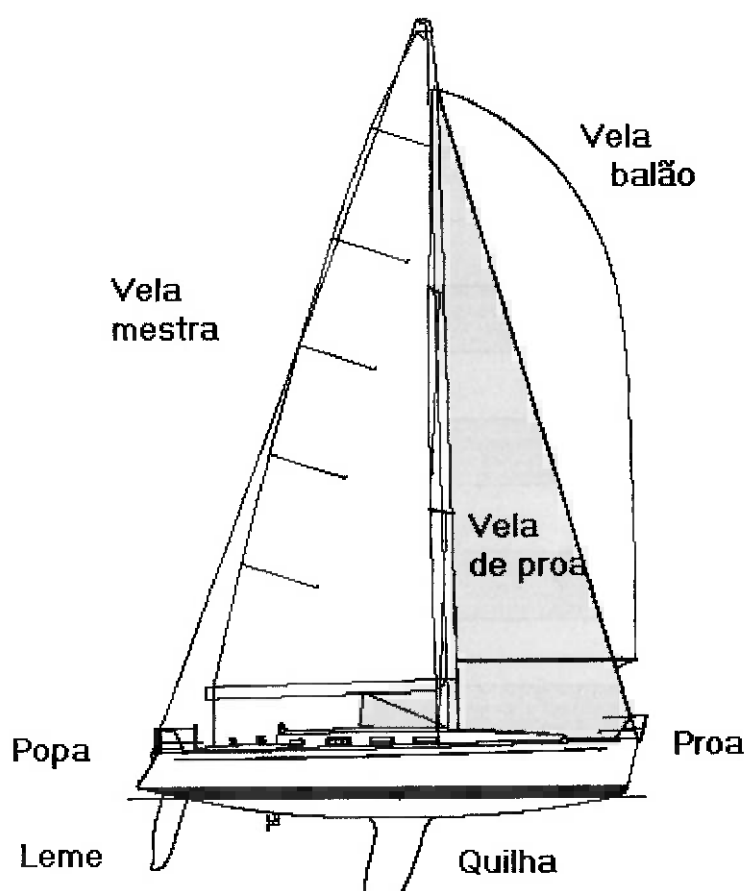


Figura 1.1.2 – Configuração típica de veleiros

O controle direcional da embarcação é dado pelo leme, localizado via de regra na extremidade de traz do veleiro (popa). Além disto, o sistema hidrodinâmico dos veleiros conta ainda com a quilha, localizada na região central do casco. A quilha é responsável por gerar resistência lateral, evitando que o barco locomova-se para os lados, além de quando carregada com lastro (ferro fundido ou chumbo), prover a estabilidade da embarcação.

## 1.2 Dinâmica de funcionamento

Ao contrário de embarcações a motor, em que a força de propulsão (empuxo do hélice) e a força de resistência (arrasto do casco) estão num mesmo plano, os veleiros experimentam forças em diversos planos e posições além de momentos resultantes dessas forças. Pode-se dividir estas forças em três grupos: forças aerodinâmicas, forças hidrodinâmicas e forças gravitacionais e hidrostáticas.

- Forças aerodinâmicas: as velas comportam-se como perfis aerodinâmicos, gerando sustentação e arrasto, dependentes do ângulo de incidência e intensidade do vento. A parte exposta do casco, o convés, a tripulação e a própria mastreação também o fazem.

A resultante destas forças quando decomposta nas direções longitudinal e transversal da embarcação representam a força de propulsão e a força lateral respectivamente. O ponto de aplicação desta resultante determina os momentos atuantes nas três direções do veleiro, entre eles o mais importante é o momento de adernamento (inclinação lateral), causado pela força lateral.

- Forças hidrodinâmicas: devido à força de propulsão, o casco assume uma velocidade e passa a sofrer resistência ao avanço gerada por diferentes fenômenos, como resistência ao avanço de origem viscosa e resistência ao avanço relacionada a diferenças de pressão devido à onda formada pela proa (frente do barco). Em reação a força lateral, o deslocamento do barco é desviado do sentido longitudinal deste, até que este desvio (ângulo de deriva) configure um ângulo de ataque suficiente para que, principalmente, a quilha (alem do casco e do leme) gere sustentação suficiente para anular a força lateral aerodinâmica.

- Forças gravitacionais e hidrostáticas: na ausência de momentos atuantes, o centro de gravidade da embarcação coincide verticalmente com o centro de flutuação do casco. Devido ao momento de adernamento, por exemplo, é necessário que outro binário anule este momento. Isto ocorre graças ao deslocamento lateral da tripulação em embarcações pequenas. Quando o peso da tripulação é pequeno comparado ao peso da

embarcação, o binário restituinte é conseguido pela inclinação da embarcação. Nesta situação o centro de flutuação se desloca lateralmente em relação ao centro de gravidade. Este deslocamento constitui o braço do momento gerado pela força peso e é tanto maior quanto mais alargado for o formato do casco (deslocamento lateral do centro de flutuação) e mais baixo for o centro de gravidade (deslocamento lateral deste) do barco, devido ao lastro na quilha.

### 1.3 Desenvolvimentos recentes

O desenvolvimento de novos dispositivos, compreendendo tanto sensores quanto atuadores, facilitou a operação das embarcações à vela, além de melhorar seu desempenho. Estas novas tecnologias abrangem todos os sistemas do veleiro, tanto a configuração do velame quanto os apêndices hidrodinâmicos, assim como parâmetros relativos à estabilidade. A comunicação, como um todo, também foi favorecida.

Estão disponíveis diversos sistemas de transmissão de boletins meteorológicos. A posição e dados do veleiro, como velocidade do barco e do vento, são transmitidos em tempo real, permitindo o acompanhamento de uma regata ou a situação em relação ao recorde anterior de uma travessia. Transmissões de vídeo e de áudio também se tornaram comuns.

Existem atualmente enroladores para todos os tipos de vela, permitindo que estas sejam abertas ou recolhidas facilmente, além de, para algumas velas, ser possível diminuir (rizar) a fração exposta da vela. Sensores de inclinação controlam sistemas de alívio das escotas (cabos responsáveis pelo posicionamento da vela), anulando as forças atuantes sobre as velas com a finalidade de evitar o adernamento excessivo. Estas facilidades permitem a instalação de planos vélicos ainda maiores e sua operação por tripulações reduzidas, como nas competições em solitário.

Diversos dispositivos também estão disponíveis para os apêndices hidrodinâmicos. As quilhas podem ser pivotantes ou retráteis, mesmo para quilhas de mais de 80 toneladas de massa, fornecendo maior estabilidade, permitindo acesso a locais de pequena profundidade ou diminuindo a área molhada exposta. A favor da

estabilidade estão também os tanques de lastro d'água móvel (mobilidade transversal ou longitudinal), de operação automatizada.

O processo de crescimento dimensional dos veleiros acelerou-se devido ao desenvolvimento dos itens acima mencionado e dos projetos e métodos construtivos empregados. A prova disto são os recentes veleiros Mari Cha IV (figura 1.3.1) e Mirabella V lançados em 2004. O primeiro, com 42,6 m, 50 toneladas de deslocamento e aproximadamente 1300m<sup>2</sup> de área vélica, destina-se à quebra de recordes, sendo utilizada, obrigatoriamente, somente a força humana para a operação do aparelho vélico e hidrodinâmico, necessitando inclusive grande tripulação e a divisão do velame em dois mastros.



Figura 1.3.1 – Veleiro Mari-Cha IV

Já o Mirabella V é o maior “sloop” do mundo, com 75,22m de comprimento, 765 toneladas de deslocamento, e 3400m<sup>2</sup> de área vélica, possui acionamento hidráulico ou elétrico em todos os dispositivos, sendo direcionado para cruzeiros e “charters”.

## 1.4 Otimização de veleiros

No método clássico de projeto, conhecido como espiral de projeto (figura 1.4.1), um primeiro sistema dos muitos que compõem o barco é definido isoladamente, como por exemplo, as dimensões do casco, e os seguintes em consequência deste, porém existe dependência entre todos os sistemas e uma revisão no primeiro sistema é realizada ao final do primeiro ciclo e consequentemente nos sistemas seguintes, até que ambos funcionem conjuntamente. Este método converge, via de regra, rapidamente para um veleiro possível, realizável, porém a uma distância desconhecida do projeto ótimo.

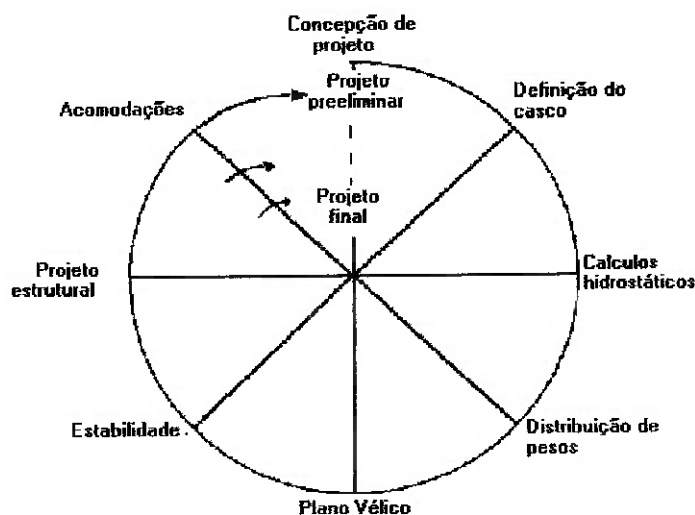


Figura 1.4.1 - Espiral de projeto clássico

O cenário esperado para cada embarcação governa a sua configuração ótima. Velocidades desejadas, direção e força do vento, condição de mar, tripulação e mesmo orçamento entram em jogo neste momento. Relações de compromisso são regra na configuração dos veleiros, existindo inúmeros exemplos como a área vélica total carregada. Quanto mais área, maiores a força de propulsão e a força lateral, maior a

estabilidade necessária, mais lastro deve ser instalado, mais peso carregado e, portanto, maior resistência gerada.

Para embarcações de competição em particular, a otimização de seu projeto esta ligada à raia em que esta competirá, e suas condições predominantes, além da regra sob a qual a mesma estará sujeita.

Uma amostra disto está nas grandes diferenças encontradas entre barcos de competição destinados a regatas diferentes, ainda que possuam o mesmo comprimento, como é o caso da América's Cup (em águas abrigadas), Volvo Ocean Race (volta ao mundo com escalas) e Around Alone (volta ao mundo em solitário sem escalar).

Os dispositivos modernos de operação dos veleiros acima citados permitem otimizar o projeto do veleiro, uma vez que este já está construído, ou seja, é possível alterar parâmetros básicos de projeto, como área vélica e sua posição, área da quilha, ângulo de ataque desta, posição (nos três eixos) do centro de gravidade, lastro, momento de inércia e etc. em tempo real, controlados automaticamente, sem intervenção humana.

A tomada de decisão em relação a este controle e suas manobras é o objetivo deste trabalho, o que possibilita desenvolver também projetos para condições específicas ou mesmo a determinação dos limites de variação destes dispositivos afim de que o projeto tenha bom desempenho numa faixa de condições esperadas.



## 2. OBJETIVOS

Este trabalho propõe otimizar a configuração de embarcações à vela, para diferentes condições, determinando a configuração de todos os sistemas reguláveis da embarcação, a fim de maximizar o seu desempenho.

Para tal é necessário, primeiramente, desenvolver um programa capaz de prever o comportamento do veleiro diante de diferentes regulagens. Este tipo de programa é conhecido como “VPP” (*velocity prediction program*). Este programa resolve, por otimização, o equilíbrio de forças de um veleiro existente. A apresentação típica dos resultados de programas VPP é na forma de gráfico polar, onde são apresentadas as curvas da velocidade do barco para cada direção de vento, para diferentes intensidades de vento real.

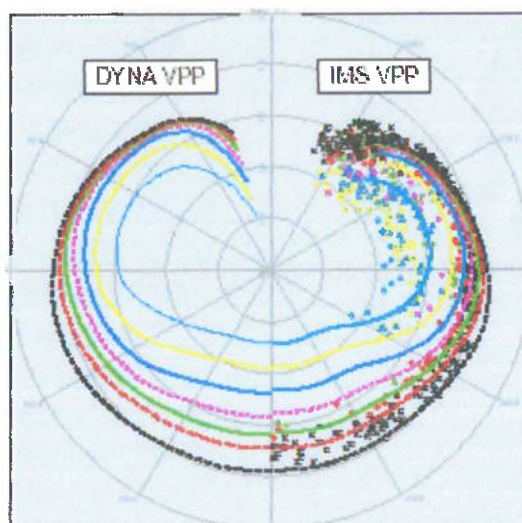


Figura 2.1 - Exemplos de gráficos de VPP's comerciais. Curvas para velocidades diferentes de vento. Velocidade do barco na dimensão radial.[Hochkirch]

A solução do VPP envolve exclusivamente a determinação das variáveis ligadas a atitude do veleiro (ângulos de adernamento e deriva) e sua velocidade, minimizando a resultante de forças e momentos.

Estando esta ferramenta disponível, serão otimizadas separadamente as características e dimensões dos sistemas presentes no veleiro, a saber: dimensões do plano vélico; forma do casco e estabilidade, tendo como figura de mérito a velocidade de avanço do veleiro. Em sequência, o objetivo é resolver o problema de otimização de todos os sistemas simultaneamente.

Nesta otimização, os limites das variáveis de projeto correspondem aos limites de regulação dos dispositivos controláveis do veleiro, apresentando como resultado a decisão de controle de um veleiro automatizado.

Esta ferramenta também gera, por consequência, o projeto ótimo para um veleiro novo, porém considerando apenas uma condição, o que torna o projeto pobre. Faz-se necessário expandir o conceito, ou seja, aplicar a otimização para maximizar a integral do gráfico de VPP, ou mesmo minimizar o tempo de um percurso conhecido, onde direções específicas de vento possuem ponderações de acordo com a rota, neste trabalho uma forma específica de regata é utilizada como exemplo.

Em todos os casos, o critério “Velocidade do Barco” pode ser substituído pelo conceito de “Velocity Made Good”, ou seja, velocidade projetada para o rumo desejado, quando não se veleja diretamente para o destino, e sim em “zig-zag”.

### 3. JUSTIFICATIVA

Há muitos anos no mercado, os aparelhos de “Piloto Automático” se restringem somente à operação do leme, são capazes de responder a um desvio na rota (seguindo um rumo magnético) atuando sobre o leme. Estes foram adaptados aos veleiros a partir de aparelhos voltados para barcos a motor, ou mesmo grandes navios. Situações em que a força de propulsão é sempre conhecida e controlável, e o leme é o único dispositivo a ser operado.

O desenvolvimento dos dispositivos citados anteriormente, todos eles podendo ser acionados por diversas formas que não a ação humana, permite a integração do sistema de direcionamento automático com a operação do aparelho vélico e hidrodinâmico. Existe, portanto, a possibilidade de tornar autônoma a tomada de decisão relativa ao controle destes dispositivos.

*“Push Bottom Sailing”* é uma denominação difundida por todo o mundo representando construções recentes em que toda a operação da embarcação resume-se a um painel de comando, onde cabe ao tripulantes apenas “pressionar botões”. Nestas embarcações, a instalação de um sistema de controle com as capacidades acima propostas é praticamente imediata.

As informações geradas através da otimização possuem outras aplicações que não somente o comando controle destas embarcações. As regras das competições e dos comitês que validam recordes proíbem o uso de força mecânica, elétrica e etc. na operação do aparelho vélico e hidrodinâmico, com exceção do leme. Nestes casos, a tripulação pode utilizar estas informações e aplicá-las aos dispositivos. Durante o projeto e construção destes veleiros, pode-se antecipar o comportamento diante das condições esperadas e otimizar suas dimensões para estas situações.

Estas regatas atraem grande interesse do público e conseqüentemente de patrocinadores. Destacar-se, graças ao bom desempenho, garante o financiamento de orçamentos de dezenas de milhões de dólares. Jornadas com propósito exclusivo de quebra de recordes atraem igualmente a mídia e os patrocinadores, com a vantagem para

estes últimos da exclusividade de veiculação. Esta exposição atrai pessoas dispostas a pagar para tripular ou mesmo comandar tais barcos, aluguel conhecido como *charter*.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como será visto, as ferramentas de otimização necessitam de uma função analítica, pela qual possa avaliar a função objetivo específica e procurar a solução que a maximize ou a minimize. O VPP resolve o problema referente ao comportamento do veleiro minimizando a resultante das forças e momentos atuantes. A função com este propósito foi desenvolvida sobre o modelo de forças atuantes nos veleiros.

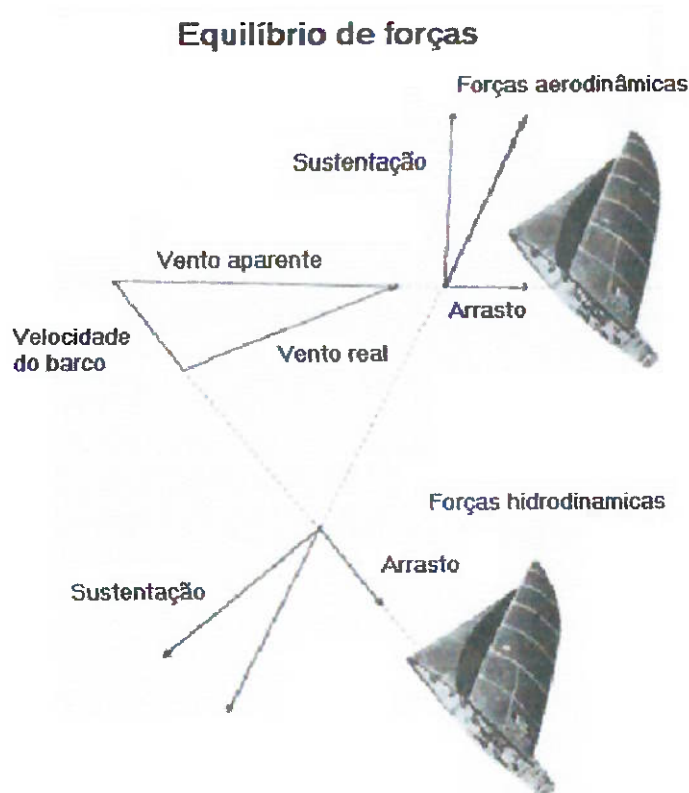


Figura 4.1 – Esquema simplificado de forças aerodinâmicas e hidrodinâmicas

O modelo do fenômeno foi formulado a partir de equações semi-empíricas disponíveis na literatura consagrada da área. Nos diversos sistemas que compõem a embarcação, diferentes abordagens foram encontradas. Inicialmente, optou-se por usar uma fonte única e completa [Oossanem] em favor da coerência. Abordagens diferentes

também foram implementadas, seja por disponibilidade maior de informações, seja por maior aceitação no meio naval.

O equilíbrio das forças ocorre quando a resultante aerodinâmica se iguala a resultante hidrodinâmica, o mesmo valendo para os momentos causados por estas duas categorias de forças, que devem ser nulos nos três eixos.

## 4.1 Modelo aerodinâmico

O vento, atuando sobre as velas, casco e mastreação, gera forças de arrasto e de sustentação, estas decompostas em força de propulsão e força lateral em função da direção do vento aparente (composição entre o vento real e o fluxo de ar gerado pelo movimento da embarcação). Oossanem emprega a formulação desenvolvida e utilizada pela regra de regata IMS (*International Measurement System*), porém esta formulação faz uso de coeficientes de correção para a iteração entre as velas, os quais não estão disponíveis.

Como base de comparação e eventual emprego no modelo, há ainda a formulação proposta por [Hazen] e utilizada por [Larssons] no consagrado “Principles of Yacht Design”. Este modelo já possui incorporada a iteração entre as velas, porém apresenta somente valores de coeficientes aerodinâmicos para velas de proa, mestra e balão simétrico, enquanto que a formulação IMS trata de diversos tipos adicionais de velas.

O modelo obtém as forças de propulsão e forças laterais por meio da decomposição da resultante das forças de arrasto e de sustentação a partir dos coeficientes  $C_l$  e  $C_d$  apresentados para todas as diferentes direções de incidência do vento, em duas formulações diferentes. Implementou-se primeiramente a formulação IMS. Funções polinomiais de 4ª ordem são utilizadas para interpolar os coeficientes.

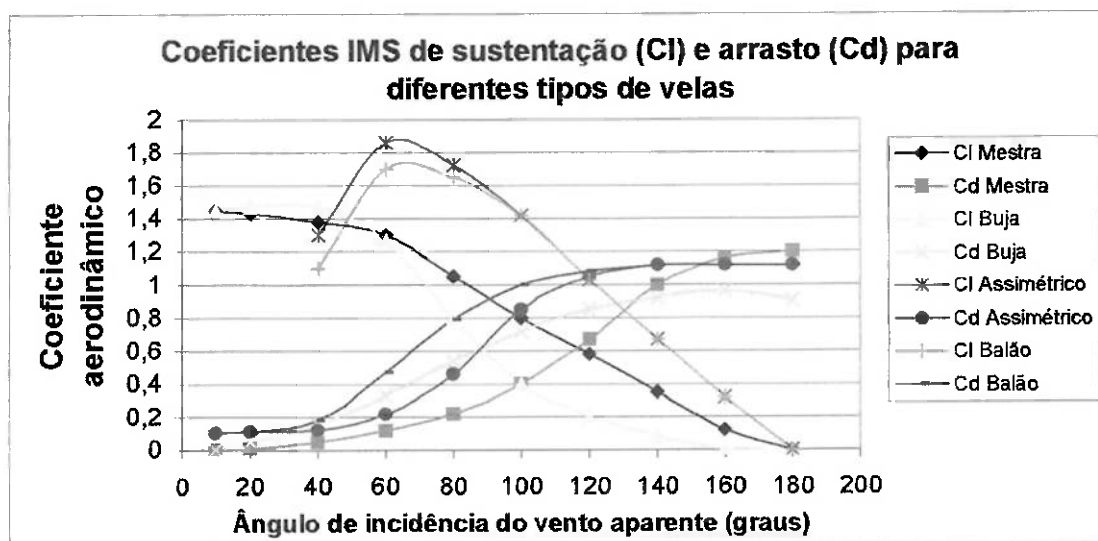


Figura 4.1.1 – Coeficientes aerodinâmicos das velas segundo regra IMS

No cálculo das forças deve ser utilizada a intensidade e a direção do vento atuante sobre a embarcação, denominado vento aparente. Este é definido pela soma vetorial do vento real, ou seja, direção e intensidade do vento presente no local considerado, e o vento gerado pelo movimento da embarcação, igual à velocidade do barco, conforme ilustrado pela figura 4.1.2.

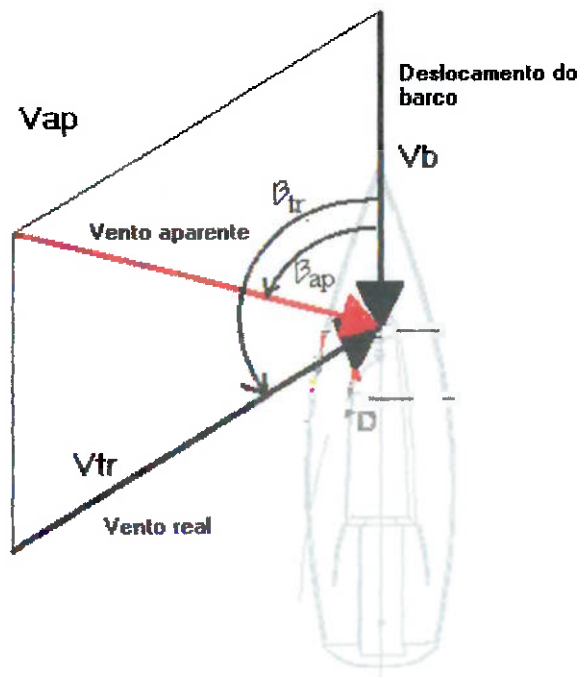


Figura 4.1.2 – Composição do vento aparente

Formulação utilizada no modelo:

$$F_s = \frac{\rho A_n C_{l_{ta}} V_{ap}^2}{2},$$

$$F_a = \frac{\rho A_n C_{d_{ta}} V_{ap}^2}{2},$$

$$F_p = F_s \sin(\beta_{ap}) - F_a \cos(\beta_{ap}),$$

$$F_l = F_s \cos(\beta_{ap}) + F_a \sin(\beta_{ap}),$$

onde  $\rho$  é densidade do ar,  $A_n$  é a área vélica total,  $C_{l_{ta}}$  e  $C_{d_{ta}}$  são os coeficientes aerodinâmicos das velas armadas, ponderados pelas suas áreas.  $\beta_{ap}$  é o ângulo de incidência do vento aparente, e  $V_{ap}$  é a sua intensidade.  $F_s$  é a força de sustentação,  $F_a$  é a força de arrasto,  $F_p$  é a projeção destas últimas no sentido do movimento do barco, sendo a responsável pela propulsão e  $F_l$  é a projeção lateral. Estas forças devem ser multiplicadas pelo vetor ligando o ponto de aplicação destas resultantes e um determinado pólo, fornecendo momentos nas três direções do barco.



## 4.2 Modelo hidrodinâmico

O casco, leme e quilha, constituintes do sistema hidrodinâmico, por sua vez, geram força de arrasto devido ao movimento de avanço. Em reação as forças laterais geradas pelo velame, o casco deriva (movimenta-se lateralmente) gerando uma parcela lateral de fluxo de água que define o ângulo de ataque dos fôlios (quilha e leme) e do casco que passam a gerar sustentação e conseqüentemente arrasto devido à sustentação.

Num artigo mais profundo (Oossanem, 1993) estes fenômenos são tratados de forma completa, considerando e propondo formulações para interações entre casco e quilha, casco e leme, leme e superfície da água e quilha e leme, além da sustentação gerada pelo casco e seu ponto de atuação, permitindo o cálculo do centro de esforços hidrodinâmicos laterais por ponderação. Já a literatura mais didática (Larssons, 1994) trata apenas os fôlios como tendo comprimento finito, unidos a uma superfície plana.

Quanto a resistência ao avanço sofrida pelo casco, devido à complexidade do seu formato e do fato deste cortar a interface entre dois meios, não há disponível no momento modelos analíticos completos a respeito da resistência experimentada por estes corpos. Em substituição, diferentes modelos de base empírica são utilizados.

Primeiramente é calculada a resistência friccional do casco, também chamada de resistência viscosa. Com base na sua área molhada, utiliza-se a formulação para atrito de escoamentos sobre placas planas com base no número de Reynolds igual ao comprimento de linha d'água ou, dependendo da formulação e do autor, 70% deste valor, visto que apenas uma linha de escoamento se estende pelo comprimento total do casco submerso, para tal, modelos distintos, porém similares são encontrados na literatura, oriundos da mecânica dos fluidos tradicional.

Formulação de resistência viscosa:

$$R_n = \frac{V_b L_{\text{long}}}{\nu};$$
$$C_{fv} = \frac{0,075}{(\log(R_n) - 2)^2};$$
$$R_v = \frac{1}{2} \rho_a V_b^2 C_{fv} A_m;$$

onde  $\rho_a$  é densidade da água,  $C_{fv}$  é o coeficiente de atrito viscoso,  $R_n$  é o número de Raynolds baseado no comprimento longitudinal,  $L_{\text{long}}$ , do casco, quilha ou leme,  $A_m$  é a área molhada em questão e  $V_b$  é a velocidade do barco.

Sabe-se, porém, que existe um acréscimo nesta força devido ao fato do casco ser uma forma tri-dimensional diferente da placa plana, porém este acréscimo, assim como outras formas de resistência, dependentes do formato do casco são agrupadas em único grupo, chamado de resistência residual.

Esta divisão é utilizada na série sistemática de veleiros da Delft University of Technology, [Gerritsma], que realiza experimentos com modelos de casco com variações sistematizadas e periodicamente publica os resultados, incrementando o número de dados a partir de desenhos contemporâneos.

A principal componente deste grupo, resistência residual, é causada pela onda gerada pela proa da embarcação. A amplitude e o comprimento desta onda aumentam conforme aumenta a velocidade do veleiro.

Quando o comprimento da onda gerada se aproxima do comprimento da linha d'água do casco, ocorre um grande aumento na resistência. A igualdade entre estes comprimentos define uma relação conhecida como "velocidade de casco", ou seja, a máxima velocidade que um casco deslocante como um veleiro de oceano pode atingir

em condições normais. Esta velocidade só é superada graças a uma fonte extra de força de propulsão, como uma forte rajada ou onda vinda pela popa.

A relação entre a “velocidade de casco” e o seu comprimento é dada pelo número de Froude igual a 0,45. Dado por:

$$F_n = \frac{V_b}{\sqrt{g \text{ LWL}}} ;$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\text{LWL}$  é o comprimento de linha d'água do casco. Ou seja:

$$V_{\text{casco}} \cong 1,25 \sqrt{\text{LWL}}$$

Atualmente, veleiros de desenhos avançados e construídos com materiais leves são capazes de ultrapassar esta velocidade com grande frequência, a série da Delft University of Technology passou então a incluir uma formulação complementar para estas velocidades superiores à “velocidade de casco”.

Por este modelo, a força é dada proporcional ao peso da embarcação, e depende dos seguintes fatores:

$C_p$  – coeficiente prismático do casco

#### **LCB – CENTRO LONGITUDINAL DE FLUTUAÇÃO**

$B_{wl}/T_{cb}$  - razão boca/calado (largura/profundidade)

$L_{cb}/\nabla^{1/3}$  - razão comprimento/volume de deslocamento

$A_{wp}/\nabla^{2/3}$  - razão área plano de linha d'água/volume de deslocamento

São considerados também estes fatores elevados à segunda potência e o produto entre estes fatores, multiplicados por coeficientes tabelados para cada número de Froude. Interpolação linear é indicada para a obtenção dos coeficientes para valores intermediários de  $F_n$ .

Formulação válida para velocidades correspondentes a faixa 0,125 a 0,45 do número de Froude:

$$R_r = (\Delta g)(a_0 + a_1 C_p + a_2 LCB + a_3 (B_{wl}/T_{cb}) + \\ + a_4 L_{cb}/\nabla^{1/3} + a_5 C_p^2 + a_6 C_p L_{cb}/\nabla^{1/3} + a_7 LCB^2 + \\ + a_8 (L_{cb}/\nabla^{1/3})^2 + a_9 (L_{cb}/\nabla^{1/3})^3$$

Formulação válida para velocidades correspondentes a faixa 0,475 a 0,75 do número de Froude:

$$R_r = (\Delta g)(c_0 + c_1 L_{cb}/B_{wl} + c_2 A_{wp}/\nabla^{2/3} + c_3 L_{cb} + \\ + c_4 (L_{cb}/B_{wl})^2 + c_5 (L_{cb}/B_{wl})(A_{wp}/\nabla^{2/3})^3$$

O casco, quando sob ângulo de deriva diferente de zero, também gera sustentação, e conseqüentemente resistência induzida por esta sustentação, denominada somente por resistência induzida. Esta relação é dada por fórmula empírica baseada em testes em modelos proposta por Oossanem. Formulação para a força lateral gerada para o casco:

$$F_{lcb} = \frac{1}{2} \rho_a V_b^2 \left( \frac{1}{2} \pi T_{cb}^2 + 1.8 A_{Lcb} \beta \cos(\phi) \right) \beta \cos(\phi);$$

onde  $A_{lcb}$  é a área lateral do casco,  $\beta$  é o ângulo de deriva e  $\phi$  é o ângulo de adernamento.

Oossanem propõe inclusive uma formulação para a resistência induzida do casco:

$$AR_{ecb} = 2 T_{cb} / (0.75 LWL),$$

$$TR_{cb} = 0.3,$$

$$ffact_{cb} = 1 + (0.012 - 0.057 TR_{cb} + 0.095 TR_{cb}^2 - 0.04 TR_{cb}^3) AR_{ecb},$$

$$R_{lcb} = (F_{lcb} / \cos(\phi))^2 ffact_{cb} / (0.5 \rho_a V_b^2 AL_{cb} \pi AR_{ecb}),$$

Os apêndices, como são chamados leme e quilha são tratados de forma similar, apresentando resistência viscosa, e para o caso de lemes que perfuram a superfície,

resistência de onda. Porém as forças importantes nestes corpos são as de sustentação e de arrasto induzido, que podem ser calculadas segundo a teoria de asas, visto que são fólios de grande razão de aspecto e geometria conhecida (series Naca), ao contrário do casco.

A seguinte formulação (Ossanem) é inicialmente utilizada:

$$F_{lap} = \frac{1}{2} \rho_a V_b^2 (Cl_{lin} \beta \cos(\phi) + Cl_q (\beta \cos(\phi))^2) A_{ap} \cos(\phi);$$

onde a força lateral do apêndice é dada em função do seu coeficiente de sustentação linear,  $Cl_{lin}$ , e o coeficiente de sustentação não linear,  $Cl_q$ , ambos obtidos pela geometria e posição dos apêndices, e sua área lateral,  $A_{ap}$ .

A resistência induzida, para estes componentes, é dada por:

$$AR_{eAp} = 2 \text{span}_{Ap} / mc_{Ap},$$

$$ffact_{Ap} = 1 + (0,012 - 0,057 TR_{ap} + 0,095 TR_{ap}^2 - 0,04 TR_{ap}^3) AR_{eAp},$$

$$R_{iAp} = (Fl_{ap} / \cos(\phi))^2 ffact_{Ap} / (0,5 \rho_a V_b^2 A_{ap} \pi AR_{eAp}),$$

onde a resistência induzida é proporcional à segunda potência da força lateral e a fatores geométricos como a razão de aspecto do apêndice,  $AR_{eAp}$ ; comprimento,  $\text{span}_{Ap}$  e largura média,  $mc_{Ap}$ .

### 4.3 Modelo de estabilidade

Os momentos gerados por esses sistemas mudam a atitude do veleiro, por exemplo, seu ângulo de adernamento, até que mudanças no centro de flutuação e no centro de gravidade, bem como mudanças nos pontos de aplicação das forças, gerem momentos restauradores em todas as direções.

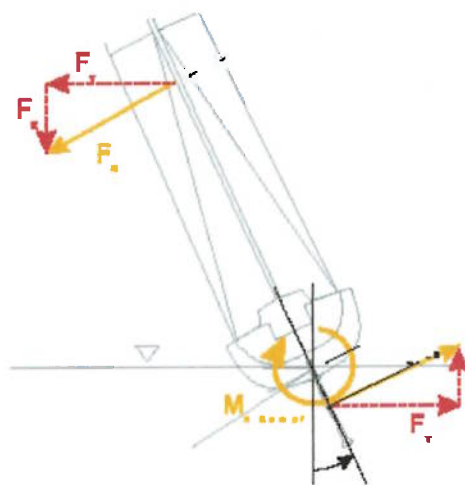


Figura 4.3.1 – Composição do momento de adernamento – binário entre forças laterais aerodinâmicas e forças laterais hidrodinâmicas.

Os momentos restituíntes são calculados a partir de equações aproximadoras, [Oossanem]; [Larssons], para o caso em que não se possui um desenho de casco, ou seja, no desenvolvimento do projeto, pois este utiliza a posição do centro de flutuação que se move de acordo com a atitude do veleiro. Para cascos já conhecidos, relações entre a posição do centro de flutuação em função do ângulo de adernamento podem ser utilizadas diretamente, possibilitando o levantamento de curvas de estabilidade, como a da figura 4.3.2.

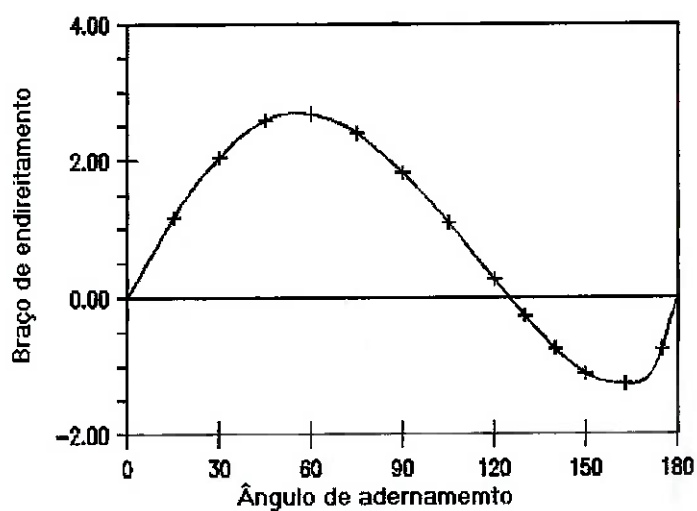


Figura 4.3.2 – Curva de estabilidade típica.

A estabilidade relativa à resistência ao adernamento, fundamental para a segurança e desempenho dos veleiros, depende diretamente do distanciamento entre o centro de gravidade e o centro de flutuação. A inclinação pode inclusive ser intencional para velocidades baixas, onde o adernamento melhora a performance.

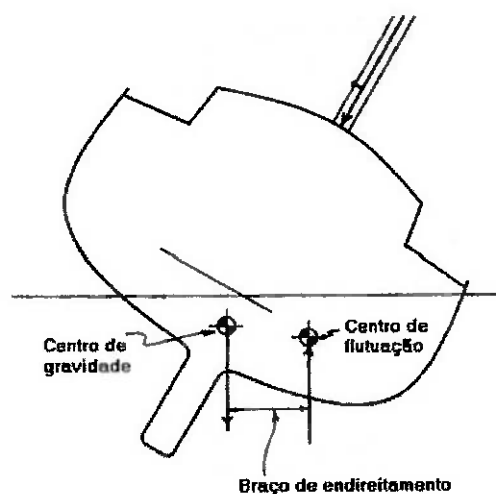


Figura 4.3.3 – Distanciamento entre os centros de flutuação e de gravidade devido ao adernamento do veleiro.

A favor da estabilidade estão recursos como quilhas pivotantes e lastros d'água móveis. O primeiro recurso promove o deslocamento angular da quilha apenas como forma de gerar o momento restituinte, sem que seja necessário o adernamento do veleiro para o surgimento destas forças. Os lastros d'água móveis funcionam de forma similar, posicionando grande quantidade de massa na borda da embarcação incrementando a estabilidade.

#### 4.4 Método de otimização

O método de otimização envolve a análise de sistemas e a síntese de um novo sistema com propriedades desejadas. Ou seja, o algoritmo de otimização não apenas

permite estudar e avaliar um sistema como também fornece sistematicamente novas configurações para estes sistemas, de forma independente do analista.

De qualquer forma, trabalhar em conjunto com um algoritmo de análise é fundamental pois ele vai certificar se a solução proposta pelo algoritmo é realmente melhor ou não.

Na formulação de um problema de otimização estão presentes os seguintes conceitos: variáveis de projeto, função objetivo e restrições. Essencialmente, as variáveis de projeto são os parâmetros do problema que podem ser alterados para otimizar o sistema. Por exemplo, no caso de um veleiro podem representar as dimensões da mastreação ou a posição angular de uma quilha pivotante. Estas variáveis, neste exemplo são claramente variáveis contínuas, enquanto que podem haver variáveis discretas ou descontinuidades como o tipo de terminação da quilha ou total de área vélica no momento em que é erguida uma vela adicional, respectivamente.

Problemas de otimização que envolvem variáveis discretas são em geral algoritmos complexos e os problemas são de difícil solução. Nestes casos é possível tratar tais variáveis como contínuas, apesar de este artifício matemático ter seu uso limitado quando há problemas de restrições, principalmente entre valores discretos muito distantes.

A função objetivo deve quantificar o que queremos otimizar e será função das variáveis de projeto escolhidas. Esta função pode ainda representar mais de um critério objetivado, quando é chamada de função multiobjetivo. Neste caso principalmente, mas também fundamental na função simples, a formulação adequada da função objetivo é determinante no sucesso da otimização. Muitas dificuldades são encontradas nesta etapa e serão discutidas adiante nos resultados.

As variáveis de projeto obviamente possuem limitações, e mesmo a relação entre essas variáveis podem constituir uma restrição, como a razão entre duas destas variáveis ou sua soma. Deve-se evitar, na medida do possível, um grande número de



restrições no problema, pois isso encarece consideravelmente o custo computacional da otimização.

Um problema de otimização é dito linear se a função objetivo e suas restrições são lineares, caso contrário, o problema de otimização é não-linear. Se o problema de otimização é linear, pode ser resolvido com o método denominado programação linear.

Neste caso o problema é não-linear devido à própria natureza dos fenômenos aerodinâmicos e hidrodinâmicos, dependentes do quadrado da velocidade do fluido e devido às relações trigonométricas entre forças e momentos.

A rotina de otimização, através de derivadas parciais calculadas numericamente, determina uma direção na qual deve seguir alterando as variáveis de projeto a fim de minimizar (ou maximizar) a função objetivo. Esta direção é limitada pelas restrições, que uma vez atingidas, obrigam o deslocamento destas variáveis a prosseguir de forma paralela à restrição.

O conceito de mínimo local e mínimo global deve ser entendido pois pode explicar resultados inesperados. O mínimo local aparece numa cavidade onde ao seu redor configurações piores são encontradas, porém a uma distância maior pode ser encontrado o resultado esperado. Essa situação é comum em muitos problemas de otimização, fazendo com que os algoritmos estacionem no mínimo local. A confirmação se o mínimo encontrado é global não é possível ou muito difícil para a maioria dos problemas. A adoção de valores iniciais diferentes para as variáveis de projeto é a forma de solucionar este problema ou verificar a validade de um resultado.

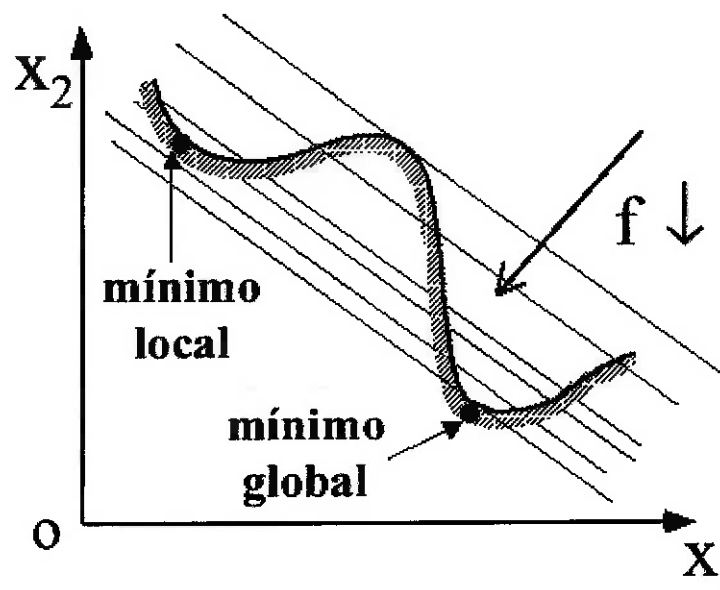


Figura 4.2.1 – Representação de mínimo global e local [Silva]

Devido ao grande número de métodos disponíveis, devem ser adotados critérios para a escolha do método numérico. Por este mesmo motivo foi possível e decidido por utilizar um software disponível (Rotina *Fmincon* do *MatLab*) a implementar um novo algoritmo. Este algoritmo trata problemas não lineares com restrições.

## 4.5 Definição dos problemas

Três problemas diferentes serão abordados: resolver o VPP por otimização, otimizar sistemas isolados juntamente com a solução do VPP e otimizar diversos sistemas do veleiro.

### 4.5.1 Solução do VPP

A solução do VPP por otimização significa procurar o conjunto de variáveis de posicionamento do veleiro que minimize a resultante das forças e momentos, encontrando assim o equilíbrio do barco para uma determinada condição (resultante nula). O VPP utiliza uma lista extensa de características do veleiro e deve buscar o

equilíbrio das forças citadas anteriormente com o propósito de estabelecer a atitude (ângulos de adernamento, de deriva e de leme) e a velocidade na qual o barco veleja numa determinada condição.

Toda a rotina é executada para todos os ângulos de incidência do vento e para diferentes intensidades do vento real, obtendo assim o desempenho do veleiro para diversas combinações de direção e intensidade de vento.

Neste caso, as variáveis de projeto são na verdade a posição assumida (inclinação ou adernamento do barco, ângulo do leme e ângulo de deriva) e a velocidade desenvolvida. As restrições, portanto, devem apenas censurar situações absurdas como velejar com ângulos de adernamento superiores a  $90^\circ$ , ou seja, com o mastro dentro d'água.

Caso esta situação ocorra, isto indica que algum limite foi ultrapassado (excesso de vento, de vela ou de velocidade são exemplos). Em outros problemas de otimização, espera-se que a solução esteja na intersecção de duas ou mais restrições, situação esperada por ocasião da otimização da geometria e da regulagem do veleiro, objetivo final deste trabalho.

#### **4.5.2 Otimizações isoladas**

A mastreação, o casco e a estabilidade são o alvo desta otimização e serão tratados separadamente. As dimensões do velame e do casco são incluídos como variáveis de projeto na otimização para a resolução do VPP, juntamente com as variáveis de posicionamento do veleiro. São encontradas configurações ótimas para cada direção e intensidade de vento.

A resposta obtida nestas otimizações, da mesma forma que acontece no VPP, informa a configuração ótima para diversas combinações de direção e intensidade de vento. Estas informações fornecem as decisões de comando de dispositivos como enroladores de vela da proa e da vela mestra dada pela a otimização do velame, comando dos lastros d'água móveis na direção longitudinal para alteração do centro

longitudinal de flutuação dada pela otimização do casco e comando da quilha pivotante e lastro d'água móvel na direção transversal dada pela otimização da estabilidade.

Como visto, este problema possui em sua otimização dois objetivos distintos, minimizar a resultante das forças e maximizar a velocidade do barco, equivalente a minimizar o inverso da velocidade. Faz-se necessária a criação de uma Função Multiobjetivo para execução do algoritmo.

#### **4.5.3 Otimizações conjuntas**

Nesta parte do trabalho deseja-se determinar apenas uma configuração do barco para uma faixa de condições, incluindo na otimização os parâmetros de diferentes sistemas do veleiro. A solução do  $V_{pp}$  é feita separadamente, sendo utilizada somente como ferramenta de avaliação do veleiro sugerido.

A ponderação utilizada na obtenção de uma configuração ótima é realizada pela simulação de uma regata, onde a faixa de ventos esperada é dividida em três intervalos e atua sobre cada volta da regata (três voltas no total) Neste caso a otimização busca minimizar o tempo total de regata.

Uma vez que o propósito é comparar o veleiro otimizado ao original, uma regata é o cenário ideal, e por isso é utilizada neste trabalho. Porém, este formato de otimização é equivalente para outras situações como travessias oceânicas onde são esperadas intensidades e direções diferentes em frações diferentes da travessia.

### **5. RESULTADOS**

Este capítulo contém os resultados do modelo de forças e momentos implementado, apresentando curvas de comportamento para forças específicas em relação a diferentes situações esperadas.

A partir destas curvas é possível entender os resultados também apresentados para o programa de predição de velocidades, *VPP*, como a limitação da velocidade do barco e perdas de desempenho em ventos de grande intensidade graças à resistência induzida do casco e dos apêndices.

Novas curvas polares de velocidades obtidas para as novas configurações do veleiro otimizado também são apresentadas e comparadas com as curvas do veleiro original. Foram otimizadas as características do casco e as dimensões da mastreação separadamente e obtidas configurações ótimas diferentes para cada direções e intensidades do vento real distintas.

Uma nova série de otimização é realizada para o caso específico de regatas, abrangendo uma faixa restrita de velocidades de vento real e apenas duas direções de vento real, contravento e vento de popa. Neste caso, as características do velame e do casco são otimizadas em conjunto e apenas uma configuração do veleiro é obtida para esta faixa.

## 5.1 Modelo de forças

O modelo analítico foi implementado através do programa MatLab, dividido em funções específicas para cada grupo de forças: aerodinâmicas, resistência residual, resistência viscosa, sustentação hidrodinâmica, resistência induzida e momentos de estabilidade.

No teste destas funções e na solução do VPP, utilizou-se as dimensões do veleiro Flash165. Nas rotinas de otimização, veleiros otimizados são propostos baseados neste modelo, citado como veleiro original quando da comparação entre suas características.

Todas as dimensões e características são conhecidas para este veleiro, o que motivou a sua escolha. Suas dimensões básicas são:

Comprimento = 5,0 m  
 Largura (boca) = 2,1 m  
 Profundidade (calado) = 1,35 m  
 Massa total máxima = 500 Kg  
 Área vélica = 16,5 m<sup>2</sup>

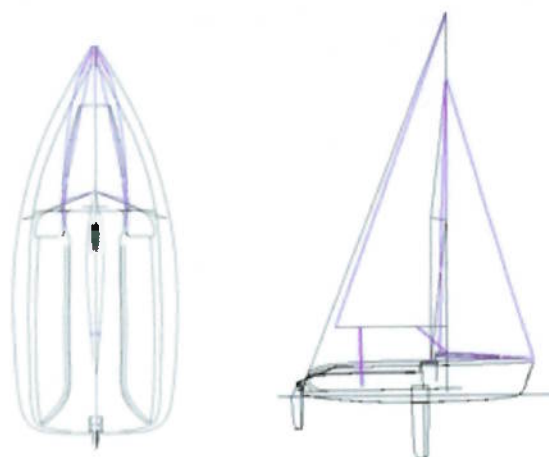


Figura 5.1.1 - Convés e plano vélico do Flash165

A função contendo as forças aerodinâmicas foi implementada utilizando os coeficientes da regra IMS, somente para a vela mestra e a vela de proa (bujá). Os comportamentos das forças de propulsão e da força laterais são expostos na figura 5.1.2 para diferentes ângulos de incidência do vento aparente com intensidade de 4 m/s aproximadamente 8 nós.

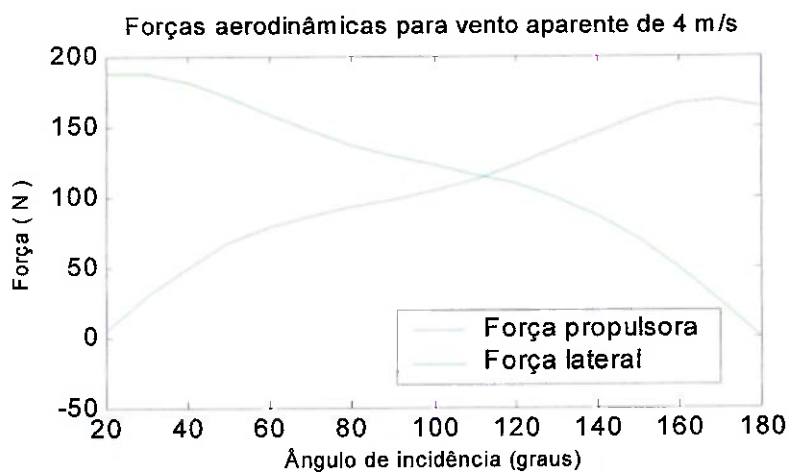


Figura 5.1.2 – Comportamento das forças aerodinâmicas

A resistência viscosa é calculada para todas as superfícies molhadas do veleiro, incluindo neste caso o casco, leme e bolina (quilha sem lastro). Esta forma de resistência,

como pode ser visto na figura 5.1.3, cresce proporcional ao quadrado da velocidade do barco, representada pelo número de Froude no gráfico.

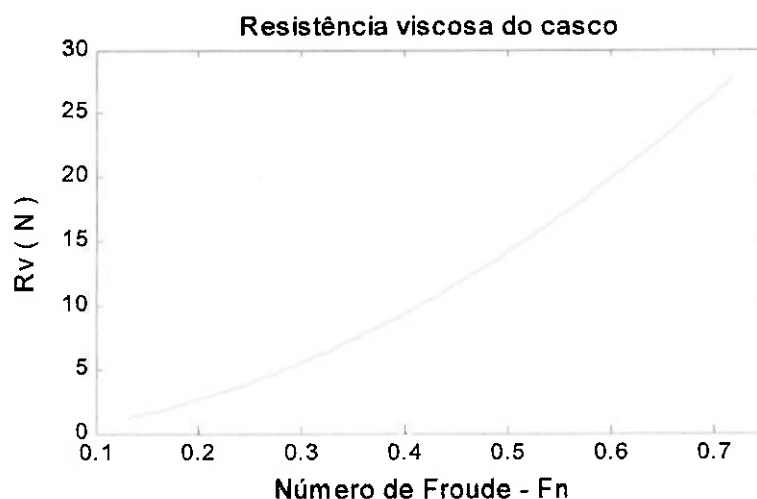


Figura 5.1.3 – Resistência viscosa do casco e apêndices hidrodinâmicos.

Ao contrário da resistência viscosa, a resistência residual cresce aproximadamente com a quarta potência da velocidade do barco. Na figura 5.1.4 pode-se observar claramente o aumento acentuado da resistência próximo ao número de Froude de 0,45.

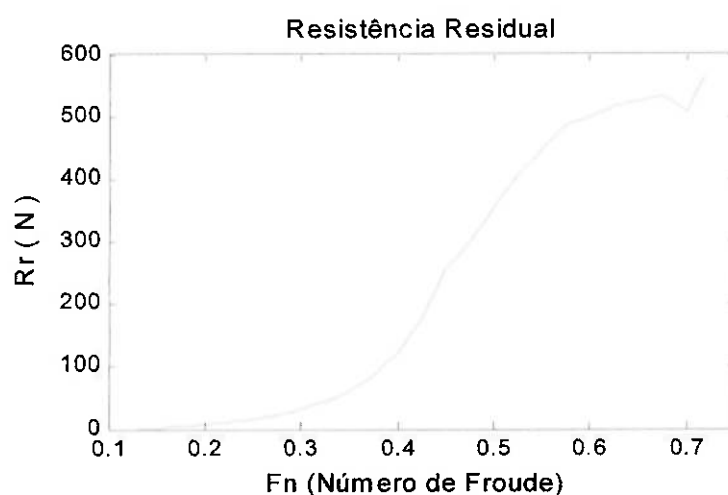


Figura 5.1.4 – Resistência residual para a região de deslocamento ( $F_n < 0,45$ ) e para a região de planeio ( $F_n > 0,45$ ).

A resistência residual mostra-se predominante para velocidades elevadas. Em baixas velocidades, a resistência viscosa, proporcional à área molhada, representa grande parte da resistência total. Neste caso, o adernamento da embarcação pode ser proposital, pois nesta condição a área molhada é reduzida, principalmente para embarcações proporcionalmente mais largas.

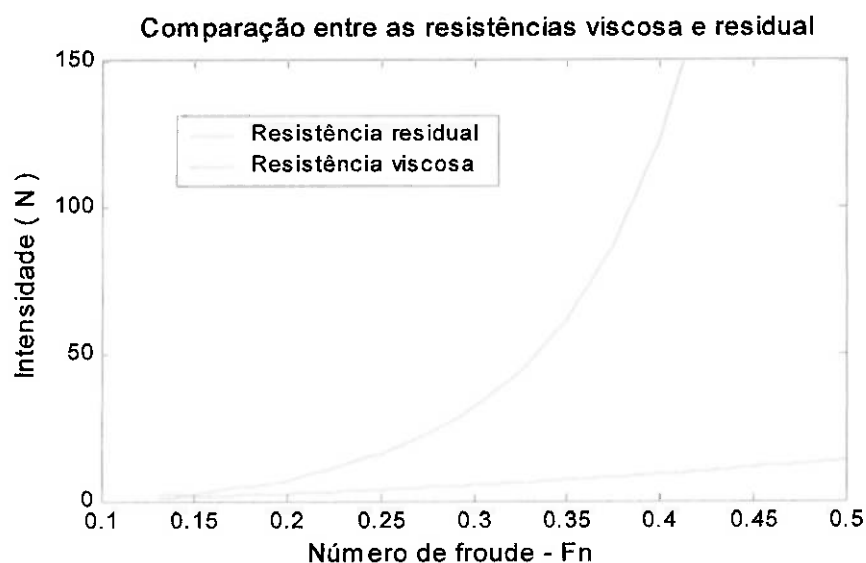


Figura 5.1.5 – Predominância da resistência residual sobre a resistência viscosa em velocidades elevadas

A força lateral hidrodinâmica total é apresentada na figura 5.1.6 para a velocidade do barco de 2m/s (4 nós), composta pela sustentação do casco, bolina e leme, este último alinhado com a linha de centro da embarcação. O arrasto induzido pela sustentação, proporcional ao quadrado da sustentação, só é considerável para ângulos de ataque grandes, que só ocorrem no leme durante manobras. Para os ângulos normais de deriva, usualmente menores que 5 graus, os apêndices mostram-se muito eficientes quanto à relação sustentação/arrasto.



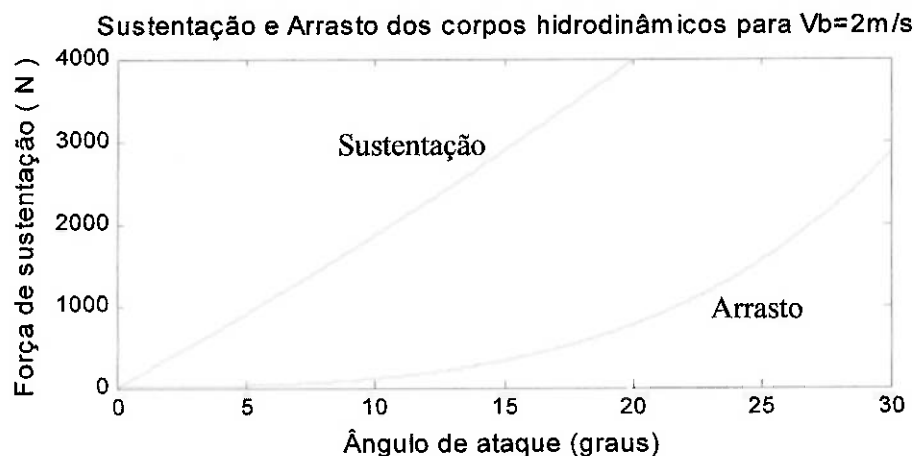


Figura 5.1.6 – Alta eficiência dos apêndices hidrodinâmicos para pequenos ângulos de deriva

A curva de estabilidade para este veleiro é apresentada na figura 5.1.7, para o caso dos três tripulantes fazerem escora, ou seja, contra-peso, sentados na borda e para o casco apenas, sem tripulantes. A ação da tripulação é responsável por tornar o momento de endireitamento não nulo para ângulo de adernamento nulo.

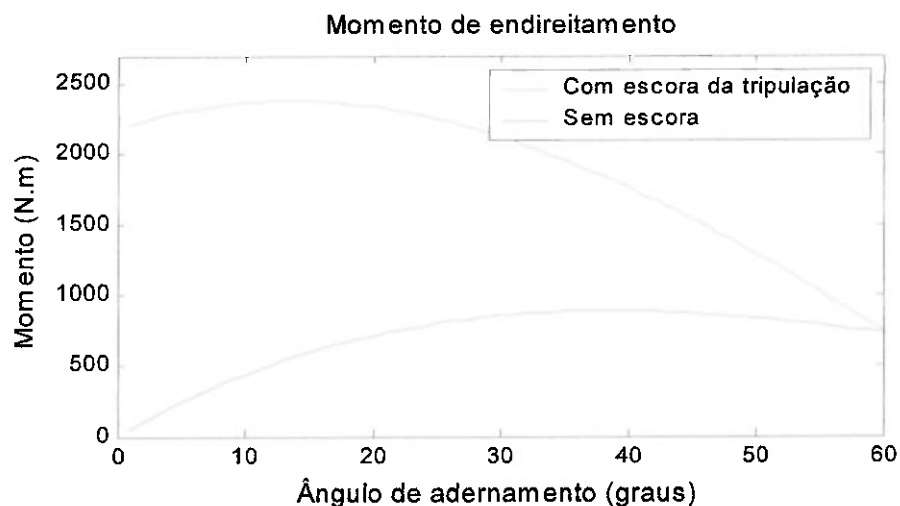


Figura 5.1.7 Curva de estabilidade para o veleiro Flash165.

Fica evidente, para veleiros de pequeno porte, a importância da posição da tripulação, responsável por 40% do peso da embarcação, na estabilidade e performance do veleiro. Mesmo para embarcações maiores, o posicionamento da tripulação continua a desempenhar um papel importante na estabilidade, devendo, assim como os outros parâmetros, ser otimizado.

## 5.2 Programa de predição de velocidade - *VPP*

Inicialmente, o VPP foi programado a fim de resolver somente o equilíbrio das forças longitudinais, ou seja, propulsão aerodinâmica e arrasto hidrodinâmico. Uma vez que as forças laterais não são consideradas, não há ângulo de deriva e, portanto, sustentação gerada pelos apêndices hidrodinâmicos. Isto faz com que a resistência ao avanço se resuma à resistência residual e à resistência viscosa, não havendo resistência induzida.

A velocidade do barco é a única variável de projeto, ainda sim o problema é altamente não linear. As resistências em questão são proporcionais à segunda e à quarta potência da velocidade. A própria força propulsora é dependente do quadrado da intensidade do vento aparente, este último composto pelo vento real e pela velocidade do barco. Utilizam-se, desde já, portanto, ferramentas de otimização não linear com restrições.

A figura 5.2.1 contém os resultados para velocidades de vento real ( $V_{tr}$ ) iguais a 3, 6 e 9 m/s, 6, 12 e 18 nós respectivamente, pode-se perceber que para ângulos menores que  $30^\circ$  a velocidade cai rapidamente. As maiores velocidades são obtidas para ângulos de vento real entre  $70^\circ$  e  $90^\circ$ , devido à composição do vento aparente, que tem seu módulo aumentado.

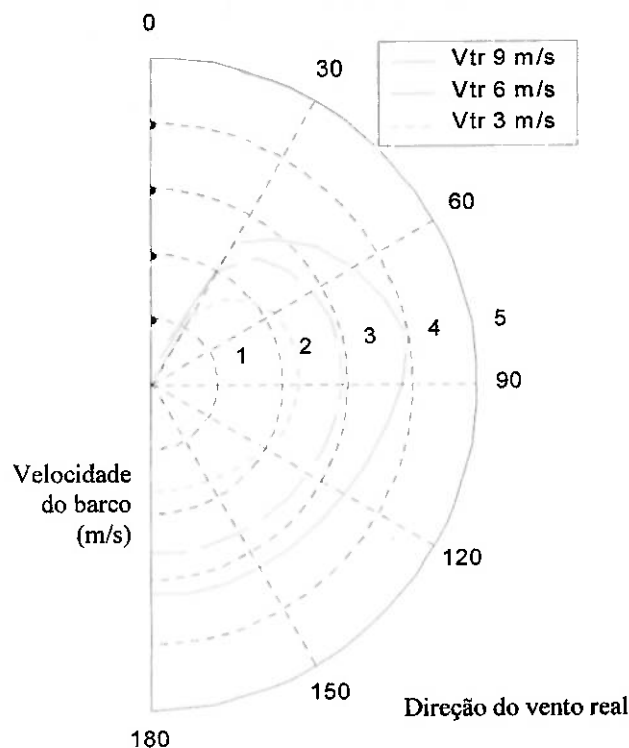


Figura 5.2.1 – VPP para o Flash165 considerando somente forças longitudinais.

Quando as forças laterais são adicionadas, é necessário determinar o ângulo de deriva e o ângulo de atuação do leme que anulem as forças e momentos causados pela força lateral aerodinâmica na direção vertical. Esta parte da otimização mostrou bons resultados quando inserida dentro da otimização principal de forças longitudinais. A solução simultânea dos dois sistemas por otimização gerou problemas de convergência. O peso de cada eixo na minimização altera a sequência de iteração e não foi possível estabelecer, por tentativa e erro, a ponderação que leva a convergência correta.

O mesmo ocorre para a definição do ângulo de adernamento, este problema também foi otimizado dentro da solução das forças longitudinais. O ângulo de adernamento e a posição lateral da tripulação são otimizados de forma a minimizar a resultante do momento de adernamento e o próprio ângulo de adernamento, pois inúmeros pontos de equilíbrio são possíveis.

Os resultados para o VPP considerando todas as forças e momentos é apresentado na figura 5.2.2. A solução deste gráfico completo tomou apenas uma fração de hora para ser

realizada, este baixo custo computacional obtido até este estágio de desenvolvimento permite a adição de diversos outros parâmetros sem comprometer a funcionalidade do método.

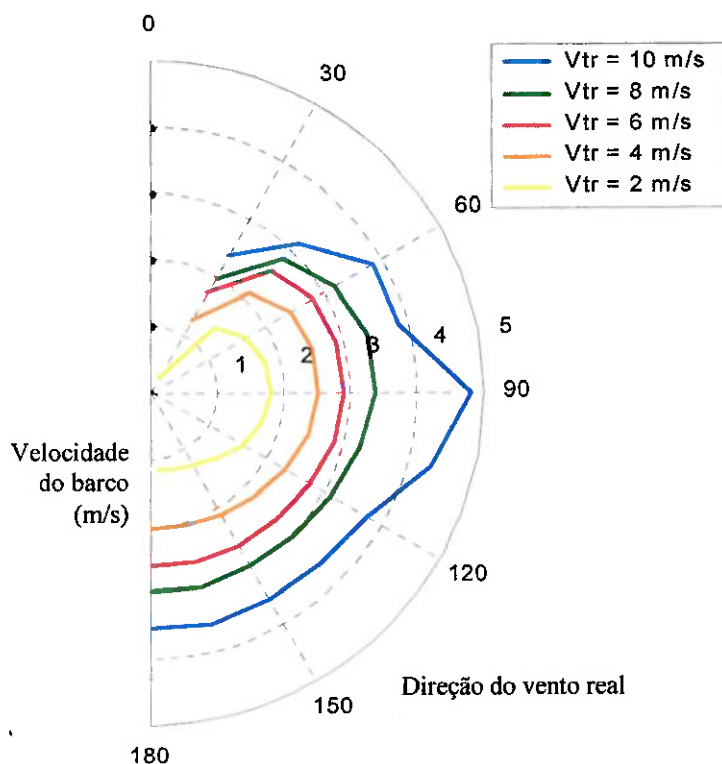


Figura 5.2.2 – Gráfico polar de velocidades para o veleiro Flash165 considerando forças longitudinais e laterais inclusive seus momentos.

A curva para a intensidade de vento real de 10m/s, ou seja, 20nós, apresenta distorções para pequenos ângulos (contra-vento) até  $90^{\circ}$ . Analisando o comportamento do valor da função objetivo utilizada na otimização do ângulo de adernamento, figura 5.2.3, pode-se notar que esta não é nula para ângulos inferiores a  $90^{\circ}$ , indicando que não foi possível anular o momento de adernamento pelo momento de endireitamento obtido através da atitude do barco e posicionamento da tripulação.

Esse resultado está dentro do esperado, pois veleiros deste porte não costumam suportar ventos de 20 nós (10 m/s) como calculado. Outras regulagens, como achatamento das velas ou diminuição destas (rizo) devem ser inseridas na otimização a fim de anular esta discrepância.

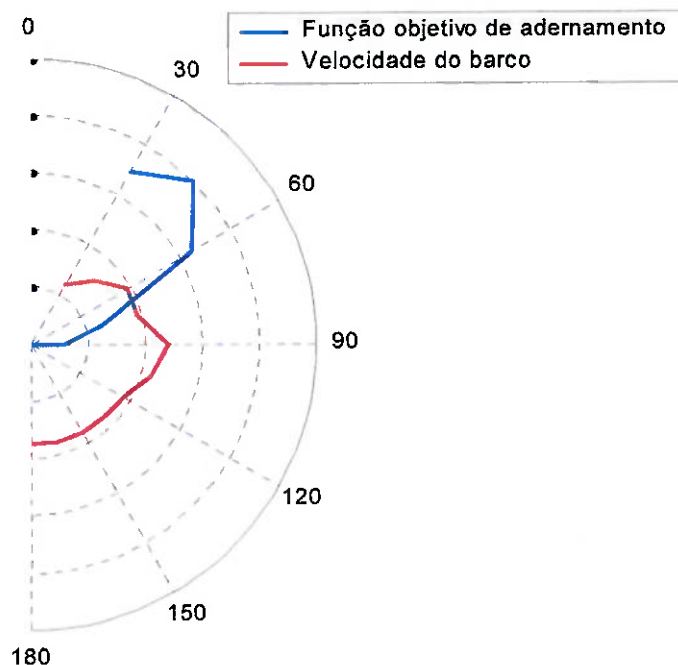


Figura 5.2.3 – Região distorcida do gráfico de velocidade coincide com a região não nula da função objetivo.

Um novo gráfico polar de velocidade é obtido quando incluído no algoritmo a sub-rotina de alívio das velas e diminuição da área vélica da vela mestra. A diminuição da vela, conhecida como rizo, funciona de forma discreta. Existem forras de rizo que manterão por exemplo 80% ou 50% da altura da vela, 64% ou 25% da área da vela exposta respectivamente. Isto pode fazer com que mesmo em ventos mais fortes o barco possua velocidade menor. A figura 5.2.4 apresenta o gráfico polar de velocidade para as mesmas 5 velocidades de vento real.

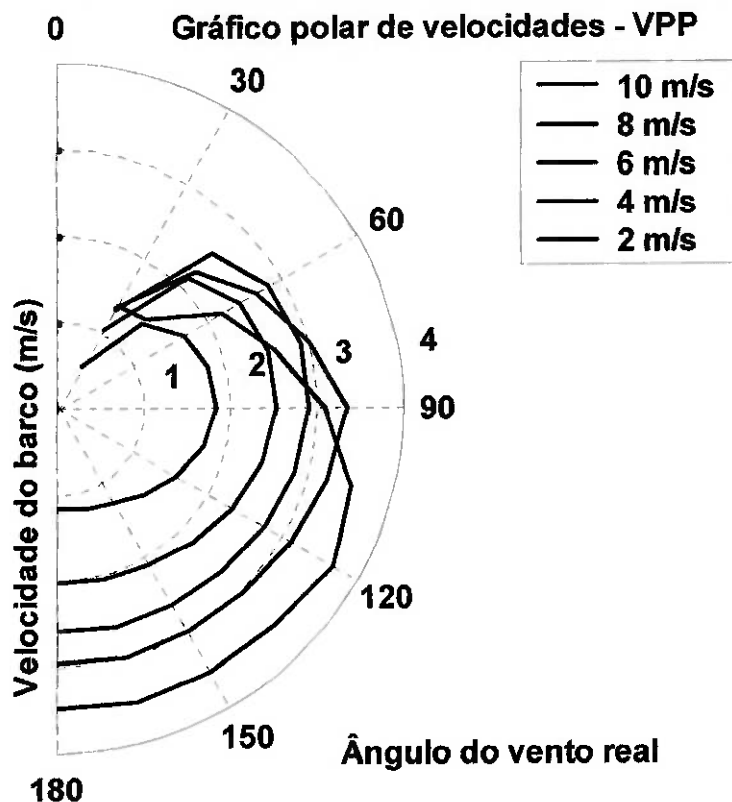


Figura 5.2.4 – VPP resolvido para todas as forças com algoritmo de alívio de velas.

O algoritmo de determinação do alívio (conhecido como *flat*) e diminuição da vela (sistema de rizo) resolvido de forma analítica, substituiu o algoritmo interno de otimização. Este algoritmo realimenta o cálculo das forças aerodinâmicas e checa novamente se o momento de adernamento está sendo anulado pela atitude do barco e posicionamento da tripulação.

Apesar do problema ter se tornado mais complexo, o custo computacional foi reduzido, isto fez com que a solução do equilíbrio das forças laterais, incluindo ângulo de deriva e do leme também fosse obtida por um algoritmo direto.

A seguir é esquematizado o processo de otimização para a solução do VPP, a sequência apresentada deve ser resolvida para todas as combinação de intensidade e direção de vento real desejadas no gráfico polar de velocidades. A resultante das forças longitudinais utilizada na função objetivo é elevada ao quadrado como forma de obtenção da função módulo, com a função e suas derivadas contínuas.

## Solução do Vpp

Propósito da otimização: **Minimizar a resultante das forças longitudinais**

Função Objetivo:

Quadrado da resultante das forças longitudinais

$R_{lon}^2$

Variáveis otimizadas: **Vb** (velocidade do barco)

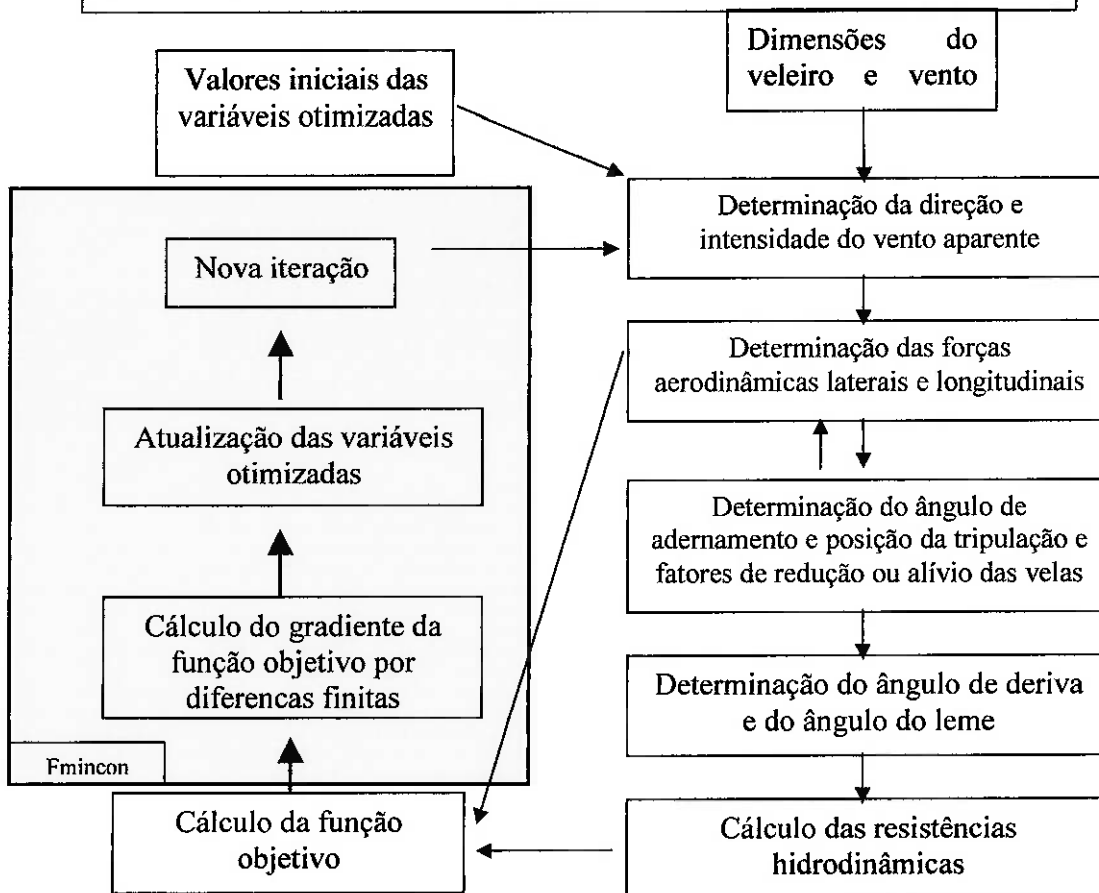
Restrições:

Limite Superior e Inferior  $0 \leq Vb \leq 4,7$

Algoritmo de otimização utilizado:

**Rotina Fmincon do software MatLab 6.5**

(minimização não-linear com restrições)



### **5.2.1 Determinação do valor inicial**

O algoritmo de otimização não linear empregado utiliza valores iniciais na sua busca por valores ótimos. Para a solução do VPP, na primeira situação de direção e intensidade do vento, utiliza-se um valor arbitrário e para as soluções seguintes é utilizado o valor obtido na iteração anterior, pois as condições são próximas e o valor esperado da velocidade do barco também se aproxima do resultado anterior.

No entanto alguns problemas de convergência são encontrados principalmente para baixas intensidades de vento. Nestes casos o algoritmo retorna velocidades próximas ao limite inferior pré-definido para a velocidade do barco (próximo de zero, porém não nulo para evitar problemas de divisão por zero).

Esta situação pode ser diretamente identificada e corrigida executando o algoritmo para novos valores iniciais arbitrários.

Outros problemas de convergência ocorrem quando os valores iniciais coincidem com os limites superiores ou inferiores das variáveis. Nas otimizações de alguns sistemas como o aerodinâmico por exemplo, espera-se que o resultado coincida com a restrição de limite superior na maioria das situações, ou seja, espera-se que a maior área vélica permitida gere a maior velocidade do barco na maior parte das situações. No entanto, nas situações em que essa premissa não é verdadeira, o algoritmo se restringe à restrição e não encontra outras soluções, havendo necessidade, portanto de fornecer valores iniciais sempre distintos dos limites superiores e inferiores.



### 5.3 Otimização da configuração dos veleiros

O VPP constitui a ferramenta necessária para avaliar o impacto de mudanças no desempenho do veleiro e portanto é a base para o algoritmo de otimização das características do veleiro. Dentre todas as dimensões e variáveis que definem o projeto completo do veleiro, muitas destas podem ser alteradas mesmo após a sua construção e nas construções mais recentes, podem ser alteradas durante a navegação e acionados sem a intervenção da tripulação.

São realizadas 4 séries de otimizações: Otimização do casco, do velame, do velame para regatas e do casco e velame simultânea para regatas. Os resultados obtidos são comparados ao desempenho do veleiro original e analisadas as alterações nas variáveis de otimização.

#### 5.3.1 Otimização dos parâmetros do casco

A resistência hidrodinâmica atuante sobre o veleiro, como explicado, possui diversas componentes. Duas destas componentes: a resistência residual e a resistência viscosa são governadas por um mesmo conjunto de dimensões e parâmetros do casco da embarcação.

As dimensões e parâmetros são:

$C_p$  – coeficiente prismático do casco

LCB – centro longitudinal de flutuação

$B_{wl}$  – Largura na linha d'água

$T_{cb}$  – Profundidade do casco

$L_{cb}$  - Comprimento de linha d'água

$\nabla$  - Volume de deslocamento

A partir destas dimensões, são obtidas outras como área molhada, valor determinante da resistência viscosa, e área do plano da linha d'água, fator importante na determinação da resistência residual em velocidades acima da velocidade de casco.

Com finalidade de otimizar o formato do casco apenas, algumas dimensões devem ser mantidas constantes como o deslocamento e o comprimento de linha d'água. As razões para isso são a alta dependência da velocidade do barco em relação ao seu deslocamento total e ao seu comprimento. A otimização deve buscar o veleiro mais rápido que possua o mesmo tamanho, neste caso não só o mesmo comprimento como também o mesmo deslocamento.

Portanto são otimizadas as seguintes dimensões: Coeficiente prismático, localização longitudinal do centro de flutuação, profundidade do casco (sem apêndices hidrodinâmicos) e largura na linha d'água.

O Coeficiente Prismático é o parâmetro que mede “o quanto cheio” é o casco (*fullness*). Este é definido pela divisão do volume de deslocamento do casco pelo volume obtido pela multiplicação da área da maior seção transversal pelo comprimento na linha d'água do casco.

Esta otimização está sujeita à, além de limites superiores e inferiores, a restrições não lineares que relacionam os parâmetros  $Bwl$  e  $Tcb$ . Estas restrições têm origem no modelo semi-empírico utilizado no cálculo da resistência residual cujo escopo não extrapola limites para a razão desde parâmetros.

A função objetivo neste caso é definida por:

$$R_{lon}^2 - 10 \cdot V_b^2$$

(subtração da resultante das forças longitudinais ao quadrado pela velocidade ao quadrado multiplicada por 10).

A multiplicação da velocidade por 10 evita anormalidades no algoritmo devido à diferença de grandeza entre os valores obtidos durante as iterações, ou seja, enquanto a resultante das forças não é nula. Neste caso o valor mínimo corresponde ao equilíbrio das forças (resultante nula) com a maior velocidade possível.

Trata-se, portanto, de uma função Multi-objetivo, em que as potências de dois possuem propósitos distintos, como visto, para a resistência longitudinal, a potência de dois funciona como a função módulo, porém com a própria função e suas derivadas contínuas.

Já para a velocidade do barco, além de melhorar a semelhança entre as grandezas das duas parcelas da soma, a potenciação torna semelhante a ponderação das duas funções objetivos, ou seja, as duas parcelas crescem com o quadrado dos valores estudados.

O processo de otimização é esquematizado para a otimização do casco. O algoritmo obedece ao mesmo fluxograma apresentado para a solução do Vpp, apenas alterando o vetor de entradas da rotina.

**Propósito da otimização: Minimizar a resultante das forças longitudinais e maximizar a velocidade do veleiro**

**Função Objetivo:**

$$R_{lon}^2 - 10 \cdot V_b^2$$

**Variáveis otimizadas:** Vb, Cp, Tcb,  
Bwl, LCB

**Restrições lineares:**

**Limites Superiores e Inferiores**

$$0 \leq V_b \leq 4,7 \quad 0,52 \leq C_p \leq 0,60 \quad 0,15 \leq T_{cb} \leq 0,22$$

$$1,50 \leq B_{wl} \leq 1,70 \quad -6\% \leq LCB \leq 0\%$$

**Restrições não lineares:**

$$2.46 < B_{wl}/T_{cb} < 19.32$$

As figuras abaixo apresentam os resultados da otimização para duas velocidades de vento real: 8m/s e 2 m/s comparadas com as curvas para o casco original, não otimizado. Nota-se que ganhos maiores são obtidos em velocidades de vento e conseqüentemente do barco, mais baixas.

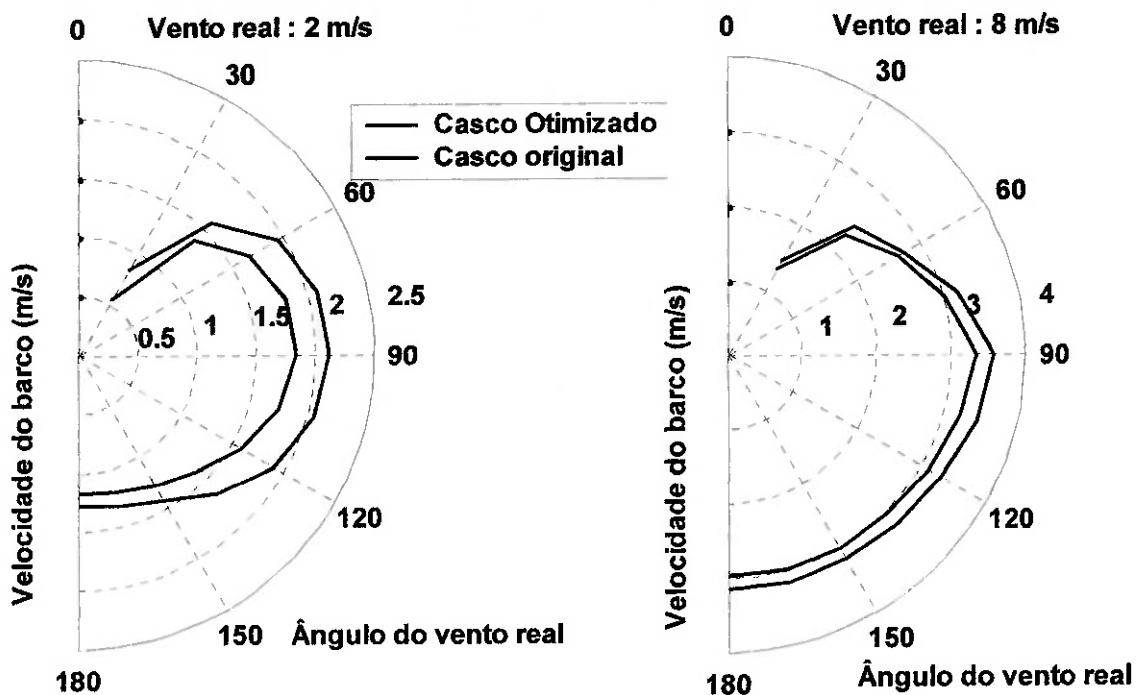


Figura 5.3.1.1 Gráfico de velocidades para intensidade do vento real de 8 m/s e 2 m/s para o casco original e para cascos otimizados

Os ganhos de velocidade abrangem todos os ângulos de incidência do vento real, existindo para cada uma destas direções um casco ótimo diferente. Na figura 5.3.1.2 pode-se observar o comportamento da variável de otimização LCB (centro longitudinal de flutuação). Nota-se que para baixas velocidades do barco, no caso vento real de 2 m/s ou contra vento com vento real de 8 m/s, os valores ótimos de LCB não estão sobre as restrições de limite superior e inferior para esta variável ( $-6 < LCB < 0$ ).

A posição do centro de flutuação coincide com a posição do centro de massa, que pode ser alterada pelo deslocamento de lastros móveis no interior da embarcação. Embarcações modernas já possuem sistemas integrados de lastros d'água comandados por bombas elétricas, o que permite alterar o fator predominante desta otimização durante a navegação.

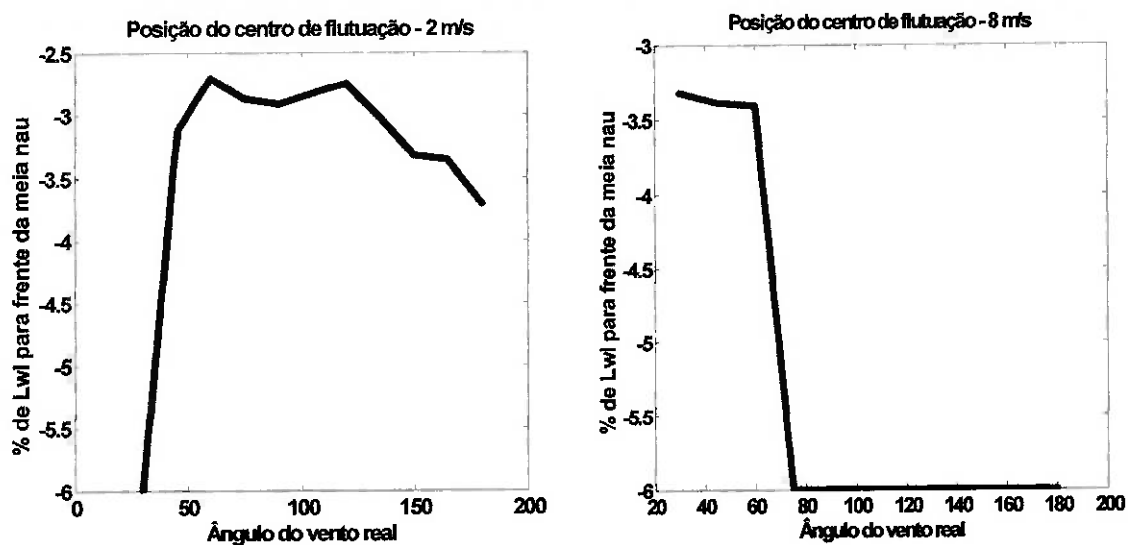


Figura 5.3.1.2 – Variação da posição longitudinal do centro de flutuação ótima.

Os demais parâmetros otimizados não apresentaram variação significativa em função do ângulo de incidência do vento ou da intensidade deste, ficando sobre uma das restrições (superior ou inferior).

### 5.3.2 Otimização das dimensões do mastro

O velame de uma embarcação utilizando apenas as velas mestra e buja é definido basicamente por 4 dimensões conhecidas por I, J, P e E. Estas são as bases e as alturas destas velas de formato triangular, sendo I a altura da vela buja e J sua base. A dimensão J corresponde à distância da extremidade da proa à base do mastro. Já para a vela mestra, P é a sua altura e E sua base.

A área vélica nominal neste caso é dada por:

$$A_v = (I \cdot J + P \cdot E) / 2$$

Assim como a área vélica total, outras características são definidas por estas dimensões com o centro de esforço aerodinâmico e conseqüentemente os momentos de adernamento e momento de "Yawl" que faz com que exista ângulo não nulo no leme afim de anulá-lo.

A otimização destes parâmetros só faz sentido para ventos fortes, quando a estabilidade da embarcação já não é capaz de suportar os esforços aerodinâmicos e ocorre elevação das resistências hidrodinâmicas. Em ventos fracos, o velame ótimo sempre será o maior velame permitido (restrição superior das variáveis de projeto).

Portanto, são apresentados os resultados para intensidades de vento real de 8 e 10 m/s, correspondendo a 16 e a 20 nós. Na figura 5.3.2.1 pode-se observar ganhos no desempenho para as condições de contra-vento. Para ventos de popa, onde não há problema de adernamento excessivo, não há ganhos de desempenho e o velame ótimo corresponde ao velame original e portanto ao limite superior destas variáveis.

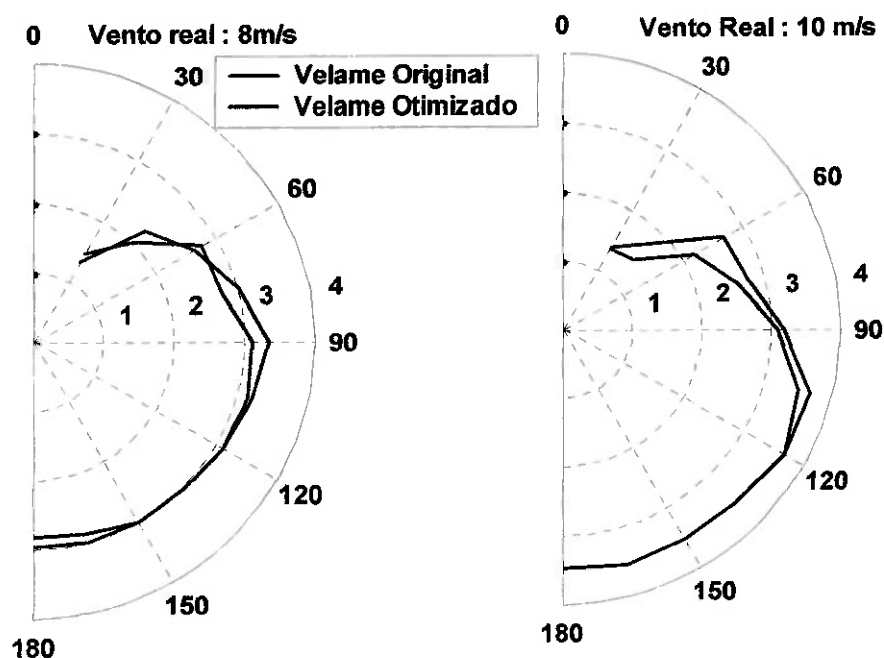


Figura 5.3.2.1 - Gráfico polar de velocidades para intensidades do vento real de 8 m/s e 10 m/s para o velame original e para velames otimizados.

Apenas as dimensões I, P e E são consideradas. A dimensão J, por representar a posição da base do mastro, é mantida constante. Devido a características da construção deste veleiro, a altura da vela mestra é maior que a altura da vela buja, caracterizando uma mastreação fracionada. Isto implica em uma restrição onde I deve ser inferior a P.

Para a utilização de enroladores de vela, outras restrições devem existir para manter constantes relações como  $P/E$ , para o caso do enrolador da vela mestra. Este sistema é mais eficiente que o sistema de rizo do ponto de vista do desempenho da embarcação, pois a diminuição é contínua, e a vela pode ser mantida sempre com a sua máxima fração de área exposta que sua estabilidade permitir.

Esta otimização, portanto, fornece valores ótimos para mastreações novas da mesma forma que parâmetros para a operação dos enroladores de vela, alterando construções novas para condições específicas de vento esperadas ou embarcações enquanto navegam. A figura 5.3.2.2 apresenta o comportamento das dimensões I, P e E para diferentes ângulos de incidência do vento real.

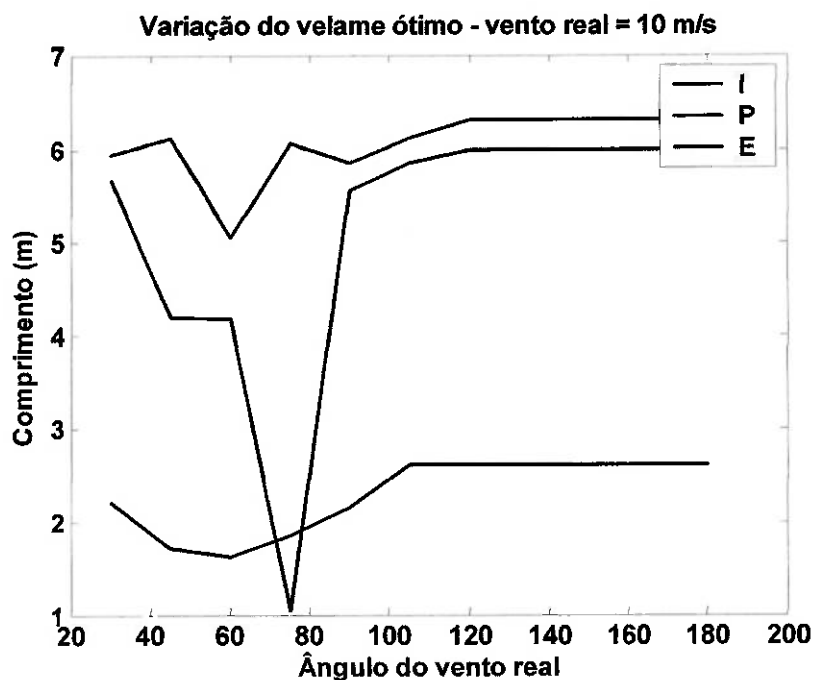


Figura 5.3.2.2 – Comportamento das dimensões do velame ótimo para intensidade do vento real de 10 m/s.

A otimização das dimensões do velame é resumida no quadro abaixo e assim como a otimização dos parâmetros do casco, obedece ao mesmo fluxograma da solução do  $V_{pp}$ :

Propósito da otimização: **Minimizar a resultante das forças e maximizar a velocidade do veleiro**

Função Objetivo:

$$R_{lon}^2 - 10 \cdot V_b^2$$

Variáveis otimizadas:  $V_b$ ,  $I$ ,  $P$ ,  $E$

Restrições lineares:

$$I - P < 0$$

Limites Superiores e Inferiores

$$0 \leq V_b \leq 4,7$$

$$0 \leq I \leq 6$$

$$0 \leq P \leq 6,5$$

$$0 \leq E \leq 2,6$$

### 5.3.3 Otimização do velame para uma regata

Esta série de otimização procura definir apenas uma nova mastreação ótima, não para cada direção e intensidade do vento real, mas sim para uma faixa de velocidades considerando duas direções do vento real apenas.



As duas direções consideradas são a orça fechada, ou seja, contra-vento com 40 graus de incidência do vento real e a condição de vento de popa, ou seja, aproximadamente 160 graus. Em geral não se veleja com o vento real a 180 graus, pois existe perda de eficiência das velas por recobrimento (sombra de vento) e dificuldade de equilíbrio da embarcação.

Pode-se observar nos gráficos de VPP já apresentados que o ângulo de aproximadamente 40 graus fornece as maiores velocidades projetadas na direção do vento real. O mesmo ocorre para os ventos de popa, onde a velocidade projetada não se altera até ângulos de aproximadamente 150 graus. Estas velocidades projetadas são conhecidas como VMG do inglês *velocity made good*.

A forma predominante de regata é caracterizada por um percurso chamado Barla-Sota, onde as duas únicas bóias que devem ser contornadas pelos participantes estão alinhadas com a direção do vento, caracterizando perna de contra-vento e pernas de vento em popa, geralmente com até 3 voltas (ou 6 pernas). Neste caso, tanto na orça quanto no vento em popa, os barcos executam diversas manobras desenhando trajetórias em “zig-zag” de -40 e +40 graus e -160 e +160 graus com a direção do vento.

A tabela 5.3.2.1 apresenta os resultados obtidos para duas faixas diferentes de vento real, de 6 a 8 m/s e de 8 a 10 m/s, equivalentes aos intervalos de 12 a 16 nós e de 16 a 20 nós. São apresentados também o incremento percentual de velocidade em comparação ao desempenho do veleiro original para a perna de contra vento e para a perna de vento em popa e a vantagem de tempo na chegada numa regata de 6 milhas (6 pernas de 1 milha) com 7 m/s e 9 m/s de intensidade de vento real respectivamente.

	Mastreção original	Otimizada para 6 a 8 m/s	Otimizada para 8 a 10 m/s
I ( m )	6,0	6,0	5.18
P ( m )	6,3	6,18	5.18
E ( m )	2,6	2,6	1.65
Incremento de velocidade na	-	2%	23%

orça ( % )			
Incremento de velocidade no vento de popa ( % )	-	-0,1%	-8%
Vantagem em regata de 6 milhas (min)	-	11 min	18 min

Tabela 5.2.3.1 – Comparação de desempenho entre veleiros otimizados e o veleiro original para regata do tipo “Barla-Sota”.

Na tabela se observa ganhos maiores para ventos fortes, assim como esperado pela série anterior de otimização. Ocorre inclusive perda de desempenho no vento de popa devido à diminuição na área vélica, compensada pelos ganhos de velocidade no contra-vento (pernas mais longas em tempo e, portanto, predominantes na formação da velocidade média).

A otimização das dimensões do velame para regata é resumida no quadro a diante, onde a função objetivo representa o tempo de regata dado pela somatória dos inversos das velocidades encontradas para cada velocidade de vento do intervalo a menos da constante D que representa a distância da perna.

$$T_{reg} = D/V_{bv1} + D/V_{bv2} + D/V_{bv3} + D/V_{bv4}$$

#### Otimização das dimensões da mastreação para regatas tipo “Barla-Sota”

Função Objetivo:

$$\sum(V_{bvi}^{-1})$$

Propósito da otimização: **Minimizar o tempo de regata**

Variáveis otimizadas: I, P, E

Restrições lineares:

$$I - P < 0$$

Limites Superiores e Inferiores

$$0 \leq V_b \leq 4,7$$

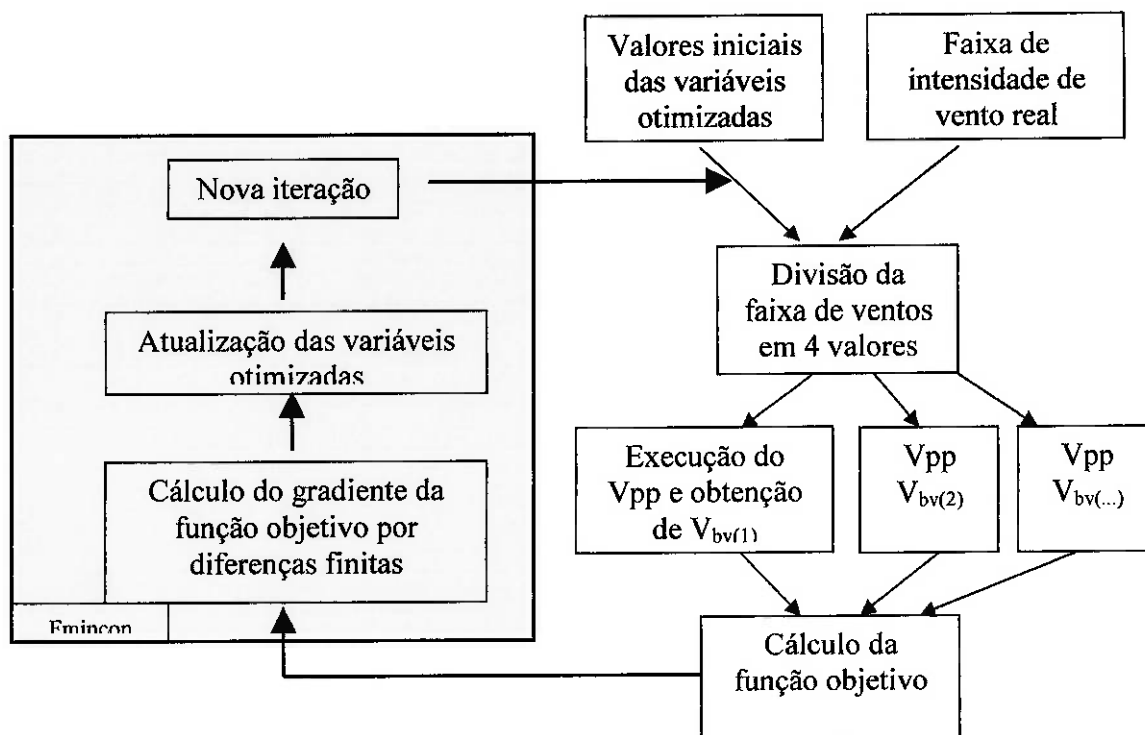
$$0 \leq I \leq 6$$

$$0 \leq P \leq 6,5$$

$$0 \leq E \leq 2,6$$

Nesta rotina de otimização, o problema de predição de velocidade é resolvido de forma separada, ou seja, apenas os parâmetros do velame são otimizados. O  $V_{pp}$  é utilizado como uma função complementar. Esta separação dos problemas implica na ocorrência de iterações de otimização para solução do  $V_{pp}$  dentro da iteração para a otimização dos parâmetros geométricos da mastreação. Ainda sim há maior rapidez na convergência deste problema quando resolvido de forma separada do que quando resolvido de forma conjunta, como nas otimizações anteriores.

O fluxograma seguinte apresenta esta separação, onde o  $V_{pp}$  é utilizado como subrotina do programa que calcula a função objetivo.



Este mesmo procedimento de otimização utilizado para regatas é capaz de determinar a configuração ótima para outras situações como grandes travessias oceânicas, onde diferentes condições de vento são esperadas em frações conhecidas do trajeto.

#### 5.3.4 Otimização casco e velame para regata

O mesmo procedimento é realizado nesta série incluindo como variáveis de otimização os parâmetros do casco. Novamente o objetivo é determinar a embarcação ótima para competir em regatas do tipo Barla-Sota com dentro de uma faixa específica de velocidades de vento real. Nesta otimização as variáveis otimizadas são:

I – Altura de vela buja

P – Altura da vela mestra

E – Base da vela mestra

C<sub>p</sub> – coeficiente prismático do casco

LCB – centro longitudinal de flutuação

B<sub>wl</sub> – Largura na linha d'água

T<sub>cb</sub> – Profundidade do casco

Assim como na otimização isolada das dimensões e parâmetros do casco, devem ser respeitadas as restrições não lineares, caracterizando assim um problema de otimização não linear com restrições lineares, restrições de limites superiores e inferiores e restrições não lineares.

A tabela 5.3.4.1 apresenta e compara os resultados obtidos para as seguintes faixas de velocidade de vento real: 2 a 5 m/s, 6 a 8 m/s e 8 a 10 m/s correspondendo a 4 a 10 nós, 12 a 16 nós e 16 a 20 nós.

	Embarcação original	Otimizada para 2 a 5 m/s	Otimizada para 6 a 8 m/s	Otimizada para 8 a 10 m/s
I ( m )	6,0	6,0	6,0	5,87
P ( m )	6,3	6,3	6,28	6,25
E ( m )	2,6	2,6	2,6	1,00
LCB	-4,66	-3,14	-4,25	-0,46
Bwl	1,62	1,5	1,55	1,5
C <sub>p</sub>	0,58	0,52	0,55	0,52
Tcb	0,16	0,22	0,22	0,153

Tabela 5.3.4.1 – Dimensões dos veleiros otimizados em comparação ao veleiro original.

A tabela 5.3.4.2 compara o desempenho dos veleiros otimizados ao desempenho do veleiro original em uma regata de 6 milhas, com 3.5, 7 e 9 m/s de vento real respectivamente.

Em comparação ao veleiro com as dimensões originais	Otimizada para 2 a 5 m/s	Otimizada para 6 a 8 m/s	Otimizada para 8 a 10 m/s
Incremento de velocidade na perna de contra-vento	12%	22%	5,5%
Incremento de velocidade na perna de vento a favor	8%	-9%	1,5%
Vantagem em regata de 6 milhas (min)	6 min	18 min	3 min

Tabela 5.3.4.2 – Comparação de desempenho entre os veleiros ótimos e o veleiro original em regatas tipo “Barla-Sota”

A tabela 5.3.4.3 apresenta a simulação do desempenho das embarcações otimizadas para ventos de 2 a 5 m/s e para 8 a 10 m/s correndo em regatas em ventos de 9 m/s e 3.5 m/s respectivamente, comparadas com o veleiro original.

Nesta comparação, os intervalos de intensidade de vento real foram invertidos, ou seja, a embarcação otimizada para ventos fortes tem seu desempenho comparado com o veleiro original para uma regata de ventos fracos e a embarcação otimizada para ventos fracos é comparada com o veleiro original para uma regata de ventos fortes. Pode-se perceber que o veleiro otimizado para uma determinada condição não mantém seu desempenho superior.

	Otimizada para 2 a 5 m/s em ventos de 9 m/s	Otimizada para 8 a 10 m/s em ventos de 3.5 m/s
Decremento de velocidade na orça	3.2%	33%
Decremento de velocidade no vento de popa	-1%	2,7%
Desvantagem em regata de 6 milhas (min) para o veleiro original	2,5 min	16 min
Desvantagem em regata de 6 milhas (min) para o veleiro otimizado	5,5 min	22 min

Tabela 5.3.4.3 – Veleiros otimizados em regata fora da faixa de ventos para a qual foram otimizados

O quadro abaixo apresenta o resumo da otimização dos parâmetros do casco e velame para regatas (esta otimização segue o mesmo fluxograma da otimização do velame para regatas) :

**Otimização das dimensões da mastreação e dos parâmetros do casco para regatas tipo “Barla-Sota”**

Função Objetivo:

$$\sum(Vbvi^{-1})$$

Propósito da otimização: **Minimizar o tempo de regata**

Variáveis otimizadas: I, P, E, Cp, Tcb, Bwl, LCB

Restrições lineares:

$$I-P < 0$$

Limites Superiores e Inferiores

$$0 \leq I \leq 6$$

$$0 \leq P \leq 6,5$$

$$0 \leq E \leq 2,6$$

$$0,52 \leq Cp \leq 0,60$$

$$0,15 \leq Tcb \leq 0,22$$

$$1,50 \leq Bwl \leq 1,70$$

$$-6\% \leq LCB \leq 0\%$$

Restrições não lineares:

$$2.46 < Bwl/Tcb < 19.32$$

### 5.3.5 Otimização do ângulo de adernamento

Como citado anteriormente, o adernamento do veleiro pode ser benéfico para baixas velocidades do barco, e portanto, baixas intensidades de vento. O principal motivo para isso é a diminuição considerável da área molhada do casco, principalmente para cascos largos e pouco profundos.

Dentre as componentes da resistência hidrodinâmica, a resistência viscosa só é significativa em baixas velocidades, pois em altas velocidades a resistência residual é preponderante e responsável pela maior parcela da resistência total. A resistência residual é altamente dependente do comprimento da linha d'água, dimensão que também diminui com o adernamento, mas em menor proporção e de forma considerável apenas para grandes ângulos de adernamento.

Tomando uma condição específica de travéz, isto é, ângulo de incidência do vento real à 90 graus com a linha de centro da embarcação, a figura 5.3.5.1 mostra o resultado da otimização do ângulo de adernamento para diferentes velocidades. Nota-se que adernamentos não nulos são interessantes somente para velocidades muito baixas, cerca de 20% da velocidade de casco deste veleiro.



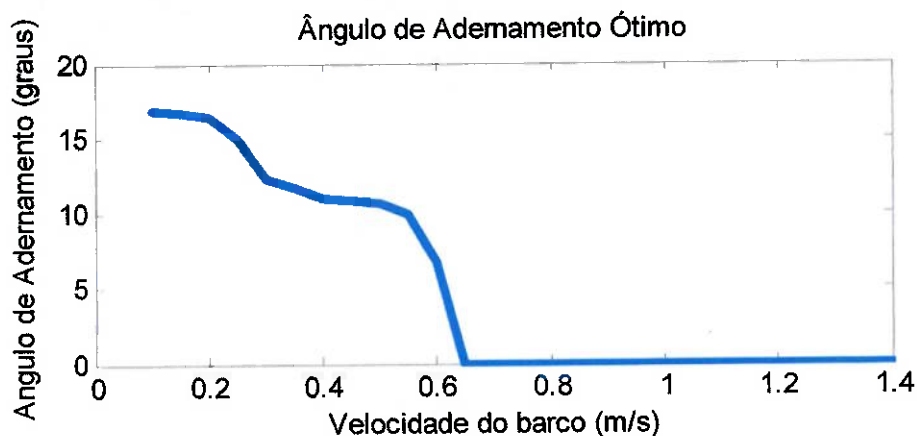


Figura 5.3.5.1- Adernamento desejável para baixas velocidades

O quadro abaixo apresenta o resumo da otimização do ângulo de adernamento, onde é calculada somente a somatória das forças de resistência ao avanço do veleiro.

<b>Otimização do Ângulo de Adernamento</b>
Propósito da otimização: Minimizar a resistência ao avanço total
Função Objetivo:
<b><math>R_{tot}</math></b>
Variáveis otimizadas: $\phi_i$ (ângulo de adernamento)
Restrições lineares:
Limites Superiores e Inferiores
<b><math>0 \leq \phi_i \leq 30</math></b>

Este adernamento proposital é obtido pelo posicionamento da tripulação em embarcações pequenas e médias e pelo deslocamento do lastro d'água ou da quilha pivotante em embarcações que dispõem destes recursos.

## 6. CONCLUSÃO

A utilização de ferramentas de otimização não lineares com restrição na solução do VPP mostrou-se adequada. O problema é resolvido com relativo baixo custo computacional e permite a inclusão de novos parâmetros sem, contudo, torna-lo demasiadamente custoso.

Os resultados apresentados pelo programa de predição de velocidades mostraram-se de acordo com o comportamento esperado para o modelo de veleiro considerado, tanto qualitativamente como quantitativamente. O modelo desenvolvido está, portanto, correto e adequado para uso como ferramenta de avaliação nas séries de otimização.

A otimização dos parâmetros do veleiro geram ganhos notáveis de desempenho, atestando a utilidade do método, porém fica claro também a noção de compromisso desses parâmetros, pois a otimização de uma condição compromete o desempenho em outras condições.

Fica claro portanto que não existe um veleiro ótimo para todas as condições, existem sim, veleiros ótimos e melhores para cada condição, e a possibilidade de alteração dos parâmetros durante a navegação permite garantir alto desempenho em faixas mais amplas de condições.

A ferramenta desenvolvida cumpre a função de tomada de decisão para estes casos, e pode ser integrada a sistemas de controle de embarcações modernas, pois parâmetros tratados nestas otimizações controlam estes novos dispositivos como posição do centro de gravidade que determina o controle de lastros d'água móveis; posição lateral da tripulação equivalente à posição angular da quilha pivotante e dimensões do plano vélico que alimentam o controle dos enroladores de velas foram obtidos com sucesso para condições isoladas ou inseridas em situações de regata por exemplo.

## 7. REFÊRENCIAS

Oossanem, P. van,, "Predicting the Speed of Sailing Yachts", SNAME Transactions, Vol.101, 1994.

Larssons, L.; Eliasson, R., "Principles of yacht design", International Marine, Maine, EUA.

Hazen, G. S., "A Model of Sail Aerodynamics for Diverse Rig Types", New England Sailing Yacht Symposium, 1980.

Gerritsma, J. K., "Sailing Yacht Performance in Calm Water and in Waves", 12<sup>th</sup> Symposium on Developments of Interest to Yacht Architecture, Amsterdam, 1992.

Hochkirch, K.; Brandt, H., "Segelleistungsprognose aus Messungen im Originalmaßstab, Hamburg, 2000.

Silva, E.C.N.; "Apostila de Otimização Aplicada ao projeto de sistemas mecânicos"