



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

PROPOSTA DE CONTROLE PARA UM VELEIRO DE NAUTIMODELISMO

Pedro Henrique Sevenini Silva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação, da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Fernando Cesar Lizarralde

Rio de Janeiro
Março de 2018

PROPOSTA DE CONTROLE PARA UM VELEIRO DE NAUTIMODELISMO

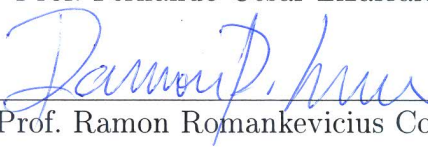
Pedro Henrique Sevenini Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

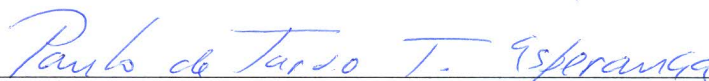
Examinado por:



Prof. Fernando Cesar Lizarralde, D.Sc.



Prof. Ramon Romankevicius Costa, D.Sc.



Prof. Paulo de Tarso Themistocles Esperança, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2018

Sevenini Silva, Pedro Henrique

Proposta de controle para um veleiro de nautimodelismo/Pedro Henrique Sevenini Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2018.

IX, 68 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Fernando Cesar Lizarralde

Projeto de graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia de Controle e Automação, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 62 – 63.

1. Controle veleiro. 2. Veleiro autônomo. 3. PID. 4. *Backstepping*. 5. Lyapunov. 6. Modelagem dinâmica. I. Cesar Lizarralde, Fernando. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à POLI/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

PROPOSTA DE CONTROLE PARA UM VELEIRO DE NAUTIMODELISMO

Pedro Henrique Sevenini Silva

Março/2018

Orientador: Fernando Cesar Lizarralde

Curso: Engenharia de Controle e Automação

Apresenta-se, neste trabalho, o projeto de controle de rumo e ajuste de vela para um veleiro de nautimodelismo. O veleiro controlado foi projetado e construído pela equipe Minerva Náutica da UFRJ.

São projetados dois controles de rumo, um controlador por realimentação PID e um controle por *Backstepping*, uma técnica por realimentação não linear baseada em funções de Lyapunov.

O algoritmo de ajuste da vela baseia-se nas configurações adequadas para a navegação do veleiro em relação a sua orientação e a direção do vento. O controle de ajuste da vela tem como objetivo encontrar o ângulo de abertura da vela que proporciona uma força de propulsão ideal.

É apresentado também a modelagem matemática da dinâmica de um veículo marítimo, que é usada para representar o comportamento do veleiro nas simulações e base para o projeto dos controles.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Control and Automation Engineer.

PROPOSAL OF A SAILING ROBOT CONTROL

Pedro Henrique Sevenini Silva

March/2018

Advisor: Fernando Cesar Lizarralde

Course: Control and Automation Engineering

This academic work presents the course control and adjustment of sail for a sailing Robot. The controlled sailboat was designed and built by the Minerva Náutica team at UFRJ.

Two course controls are projected. The first one is a feedback PID controller and the second one is a control by *Backstepping*, a nonlinear feedback technique in Lyapunov functions.

The sail adjustment algorithm is based on the most suitable configurations for navigation in relation to its orientation and wind direction. The sail adjustment control aims to find the opening angle of the sail that provides an ideal propulsion force.

It also shows the dynamic modeling of a marine vehicle, which is used to represent the operation of the sailboat in the simulations and basis for the design of the controls.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivo	2
1.3 Organização do trabalho	3
2 Modelo dinâmico de um veleiro	4
2.1 Diagramas e definições	4
2.2 Modelo dinâmico	5
2.2.1 Matrizes de corpo rígido e massa adicional	7
2.2.2 Matrizes Coriolis-Centrípeta	8
2.2.3 Matriz de amortecimento	9
2.2.4 Matriz de gravidade	9
2.2.5 Forças de <i>Lift</i> e <i>Drag</i>	9
2.2.6 Forças e torques vela	10
2.2.7 Forças e torques leme	11
2.2.8 Forças e torques quilha	11
2.3 Parâmetros do modelo do veleiro Glória	12
3 Controle de rumo e de vela	15
3.1 Controle de rumo	15
3.1.1 Controle de rumo PID	16
3.1.2 Controle por <i>Backstepping</i>	18
3.2 Controle de vela	22
4 Resultados e Discussões	25
4.1 Controle de rumo PID com vela fixa	25
4.1.1 Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 0^\circ$ $\lambda = 90^\circ$	25
4.1.2 Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 30^\circ$ $\lambda = 60^\circ$	28

4.1.3	Navegação contra o vento: $\psi_0 = 135^\circ$ $\psi_d = 135^\circ$ $\lambda = 40^\circ$. .	30
4.1.4	Navegação de través: $\psi = 90^\circ$ $\psi_d = 90^\circ$ $\lambda = 55^\circ$	33
4.2	Controle de rumo PID com controle de vela	35
4.2.1	Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 0^\circ$	35
4.2.2	Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 30^\circ$	38
4.2.3	Navegação contra o vento: $\psi_0 = 135^\circ$ $\psi_d = 135^\circ$	41
4.2.4	Navegação de través: $\psi_0 = 90^\circ$ $\psi_d = 90^\circ$	44
4.3	Controle de rumo <i>Backstepping</i> com controle de vela	47
4.3.1	Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 0^\circ$	47
4.3.2	Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 30^\circ$	50
4.3.3	Navegação contra o vento: $\psi_0 = 135^\circ$ $\psi_d = 135^\circ$	53
4.3.4	Navegação de través: $\psi_0 = 90^\circ$ $\psi_d = 90^\circ$	56
4.4	Implementação	59
5	Conclusões	61
	Referências Bibliográficas	62
A	Coefficientes de <i>Lift</i> e <i>Drag</i>	64

Lista de Figuras

2.1	Diagrama dos principais parâmetros e suas direções	5
2.2	Graus de liberdade	5
2.3	Diagrama de forças	10
2.4	Veleiro Glória	12
3.1	Esquema Controle PID	16
3.2	Controle PID simulado	17
3.3	Diagrama vela/vento	22
3.4	Controle vela simulado	23
4.1	Controle PID: $\psi_d = 0^\circ$	27
4.2	Controle PID: $\psi_d = 30^\circ$	29
4.3	Controle PID: $\psi_d = 135^\circ$	32
4.4	Controle PID: $\psi_d = 90^\circ$	34
4.5	Controle PID e controle vela: $\psi_d = 0^\circ$	37
4.6	Controle PID e controle vela: $\psi_d = 30^\circ$	40
4.7	Controle PID e controle vela: $\psi_d = 135^\circ$	43
4.8	Controle PID e controle vela: $\psi_d = 90^\circ$	46
4.9	Controle <i>Backstepping</i> e controle vela: $\psi_d = 0^\circ$	49
4.10	Controle <i>Backstepping</i> e controle vela: $\psi_d = 30^\circ$	52
4.11	Controle <i>Backstepping</i> e controle vela: $\psi_d = 135^\circ$	55
4.12	Controle <i>Backstepping</i> e controle vela: $\psi_d = 90^\circ$	58
4.13	Esquema eletrônico Glória	59

Lista de Tabelas

2.1	Descrição das variáveis do sistema	4
2.2	Descrição das variáveis de (η) e (ν)	6
2.3	Descrição das variáveis da equação de dinâmica	6
2.4	Valores dos parâmetros do modelo do veleiro Glória	12
2.5	Valores das dimensões do veleiro Glória	13
A.1	Coefficientes hidrodinâmicos leme e quilha (NACA 63-010)	64
A.2	Coefficientes aerodinâmicos vela (NACA 0015)	65

Capítulo 1

Introdução

Veleiros surgiram na origem das navegações com a necessidade da humanidade de transportar carga e pessoas pelas águas. Barcos a vela são embarcações que utilizam a força do vento para se deslocarem. Desde do seu surgimento a engenharia de projetos de veleiros vem se desenvolvendo para melhorar a performance desses veículos marítimos, seja na sua capacidade de carga, estabilidade ou velocidade.

Como solução inicial surgiram as velas quadradas, que basicamente permitem apenas a navegação a favor do vento. Com modificações na posição do mastro e combinações de diversas velas a limitação de movimento com as velas quadradas diminuiu. Porém a revolução ocorreu mesmo com o surgimento das chamadas velas Latinas, no formato triangular combinadas com barcos que possuem resistência lateral, com implementação de quilhas e bolinas, permitiram a navegação de través (recebendo vento lateral). Uma quilha traz duas vantagens importantes para a estabilidade na navegação a vela: o aumento da estabilidade dinâmica transversal e o aumento de sua estabilidade direcional.

Projetos mais recentes de veleiros buscam embarcações cada vez mais velozes. Uma maneira de atingir esse objetivo é saindo da água, pois o arrasto do ar é bem menor. Outra alternativa usada atualmente, implementada no veleiro controlado nesse projeto, são as velas rígidas que num formato parecido de uma asa de avião produzem significativamente mais potências.

Os veleiros se deslocam com base no princípio de Bernoulli, Brunetti (2008). A pressão de cada lado da vela é inversamente proporcional a velocidade do fluido. De um lado da vela o ar percorre com alta velocidade uma distância superior àquela percorrida com baixa velocidade pelo ar no outro lado. Esta diferença de velocidade gera uma diferença de pressão que, por sua vez, tem como consequência uma força resultante composta pela força de arrasto (*drag*) no sentido do vento aparente e pela força de sustentação (*lift*) perpendicular ao vento aparente. Essa força resultante permite o movimento das embarcações a vela.

1.1 Motivação

O mar tem grande influência no ecossistema do nosso planeta, abrangendo desde a regulação do clima até o fornecimento de alimentos, recursos minerais e energéticos. Apesar de fazermos parte desse ecossistema, o ser humano agride e degrada o meio ambiente marinho seja mediante a atividades poluidoras ou a extração ostensiva de seus recursos naturais (Patini (1982)).

Torna-se importante o desenvolvimento de sistemas de monitoramento que atuem em superfícies aquáticas para maior compreensão desse enorme ambiente, que ocupa cerca de dois terço da superfície da Terra. É preciso obter informações sobre a saúde da água e vida marinha. Esse monitoramento gera dados para a elaboração de soluções que proporcionam meios de proteger o ecossistema marinho e explorá-lo de forma mais sustentável.

Embarcações a vela utilizam uma energia limpa para se movimentarem, a força do vento, combinados com um controle autônomo possuem grande aplicação em monitoramentos de ambientes aquáticos e coleta de amostras de variáveis físicas e químicas da água para esses monitoramentos e pesquisas.

Nos últimos anos controle de veleiros autônomos vem ganhando atenção, como é visto em Xiao & Jouffroy (2014) e Wille et al. (2016).

1.2 Objetivo

O principal objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um controle autônomo para o veleiro Glória. Esse que foi projetado e construído pela equipe Minerva Náutica da UFRJ para participar da Competição Internacional de Veleiros Autônomos (*International Robotic Sailing Competition*).

O controle autônomo de um veleiro se dá quando o rumo da embarcação segue um ângulo desejado sem a interferência humana. O leme da embarcação é o atuador que controla o seu rumo, sendo o ângulo do leme a variável manipulada e o ângulo do rumo a variável controlada no processo. O controle do ângulo da vela se dá de maneira a obter a configuração adequada para a embarcação se mover a favor ou contra o vento.

Neste trabalho é proposto o controle de rumo e ajuste de vela. Sendo projetados dois controles de rumo, um controlador por realimentação PID e um controle por *Backstepping*, empregado em Wille (2016), Xiao & Jouffroy (2014) e Fossen (2011). O controle da vela é um algoritmo que busca o ângulo de abertura da vela que proporciona uma força de propulsão ideal.

Apresenta-se também a modelagem dinâmica de um veleiro, baseando-se na modelagem e representação vetorial proposta em Fossen (1994).

1.3 Organização do trabalho

No Capítulo 1 foram apresentados uma breve contextualização do tema, a motivação do projeto e os objetivos que este pretende alcançar. Expondo a história, a física e a conscientização ambiental por trás do veleiro.

O Capítulo 2 demonstrará o modelo dinâmico de um veleiro, a estrutura do sistema estudado e os parâmetros de modelagem do veleiro Glória.

No Capítulo 3 serão apresentados os controles projetados de rumo e vela do veleiro Glória. Explicará as variáveis controladas e manipuladas, a estrutura do controle e a lógica implementada.

O Capítulo 4 apresentará os resultados da simulação do sistema controlado. É simulado o controle de rumo com a vela fixa e em conjunto com o controle de ajuste de vela. Apresentará também discussões a respeito dos resultados obtidos. No final desse capítulo se encontra a implementação inicial do sistema eletrônico do veleiro Glória.

O Capítulo 5 trará a conclusão do projeto tendo como base o estudo sobre o tema e os resultados das simulações.

Capítulo 2

Modelo dinâmico de um veleiro

Nesse capítulo será apresentado o modelo matemático da dinâmica de um veleiro, que será a base para a construção da simulação e projeto do controle. O modelo apresentado tem como referência o livro *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Fossen (1994), a tese *Autonomous Sailboats*, Wille (2016) e o artigo *Modeling and Nonlinear Heading Control of Sailing Yachts*, Xiao & Jouffroy (2014).

Os parâmetros de modelagem do veleiro a ser controlado é referente ao veleiro Glória, que foi projetado pela equipe Minerva Náutica da UFRJ e foram obtidos principalmente pelos alunos Bernado Pimentel e Caio Swan. O projeto final intitulado Comparação de Modelos de Manobra para Navios, Swan (2017) também é referência para essa modelagem.

2.1 Diagramas e definições

Na Figura 2.1 apresenta-se um esquema com os parâmetros essenciais para a modelagem do sistema como eixos de coordenada, ângulos e forças. As descrições das variáveis se encontram na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Descrição das variáveis do sistema

Variável	Descrição	Variável	Descrição
ϕ	<i>roll</i> ângulo [rad]	S_L	<i>lift</i> da vela [N]
ψ	<i>yaw</i> ângulo [rad]	S_D	<i>drag</i> da vela [N]
σ	ângulo do leme [rad]	K_L	<i>lift</i> da quilha [N]
λ	ângulo da vela [rad]	K_D	<i>drag</i> da quilha [N]
β_w	ângulo do vento [rad]	R_L	<i>lift</i> do leme [N]
V_w	vetor velocidade do vento [m/s]	R_D	<i>drag</i> do leme [N]
β_c	correnteza ângulo [rad]	x'	x no referencial do barco
V_c	vetor velocidade da correnteza [m/s]	y'	y no referencial do barco
κ	ângulo <i>flap</i> da vela [rad]	CG	centro de gravidade [m]

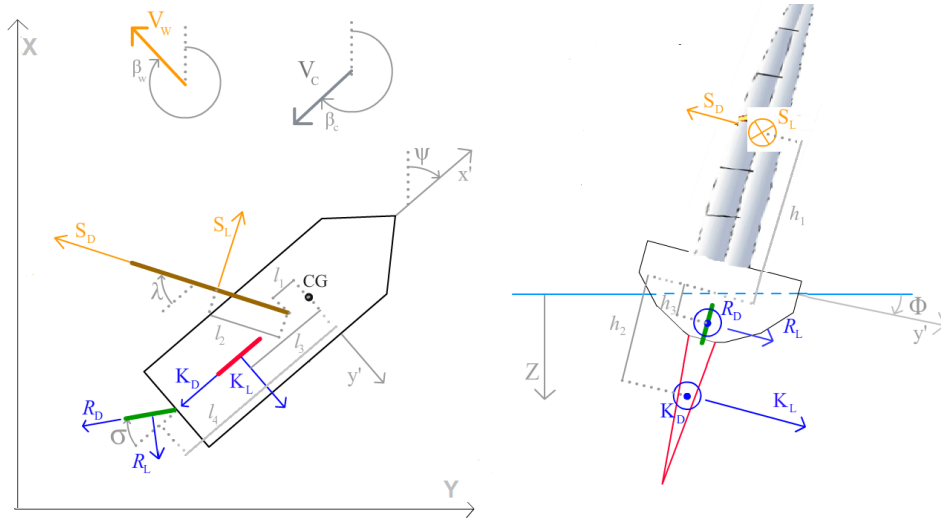


Figura 2.1: Diagrama dos principais parâmetros e suas direções
 Fonte: Modificada de *Autonomous Sailboats Wille* (2016)

2.2 Modelo dinâmico

Para a modelagem da dinâmica do sistema são usados dois referenciais de coordenadas: o inercial (x, y, z) e o do barco (x', y', z'). Para veículos marítimos usualmente é desprezado o movimento da Terra, portanto as coordenadas inerciais são representadas fixas na mesma. A origem do referencial do barco, CO, é colocado junto ao centro de gravidade (CG).

As equações do sistema são baseadas na representação vetorial proposta em Fossen (1994). É definido que um veículo marítimo é representado em seis graus de liberdade (*DOF - degrees of freedom*). Tais graus de liberdade são apresentados na Figura 2.2.

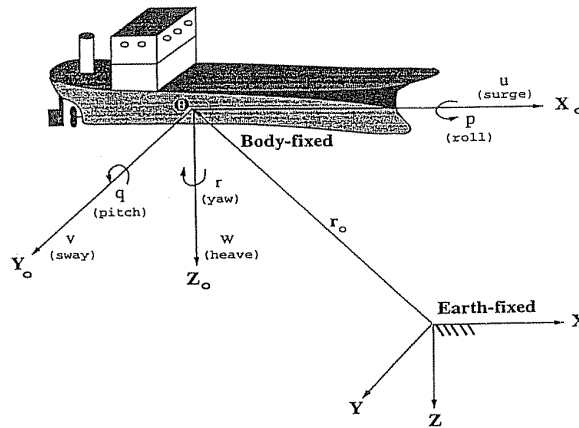


Figura 2.2: Graus de liberdade
 Fonte: *Guidance and Control of Ocean Vehicles* Fossen (1994)

Na modelagem do veleiro desse projeto são utilizados quatro graus de liberdade. Desconsidera os graus de liberdade menos relevantes na dinâmica de um barco, *pitch* (q) e *heave* (w). As posições, ângulos e velocidade para os graus de liberdade modelados são expressados por η e ν , respectivamente:

$$\eta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} \quad \nu = \begin{bmatrix} u \\ v \\ p \\ r \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Tabela 2.2: Descrição das variáveis de (η) e (ν)

Variável	Descrição	Variável	Descrição
x	norte [m]	u	velocidade em x' [m/s]
y	leste [m]	v	velocidade em y' [m/s]
ϕ	<i>roll</i> [rad]	p	velocidade angular em <i>roll</i> [rad/s]
ψ	<i>yaw</i> [rad]	r	velocidade angular em <i>yaw</i> [rad/s]

Para representar as orientações e rotações é usado o modelo de ângulos e teorema de rotação de Euler. A formulação do sistema é baseada na Segunda Lei de Newton relativo à massa, aceleração e às forças atuantes.

Tabela 2.3: Descrição das variáveis da equação de dinâmica

Variável	Descrição	Variável	Descrição
M_{RB}	Matriz de corpo rígido	M_A	Matriz de massa adicional
C_{RB}	Matriz força centrípeta/Coriolis	C_A	Matriz força centrípeta adicional
D	Matriz de amortecimento	g	Mariz de gravidade
J	Matriz de transformação	S	Forças e torques vela
K	Forças e torques quilha	R	Forças e torques leme

Modelo matemático do sistema:

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= J(\phi, \psi)\nu \\ M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu + M_A\dot{\nu}_r + C_A(\nu_r)\nu_r + D(\nu_r) + g(\eta) &= \\ S(\eta, \nu, \lambda, \kappa, V_w) + K(\eta, \nu, V_c) + R(\eta, \nu, V_c, \sigma) & \end{aligned} \quad (2.2)$$

$J(\phi, \psi)$ é a matriz de transformação do sistema de coordenadas do barco para o inercial:

$$J(\phi, \psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \cos(\phi) & 0 & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \cos(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

e $\nu_r = \begin{bmatrix} u_r & v_r & p & r \end{bmatrix}^T$ é a velocidade do barco relativo a água.

$$\begin{bmatrix} u_r \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - J_{2D}^T(\psi, \phi) V_c \quad (2.4)$$

$$J_{2D}(\phi, \psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \cos(\phi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Assumindo aceleração da correnteza igual a zero, $\dot{V}_c = 0$, então podemos dizer que $\dot{\nu}_r = \dot{\nu}$.

2.2.1 Matrizes de corpo rígido e massa adicional

A matriz de corpo rígido representa a inércia e massa do veleiro e sua distribuição, considerado como um corpo rígido. Ela é definida pela equação 2.6 demonstrada em Fossen (1994)[pág.26].

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3x3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$S(r_G)$ é o operador de matriz anti-simétrica 2.7, r_G é o vetor distância entre a origem do sistema de coordenadas do referencial do barco e o centro de gravidade do mesmo, I_{3x3} é uma matriz identidade 3x3 e I_0 é a matriz de inércias.

$$S(\gamma) = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_3 & \gamma_2 \\ \gamma_3 & 0 & -\gamma_1 \\ -\gamma_2 & \gamma_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{bmatrix}^T \quad (2.7)$$

Simplificando para quatro graus de liberdade, assumindo simetria do veleiro no plano xz e tendo que a origem do sistema de coordenadas do referencial do barco se encontra no seu centro de gravidade, a matriz de corpo rígido é representada agora na equação 2.8.

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

A matriz de inércia é demonstrada em Fossen (1994)[pág.21] tendo 2.9.

$$I_{xx} = \int_V (y^2 + z^2) \rho_b dV \quad I_{zz} = \int_V (x^2 + y^2) \rho_b dV \quad (2.9)$$

com ρ_b sendo a massa específica do barco e V o volume.

A matriz de massa adicional considera uma força atuante sobre o barco devido a sua aceleração no fluido causando um campo de pressão. Levando em consideração as mesmas simplificações feitas com a matriz de corpo rígido e considerando a ausência de ondas, tornando os parâmetros de massa adicional constantes, obtêm-se a equação 2.10.

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\ddot{v}} & 0 & Y_{\ddot{r}} \\ 0 & 0 & K_{\ddot{p}} & 0 \\ 0 & Y_{\ddot{r}} & 0 & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Demonstrada em Fossen (1994)[pág.33]. Os parâmetros da matriz são representados de forma que, por exemplo, a massa adicional em *surge* (eixo x') causada pela aceleração em *surge* (\ddot{u}) é representada pelo parâmetro $X_{\ddot{u}}$.

2.2.2 Matrizes Coriolis-Centrípeta

As matrizes de Coriolis-Centrípeta são definidas nas equações 2.12 e 2.11 . São demonstradas em Fossen (1994)[pág.27 e pág.36]. Essas matrizes são consequência da rotação do referencial do barco em relação ao inercial. Como a origem do sistema de coordenadas do referencial do barco é no seu centro de gravidade vários parâmetros da matriz C_{RB} são zerados.

$$C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & -mr & 0 & 0 \\ mr & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$C_A(\nu_r) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & Y_{\dot{v}}v_r + Y_{\dot{r}}r \\ 0 & 0 & 0 & -X_{\dot{u}}u_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_{\dot{v}}v_r - Y_{\dot{r}}r & X_{\dot{u}}u_r & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.2.3 Matriz de amortecimento

A matriz de amortecimento é definida na equação 2.13. É demonstrada em Fossen (1994)[pág.42].

$$D(\nu_r) = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & Y_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_v & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.2.4 Matriz de gravidade

A Matriz de gravidade é calculado pela equação 2.14.

$$g(\eta) = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mgGM \sin(\phi) \cos(\phi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

onde GM é a altura metacêntrica transversal (a distância entre o centro de gravidade e o metacentro) Fossen (1994)[pág.191].

2.2.5 Forças de *Lift* e *Drag*

As forças de *lift* (F_L) e *drag* (F_D) são as forças de sustentação e arrasto respectivamente, elas são geradas na vela, leme e quilha a partir do movimento do veleiro no fluido seja na água ou no ar.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A C_L(\alpha) V^2 \quad (2.15)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D(\alpha) V^2 \quad (2.16)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, A é a área do perfil, V é a velocidade do fluido passando pelo perfil e $C_L(\alpha)$ e $C_D(\alpha)$ são os coeficientes de *lift* e *drag* em função do ângulo de ataque α .

No caso de perfis com ângulo de *flap* ajustável (κ), os coeficientes de *lift* e *drag* variam de acordo com esse ângulo e o ângulo de ataque (α): $C_L(\alpha, \kappa)$ e $C_D(\alpha, \kappa)$.

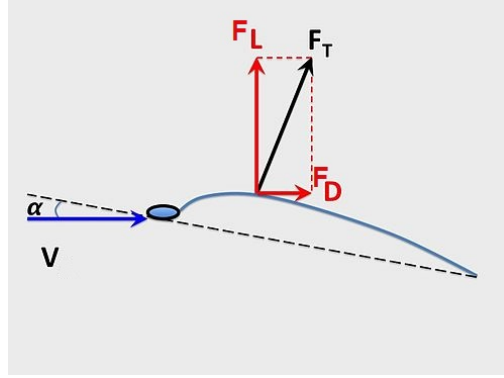


Figura 2.3: Diagrama de forças

Fonte: Modificado de en.wikipedia.org/wiki/Forces_on_sails

A velocidade do fluido passando pelo perfil é expressada em Wille (2016)[pág.14] e equacionada em 2.17.

$$V_f = J_{2D}^T(\psi, \phi)V_{w/c} - \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -ry'_f \\ rx'_f - pz'_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{x}'_f \\ \dot{y}'_f \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

onde x_f , y_f e z_f são as posições x' , y' e z' do perfil em relação a origem do referencial do barco (CO). $V_{w/c}$ é o vetor velocidade do vento ou correnteza.

2.2.6 Forças e torques vela

Velocidade e ângulo do vento passando pela vela:

$$V_{ws} = J_{2D}^T(\psi, \phi)V_w - \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} rl_2 \sin(\lambda) \\ -r(l_1 + l_2 \cos(\lambda)) + ph_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}l_2 \sin(\lambda) \\ \dot{\lambda}l_2 \cos(\lambda) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\beta_{ws} = \arctan_2(V_{ws_v}, V_{ws_u}) \quad (2.19)$$

O ângulo de ataque é dado pela equação:

$$\alpha_s = \beta_{ws} - \lambda + \pi \quad (2.20)$$

As forças de *lift* e *drag* na vela são denominadas S_L e S_D , respectivamente.

Portanto a força e torque da vela são representados por S:

$$S = \begin{bmatrix} S_{x'} \\ S_{y'} \\ S_{\phi'} \\ S_{\psi'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_L \sin(\beta_{ws}) + S_D \cos(\beta_{ws}) \\ S_L \cos(\beta_{ws}) + S_D \sin(\beta_{ws}) \\ h_1(S_L \cos(\beta_{ws}) + S_D \sin(\beta_{ws})) \\ S_{x'} l_2 \sin(\lambda) - S_{y'}(l_1 + l_2 \cos(\lambda)) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.2.7 Forças e torques leme

Velocidade e ângulo da água relativo ao leme:

$$V_{cr} = J_{2D}^T(\psi, \phi) V_c - \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ -r l_4 - p h_3 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\beta_{cr} = \arctan_2(V_{cr_v}, V_{cr_u}) \quad (2.23)$$

O ângulo de ataque é dado pela equação:

$$\alpha_r = \beta_{cr} - \sigma + \pi \quad (2.24)$$

As forças de *lift* e *drag* no leme são denominadas R_L e R_D , respectivamente.

Portanto a força e torque do leme são representados por R:

$$R = \begin{bmatrix} R_L \sin(\beta_{cr}) + R_D \cos(\beta_{cr}) \\ -R_L \cos(\beta_{cr}) + R_D \sin(\beta_{cr}) \\ h_3(R_L \cos(\beta_{cr}) - R_D \sin(\beta_{cr})) \\ l_4(R_L \cos(\beta_{cr}) - R_D \sin(\beta_{cr})) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

2.2.8 Forças e torques quilha

Velocidade e ângulo da água relativo a quilha:

$$V_{ck} = J_{2D}^T(\psi, \phi) V_c - \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ -r l_3 - p h_2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\beta_{ck} = \arctan_2(V_{ck_v}, V_{ck_u}) \quad (2.27)$$

O ângulo de ataque é dado pela equação:

$$\alpha_k = -\beta_{ck} + \pi \quad (2.28)$$

As forças de *lift* e *drag* na quilha são denominadas K_L e K_D , respectivamente.

Portanto a força e torque da quilha são representados por K :

$$K = \begin{bmatrix} K_L \sin(\beta_{ck}) + K_D \cos(\beta_{ck}) \\ -K_L \cos(\beta_{ck}) + K_D \sin(\beta_{ck}) \\ h_2(K_L \cos(\beta_{ck}) - K_D \sin(\beta_{ck})) \\ l_3(K_L \cos(\beta_{ck}) - K_D \sin(\beta_{ck})) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

2.3 Parâmetros do modelo do veleiro Glória



Figura 2.4: Veleiro Glória
Fonte: Equipe Minerva Náutica

As matrizes que compõem a dinâmica do veleiro Glória são modeladas com os valores da tabela 2.4, que foram obtidos e estimados pela equipe Minerva Náutica.

Tabela 2.4: Valores dos parâmetros do modelo do veleiro Glória

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$X_{\dot{u}}$	-2.720 [kg]	m	27.20 [kg]
$Y_{\dot{r}}$	-2.720 [kg m]	X_u	-7 [kg m/s]
$Y_{\dot{v}}$	-23.825 [kg]	Y_v	-23 [kg m/s]
$K_{\dot{p}}$	-23.825 [kg m ²]	N_r	-48 [kg m/s]
$N_{\dot{r}}$	-23.825 [kg m ²]	N_v	0 [kg m/s]
I_{xx}	0.074 [kg m ²]	Y_r	0 [kg m/s]
I_{zz}	4.716 [kg m ²]	GM	0.2 [m]

Matriz de corpo rígido e de massa adicional:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} 27.20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 27.20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.074 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.716 \end{bmatrix} \quad M_A = \begin{bmatrix} 2.720 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 23.825 & 0 & 2.720 \\ 0 & 0 & 23.825 & 0 \\ 0 & 2.720 & 0 & 23.825 \end{bmatrix}$$

Matriz das forças centrípetas/Coriolis:

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & -27.20r & 0 & 0 \\ 27.20r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz das forças centrípetas adicional:

$$C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -23.825v_r - 2.720r \\ 0 & 0 & 0 & 2.720u_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 23.825v_r + 2.720r & -2.720u_r & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de amortecimento e gravidade:

$$D = \begin{bmatrix} 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 23 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 48 \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 53.36 \sin(\phi) \cos(\phi) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Tabela 2.5: Valores das dimensões do veleiro Glória

Vela		Leme		Quilha	
A_s	$0.9 [m^2]$	h_3	$0.039 [m]$	h_2	$0.313 [m]$
h_1	$0.867 [m]$	l_4	$0.562 [m]$	l_3	$0.103 [m]$
l_1	$-0.343 [m]$	$span_r$	$0.132 [m]$	$span_k$	$0.45 [m]$
l_2	$0.228 [m]$	$chord_r$	$0.06 [m]$	$chord_k$	$0.15 [m]$

Para calcular as forças de *lift* e *drag* são usadas as equações 2.15 e 2.16, que dependem dos coeficientes de *lift* ($C_L(\alpha)$) e *drag* ($C_D(\alpha)$) que são obtidos a partir das características do formato de cada perfil. Nos perfis do Glória utilizou-se o perfil NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), um perfil amplamente difundido e utilizado pela comunidade científica e industrial. Manwell et al. (2002)

A vela do veleiro Glória é rígida, que utiliza o perfil NACA 0015 e terá seus coeficientes de *lift* e *drag* variando de acordo com seu ângulo de ataque (α) e ângulo do *flap* (κ). O perfil utilizado no leme e na quilha é o NACA 63-010.

As tabelas que representam os coeficientes de *lift* e *drag* em relação ao ângulo de ataque de cada perfil se encontram no apêndice A desse trabalho. Na tabela 2.5 encontram-se as dimensões de cada perfil.

Capítulo 3

Controle de rumo e de vela

Nesse capítulo serão apresentados os controles projetados de rumo e vela do veleiro Glória. O rumo de um veleiro é ajustado pelo leme, o torque na coordenada z gerado pelo leme altera a direção do veleiro. A variável ψ de η , 2.2, representa o rumo do veleiro em relação ao eixo de coordenadas inercial, a variável a ser controlada. O ângulo do leme em relação ao barco, σ , é a variável manipulada, que altera o torque gerado pelo leme. No controle da vela λ e κ são as variáveis manipuladas, o ângulo de rotação da vela referente ao barco e o ângulo do *flap*. O controle da vela tem como objetivo obter λ e κ adequados para que o veleiro possa navegar tanto a favor ou contra o vento e proporcione a força necessária para o barco se movimentar, pois é com a força aerodinâmica do vento na vela que obtém-se a propulsão do veleiro.

3.1 Controle de rumo

O rumo, ψ , é controlado pelo torque gerado no leme, R_ψ , que é definido pelo quarto elemento de R da equação 2.25. R_ψ é o sinal de controle que será usado para calcular σ , a variável manipulada do sistema.

$$R_\psi = l_4(R_L \cos(\beta_{cr}) - R_D \sin(\beta_{cr})) \quad (3.1)$$

Assumindo $v = p = r \approx 0$ e $\sin(\beta_{cr}) \approx 0$ baseado nas equações 2.22, 2.23 e na pouca interferência do movimento lateral do veleiro, simplifica-se R_ψ como:

$$R_\psi = l_4 R_L \cos(\beta_{cr}) \quad (3.2)$$

A força de *lift* de um perfil pode ser simplificada para pequenos ângulos de ataque ($\alpha < 15^\circ$) como:

$$F_{L0} = \frac{1}{2} \rho A C_{L0} \alpha V^2 \quad (3.3)$$

C_{L0} é o coeficiente de *lift* linearizado, que é aproximado para 2π .

Portanto temos:

$$\begin{aligned} R_\psi &= l_4 \frac{1}{2} \rho_w A_r C_{L0} \alpha_r V_{cr}^2 \cos(\beta_{cr}) \\ &= l_4 \rho_w A_r \pi \alpha_r V_{cr}^2 \cos(\beta_{cr}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Substituindo 2.24 em 3.4:

$$R_\psi = l_4 \rho_w A_r \pi (-\beta_{cr} + \sigma + \pi) V_{cr}^2 \cos(\beta_{cr}) \quad (3.5)$$

Isolando a variável manipulada σ obtém-se:

$$\sigma = \beta_{cr} - \pi + \frac{R_\psi}{l_4 \rho_w A_r \pi V_{cr}^2 \cos(\beta_{cr})} \quad (3.6)$$

Assumindo que um barco não tenha movimento somente lateral e sempre para iniciar o controle terá velocidade diferente de zero, o denominador de 3.6 será sempre maior que zero.

3.1.1 Controle de rumo PID

Controle PID é um controlador realimentado com ganho proporcional, integrador e derivativo ao erro.

A figura 3.1.1 apresenta o circuito esquemático de um sistema em malha fechada com controlador PID. A saída do sistema é o rumo do veleiro (ψ), a entrada é o rumo desejável (ψ_d) e o erro é a diferença entre rumo desejável e o rumo corrente do barco.

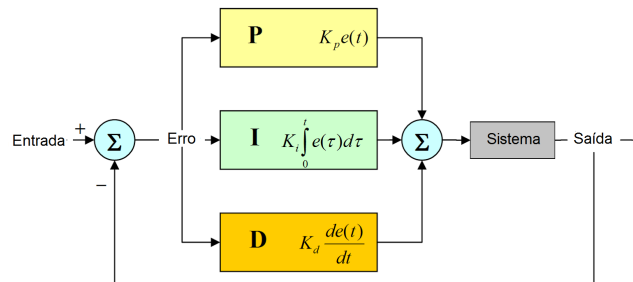


Figura 3.1: Esquema Controle PID

A função transferência do controlador PID é dada por:

$$C(s) = \frac{R_\psi}{\psi_d - \psi} = (K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d) \quad (3.7)$$

onde R_ψ é o sinal de controle e $(\psi_d - \psi)$ é o erro em malha fechada. K_p , K_i e K_d são, respectivamente, o ganho proporcional, integral e derivativo.

A componente proporcional do controle permite que quanto maior o erro maior será o sinal de controle, a componente integrativa elimina erros em regime permanente e a componente derivativa reduz as oscilações transitórias.

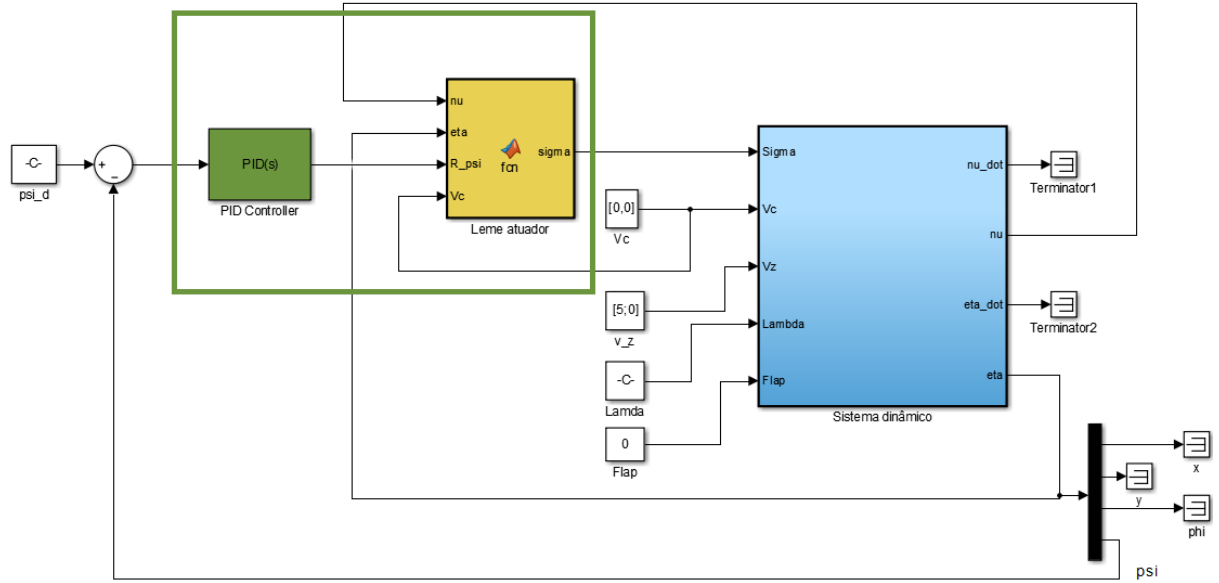


Figura 3.2: Controle PID simulado

O controle projetado é composto do controlador PID e da equação 3.6 que fornece o valor do ângulo do leme σ em relação ao sinal de controle R_ψ . O controle portanto precisa receber os valores de ν e η do sistema para ser implementado.

Para o projeto dos ganhos do controlador PID é simplificado o sistema dinâmico do veleiro 2.2 de modo que as forças externas na vela e quilha são considerados distúrbios (d). Portanto o sistema fica representado pela equação:

$$(I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} = R_\psi + d \quad (3.8)$$

De 2.2, onde $\dot{\eta} = J(\phi, \psi)\nu$, tira-se: $\dot{\psi} = r \cos(\phi)$.

Considerando para ângulos pequenos de ϕ : $\cos(\phi) = 1$ e definindo s como o operador derivativo obtém-se:

$$\frac{\psi}{R_\psi} = \frac{1}{(I_{zz} - N_{\dot{r}})s^2} \quad (3.9)$$

Fechando a malha de controle junto com o controlador PID determina-se a função de transferência do sistema como:

$$H(s) = \frac{\psi}{\psi_d} = \frac{(K_p + K_d s + \frac{K_i}{s}) \frac{1}{(I_{zz} - N_{\dot{r}}) s^2}}{1 + (K_p + K_d s + \frac{K_i}{s}) \frac{1}{(I_{zz} - N_{\dot{r}}) s^2}} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{(I_{zz} - N_{\dot{r}}) s^3 + K_d s^2 + K_p s + K_i} \quad (3.10)$$

O controle deve ser sintonizado de modo que os polos estejam no plano esquerdo, para que o sistema em malha fechada seja estável. Os ganhos devem ser calculados para obter uma resposta do sistema com tempo de subida, sobrepasso e tempo de estabilização definidos para o projeto. Em sistemas de segunda ordem esses parâmetros dependem dos valores de ζ e ω_n . Os zeros de $H(s)$ e o polo extra em sistema de terceira ordem devem ser projetados de modo a não influenciar muito na dinâmica do sistema.

$$H(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{(s + \tau)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3.11)$$

3.1.2 Controle por *Backstepping*

O controle por *Backstepping*, Krstic et al. (1995), é uma técnica de controle realimentado não linear baseada em funções de Lyapunov. É escolhido um controle virtual adequado para estabilizar os subsistemas. Essa construção de controle é demonstrado e exemplificado em Fossen (2011).

Projeto de controladores baseado em Lyapunov

A Teoria de Lyapunov, Khalil (2015), é utilizada para projeto de controladores e análise de estabilidade de sistemas não lineares. As funções de Lyapunov são úteis para o projeto de leis de controle estabilizantes para esses sistemas.

O estudo da estabilidade de um sistema não linear a partir da sua linearização em torno do ponto de equilíbrio é chamado método indireto de Lyapunov. Enquanto o método direto é a análise por meio da generalização do conceito de energia associada a sistemas mecânicos.

O controle por *Backstepping* projetado para o veleiro Glória utiliza o método direto de Lyapunov, chamado de segundo método de Lyapunov.

No método direto a ideia é construir funções escalares do tipo energia, funções de Lyapunov, para o sistema e analisar se a energia decresce.

Considerando o sistema

$$\dot{x} = f(x), \quad f(0) = 0. \quad (3.12)$$

O segundo método de Lyapunov refere-se à energia total do sistema. Se um sistema possui um estado de equilíbrio estável x_e , então a energia total armazenada no sistema decresce com o tempo até atingir o seu valor mínimo em x_e . A estabilidade é analisada via funções de Lyapunov.

Definição 1. A função de Lyapunov $V(x)$ satisfaz as seguintes condições para todo $t_1 > t_0$ e para todo x na vizinhança de $x = 0$, com $x = 0$ sendo um ponto de equilíbrio do sistema $\dot{x} = f(x)$:

1. $V(x)$ e suas derivadas parciais são definidas e são contínuas
2. $V(0) = 0$
3. $V(x) > 0$ para todo $x \neq 0$ e $\dot{V}(x)$ é a derivada de $V(x)$ em relação às trajetórias de $\dot{x} = f(x)$.

Teorema 1. Suponha que uma $V(x)$ possa ser determinada para o sistema $\dot{x} = f(x)$, $f(0) = 0$. Então, o estado de equilíbrio $x = 0$ é assintoticamente estável se $\dot{V}(x)$ for negativa definida e estável no sentido de Lyapunov se $\dot{V}(x)$ for negativa semi-definida.

Com base no teorema de estabilidade por Lyapunov é projetado a lei de controle para estabilidade de rumo do veleiro.

Controle *Backstepping* proposto

As variáveis de estado foram definidas como: z_2 sendo o erro entre rumo do veleiro e o desejável e um controle virtual δ_1 , z_3 dependendo da velocidade angular r e um controle virtual δ_2 e z_1 como a integral do erro. Permite-se assim projetar um controlador proporcional, derivativo e integrativo, que tem como objetivo de z_1 eliminar o erro em regime permanente.

O erro é calculado pela diferença do rumo do veleiro pelo desejável:

$$e = \psi - \psi_d \quad (3.13)$$

Variáveis de estado:

$$\dot{z}_1 = e \quad (3.14)$$

$$\dot{z}_2 = \dot{e} - \dot{\delta}_1 \quad (3.15)$$

$$\dot{z}_3 = \dot{r} - \dot{\delta}_2 \quad (3.16)$$

Lyapunov:

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 \quad (3.17)$$

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (3.18)$$

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}z_3^2 \quad (3.19)$$

Onde δ_1 e δ_2 são controles virtuais a ser definidos para garantir que as derivadas das funções de Lyapunov sejam negativas semidefinidas.

Passo 1:

$$\dot{z}_1 = e \quad (3.20)$$

Sabendo que $z_2 = e - \delta_1$ tem-se:

$$\dot{z}_1 = \delta_1 + z_2 \quad (3.21)$$

Escolhendo $\delta_1 = -K_i z_1$ e substituindo em 3.21:

$$\dot{z}_1 = -K_i z_1 + z_2 \quad (3.22)$$

A derivada da primeira candidata a função de Lyapunov é dada por:

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = -K_i z_1^2 + z_1 z_2 \quad (3.23)$$

Portanto $\dot{V}_1 \leq 0$ se $z_2 = 0$.

Passo 2:

$$\dot{z}_2 = \dot{e} - \dot{\delta}_1 \quad (3.24)$$

onde $\dot{e} = \dot{\psi} - \dot{\psi}_d$.

Sabendo que $z_3 = r - \delta_2$ e $\dot{\psi} = r \cos(\phi)$. Simplificando $\dot{\psi}_d = 0$ e $\cos(\phi) = 1$ tem-se:

$$\dot{z}_2 = \delta_2 + z_3 - \dot{\delta}_1 \quad (3.25)$$

A derivada da segunda candidata a função de Lyapunov é dada por:

$$\dot{V}_2 = -K_i z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 \dot{z}_2 = -K_i z_1^2 + z_2(z_1 + \delta_2 + z_3 - \dot{\delta}_1) \quad (3.26)$$

Escolhendo $\delta_2 = \dot{\delta}_1 - K_p z_2 - z_1$ e substituindo em 3.26:

$$\dot{V}_2 = -K_i z_1^2 - K_p z_2^2 + z_2 z_3 \quad (3.27)$$

Portanto $\dot{V}_2 \leq 0$ se $z_3 = 0$.

Passo 3:

$$\dot{z}_3 = \dot{r} - \dot{\delta}_2 \quad (3.28)$$

A derivada da terceira candidata a função de Lyapunov é dada por:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 = -K_i z_1^2 - K_p z_2^2 + z_3(z_2 + \dot{r} - \dot{\delta}_2) \quad (3.29)$$

Extraindo \dot{r} da equação de dinâmica do sistema 2.2:

$$\dot{r} = \frac{C_\psi(S + K - C_A \nu_r - D) + R_\psi}{I_{zz} - N_{\dot{r}}} \quad (3.30)$$

Onde $C_\psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, e R_ψ é o sinal de controle.

Deve-se encontrar o valor de R_ψ que faz com que a terceira candidata a função de Lyapunov escolhida satisfaça o teorema 1. Assim R_ψ que estabiliza o sistema é dado por:

$$R_\psi = -C_\psi(S + K - C_A \nu_r - D) + (I_{zz} - N_{\dot{r}})(\dot{\delta}_2 - z_2 - K_d z_3) \quad (3.31)$$

Substituindo 3.31 em 3.30 e esta em 3.29:

$$\dot{V}_3 = -K_i z_1^2 - K_p z_2^2 - K_d z_3^2 \quad (3.32)$$

Proporcionando $\dot{V}_3(z_1, z_2, z_3) \leq 0$ para todo $K_p, K_i, K_d > 0$.

Aplicando o princípio de LaSalle, Khalil (2015), pode ser mostrado que a origem $z = 0$ é o máximo centro invariante, portanto $z = 0$ é assintoticamente estável.

Concluindo, a lei de controle que proporciona estabilidade global e assintótica é dada por:

$$R_\psi = -C_\psi(S + K - C_A \nu_r - D) + (I_{zz} - N_{\dot{r}})(\dot{\delta}_2 - z_2 - K_d z_3) \quad (3.33)$$

Onde as variáveis de estado são $\dot{z}_1 = \psi - \psi_d$, $z_2 = \psi - \psi_d - \delta_1$ e $z_3 = r - \delta_2$. Com controles virtuais $\delta_1 = -K_i z_1$ e $\delta_2 = \dot{\delta}_1 - K_p z_2 - z_1$.

3.2 Controle de vela

O ajuste do ângulo λ da vela, 2.2, permite ter controle da força resultante propulsora do veleiro. Essa força depende da direção do barco em relação ao vento. Quando se quer velejar a favor do vento a vela deve estar aberta, com λ por volta de $\pm 90^\circ$, onde a força resultante tem como principal componente a força de *drag* do vento. Não é possível navegar diretamente contra o vento, para seguir essa direção é preciso movimentar em zigue-zagues com um ângulo de aproximadamente 45° em relação a direção do vento com a vela mais fechada, com λ por volta de $\pm 40^\circ$. Nessa configuração, quando se navega perto da linha do vento, a força resultante tem como principal componente a força aerodinâmica *lift*.

A figura abaixo exemplifica as posições adequadas da vela em relação ao vento e a direção do barco.

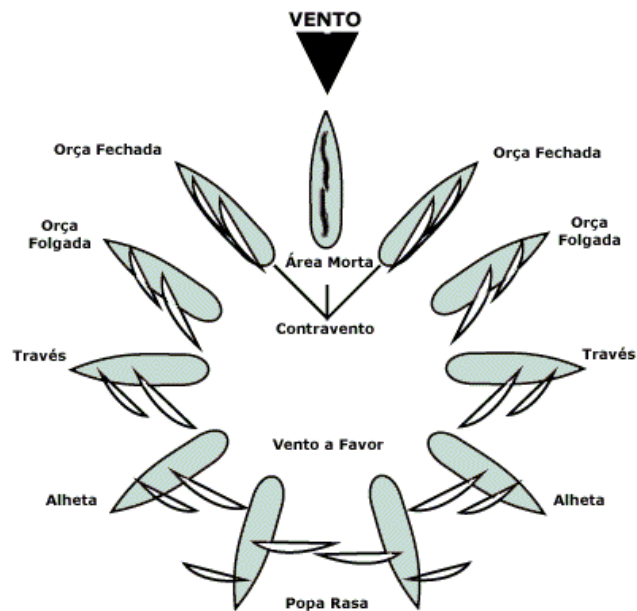


Figura 3.3: Diagrama vela/vento

Fonte: veleiro.net/livrodebordo/cursodevela_parte1

As forças e torques na vela foram apresentados na equação 2.21 que depende das forças de *lift* e *drag* produzidas pela aerodinâmica do vento na vela. As forças aerodinâmicas dependem do ângulo de ataque da vela (α_s) e do ângulo de *flap* (κ). O ângulo de ataque é formado pelo ângulo do vento aparente e o λ da vela como mostrado na equação 2.20.

O controle proposto tem como objetivo encontrar o valor do ângulo λ e κ que proporcionam a maior força na direção x' do barco.

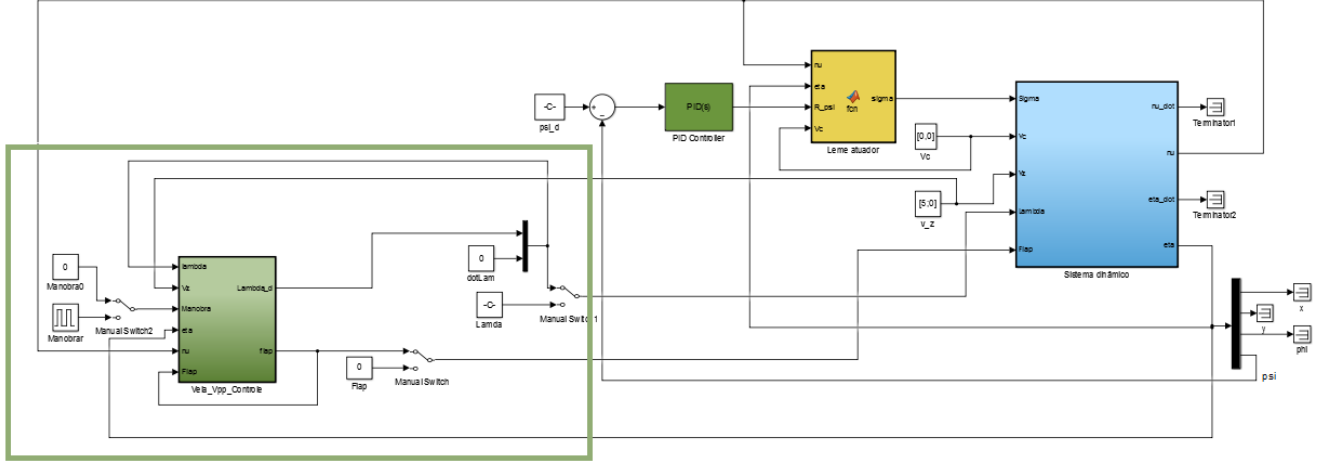


Figura 3.4: Controle vela simulado

O algoritmo do controle procura nas tabelas de coeficientes de *lift* (C_L) e *drag* (C_D) do perfil da vela, que se encontram no apêndice A, o ângulo de ataque (α_s) e do *flap* (κ) que resultará a maior força na direção x' do veleiro, a primeira componente de S 2.21.

As tabelas dos coeficientes de *lift* e *drag* são formadas pelo ângulo α_s variando de 0° a 180° e com o ângulo κ variando de 0° a 30° , ambos com uma amostragem de 5° . Para cada valor de ângulo do *flap* é construído uma tabela de valores de C_L e C_D que variam com o valor de α_s .

Basicamente é feito uma busca em cada tabela de κ do *flap* o ângulo α , que resulta na maior força da vela na direção x' , $S_{x'}$ 2.21, dependendo da combinação dos coeficientes C_L e C_D extraídos das tabelas. Após encontrado o ângulo de ataque desejado é calculado o valor do ângulo da vela (λ) pela equação 3.35.

$$\max_{\alpha_s, \kappa} (-S_L \sin(\beta_{ws}) + S_D \cos(\beta_{ws})) \quad (3.34)$$

onde $S_L = \frac{1}{2} \rho A_s C_L(\alpha_s, \kappa) V_{ws}^2$
 $S_D = \frac{1}{2} \rho A_s C_D(\alpha_s, \kappa) V_{ws}^2$.

$$\lambda = \beta_{ws} - \alpha_s + \pi \quad (3.35)$$

O ideal para esse algoritmo de busca seria a interpolação dos valores das tabelas. Utilizando algum método de interpolação, como o de Newton, se obteria uma função da superfície gerada, onde se teria os valores de C_L e C_D em função de α_s e κ . Como objetivo é maximizar a força em x' da vela ($S_{x'}$) 2.21 que depende da função da superfície interpolada, derivando e igualando a zero $S_{x'}$ é possível encontrar seus

pontos de máximo.

Para a navegação contra o vento foi definido um ângulo fixo λ de 40° . Esse ângulo fixo permite que a força de *lift* seja maior que a de *drag* e tenha uma resultante adequada para a navegação na direção x' .

Para definir o sinal do ângulo λ , em qual bordo do barco a vela deve estar, é seguido o diagrama da figura 3.2. Essa configuração depende da posição do rumo que o barco se encontra em relação ao vento.

Vela em bombordo, lado esquerdo, portanto λ positivo se:

$$0^\circ < \psi - \beta_w < 180^\circ \quad || \quad -360^\circ < \psi - \beta_w < -180^\circ \quad (3.36)$$

Boreste, lado direito, portanto λ negativo se:

$$180^\circ \leq \psi - \beta_w \leq 360^\circ \quad || \quad -180^\circ \leq \psi - \beta_w \leq 0^\circ \quad (3.37)$$

É implementado uma saturação no ângulo λ de $\pm 90^\circ$, os ângulos máximos de abertura da vela ao velejar a favor do vento.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Foram simuladas as principais orientações de rumo da navegação de um veleiro: Navegação a favor do vento, de través e contra o vento. O vento simulado teve orientação de $\beta_w = 0^\circ$ e velocidade de 5 m/s, aproximadamente 9.7 nós, que representa um vento moderado. Em todas as simulações o veleiro iniciou seu movimento a partir do repouso com todas as variáveis de velocidade e aceleração zeradas.

Os resultados são mostrados em três blocos, o primeiro em que só se utiliza o controle PID com o ângulo da vela fixo, o segundo com o controle PID em conjunto com o controle de ajuste de vela e o terceiro com o controle *Backstepping* proposto em conjunto também com o ajuste de vela. No sistema ψ_d significa o rumo desejado e ψ_0 o rumo de origem.

4.1 Controle de rumo PID com vela fixa

Os ganhos calculados e sintonizados para o controle PID foram: $K_p = 20.2$ $K_i = 2.3$ $K_d = 30$. Com valor de $\zeta = 0.6$ e $\omega_n = 0.76$.

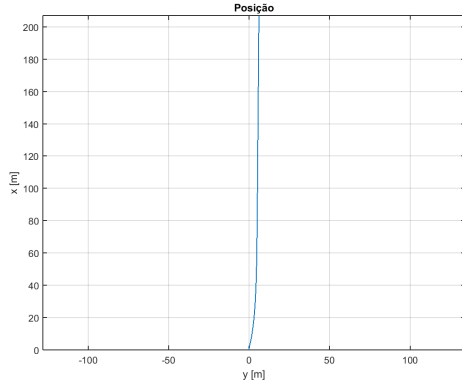
Para validar o controle as simulações foram feitas com a vela fixa de acordo com a posição mais adequada para o movimento desejado. O *flap* da vela nesse bloco de simulação teve sempre ângulo $\kappa = 0^\circ$.

4.1.1 Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 0^\circ$ $\lambda = 90^\circ$

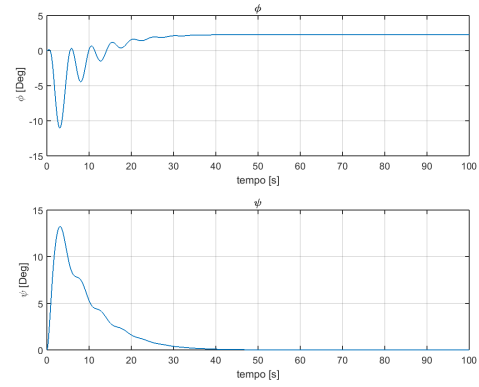
Nesta simulação foi validado a navegação a favor do vento, onde a principal força atuante na vela é a de arrasto (*drag*), que representa a força gerada no sentido do vento.

O veleiro inicia a navegação com orientação do rumo igual a 0° (ψ_0) e é esperado que ele permaneça nesse rumo durante sua trajetória.

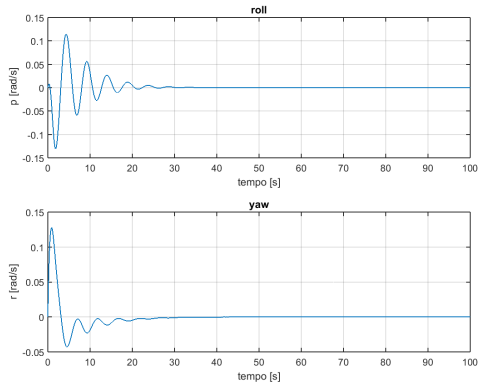
Dinâmica:



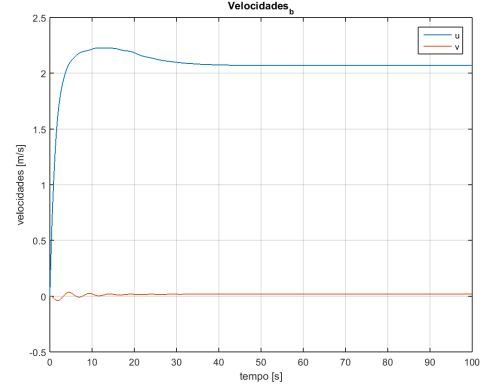
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



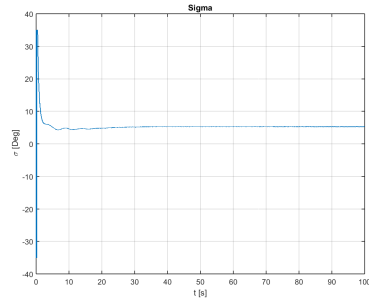
(c) Aceleração no referencial do barco



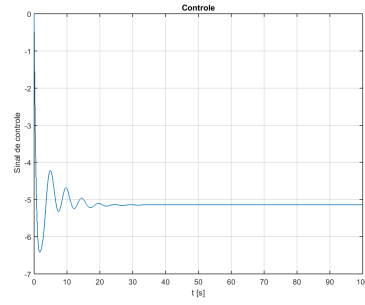
(d) Velocidade no referencial do barco

Fazendo uma análise dos gráficos de posição, orientação, velocidade e aceleração do barco percebe-se que o controle manteve a navegação a favor do vento com orientação de 0° como objetivado. No tempo inicial de simulação o veleiro começou a adquirir velocidade, esse início com pouca velocidade e maior variação nas acelerações gerou uma divergência em relação ao rumo desejado que foi corrigido satisfatoriamente pelo controle.

Controle:



(e) Ângulo leme (σ)

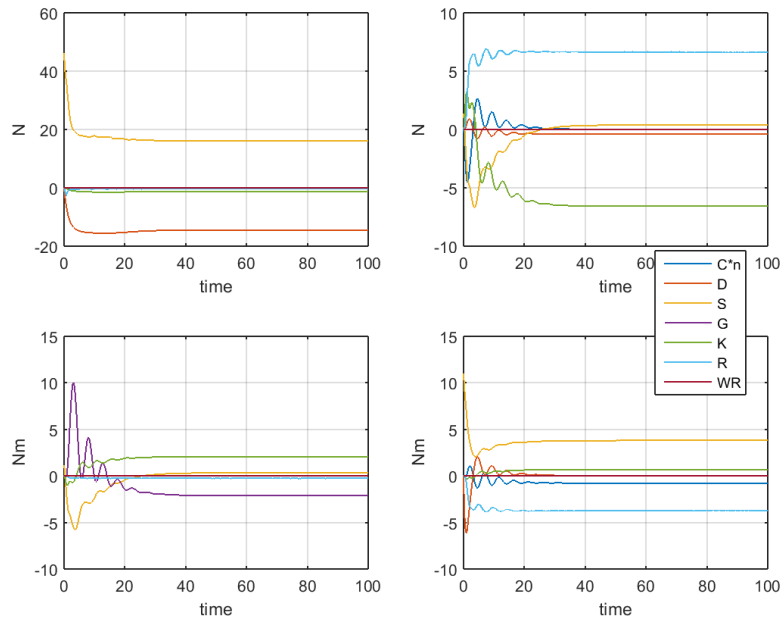


(f) Sinal de controle

O ângulo do leme se ajustou de acordo com o sinal de controle e estabilizou na posição adequada para proporcionar as forças e torques necessárias à orientação de rumo desejada.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro, os gráficos superiores a esquerda e a direita, respectivamente. Os gráficos inferiores são os torques que geram o *roll* e *yaw*, a esquerda e a direita, respectivamente.



(g) Forças e torques

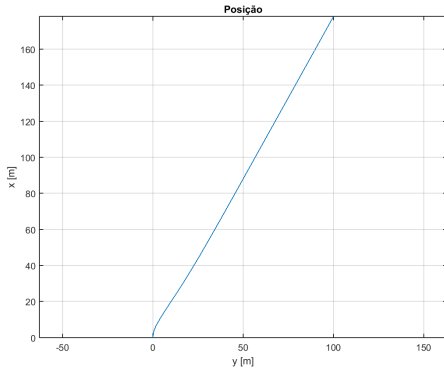
Figura 4.1: Controle PID: $\psi_d = 0^\circ$

A análise do gráfico de forças permite observar que a força da vela tem maior componente na direção x' e uma influência em y' somente no início da simulação. Pelo torque em *roll* percebe-se que a quilha consegue zera-lô depois da estabilidade do rumo, além de diminuir o movimento lateral do barco fazendo uma força contrária á força do leme em y' . No torque em *yaw* além da influência da vela temos o torque gerado pelo leme que é a variável que controla o rumo do veleiro.

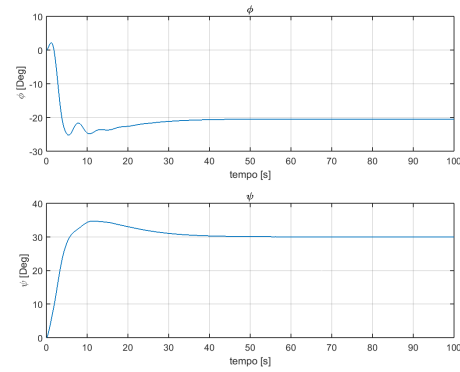
4.1.2 Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 30^\circ$ $\lambda = 60^\circ$

Nesta simulação permanece a navegação a favor do vento, porém com o ângulo do rumo desejado diferente da orientação inicial.

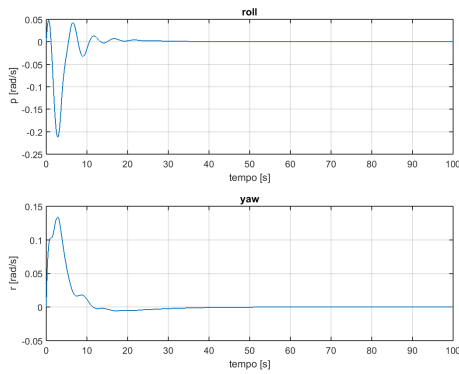
Dinâmica:



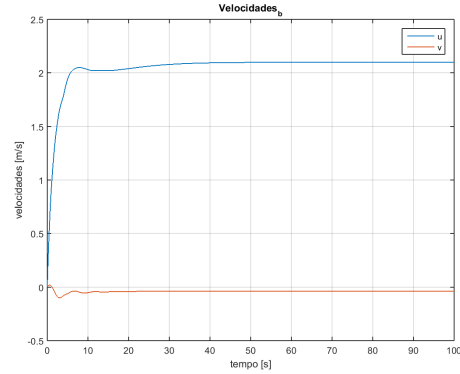
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



(c) Aceleração no referencial do barco

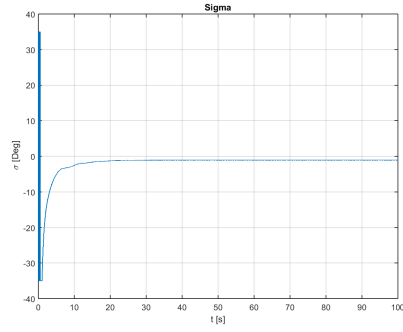


(d) Velocidade no referencial do barco

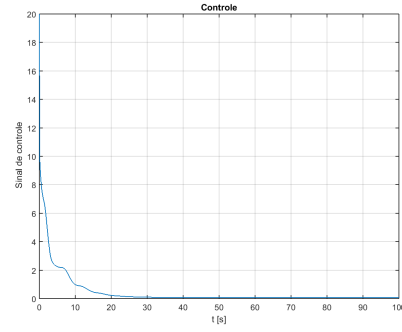
Pelos resultados exibidos nos gráficos é observado que o rumo se estabilizou e atingiu a orientação desejada e as acelerações de *roll* e *yaw* se estabilizaram em zero. É possível perceber que o barco atingiu uma adernação (inclinação lateral) constante

de 20° . É possível notar também a quase nula velocidade na direção y' , devido ao bom posicionamento da vela e a força da quilha que cancela esse movimento lateral.

Controle:



(e) Ângulo leme (σ)

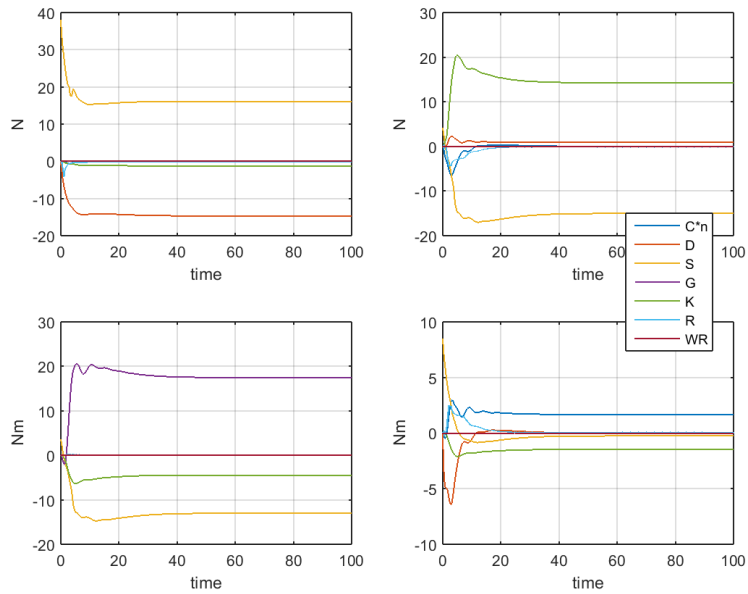


(f) Sinal de controle

O sinal de controle começa alto devido ao erro entre o rumo inicial e o desejado. Quando o barco começa a atingir o rumo objetivado o sinal de controle diminui e se estabiliza. O ângulo do leme se ajusta a partir da resposta do sinal de controle.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro e seus torques.



(g) Forças e torques

Figura 4.2: Controle PID: $\psi_d = 30^\circ$

No gráfico de forças observa-se a força da vela na direção x' e y' e o esforço da quilha em cancelar as forças em y' . Percebe-se o torque em *roll* que gerará a adernação e o torque em *yaw* que controla o rumo.

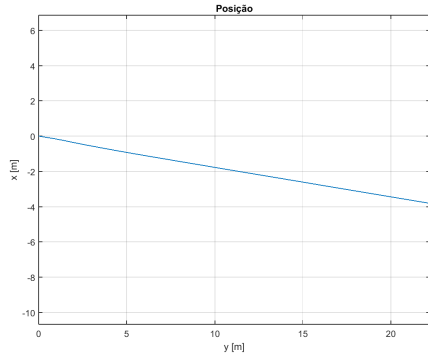
4.1.3 Navegação contra o vento: $\psi_0 = 135^\circ$ $\psi_d = 135^\circ$ $\lambda = 40^\circ$

Tendo o intuito de validar a navegação contra o vento foi feita a simulação com ângulo de rumo de 135° , que tem como valor de diferença entre a linha do vento e a orientação do barco de 45° . Em navegações contra o vento não é possível atingir rumos com ângulos mais próximos à linha do vento quanto os 45° , sendo necessário o deslocamento em zigue-zagues para atingir pontos na proximidade dessa zona.

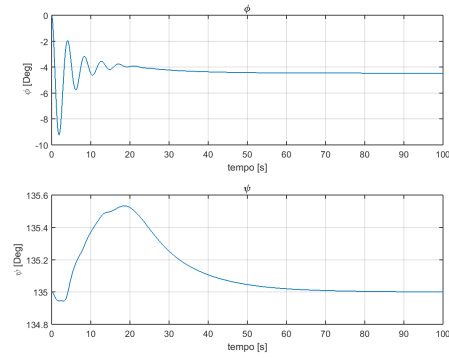
Contra o vento a principal força atuante na vela é a força de sustentação (*lift*), perpendicular ao vento aparente.

O veleiro inicia a navegação com orientação do rumo igual a 135° (ψ_0) e é esperado que ele permaneça nesse rumo durante sua trajetória.

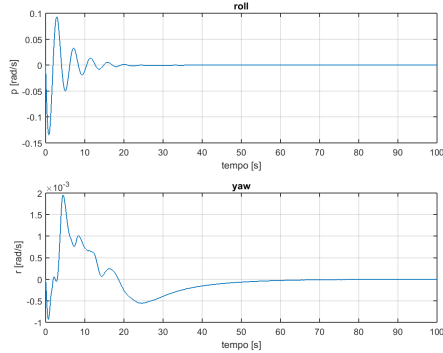
Dinâmica:



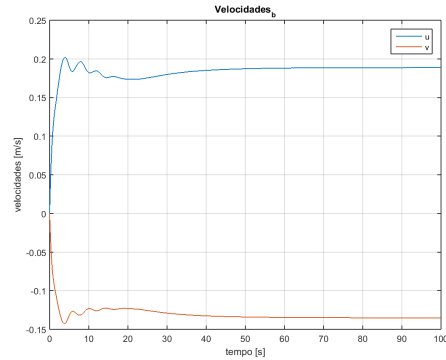
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



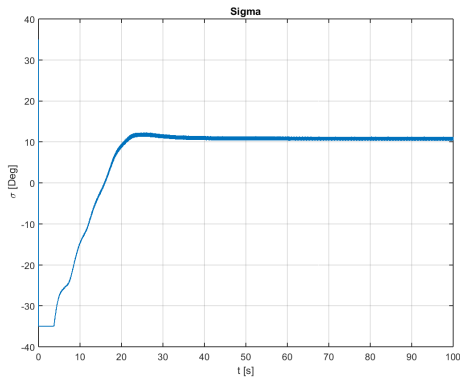
(c) Aceleração no referencial do barco



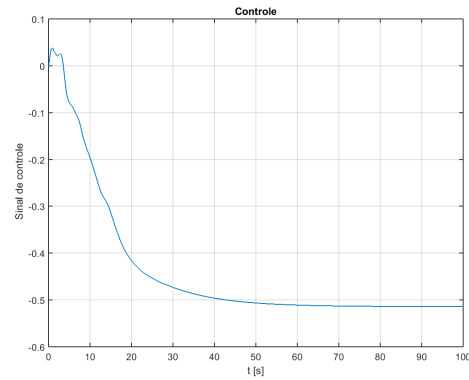
(d) Velocidade no referencial do barco

Partindo do repouso o veleiro teve uma pequena divergência ao rumo desejado, que não chegou a passar de 0.6° e voltou para o rumo inicial em seguida. Observa-se no gráfico de acelerações que depois dos movimentos iniciais elas se estabilizaram em zero. No gráfico de velocidades é visível a velocidade na direção y' que em navegações contra o vento é difícil de ser cancelada, porém ainda menor que a componente na coordenada x' .

Controle:



(e) Ângulo leme (σ)

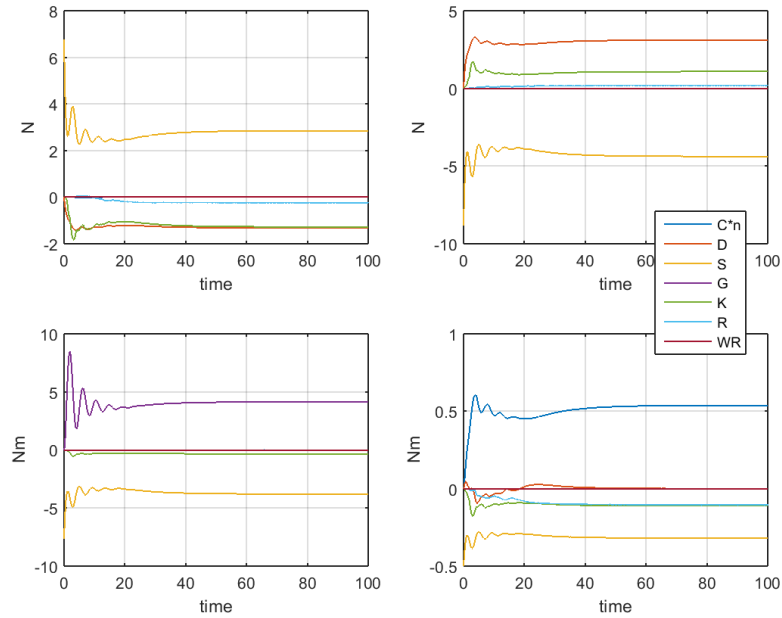


(f) Sinal de controle

O ângulo do leme se ajustou de acordo com o controle do rumo e estabilizou em 10° , proporcionando as forças necessárias à orientação desejada do barco.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro, os gráficos superiores a esquerda e a direita, respectivamente. Os gráficos inferiores são os torques que geram o *roll* e *yaw*, a esquerda e a direita, respectivamente.



(g) Forças e torques

Figura 4.3: Controle PID: $\psi_d = 135^\circ$

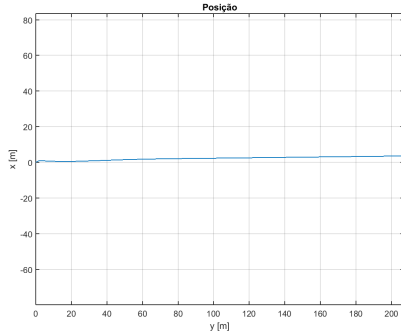
No gráfico das forças contra o vento observa-se um valor bem menor da força da vela na direção x' em relação a força a favor do vento. Observa-se também a menor força da quilha, que não consegue compensar totalmente as forças em y' , ocasionando uma velocidade lateral do barco.

4.1.4 Navegação de través: $\psi = 90^\circ$ $\psi_d = 90^\circ$ $\lambda = 55^\circ$

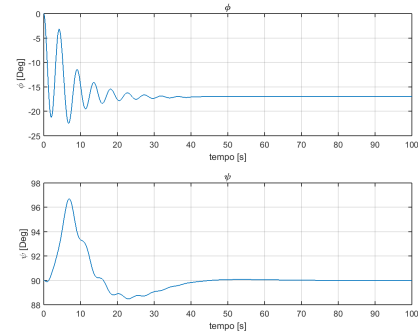
Uma navegação de través é quando o veleiro se movimenta perpendicular a linha do vento, recebendo vento lateral. Esta simulação tem como objetivo validar esse movimento do barco.

O veleiro inicia a navegação com orientação do rumo igual a 90° (ψ_0) e é esperado que ele permaneça nesse rumo durante sua trajetória.

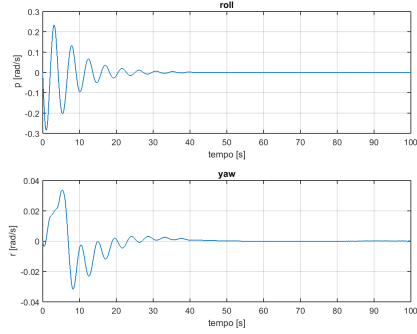
Dinâmica:



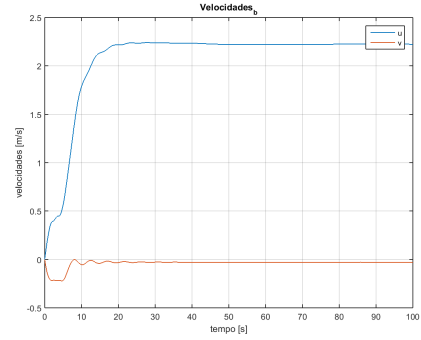
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



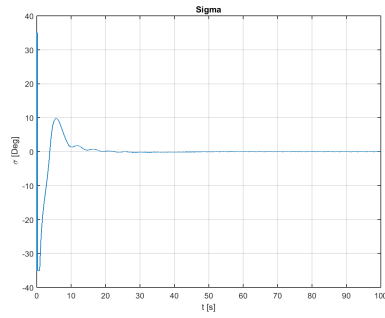
(c) Aceleração no referencial do barco



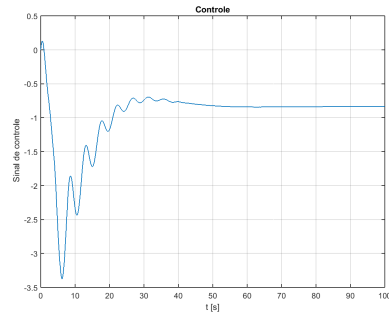
(d) Velocidade no referencial do barco

Com os resultados dos gráficos de orientação, posição e velocidade é possível validar o comportamento do veleiro em navegações de través. O controle manteve o rumo em 90° apesar da pequena variação inicial.

Controle:



(e) Ângulo leme (σ)

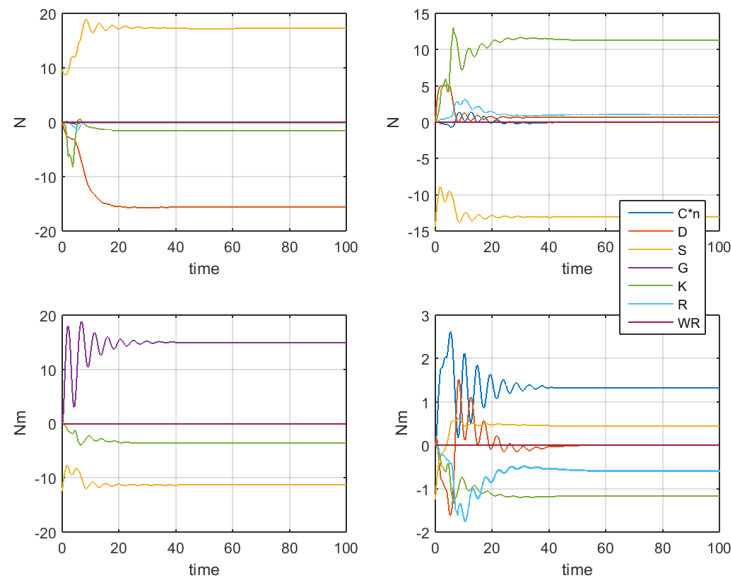


(f) Sinal de controle

O valor absoluto do sinal de controle aumentou a medida que o rumo divergia do referencial e se manteve constante ao estabilizar o rumo desejável. Com o rumo estabilizado o ângulo do leme se manteve bem próximo de zero.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro e seus torques.



(g) Forças e torques

Figura 4.4: Controle PID: $\psi_d = 90^\circ$

No gráfico das forças observamos o torque do leme, importante para a estabilidade do rumo desejável. A força da quilha suficiente para zerar o movimento lateral. E a força da vela em x' que gera a propulsão ao veleiro.

4.2 Controle de rumo PID com controle de vela

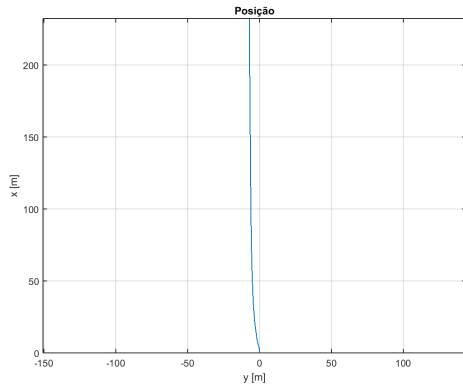
Os ganhos sintonizados para o controle PID foram os mesmos do simulado com as velas fixas: $K_p = 20.2$ $K_i = 2.3$ $K_d = 30$. A validação deste bloco de resultados é do controle PID em combinação com o controle de ajuste da vela.

4.2.1 Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 0^\circ$

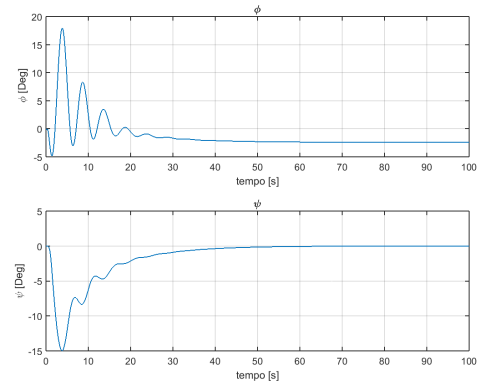
Nesta simulação foi validado a navegação a favor do vento, onde a principal força atuante na vela é a de arrasto (*drag*), que representa a força gerada no sentido do vento. É validado tanto o controle PID de rumo, quanto o controle de ajuste da vela.

O veleiro inicia a navegação com orientação do rumo igual a 0° (ψ_0) e é esperado que ele permaneça nesse rumo durante sua trajetória.

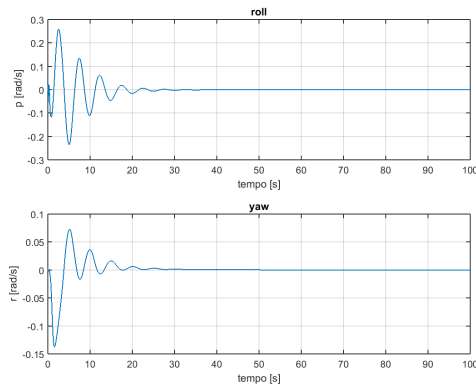
Dinâmica:



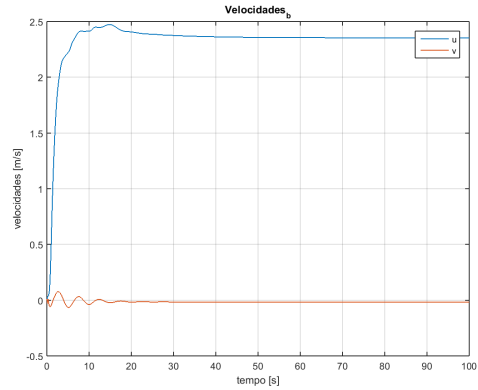
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



(c) Aceleração no referencial do barco

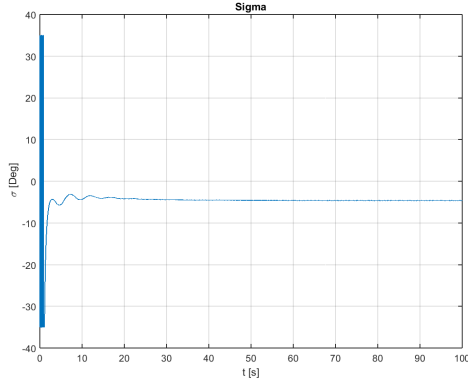


(d) Velocidade no referencial do barco

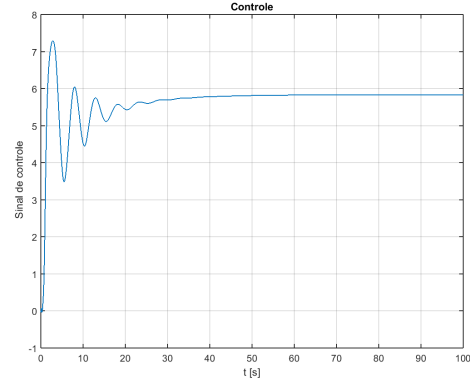
Como na simulação com a vela fixa o rumo foi controlado e atingiu o valor desejável. Combinado com o ajuste da vela a variação inicial do rumo foi negativa deslocando mais para a esquerda a posição do barco.

Percebe-se uma maior velocidade de propulsão na direção x' , devido ao algoritmo que calcula o ângulo ideal da vela e do *flap*.

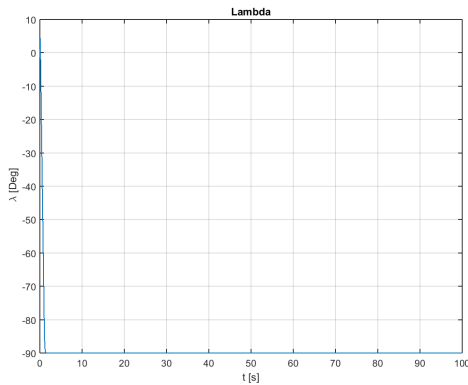
Controle:



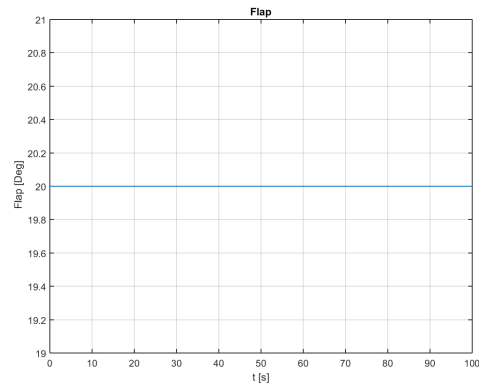
(e) Ângulo leme (σ)



(f) Sinal de controle



(g) Ângulo da vela (λ)



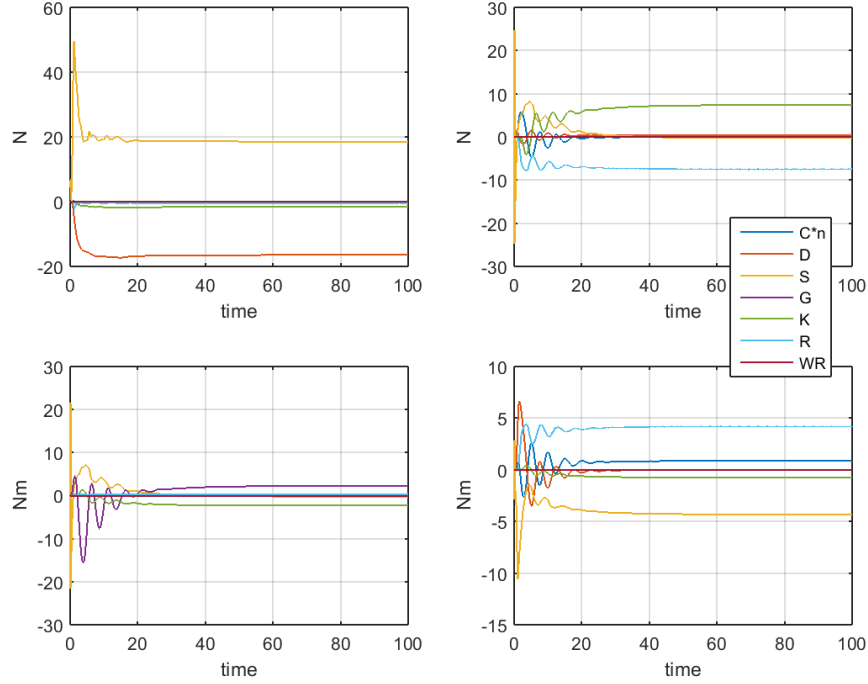
(h) Ângulo do *flap*

Com os gráficos de λ e do ângulo do *flap* observa-se o comportamento do controle de ajuste da vela, que altera o ângulo da vela em relação a orientação do barco e seleciona o ângulo ideal do *flap*.

Como o torque proporcionado pelo controle de rumo deve ser horário, o valor do seu sinal deve ser positivo. Na simulação com a vela fixa o sinal de controle foi negativo para torque anti-horário.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro, os gráficos superiores a esquerda e a direita, respectivamente. Os gráficos inferiores são os torques que geram o *roll* e *yaw*, a esquerda e a direita, respectivamente.



(i) Forças e torques

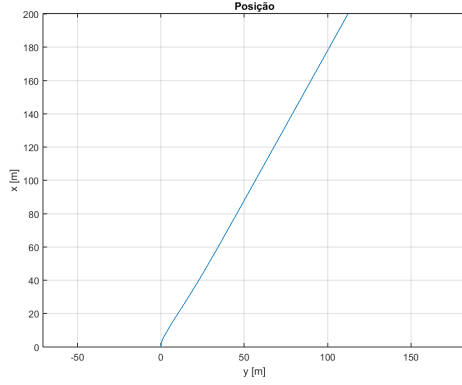
Figura 4.5: Controle PID e controle vela: $\psi_d = 0^\circ$

Pelo gráfico de forças percebe-se o torque do leme com sinal oposto ao da simulação com vela fixa, pois para estabilizar o rumo o leme precisou proporcionar um torque anti-horário com a vela fixa e horário com o ajuste de vela. Observa-se também a força da vela em x' um pouco maior, a força da quilha cancelando o movimento lateral e o torque do leme contrário ao da vela.

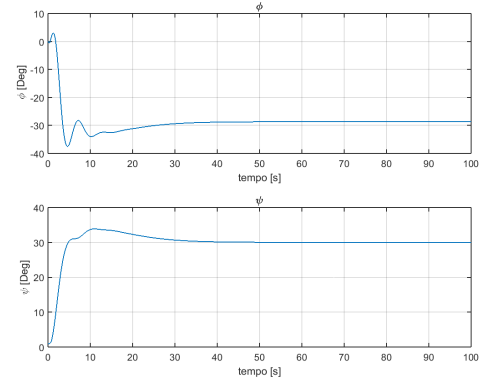
4.2.2 Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 30^\circ$

Nesta simulação permanece a navegação a favor do vento, porém com o ângulo do rumo desejado diferente da orientação inicial.

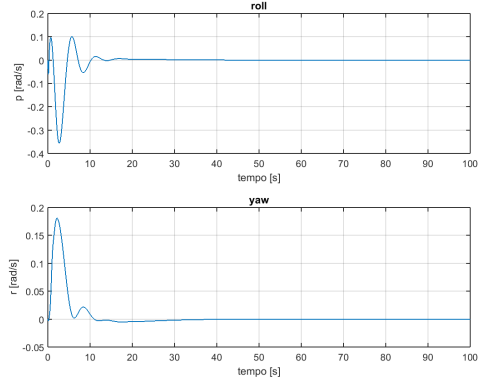
Dinâmica:



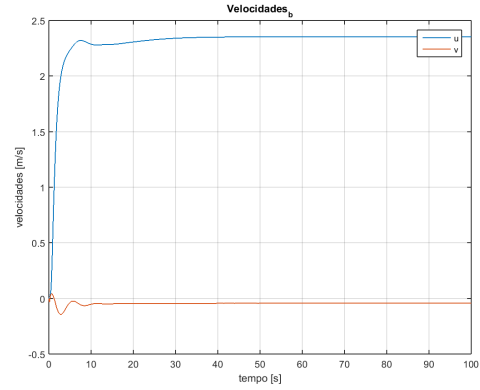
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



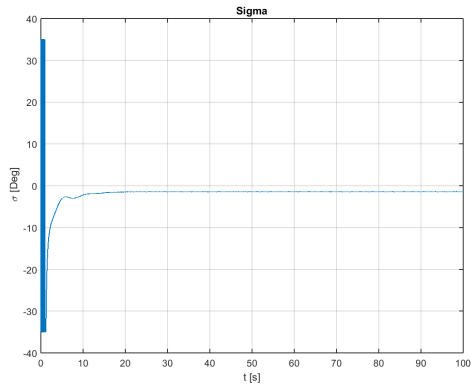
(c) Aceleração no referencial do barco



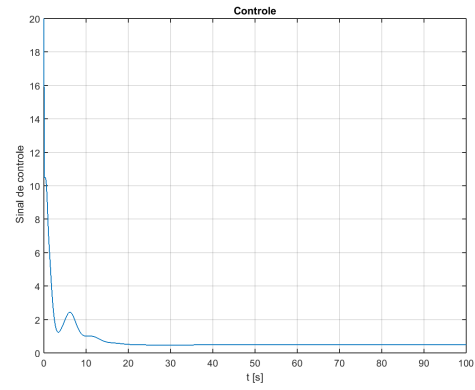
(d) Velocidade no referencial do barco

Com o ajuste da vela percebe-se uma maior velocidade de propulsão do veleiro na direção x' .

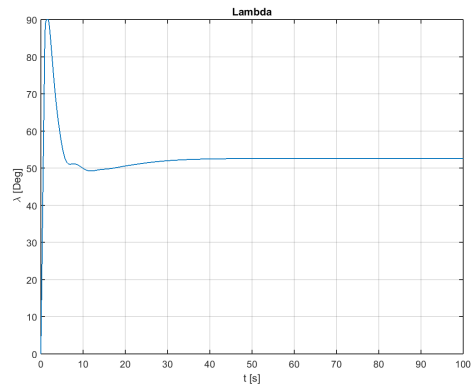
Controle:



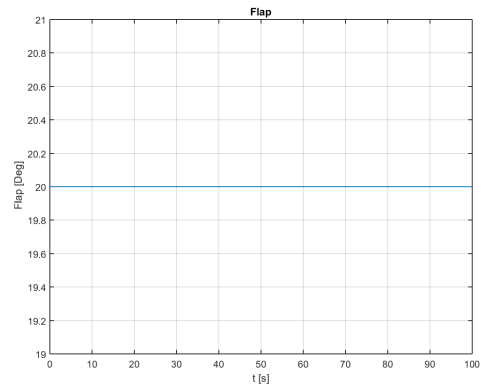
(e) Ângulo leme (σ)



(f) Sinal de controle



(g) Ângulo da vela (λ)

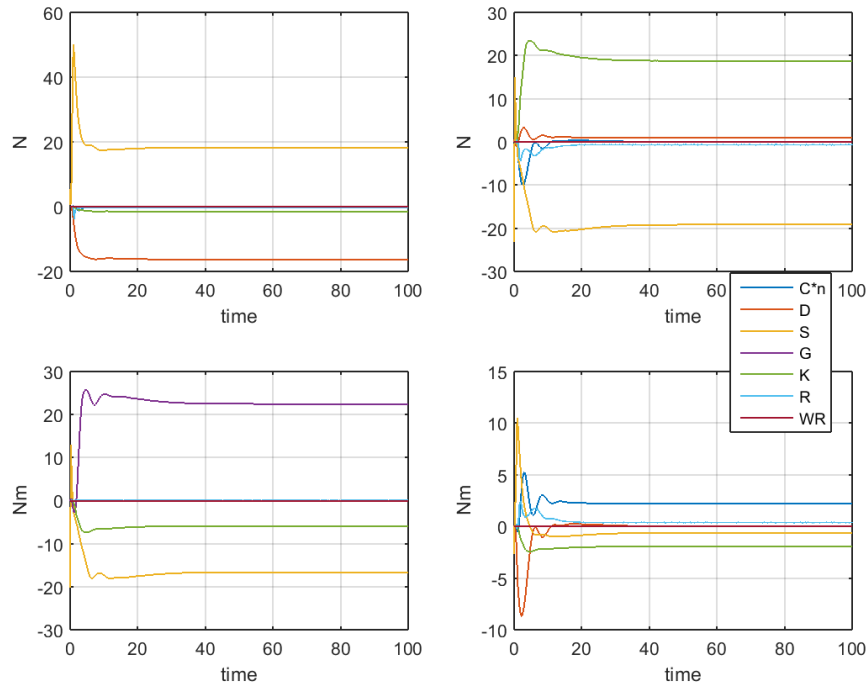


(h) Ângulo do *flap*

Percebe-se a variação do ângulo da vela, que começou em 90° , ideal para navegação em que o barco iniciou seu movimento e atingindo ângulo próximo de 50° ao estabilizar no rumo de 30° com vento a favor.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro, os gráficos superiores a esquerda e a direita, respectivamente. Os gráficos inferiores são os torques que geram o *roll* e *yaw*, a esquerda e a direita, respectivamente.



(i) Forças e torques

Figura 4.6: Controle PID e controle vela: $\psi_d = 30^\circ$

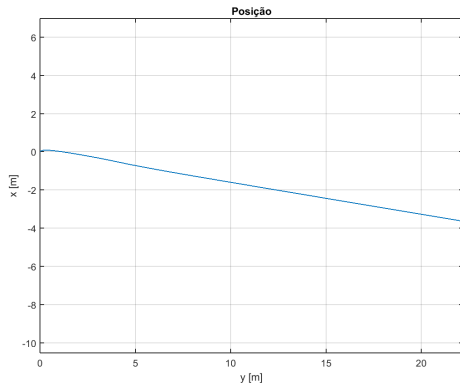
No gráfico de forças observa-se a força da vela na direção x' e y' e o esforço da quilha em cancelar as forças em y' . Percebe-se o torque em *roll* que gerá a adernação e o torque em *yaw* que controla o rumo.

4.2.3 Navegação contra o vento: $\psi_0 = 135^\circ$ $\psi_d = 135^\circ$

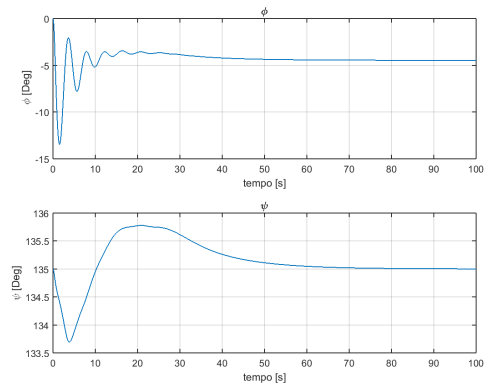
Tendo o intuito de validar a navegação contra o vento com o controle PID em combinação com o controle de ajuste da vela foi feita a simulação com ângulo de rumo de 135° , que tem como diferença entre a linha do vento e a orientação do barco de 45° .

O veleiro inicia a navegação com orientação do rumo igual a 135° (ψ_0) e é esperado que ele permaneça nesse rumo durante sua trajetória.

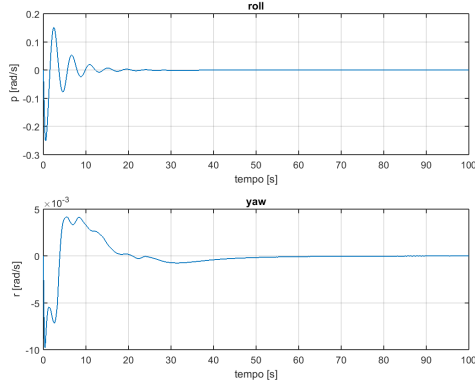
Dinâmica:



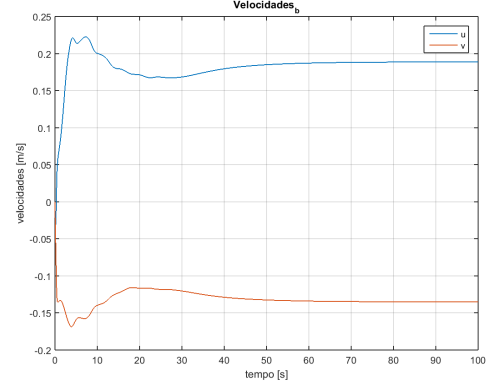
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



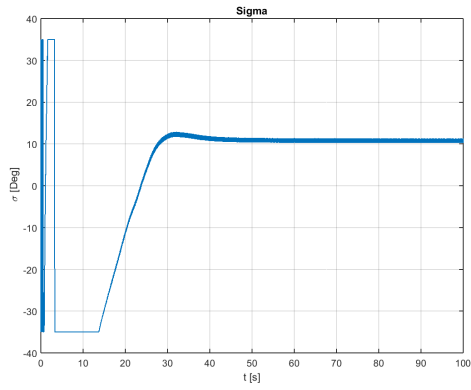
(c) Aceleração no referencial do barco



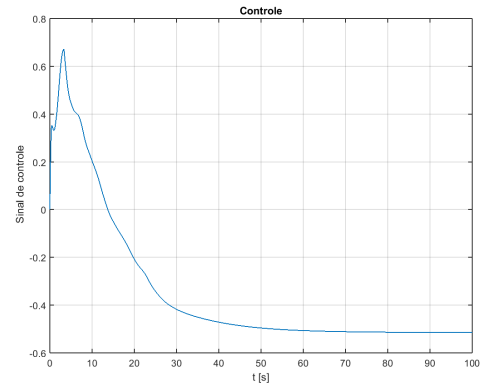
(d) Velocidade no referencial do barco

A variação inicial do rumo não passou de 1° e se estabilizou na referência. Como nas navegações contra o vento, teve uma velocidade lateral, porém menor que a velocidade na componente x' .

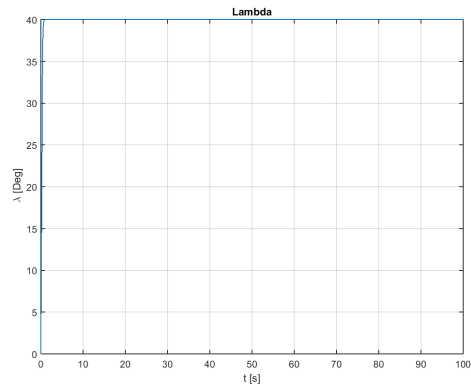
Controle:



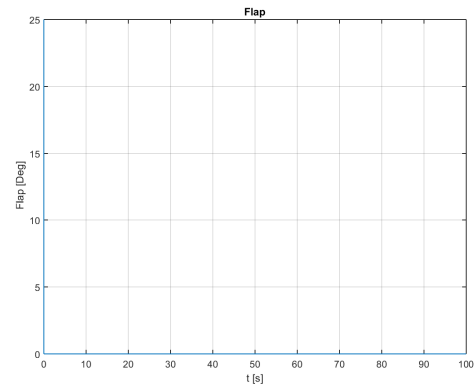
(e) Ângulo leme (σ)



(f) Sinal de controle



(g) Ângulo da vela (λ)

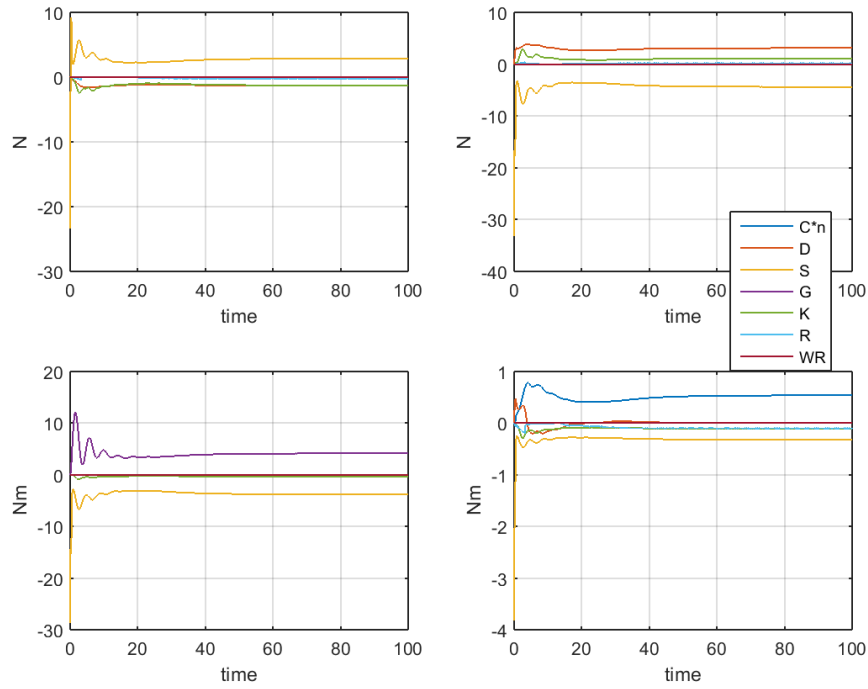


(h) Ângulo do *flap*

O ângulo do leme se estabilizou em 10° proporcionando o controle do rumo desejável. O ajuste da vela se manteve em 40° que é o ângulo escolhido e adequado para a navegação contra o vento.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro, os gráficos superiores a esquerda e a direita, respectivamente. Os gráficos inferiores são os torques que geram o *roll* e *yaw*, a esquerda e a direita, respectivamente.



(i) Forças e torques

Figura 4.7: Controle PID e controle vela: $\psi_d = 135^\circ$

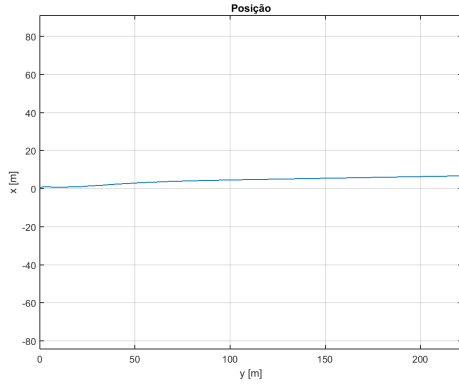
O gráfico de forças demonstra um comportamento normal das forças atuantes no veleiro para um movimento contra o vento, porém houve um pico inicial da força da vela gerado pela configuração de 0° que o ângulo da vela partiu seu movimento.

4.2.4 Navegação de través: $\psi_0 = 90^\circ$ $\psi_d = 90^\circ$

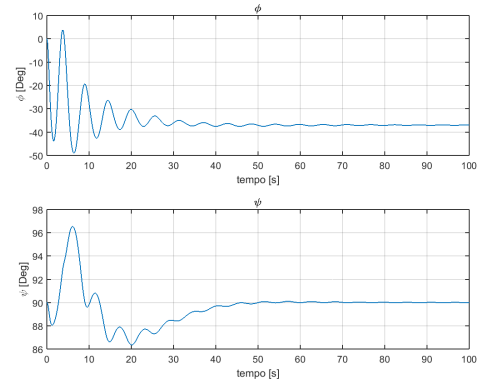
Esta simulação tem como objetivo validar o movimento de través do veleiro, recebendo vento lateral.

O veleiro inicia a navegação com orientação do rumo igual a 90° (ψ_0) e é esperado que ele permaneça nesse rumo durante sua trajetória.

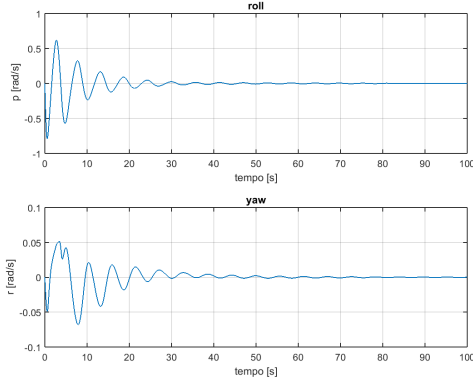
Dinâmica:



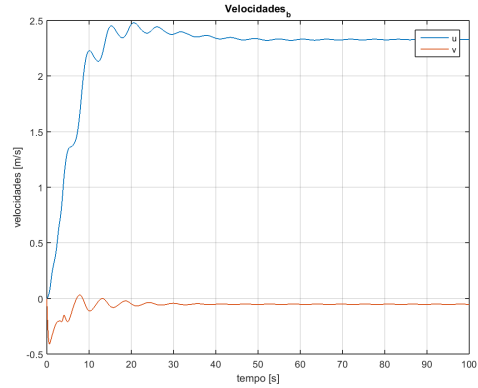
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



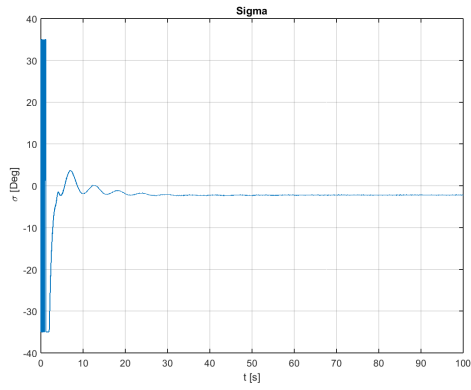
(c) Aceleração no referencial do barco



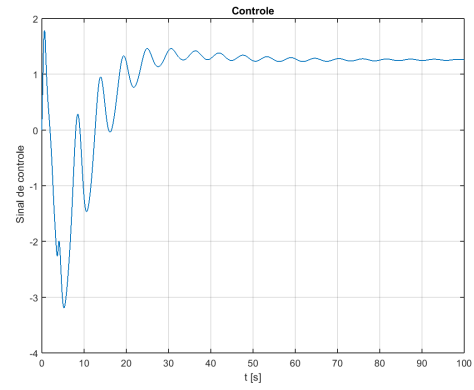
(d) Velocidade no referencial do barco

Com os resultados dos gráficos dos ângulos de orientação, posição, aceleração e velocidade é possível validar o comportamento do veleiro em navegações de través. O controle PID em combinação com o ajuste da vela manteve o rumo em 90° apesar da variação inicial. Percebe-se a maior velocidade na coordenada x' com o controle da vela.

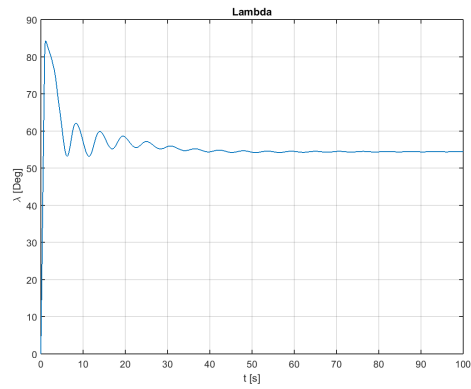
Controle:



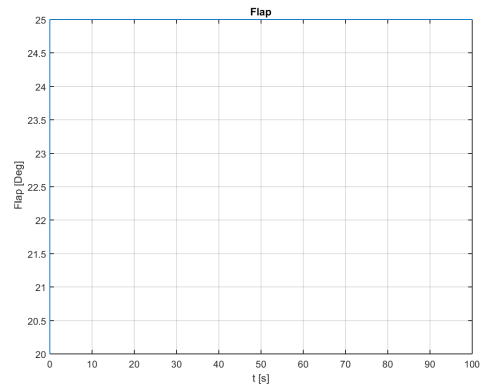
(e) Ângulo leme (σ)



(f) Sinal de controle



(g) Ângulo da vela (λ)

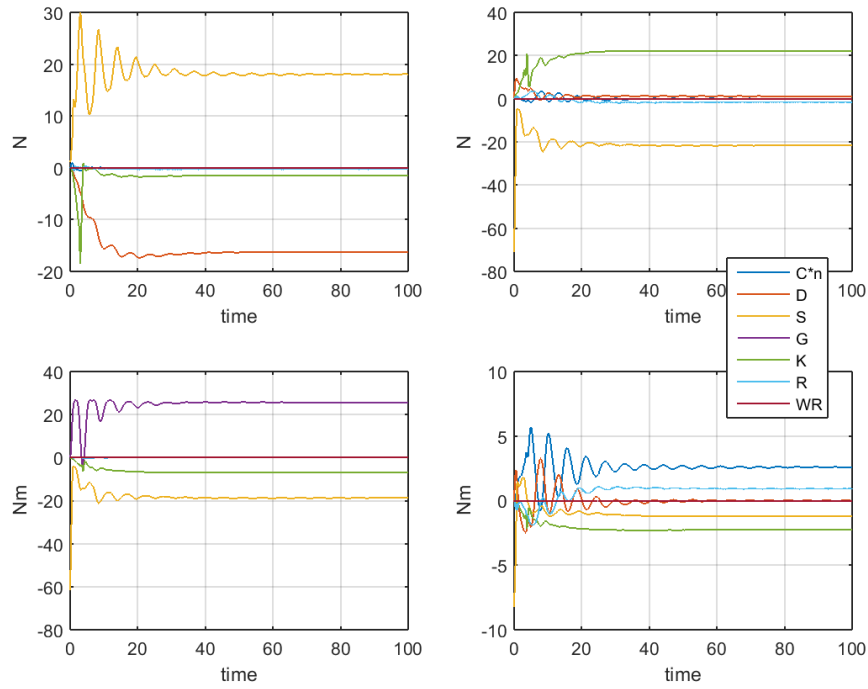


(h) Ângulo do *flap*

O ângulo λ da vela é ajustado com oscilações iniciais que vão diminuindo com a estabilidade do movimento do veleiro. Assim como o ângulo σ do leme.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro, os gráficos superiores a esquerda e a direita, respectivamente. Os gráficos inferiores são os torques que geram o *roll* e *yaw*, a esquerda e a direita, respectivamente.



(i) Forças e torques

Figura 4.8: Controle PID e controle vela: $\psi_d = 90^\circ$

No gráfico das forças observamos a força da vela em x' com algumas oscilações devido ao movimento de ajuste da vela. O torque do leme, importante para a estabilidade do rumo. E a força da quilha, diminuindo o somatório das forças laterais.

4.3 Controle de rumo *Backstepping* com controle de vela

Neste bloco de resultados é validado o controle *Backstepping* em combinação com o controle de ajuste de vela. Como o controle de vela já foi validado com o controle PID, será apresentado nesse capítulo apenas os resultados do controle *Backstepping* junto com o ajuste de vela.

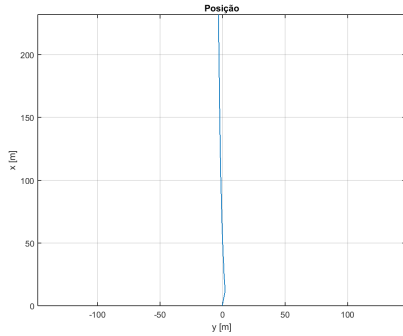
Os ganhos sintonizados para o controle *Backstepping* foram: $K_p = 0.2$, $K_i = 0.001$ e $K_d = 0.07$. A velocidade inicial do veleiro para esse bloco de simulação foi de 0.5m/s em x' .

4.3.1 Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 0^\circ$

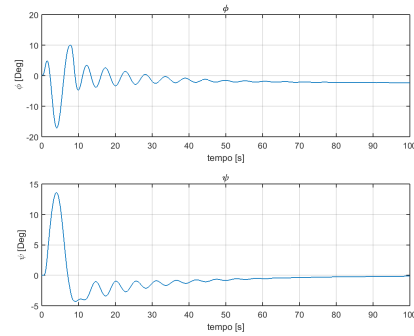
Nesta simulação foi validado a navegação a favor do vento, onde a principal força atuante na vela é a de arrasto (*drag*), que representa a força gerada no sentido do vento. É validado tanto o controle *Backstepping* de rumo, quanto o controle de ajuste de vela.

O veleiro inicia a navegação com orientação do rumo igual a 0° (ψ_0) e é esperado que ele permaneça nesse rumo durante sua trajetória.

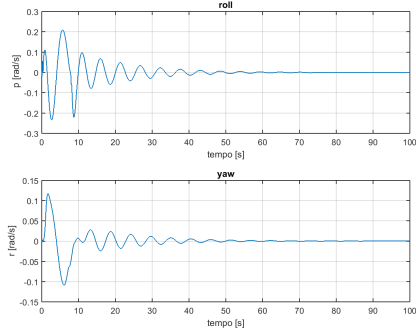
Dinâmica:



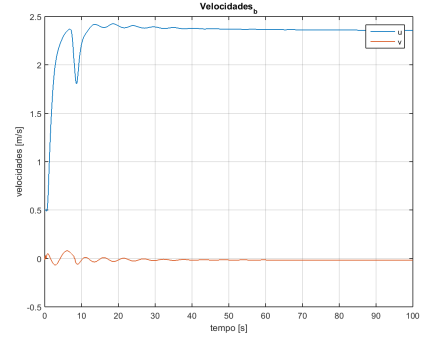
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



(c) Aceleração no referencial do barco

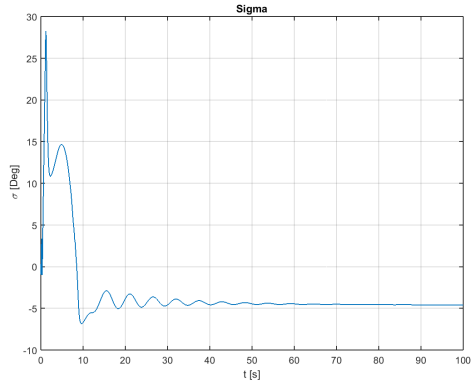


(d) Velocidade no referencial do barco

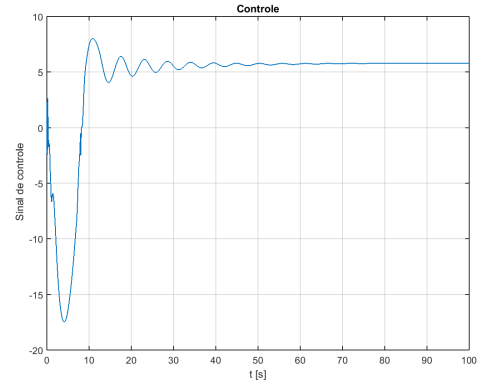
O objetivo de continuar navegando na direção inicial foi atingido, houve uma divergência do rumo no começo da simulação.

Percebe-se uma boa velocidade de propulsão na direção x' , devido ao algoritmo que ajusta a vela.

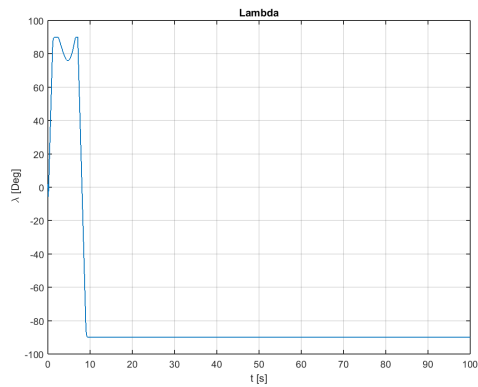
Controle:



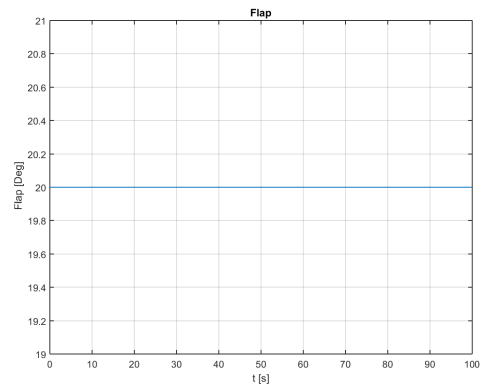
(e) Ângulo leme (σ)



(f) Sinal de controle



(g) Ângulo da vela (λ)



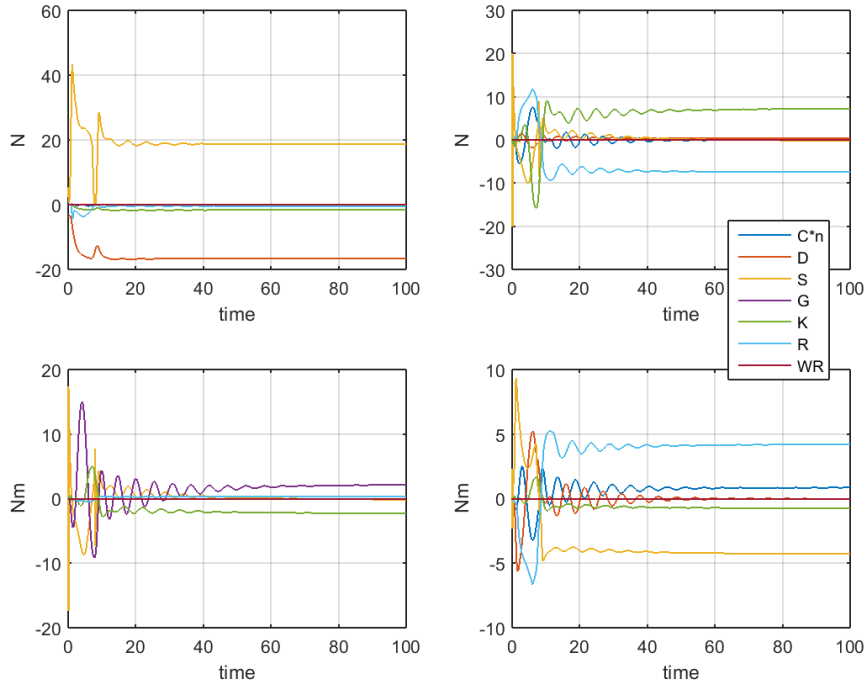
(h) Ângulo do *flap*

O sinal de controle e ângulo do leme se ajustaram de modo a estabilizar o rumo do veleiro.

Com os gráficos de λ e do ângulo do *flap* observa-se o comportamento do controle de ajuste de vela, que altera o ângulo da vela em relação a orientação do barco e seleciona o ângulo ideal do *flap*. O ângulo da vela muda de sinal quando o veleiro cruza a linha do vento como é proposto pelo diagrama vento/vela 3.2.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro, os gráficos superiores a esquerda e a direita, respectivamente. Os gráficos inferiores são os torques que geram o *roll* e *yaw*, a esquerda e a direita, respectivamente.



(i) Forças e torques

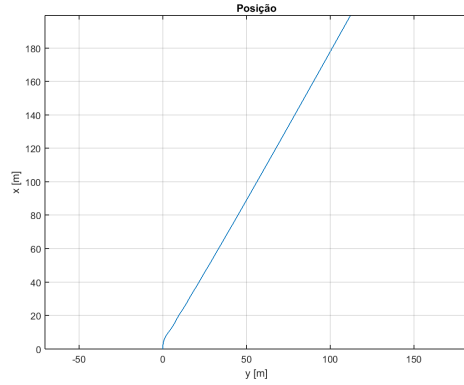
Figura 4.9: Controle *Backstepping* e controle vela: $\psi_d = 0^\circ$

A análise do gráfico de forças permite observar que a força da vela tem maior componente na direção x' e uma influência em y' somente no início da simulação. Pelos gráficos de torques em *roll* e forças em y' percebe-se o funcionamento da quilha que diminui o torque resultante e o movimento lateral do barco, fazendo uma força contrária á força do leme em y' . No torque em *yaw* além da influência da vela temos o torque gerado pelo leme, a variável que controla o rumo do veleiro.

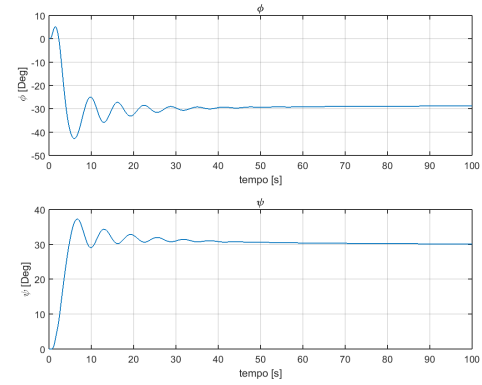
4.3.2 Navegação a favor do vento: $\psi_0 = 0^\circ$ $\psi_d = 30^\circ$

Nesta simulação permanece a navegação a favor do vento, porém com o ângulo do rumo desejado diferente da orientação inicial.

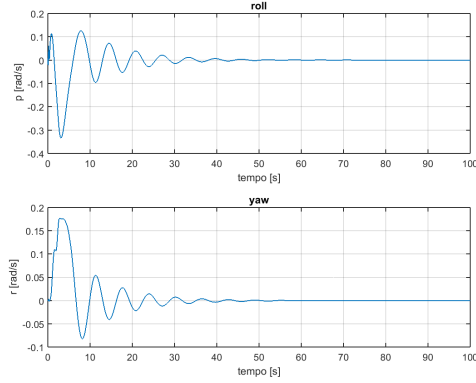
Dinâmica:



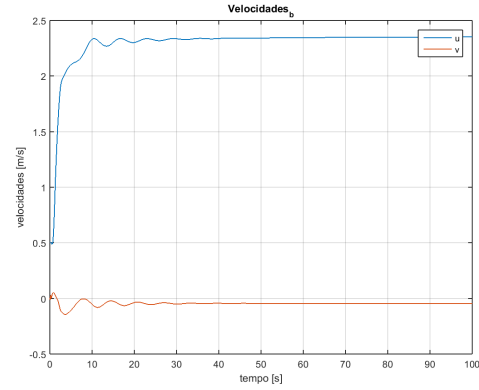
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



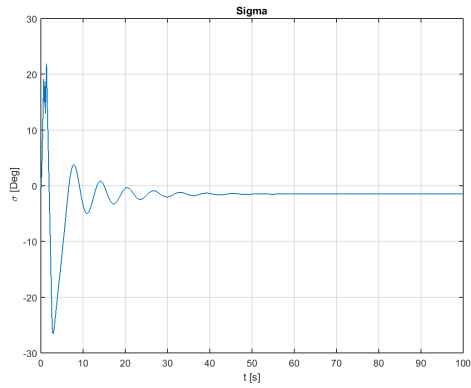
(c) Aceleração no referencial do barco



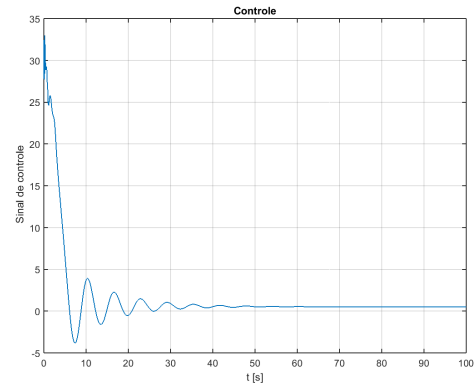
(d) Velocidade no referencial do barco

Com os resultados representados nos gráficos acima percebe-se um desempenho adequado do controle *Backstepping*. O erro entre o rumo do veleiro e o desejável foi zerado e teve um sobrepasso de poucos graus.

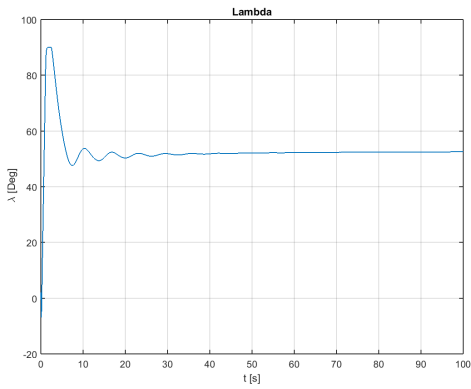
Controle:



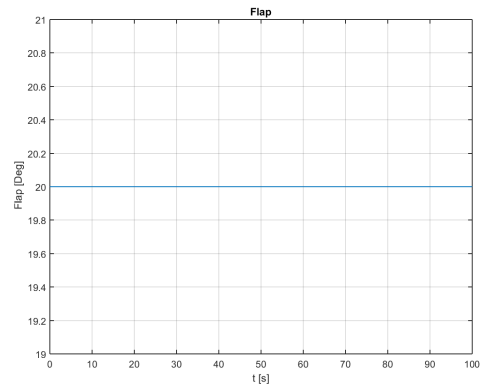
(e) Ângulo leme (σ)



(f) Sinal de controle



(g) Ângulo da vela (λ)

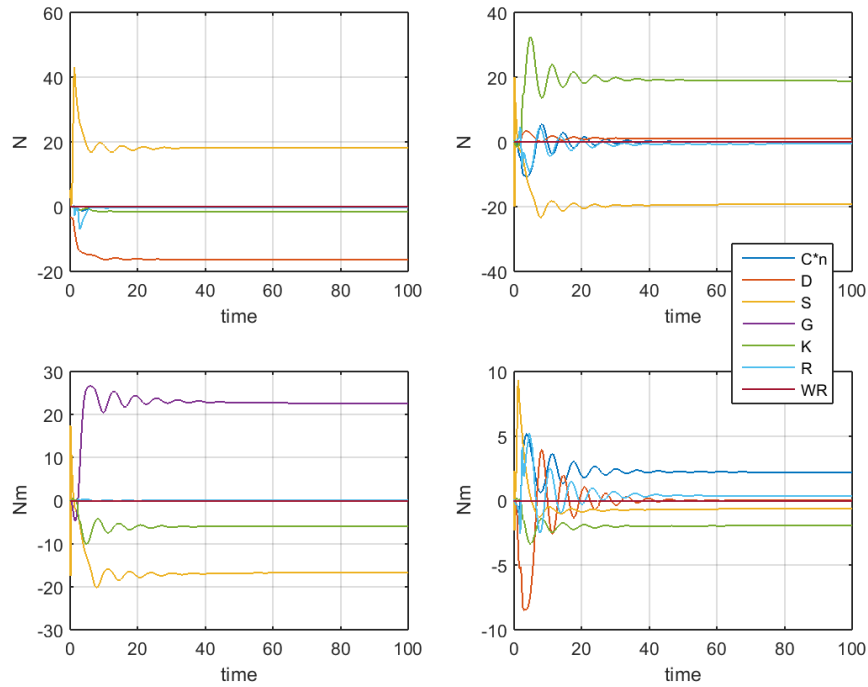


(h) Ângulo do *flap*

O controle de rumo e ajuste de vela tiveram comportamentos adequados. O sinal de controle teve um pico maior no início, quando o veleiro começa seu movimento com rumo longe do desejável.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro, os gráficos superiores a esquerda e a direita, respectivamente. Os gráficos inferiores são os torques que geram o *roll* e *yaw*, a esquerda e a direita, respectivamente.



(i) Forças e torques

Figura 4.10: Controle *Backstepping* e controle vela: $\psi_d = 30^\circ$

A força da vela em y' e em x' tem amplitudes semelhantes no rumo de 30° do veleiro. No gráfico de forças em y' dessa simulação é mais visível o funcionamento da quilha, que proporciona uma força maior para diminuir o movimento lateral do barco. A quilha desempenhou adequadamente seu papel, o veleiro apresentou boa velocidade na direção x' e quase nenhuma y' .

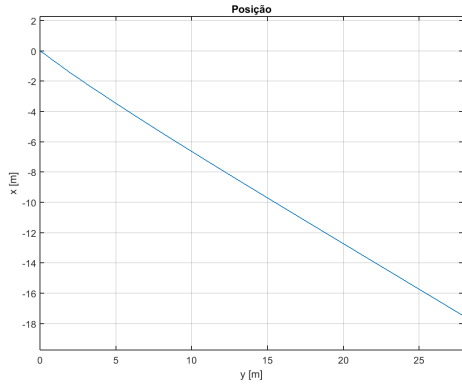
4.3.3 Navegação contra o vento: $\psi_0 = 135^\circ$ $\psi_d = 135^\circ$

Tendo o intuito de validar a navegação contra o vento do controle *Backstepping* foi feita a simulação com ângulo de rumo desejável de 135° , que tem como diferença entre a linha do vento e a orientação do barco de 45° .

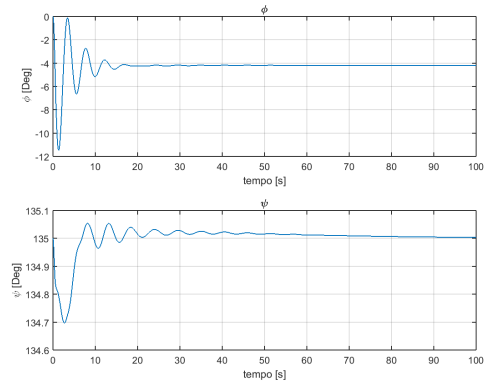
Contra o vento a principal força atuante na vela é a força de sustentação (*lift*), perpendicular ao vento aparente.

O veleiro inicia a navegação com orientação do rumo igual a 135° (ψ_0) e é esperado que ele estabilize nesse mesmo ângulo durante sua trajetória.

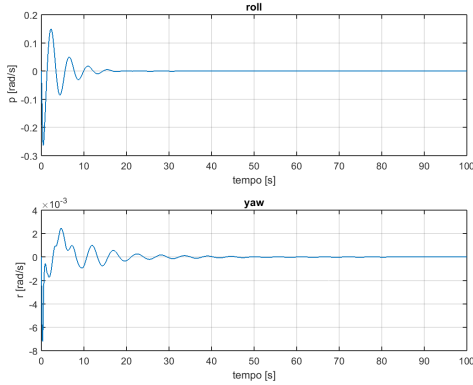
Dinâmica:



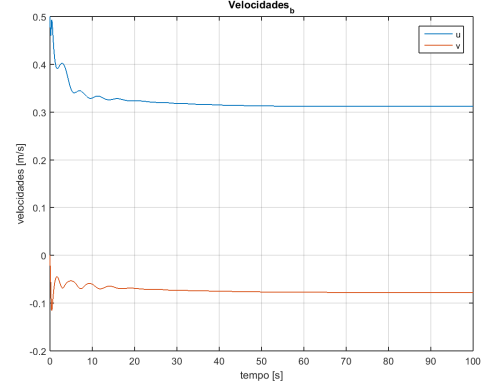
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



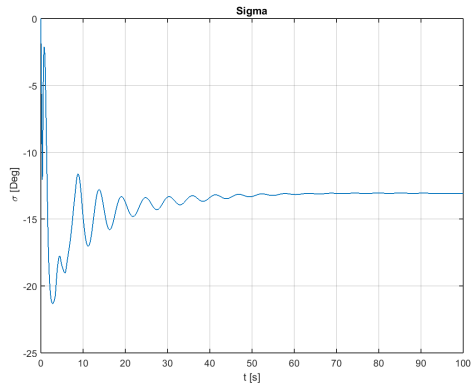
(c) Aceleração no referencial do barco



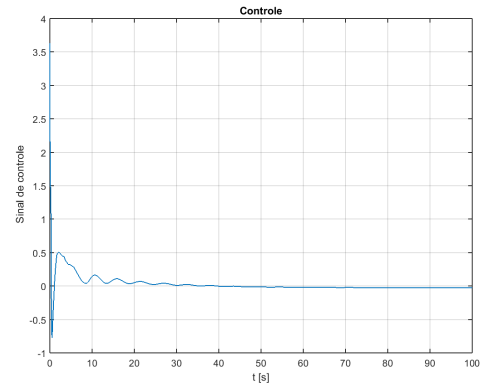
(d) Velocidade no referencial do barco

O rumo do veleiro se estabilizou bem próximo da referência de 135° . No gráfico de velocidades é visível a velocidade na direção y' que é normal em navegações contra o vento, mas sempre menor, em módulo, que a componente na coordenada x' .

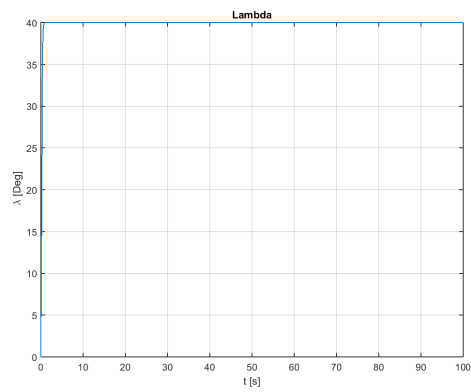
Controle:



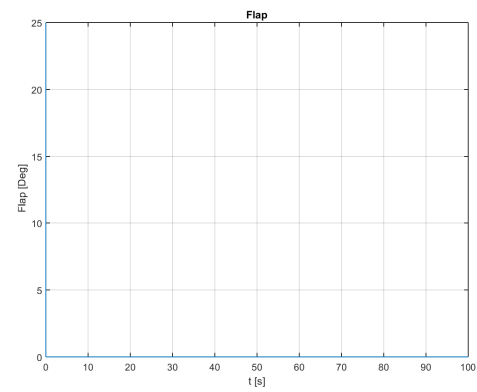
(e) Ângulo leme (σ)



(f) Sinal de controle



(g) Ângulo da vela (λ)



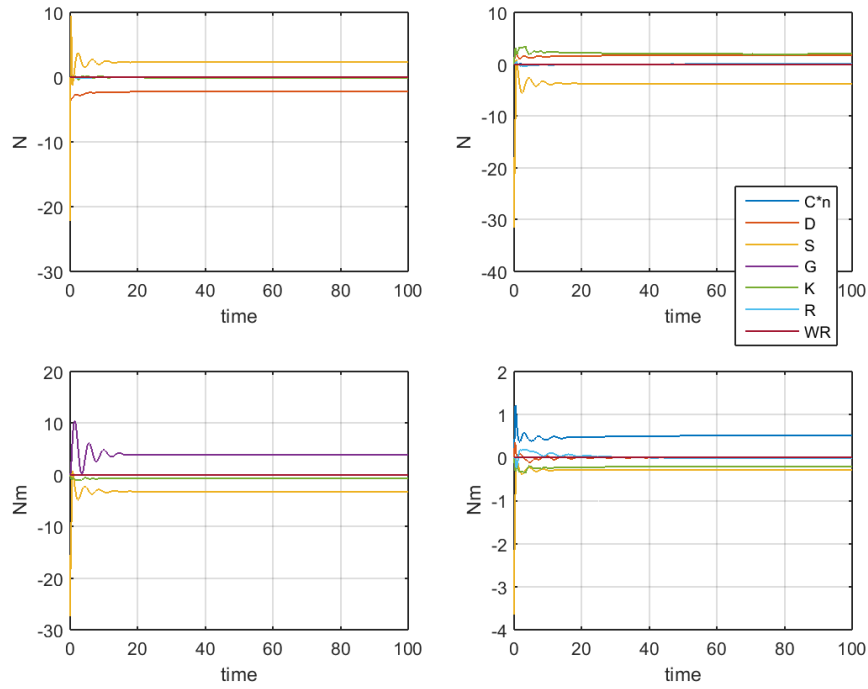
(h) Ângulo do *flap*

Para estabilizar o rumo contra o vento é exigido do leme aberturas maiores de ângulo.

O ajuste de vela se manteve em 40° que é o ângulo escolhido e adequado para a navegação contra o vento.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro, os gráficos superiores a esquerda e a direita, respectivamente. Os gráficos inferiores são os torques que geram o *roll* e *yaw*, a esquerda e a direita, respectivamente.



(i) Forças e torques

Figura 4.11: Controle *Backstepping* e controle vela: $\psi_d = 135^\circ$

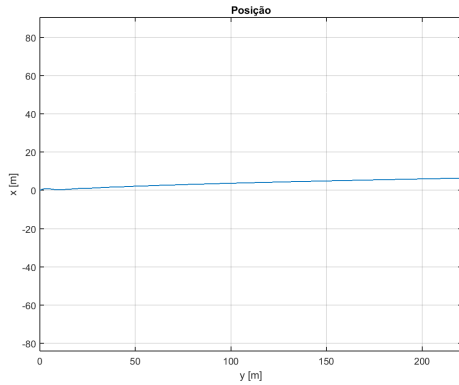
Observa-se a força em y' da vela maior que o somatório das forças da quilha e de amortecimento, ocasionando a velocidade lateral, v , do veleiro. Percebe-se também o torque predominante da força gerada pela matriz de Coriolis-Centrípeta.

4.3.4 Navegação de través: $\psi_0 = 90^\circ$ $\psi_d = 90^\circ$

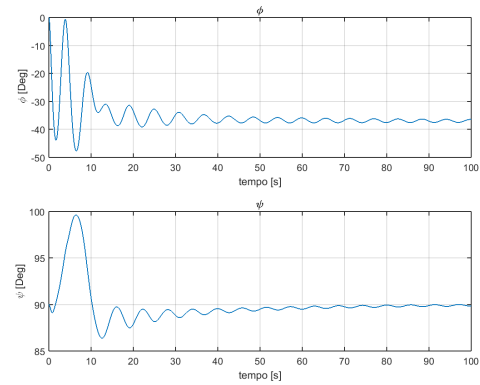
Esta simulação tem como objetivo validar o controle *Backstepping* com movimento de través do veleiro, recebendo vento lateral.

O veleiro inicia a navegação com orientação do rumo igual a 90° (ψ_0) e é esperado que ele permaneça nesse rumo durante sua trajetória.

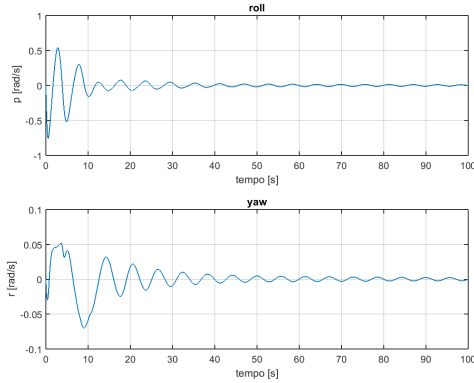
Dinâmica:



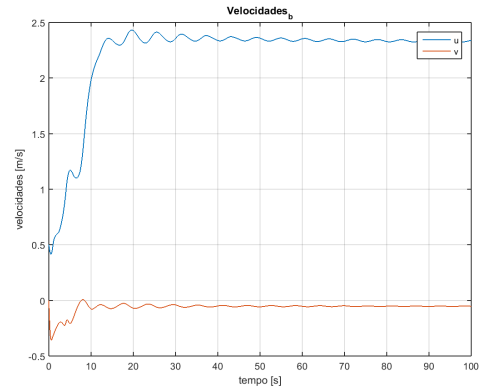
(a) Posição YX



(b) Ângulos orientação



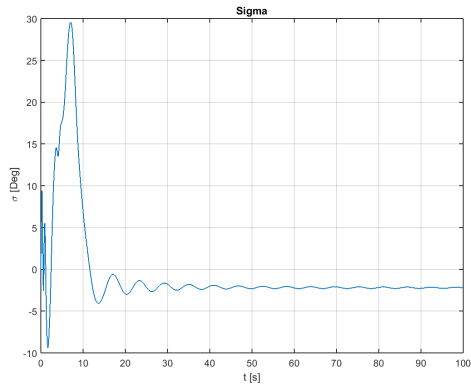
(c) Aceleração no referencial do barco



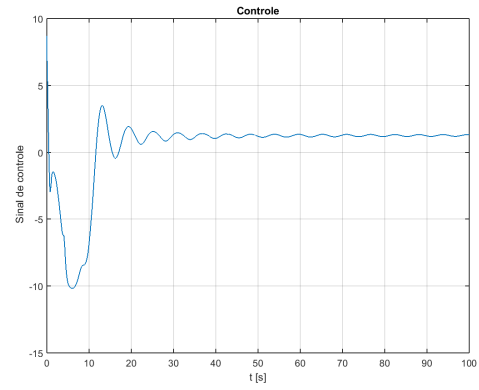
(d) Velocidade no referencial do barco

Com os resultados dos gráficos dos ângulos de orientação, posição, aceleração e velocidade é possível validar o comportamento do veleiro em navegações de través. O controle *Backstepping* em combinação com o ajuste de vela manteve o rumo em 90° apesar de pequenas oscilações.

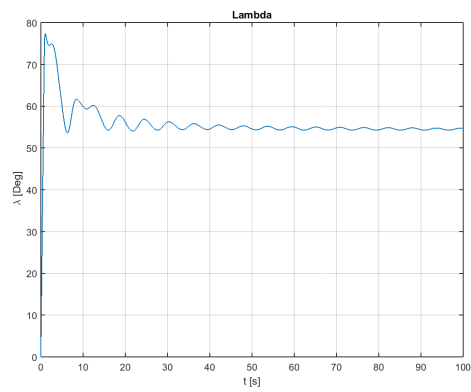
Controle:



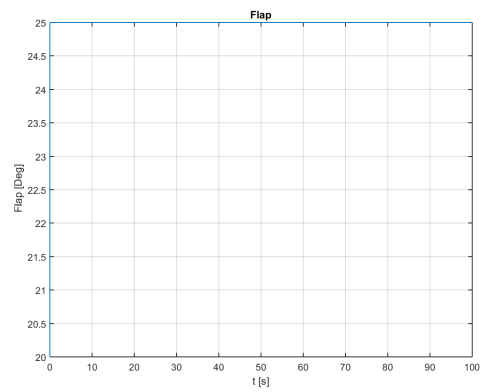
(e) Ângulo leme (σ)



(f) Sinal de controle



(g) Ângulo da vela (λ)

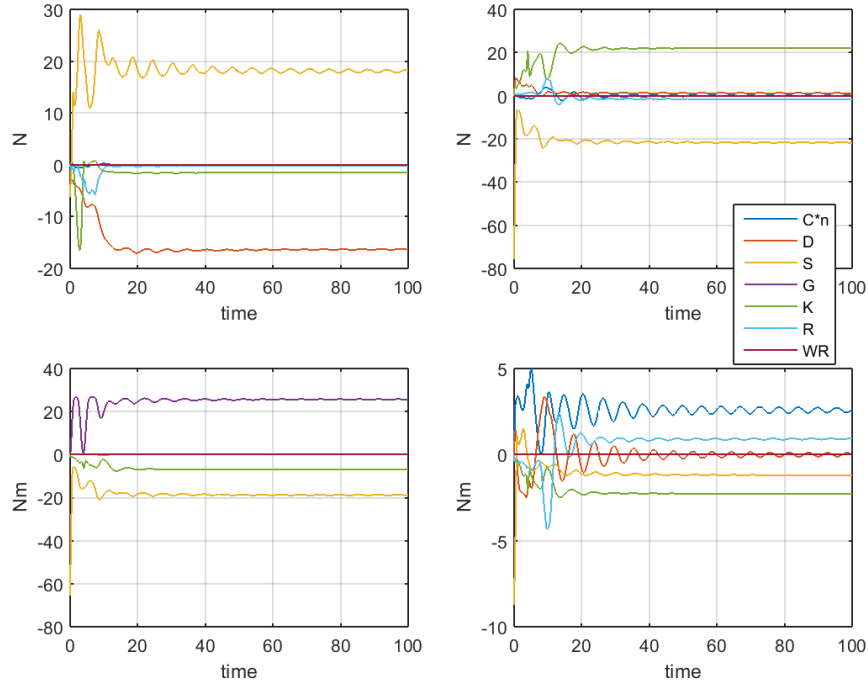


(h) Ângulo do *flap*

Com a divergência de rumo gerada no início do movimento do veleiro se exigiu maior esforço do controle e do leme, gerando inicialmente aberturas de angulação maiores no eixo do leme.

Forças e torques:

O gráfico abaixo demonstra as forças em x' e y' atuantes no veleiro, os gráficos superiores a esquerda e a direita, respectivamente. Os gráficos inferiores são os torques que geram o *roll* e *yaw*, a esquerda e a direita, respectivamente.



(i) Forças e torques

Figura 4.12: Controle *Backstepping* e controle vela: $\psi_d = 90^\circ$

Como nas simulações anteriores é possível verificar o comportamento das forças e torques atuantes no veleiro. Tendo um foco maior nas que são ajustáveis pelos controles, como o torque do leme e as forças da vela. É sempre previsto a atuação da quilha, importantíssima para o desempenho adequado de um veleiro. Além das forças referente a estrutura do barco, que respondem as influências do ambiente.

4.4 Implementação

A eletrônica do veleiro Glória foi esquematizada inicialmente como mostra a figura 4.4. Tendo objetivo de suportar os algoritmos de controle, as leituras dos sensores, os atuadores e a troca de informações do veleiro com uma central de suporte.

O circuito é alimentado por duas baterias lipos, cátodo de lítio, de 7,4 volts. Sendo conectadas em dois Arduinos, o mega e o uno. Arduinos são plataformas de prototipagem projetadas com microcontrolador Atmel, entradas e saídas embutidos e uma linguagem programação padrão.

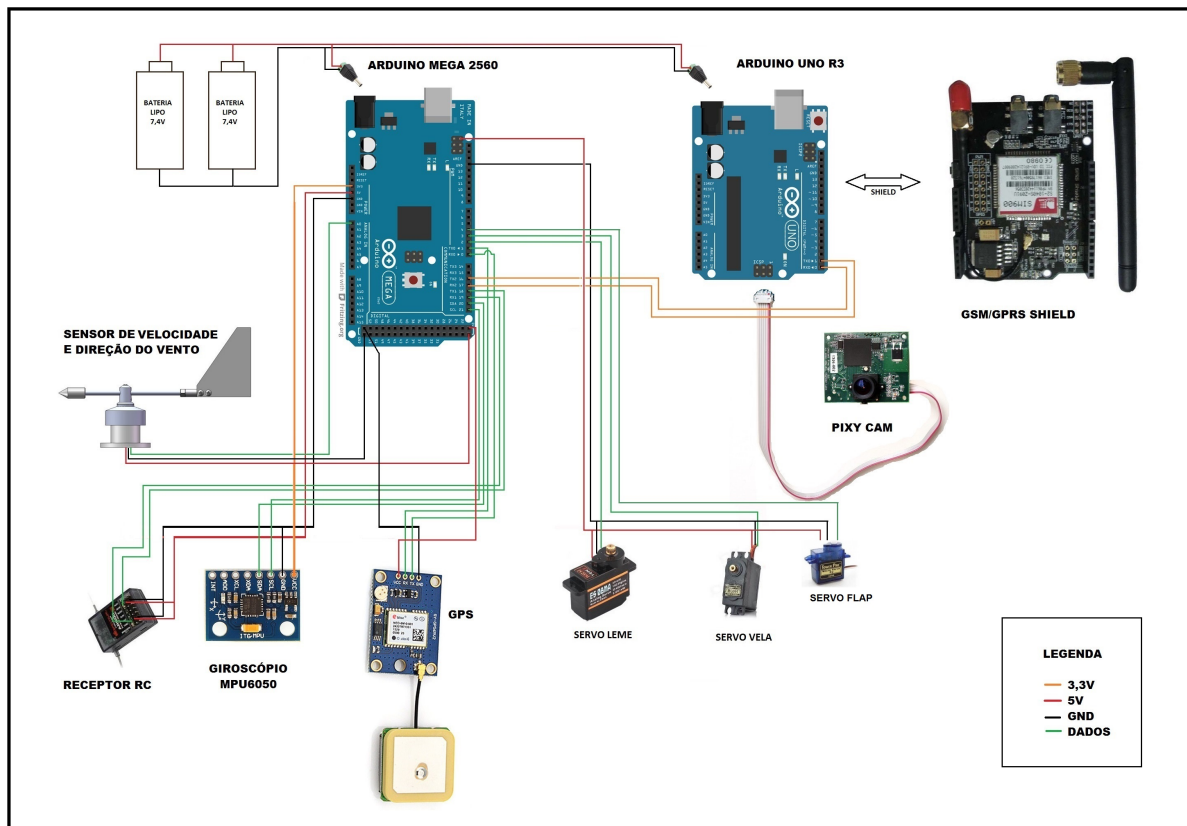


Figura 4.13: Esquema eletrônico Glória

Fonte: Equipe Minerva Náutica

O Arduino mega é o responsável pelos algoritmos de controle tanto da vela, quanto do leme. Ele também é responsável por obter dos sensores as informações necessárias de posição e velocidade do barco e do vento. Nas portas PWM (*Pulse Width Modulation* - Modulação por largura de pulso) do Arduino mega ficam conectados os atuadores dos ângulo do leme, da vela e do *flap* da vela, três servo motores, dois de giro de 180° no caso do leme e do *flap* e o outro de 360° no caso da vela.

O giroscópio e o GPS são os sensores que informam as coordenadas de posição, as velocidades e orientação do veleiro. A direção e velocidade do vento é obtida por um anemômetro. O receptor RC permite o movimento dos servos por um controle de rádio frequência para modelismo.

O Arduino uno no sistema tem a funcionalidade de estabelecer a comunicação e troca de informações com uma central de suporte ao veleiro. Essa comunicação é proporcionada pela *shield GSM/GPRS*. O Arduino uno é responsável também em processar as informações obtidas pela câmera, com o objetivo de localizar boias e obstáculos.

Após as primeiras implementações e alguns testes iniciais o esquema eletrônico foi se alterando. Como a utilização de um motor de passo para o controle do ângulo da vela, pois aguentaria melhor o torque gerado pelo vento na vela. Foi constatado que incorporando ao sistema uma bússola eletrônica proporcionaria um desempenho melhor ao calculo do rumo do veleiro. Foi alterado também o modo de comunicação com a central de suporte testando outras formas mais adequadas de comunicação.

Capítulo 5

Conclusões

Ao longo da modelagem dinâmica e do projeto dos controles de rumo e vela foram sendo feitas análises e simulações de cada etapa e partes desacopladas do sistema com o objetivo de validar todo o processo e resultados. Partindo de configurações mais simples como a validação da dinâmica do casco com uma força externa adicionada em determinada direção, acrescentando posteriormente vela sem vento e assim por diante até chegar no sistema final.

Os controles de rumo projetados apresentaram desempenho satisfatório. O veleiro atingiu a direção desejada em um tempo adequado - considerando a dinâmica envolvida e as configurações iniciais. Ocorreram poucas oscilações e quase nenhum erro estacionário. Os resultados apresentaram esse comportamento nas diferentes configurações de direção de rumo e vento, percebendo que os controles performam-se bem tanto a favor do vento, de través ou contra o vento.

Em comparação entre os controle de rumo propostos, o controle de *Backstepping*, uma técnica de controle por realimentação não linear baseada em funções de Lyapunov, apresentou desempenhos semelhantes ao controle PID padrão.

O algoritmo de controle da vela permite uma completa automatização e aumenta as possíveis configurações de movimento do veleiro. Os controles de rumo agregados com o ajuste da vela tiveram um desempenho semelhante ao da vela fixa.

O movimento do veleiro ficou prejudicado ao atingir ângulos grandes de inclinação lateral, ao adernar. Quando o ângulo de *roll* é elevado, o torque do leme não consegue compensar a força da vela. Para futuros trabalhos é preciso ajustar esse comportamento com mudanças na configuração do barco e controles que limitam o *roll*.

Referências Bibliográficas

- Beard & McLain (2012), *Small Unmanned Aircraft*, Princeton University Press.
- Brunetti, F. (2008), *Mecânica dos Fluidos*, Pearson.
- Clement, B. (2013), ‘Control algorithms for a sailboat robot with a sea experiment’, *Conference on Control Applications in Marine Systems - Osaka, Japan* **46**, 19–24.
- Cruz, N. A. & Alves, J. C. (2008), ‘Autonomous sailboats: an emerging technology for ocean sampling and surveillance’, *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.
- Dorf, R. C. & Bishop, R. H. (2011), *Modern control systems*, Prentice Hall.
- Fossen, T. I. (1994), *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Wiley.
- Fossen, T. I. (2011), *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, Wiley.
- Fossen, T. I. & Grøvlen, A. (1998), ‘Nonlinear output feedback control of dynamically positioned ships using vectorial observer backstepping’, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **6**, 121–128.
- Gomes, E. (2013), ‘Arquitetura de controle de alto nível para barcos robóticos’, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN, Master’s thesis.
- Isidori, A. (1995), *Nonlinear Control Systems*, Springer-Verlag London.
- Khalil, H. K. (2015), *Nonlinear Control*, Pearson.
- Kiam Heong Ang, G. C. & Li, Y. (2005), ‘Pid control system analysis, design and technology’, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **13**, 559–576.
- Krstic, M., Kanellakopoulos, I. & Kokotovic, P. (1995), *Nonlinear and Adaptive Control Designs*, Wiley-Interscience.

- Leonard, N. E. & Graver, J. G. (2001), ‘Model-based feedback control of autonomous underwater gliders’, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **26**, 633–645.
- Manwell, J. F., Mcgowan, J. G. & Rogers, A. L. (2002), *Wind energy explained: theory, design and application*, John Wiley & Sons.
- Marchaj, T. (2000), *Aero-Hydrodynamics of Sailing*, Tiller Pub.
- Patini, S. (1982), *Pollution and the Biological Resources of the Oceans*, Butterworth-Heinemann.
- Sastryi, S. (1999), *Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control*, Springer Science+Business Media New York.
- Schlaefel, A. & Blaurock, O. (2011), *Robotic Sailing*, Springer. Proceedings of the 4th International Robotic Sailing Conference - Lübeck, Germany.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L. & Oriolo, G. (2010), *Robotics: Modelling, Planning and Control*, Springer Science & Business Media.
- Swan, C. (2017), ‘Comparação de modelos de manobra para navios’, Projeto de Graduação - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Wille, K. L. (2016), ‘Autonomous sailboats, modeling, simulation, control’, Master of Science in Engineering and ICT - Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology.
- Wille, K. L., Hassani, V. & Sprenger, F. (2016), ‘Modeling and course control of sailboats’, *Conference on Control Applications in Marine Systems* **49**, 532–539.
- Xiao, L. & Jouffroy, J. (2014), ‘Modeling and nonlinear heading control of sailing yachts’, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **39**, 256–268.

Apêndice A

Coeficientes de *Lift* e *Drag*

Tabela A.1: Coeficientes hidrodinâmicos leme e quilha (NACA 63-010)

α	<i>Lift</i> $C_L(\alpha)$	<i>Drag</i> $C_D(\alpha)$	α	<i>Lift</i> $C_L(\alpha)$	<i>Drag</i> $C_D(\alpha)$
0°	0.000	0.00813	90°	0.021	1.87471
5°	0.567	0.01753	95°	0.021	1.30632
10°	0.760	0.08279	100°	0.021	1.33311
15°	0.624	0.20480	105°	0.023	1.30619
20°	0.378	0.38742	110°	0.025	1.87462
25°	0.224	0.72832	115°	0.027	1.62996
30°	0.141	1.09419	120°	0.032	1.46606
35°	0.095	0.86713	125°	0.037	1.29642
40°	0.068	1.09927	130°	0.046	1.18598
45°	0.051	1.32038	135°	0.064	0.82555
50°	0.040	1.64406	140°	0.085	0.68453
55°	0.033	1.81275	145°	0.118	0.52990
60°	0.028	2.03645	150°	0.176	0.82992
65°	0.024	2.24956	155°	0.279	0.53050
70°	0.022	2.53647	160°	0.471	0.24849
75°	0.020	2.00250	165°	0.777	0.11472
80°	0.019	2.08262	170°	0.947	0.02879
85°	0.018	2.10442	175°	0.568	0.01751

Tabela A.2: Coeficientes aerodinâmicos vela (NACA 0015)

<i>Flap</i> $\kappa = 0^\circ$			<i>Flap</i> $\kappa = 05^\circ$		
α	<i>Lift</i> $C_L(\alpha)$	<i>Drag</i> $C_D(\alpha)$	α	<i>Lift</i> $C_L(\alpha)$	<i>Drag</i> $C_D(\alpha)$
0°	0.0000	0.0203	0°	0.0000	0.0530
5°	0.8000	0.1065	5°	1.2100	0.2318
10°	1.4000	0.3003	10°	1.6100	0.4174
15°	1.5000	0.4222	15°	1.6000	0.5143
20°	1.4000	0.5020	20°	1.4200	0.5842
25°	1.1000	0.5982	25°	1.1700	0.7084
30°	0.9000	0.7658	30°	0.9400	0.9458
35°	0.7000	1.0452	35°	0.7700	1.2375
40°	0.6000	1.4660	40°	0.6400	1.7608
45°	0.5000	1.8654	45°	0.5300	2.2076
50°	0.4000	2.2787	50°	0.4500	2.4654
55°	0.4000	2.8771	55°	0.3700	3.3291
60°	0.3000	3.4234	60°	0.3000	3.7005
65°	0.2000	3.8399	65°	0.2400	4.2428
70°	0.2000	3.7880	70°	0.2000	4.7988
75°	0.2000	3.9017	75°	0.1600	5.1231
80°	0.1000	4.1576	80°	0.1300	4.8513
85°	0.1000	4.0353	85°	0.1200	5.0380
90°	0.1000	3.3562	90°	0.1200	5.5617
95°	0.1000	3.1924	95°	0.1400	4.3853
100°	0.2000	3.3740	100°	0.1600	4.3803
105°	0.2000	3.1864	105°	0.1900	4.1654
110°	0.2000	3.1478	110°	0.2300	3.8785
115°	0.3000	3.0736	115°	0.2800	3.2923
120°	0.3000	2.7643	120°	0.3300	2.7201
125°	0.4000	2.3853	125°	0.3800	2.3970
130°	0.5000	1.8465	130°	0.4500	2.0539
135°	0.6000	1.4943	135°	0.5300	1.4926
140°	0.7000	1.1539	140°	0.6200	1.0927
145°	0.9000	0.7330	145°	0.8200	0.7388
150°	1.1000	0.5464	150°	1.0500	0.5642
155°	1.3000	0.4752	155°	1.3000	0.4470
160°	1.6000	0.4731	160°	1.5300	0.4214
165°	1.8000	0.4627	165°	1.5200	0.3547
170°	1.5000	0.3187	170°	1.0900	0.1864
175°	0.8000	0.1076	175°	0.3400	0.0391
180°	0.0000	0.0203	180°	-0.4800	0.0525

<i>Flap $\kappa = 10^\circ$</i>			<i>Flap $\kappa = 15^\circ$</i>		
α	<i>Lift $C_L(\alpha)$</i>	<i>Drag $C_D(\alpha)$</i>	α	<i>Lift $C_L(\alpha)$</i>	<i>Drag $C_D(\alpha)$</i>
0°	0.0080	0.1456	0°	0.0000	0.2941
5°	1.6050	0.3982	5°	1.9000	0.5838
10°	1.7580	0.5182	10°	1.9000	0.6206
15°	1.7010	0.5896	15°	1.8000	0.6473
20°	1.4570	0.6374	20°	1.5000	0.6955
25°	1.2000	0.7800	25°	1.2000	0.8715
30°	0.9650	1.0155	30°	1.0000	1.1583
35°	0.7900	1.3700	35°	0.8000	1.4777
40°	0.6560	1.8339	40°	0.7000	1.9558
45°	0.5480	2.4119	45°	0.6000	2.4866
50°	0.4550	2.9355	50°	0.5000	2.9795
55°	0.3760	3.3064	55°	0.4000	3.4750
60°	0.3000	3.9648	60°	0.3000	4.2651
65°	0.2420	4.6180	65°	0.2000	4.3879
70°	0.1940	4.5912	70°	0.2000	4.6867
75°	0.1590	4.9884	75°	0.2000	4.9391
80°	0.1340	5.5419	80°	0.1000	5.5652
85°	0.1220	5.0766	85°	0.1000	5.1851
90°	0.1210	4.9611	90°	0.1000	5.1467
95°	0.1500	4.6488	95°	0.2000	4.0831
100°	0.1720	3.8694	100°	0.2000	4.1720
105°	0.2010	3.7289	105°	0.2000	3.4189
110°	0.2400	3.5918	110°	0.2000	3.3706
115°	0.2800	3.1032	115°	0.3000	2.9537
120°	0.3260	2.7647	120°	0.3000	2.4075
125°	0.3760	2.4766	125°	0.4000	2.1770
130°	0.4330	1.7595	130°	0.4000	1.6165
135°	0.5030	1.4743	135°	0.5000	1.1911
140°	0.6430	0.9289	140°	0.6000	0.8203
145°	0.7980	0.6333	145°	0.8000	0.5706
150°	1.0230	0.4615	150°	1.0000	0.4115
155°	1.2490	0.3915	155°	1.2000	0.3334
160°	1.3960	0.3452	160°	1.2000	0.2632
165°	1.2290	0.2402	165°	0.9000	0.1401
170°	0.6460	0.0846	170°	0.2000	0.0332
175°	-0.1420	0.0272	175°	-1.6000	0.0756
180°	-0.9530	0.1436	180°	-1.4000	0.2877

<i>Flap $\kappa = 20^\circ$</i>			<i>Flap $\kappa = 25^\circ$</i>		
α	<i>Lift $C_L(\alpha)$</i>	<i>Drag $C_D(\alpha)$</i>	α	<i>Lift $C_L(\alpha)$</i>	<i>Drag $C_D(\alpha)$</i>
0°	0.0000	0.4834	0°	0.0000	0.6888
5°	2.1000	0.7155	5°	2.3000	0.8221
10°	2.0000	0.6918	10°	2.0000	0.7441
15°	1.6000	0.7040	15°	1.7000	0.7302
20°	1.5000	0.7479	20°	1.4000	0.8114
25°	1.2000	0.8987	25°	1.2000	1.0070
30°	1.0000	1.2188	30°	0.9000	1.3502
35°	0.8000	1.7556	35°	0.8000	1.7230
40°	0.7000	2.0853	40°	0.6000	2.2133
45°	0.6000	2.6713	45°	0.5000	2.9092
50°	0.5000	3.2122	50°	0.4000	3.4044
55°	0.4000	4.0481	55°	0.4000	3.8889
60°	0.3000	4.0712	60°	0.3000	4.5309
65°	0.2000	4.2042	65°	0.2000	4.7193
70°	0.2000	5.1570	70°	0.2000	5.2147
75°	0.2000	5.0251	75°	0.2000	4.9346
80°	0.1000	5.6327	80°	0.1000	4.9646
85°	0.1000	5.0839	85°	0.1000	5.5701
90°	0.1000	4.7835	90°	0.1000	4.8574
95°	0.2000	4.3275	95°	0.2000	4.0668
100°	0.2000	3.8589	100°	0.2000	3.5906
105°	0.2000	3.7644	105°	0.2000	3.5785
110°	0.2000	3.2240	110°	0.2000	3.0398
115°	0.3000	2.5794	115°	0.3000	2.7490
120°	0.3000	2.3739	120°	0.3000	2.1226
125°	0.3000	2.0395	125°	0.3000	1.6956
130°	0.4000	1.4659	130°	0.3000	1.4443
135°	0.5000	0.9174	135°	0.4000	0.8538
140°	0.6000	0.6790	140°	0.5000	0.5845
145°	0.7000	0.4912	145°	0.7000	0.3957
150°	0.9000	0.3482	150°	0.8000	0.2886
155°	1.1000	0.2502	155°	0.9000	0.2029
160°	1.0000	0.1798	160°	0.7000	0.1097
165°	0.6000	0.0878	165°	0.1000	0.0382
170°	-0.3000	0.0401	170°	-0.7000	0.0953
175°	-1.2000	0.2269	175°	-1.5000	0.3195
180°	-1.8000	0.4684	180°	-2.2000	0.6572

<i>Flap</i> $\kappa = 30^\circ$		
α	<i>Lift</i> $C_L(\alpha)$	<i>Drag</i> $C_D(\alpha)$
0°	0.0000	0.8700
5°	2.2000	0.7994
10°	2.0000	0.7556
15°	1.7000	0.7419
20°	1.4000	0.8317
25°	1.1000	1.1044
30°	0.9000	1.4143
35°	0.7000	1.8525
40°	0.6000	2.2808
45°	0.5000	3.0096
50°	0.4000	3.5649
55°	0.3000	3.7164
60°	0.3000	4.3689
65°	0.2000	4.6556
70°	0.2000	5.2166
75°	0.2000	4.9883
80°	0.1000	5.0905
85°	0.1000	4.9592
90°	0.2000	4.5210
95°	0.2000	3.7765
100°	0.2000	3.4006
105°	0.2000	3.2765
110°	0.2000	2.9563
115°	0.3000	2.3440
120°	0.3000	1.9550
125°	0.3000	1.7360
130°	0.3000	1.2668
135°	0.4000	0.7297
140°	0.5000	0.4897
145°	0.6000	0.3524
150°	0.8000	0.2546
155°	0.7000	0.1654
160°	0.4000	0.0733
165°	-0.3000	0.0538
170°	-1.1000	0.1861
175°	-1.8000	0.4753
180°	-2.4000	0.8250