

PROGRAMA DE PREDIÇÃO DE VELOCIDADES E SIMULADOR DINÂMICO DE VELEIROS

Cesar Illuminati
(cesar.illuminati@poli.usp.br)

Vinicius G. do Prado
(vinicius.prado@poli.usp.br)

Alexandre N. Simos
(alesimos@usp.br)

Escola Politécnica
Universidade de São Paulo

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um programa de predição de velocidades (VPP) e de um simulador dinâmico de veleiros, ambos criados no Depto de Engenharia Naval e Oceânica (DENO) da EPUSP.

O VPP é um programa que permite prever o equilíbrio estático de um veleiro para as diferentes condições de vento. O programa encontra-se em sua primeira versão, voltada para veleiros monocascos com quilha fixa. Resolve quatro equações de equilíbrio estático e fornece, assim, estimativas para velocidade de avanço, ângulo de deriva, inclinação e ângulo de leme para cada condição de vento. A segunda versão, em implementação, incluirá a possibilidade de se trabalhar com quilhas basculantes (*canting keels*) e bolinas de vante, além de veleiros multicascos como catamarãs ou trimarãs.

Encontra-se também em desenvolvimento um simulador de veleiros, o qual resolve quatro equações de movimento, incluindo os termos dinâmicos. Em sua versão atual, permite ao usuário atuar no controle do leme e na trimagem da vela-mestra durante a simulação. A modelagem das forças hidrodinâmicas é baseada em modelo semi-empírico proposto pela Delft University of Technology e cujos resultados foram divulgados recentemente por Ridder et al. (2004). Quanto às forças aerodinâmicas, no entanto, modelos simplificados como aquele empregado pela IMS não podem ser aplicados uma vez que adotam como hipótese um ajuste ótimo de velas para cada incidência de vento e não incorporam efeitos das velocidades de rotação do casco sobre as forças nas velas. O programa permite, então, a definição dos coeficientes aerodinâmicos das velas pelo usuário. Tais coeficientes podem ser obtidos experimentalmente ou através de análises numéricas empregando, por exemplo, um programa de CFD. No tocante à parte gráfica, está prevista a visualização em 3D-Stereo, através de um monitor analógico (com cinescópio) e óculos 3D.

Nomenclatura

LOA – comprimento total	BOA – boca máxima
Tcb – calado do casco nu	ϕ – ângulo de inclinação do casco
u – velocidade na direção longitudinal do casco	ψ' – velocidade em <i>yaw</i> do casco
v – velocidade na direção transversal do casco	β – ângulo de deriva do casco (<i>leeway</i>)

1. INTRODUÇÃO

O Programa de Predição de Velocidades estima o desempenho de uma embarcação através de modelos semi-empíricos. O programa busca satisfazer as equações de equilíbrio em quatro graus de liberdade da embarcação. Para tanto, são necessárias informações sobre as propriedades hidrodinâmicas, aerodinâmicas e da estabilidade do barco, obtidas através de suas principais dimensões e de sua curva de estabilidade estática (CEE).

Contudo, o programa não prevê o comportamento do veleiro em situações dinâmicas, ou seja, quando a resultante das forças sobre a embarcação não é nula, resultando em acelerações do barco.

Para que o comportamento nessas situações seja passível de predição, faz-se necessária uma simulação dinâmica. O Programa de Simulação de Manobras, através de integrações numéricas e de modelos de forças oriundas da dinâmica da embarcação, simula seu comportamento em manobras em diversas condições de vento. Permite ao usuário o controle em tempo real do ângulo de leme e de vela-mestra, reproduzindo no domínio do tempo situações reais de velejo.

2. PROGRAMA DE PREDIÇÃO DE VELOCIDADE PARA VELEIROS (VPP)

O VPP em desenvolvimento resolve o equilíbrio estático de um veleiro em 4 graus de liberdade (ver Equação (1) e Figura (1) abaixo), baseado em modelos semi-empíricos para o cálculo das forças hidrodinâmicas e aerodinâmicas. O VPP é resolvido através de um método de otimização tendo como variáveis a velocidade do barco, seus ângulos de inclinação e de deriva e o ângulo do leme.

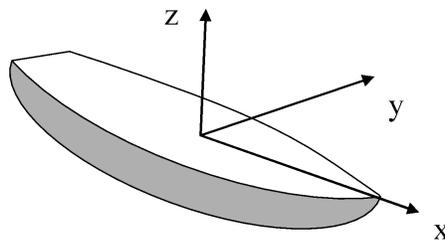


Figura 1 – Sistema de Coordenadas

$$\Sigma F_x = 0; \Sigma F_y = 0; \Sigma M_x = 0; \Sigma M_z = 0 \quad (1)$$

Onde:

F_x – forças ao longo do eixo longitudinal

F_y – forças ao longo do eixo transversal

M_x – momentos em torno do eixo longitudinal

M_z – momentos em torno do eixo vertical

2.1 Modelo Hidrodinâmico

No modelo hidrodinâmico adotado, as forças que atuam no casco e nos apêndices do barco (quilha e leme) são de dois tipos: forças de sustentação e forças de resistência.

A resistência quantifica as várias forças que se opõem ao deslocamento da embarcação. Num barco em movimento em mar calmo essa resistência pode ser decomposta em quatro parcelas: viscosa, de ondas, de inclinação (tombo) e induzida. O cálculo de cada parcela da resistência pode ser encontrado, por exemplo, em Oossannen (1993). No VPP essas formas de resistência são somadas para se obter a resistência total. A formulação da resistência nos apêndices do casco provém da Teoria de Asas.

O modelo das forças de sustentação no casco e nos apêndices também se baseia em resultados da Teoria de Asas. O ângulo de deriva proporciona um ângulo de ataque do fluxo sobre o casco, o que nos permite enxergá-lo como uma asa curta (de baixa razão de aspecto) e, portanto, podemos associar ao mesmo uma força de sustentação (*lift*). Como quilha e leme têm maior razão de aspecto (asas longas), o *lift* gerado por eles é mais expressivo. Também é estimado o arrasto induzido sobre os elementos de asa mencionados acima, que entram como parte da resistência ao avanço.

2.2 Modelo Aerodinâmico

As forças aerodinâmicas também têm seus componentes de *lift* e *drag*. O modelo aerodinâmico adotado nesse VPP é o modelo de Hazen, adotado pela IMS (Hazen, 1980). As forças nas velas são calculadas dependendo da combinação de velas utilizada. Há duas combinações possíveis: *upwind* (velas mestra e genoa) e *downwind* (vela mestra e balão).

Neste modelo são definidos dois fatores: *Reef* e *Flat*. O *Flat* mede o abaulamento da vela e o *Reef* mede o rizo da vela, ou seja, a porcentagem de área vélica realmente utilizada.

Para achar a melhor combinação para esses fatores, o VPP varre sistematicamente seus valores e calcula o equilíbrio da embarcação, tendo como parâmetro de comparação a VMG (*velocity made-good* – projeção da velocidade do barco na direção do vento) do barco.

2.3 Interface gráfica

A interface gráfica do VPP está sendo construída em ambiente *Matlab*. A intenção dessa interface é facilitar ao usuário a entrada de dados para os cálculos realizados pelo programa.

Da janela principal (Figura (2)) é possível acessar as janelas de entradas de dados. Cada janela agrupa uma parte do projeto de veleiros (casco, apêndices, velas e mastreação e equilíbrio). Todas as janelas de entrada foram ilustradas com figuras para maior facilidade na identificação das grandezas necessárias (Figura (3)).

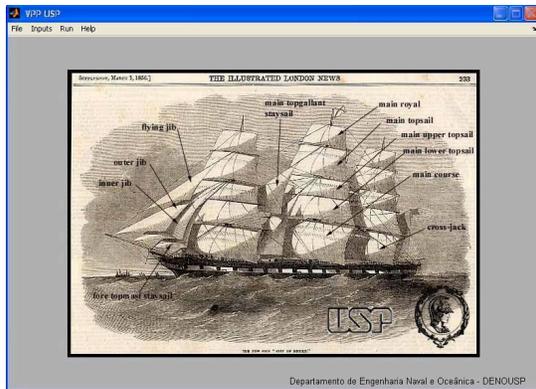


Figura 2 - Janela principal do VPP

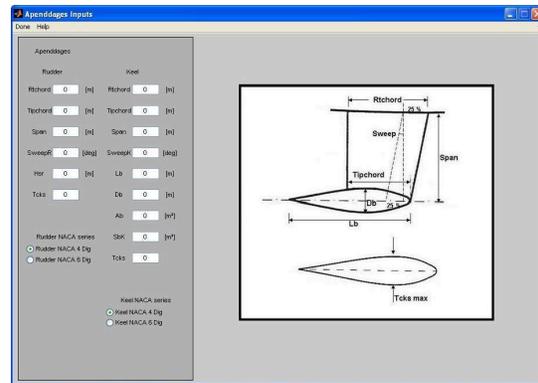


Figura 3 - Informações dos apêndices

É possível definir todos os parâmetros de funcionamento do VPP: intervalo de velocidades de vento real e seu passo, se o VPP deve calcular os fatores de *Reef* e *Flat* ou fixá-los em 1 e também quais opções de combinação de vela utilizar.

2.4 Resultados

O VPP foi testado estimando a performance de dois barcos. As dimensões do primeiro barco, chamado YD40, foram encontradas na literatura adotada para o projeto (Larsson *et al*, 1994) e o segundo barco é um veleiro de 19 pés (Poli19), projetado pelo DENO-EPUSP. As principais dimensões dos dois barcos estão dadas na Tabela (1), abaixo.

Tabela 1 - Principais dimensões dos veleiros de teste

	YD40	Poli19
LOA (m)	12,05	5,74
BOA (m)	3,71	2,36
Tcb (m)	0,57	0,256
Deslocamento (ton)	8,12	0,775
I (m)	16,9	6,3
J (m)	4,3	2,04
P (m)	15,1	7,08
E (m)	4,7	2,72

As estimativas das performances dos barcos são retratadas em gráficos polares, nos quais cada linha representa uma velocidade de vento fixa. Para o YD40, o gráfico polar mostra as estimativas para as combinações de vela *downwind*, linhas vermelhas, e *upwind*, linhas azuis, (Figura(4)). Para o Poli19, o gráfico polar contém apenas as estimativas para a combinação *upwind*, pois este barco não possui vela balão (Figura (5)).

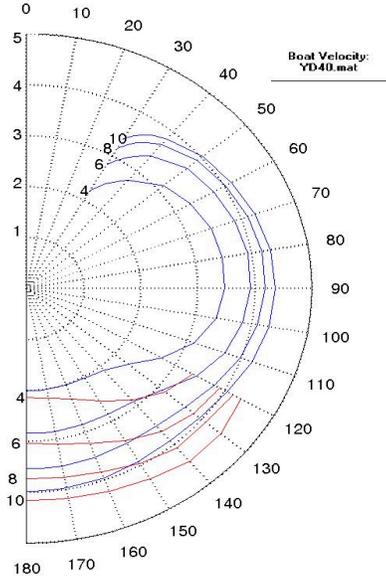


Figura 4 - Gráfico polar da velocidade para o barco YD40

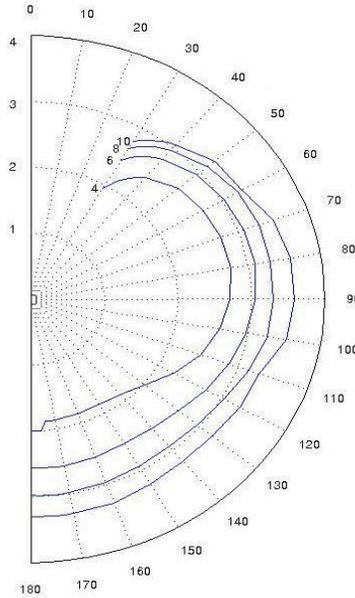


Figura 5 - Gráfico polar da velocidade para o barco Poli19

Outras saídas gráficas são fornecidas pelo VPP: a VMG, ângulo de deriva e de inclinação, ângulo de leme e *pitch* induzido. Além dos gráficos o VPP fornece tabelas em *Excel* com os resultados obtidos pelo programa (Figura (6)).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	VPP USP	Arquivo de Entrada: YD40.mat Velocidade do Vento: 4m/s Genoa and Main Sails										
2												
3	Btrue (grau)	Velocity (n)	VMG (m/s)	Leeway (gr)	Heel (grau)	Delta (grau)	Pitchest (g)	Reef	Flat	AWA (deg)	AWS (m/s)	Times for 1 nm (secs)
4	30	2.20685	-1.74928	7.56514	12.4444	1.20072	0.09381	0.95	0.95	16.8288	5.90461	839.2044981
5	32	2.33566	-1.81009	7.19707	13.1968	1.03301	0.11354	0.95	0.95	17.745	5.99467	792.9221241
6	34	2.45911	-1.86018	6.84831	13.8692	0.86621	0.13402	0.95	0.95	18.6524	6.07689	753.1183738
7	36	2.56489	-1.88944	6.55269	14.416	0.70502	0.15529	0.95	0.95	19.5893	6.13956	722.0571735
8	38	2.66512	-1.90869	6.26044	14.8643	0.54753	0.17697	0.95	1	20.5261	6.19454	694.9042299
9	40	2.75681	-1.91573	5.98019	15.2045	0.397	0.19884	0.95	1	21.4735	6.23906	671.7905795
10	50	3.14376	-1.80082	5.05273	17.7517	-0.43809	0.32817	1	1	26.0479	6.34742	589.1028867
11	60	3.31573	-1.44132	4.23422	16.9519	-0.73964	0.40089	1	1	31.243	6.20682	558.5501096
12	70	3.4433	-0.97628	3.52905	15.6252	-0.88564	0.46134	1	1	36.4338	5.97214	537.8563626
13	80	3.43089	-0.42886	2.81922	11.8074	-0.532	0.43421	0.95	0.85	42.4545	5.58587	539.8015933
14	90	3.47824	0.14861	2.44873	11.2558	-0.65566	0.4778	1	1	47.9404	5.18742	532.4524734
15	100	3.36815	0.69787	1.95814	8.28754	-0.38547	0.42459	1	1	55.0614	4.66492	549.855945
16	110	3.12712	1.14591	1.49632	5.25594	-0.12783	0.33203	1	1	64.4482	4.07574	592.2373705
17	120	2.73621	1.4149	1.1381	2.92795	0.03096	0.2253	1	1	77.8248	3.48821	676.8481588
18	130	2.31997	1.52204	1.00009	1.79795	0.09792	0.14564	1	1	94.7553	3.03413	798.2857304
19	140	2.09793	1.6296	0.96519	1.40642	0.11764	0.11267	1	1	110.865	2.71377	882.7733564
20	150	2.02595	1.76913	0.83646	1.13184	0.10692	0.10294	1	1	126.129	2.43956	914.1390159
21	160	2.01426	1.90007	0.61423	0.81809	0.07871	0.10152	1	1	142.339	2.2038	919.4423949
22	170	2.01459	1.98607	0.34704	0.46012	0.04422	0.10164	1	1	160.478	2.04206	919.2918634
23	172	2.0134	1.99521	0.29331	0.38802	0.03736	0.10149	1	1	164.33	2.02289	919.8376978
24	174	2.01139	2.00124	0.24077	0.31756	0.03068	0.10122	1	1	168.234	2.00892	920.7541713
25	176	2.00848	2.00404	0.1901	0.24974	0.02425	0.10082	1	1	172.175	2.00041	922.0900549
26	178	2.0046	2.00354	0.14204	0.1857	0.01815	0.10029	1	1	176.135	1.99751	923.8763101
27	180	2	2	0.0996	0.1295	0.01275	0.09966	1	1	179.9	2	925.9991396
28												

Figura 6 – Saída do VPP em Excel

3. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE MANOBRAS DE VELEIROS

3.1 Estrutura do programa

O programa de simulação de manobras está escrito atualmente em ambiente Matlab/Simulink. A estrutura básica do programa, esquematizada na Figura (7), é a estimativa das forças em instantes sucessivos de tempo, e conseqüentemente, através das equações de movimento, obter as acelerações instantâneas da embarcação, concomitantemente à integração dessas acelerações para obtenção das velocidades e deslocamentos em tempo real. O simulador incorpora dois parâmetros de controle, o ângulo de leme e o ângulo de vela-mestra, comandados pelo usuário.

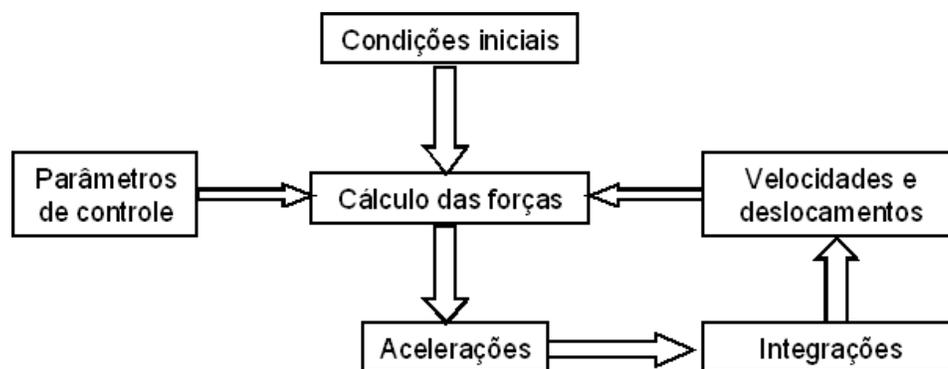


Figura 7 - Fluxograma simplificado do funcionamento do programa

As entradas do programa simulador são as condições de vento (velocidade e direção) e a caracterização dos parâmetros e dimensões da embarcação. Os parâmetros de controle, ângulo de leme (δ) e ângulo de vela-mestra (ϵ), são variáveis independentes controladas externamente pelo usuário. A versão atual do programa conta com saídas na forma de visualização simultânea da trajetória da embarcação no plano horizontal e indicadores numéricos das variáveis de simulação.

Para uma futura versão do programa simulador, é pretendida a viabilização de saídas gráficas para implementação no ambiente de visualização 3D do Tanque de Provas Numérico (TPN) do DENO-USP, possibilitando ao usuário uma visualização mais fiel e atrativa do comportamento real da embarcação.

3.2 Modelagem das forças

Para a modelagem das forças hidrodinâmicas, o simulador utiliza um modelo apresentado por Ridder *et al* (2004). Trata-se de um modelo empírico baseado em resultados experimentais da Universidade de Delft, Holanda, que apresenta regressões para estimar o valor das forças de origem tanto estática quanto dinâmica, atuantes em uma embarcação a vela. As forças dinâmicas são funções das velocidades angulares, em torno dos eixos longitudinal e vertical da embarcação.

Entretanto, Ridder *et al* (2004) não apresentavam uma formulação para o momento de amortecimento devido à velocidade de *roll* ($\dot{\varphi}$). Assim, para uma modelagem mais completa, foi utilizada também uma formulação apresentada por Klaka *et al* (2004), em um trabalho que discute o movimento de *roll* de veleiros para definir, de forma simplificada, um valor estimado para o amortecimento em *roll*.

Outra diferença importante na modelagem em comparação com aquela adotada por Ridder *et al* (2004) se refere ao modelo aerodinâmico utilizado. Os modelos mais comumente empregados para as forças aerodinâmicas trazem os valores dos coeficientes de sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque entre o casco e o vento, admitindo implicitamente uma trimagem ótima das velas. No simulador, no entanto, utilizar modelos como esse não seria suficiente, já que no programa, a trimagem das velas é justamente um dos principais comandos do velejador. Faz-se necessário, portanto, a utilização de um modelo que forneça os coeficientes de sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque instantâneo sobre cada uma das velas.

A estimativa dos coeficientes aerodinâmicos para diferentes jogos de velas com ângulos de trimagem arbitrários é um problema complexo pois envolve, por exemplo, a influência do corte e material das velas e a interferência aerodinâmica entre elas. Assim, a definição destes coeficientes é feita externamente, por exemplo, através de um estudo de CFD ou em ensaios de túnel de vento.

3.3 Modelagem do sistema

O sistema de coordenadas adotado tem origem na interseção da linha d'água de projeto, com a linha de centro da embarcação à meia-nau, e eixos orientados conforme a Figura (1). Assim, as equações *Eulerianas* de movimento da embarcação ficam:

$$\begin{aligned} M(\dot{u}' - v\dot{\psi}') &= \Sigma F_X \\ M(\dot{v}' + u\dot{\psi}') &= \Sigma F_Y \\ J_{xx}\dot{\varphi}'' &= \Sigma M_X \\ J_{zz}\dot{\psi}'' &= \Sigma M_Z \end{aligned} \quad (2)$$

Considerando o centróide da massa adicional coincidente com o centro de gravidade da embarcação, garante-se que não haja forças ou momentos adicionais provenientes das possíveis distâncias entre os dois centros. Assim desenvolvendo as equações (2) para admitirem grandes ângulos de inclinação (ver Ridder *et al*, 2004), tem-se:

Surge

$$(m+m_x)\dot{u}' - (m + m_y\cos^2\varphi + m_z\sin^2\varphi)v\dot{\psi}' = \Sigma F_X$$

Sway

$$(m+m_y\cos^2\varphi+m_z\sin^2\varphi)\dot{v}'+(m+m_x)u\dot{\psi}'+2(m_z-m_y)\sin\varphi\cos\varphi.v\dot{\psi}' = \Sigma F_Y$$

Roll

$$(I_x+J_x)\dot{\varphi}''(I_y+J_y-I_z-J_z)\sin\varphi.\cos\varphi.(\dot{\psi}')^2 = \Sigma M_X$$

Yaw

$$\{(I_y+J_y)\sin^2\varphi+(I_z+J_z)\cos^2\varphi\}\dot{\psi}''+2(I_y+J_y-I_z-J_z)\sin\varphi\cos\varphi.\dot{\psi}'\dot{\varphi}' = \Sigma M_Z$$

Onde:

m – massa total da embarcação

m_x, m_y, m_z – massas adicionais em x, y, z

I_x, I_y, I_z – momentos de inércia em torno de x, y, z

J_x, J_y, J_z – momentos de inércia adicional em torno de x, y, z

F_x, F_y, M_x, M_z - Forças e Momentos externos em x, y e z

Ridder et al. (2004) apresentam formulações para os parâmetros supracitados. Porém, a não ser pela massa adicional em *surge*, o cálculo desses parâmetros seria inviável pela quantidade de detalhes que deveriam ser conhecidos sobre o casco. Não seria condizente com o nível de projeto ao qual está destinado o programa simulador. O modelo para a inércia adicional em *roll* está sugerido no trabalho citado anteriormente de Klaka *et al.* e modelos aproximados foram empregados para a definição das demais massas e inércias adicionais relevantes para a simulação.

3.4 Resultados

A primeira versão completa do simulador já pôde ser utilizada em alguns testes qualitativos, e alguns resultados utilizando os dados do veleiro YD40 (ver Tabela (1)) são mostrados nas Figuras (8), (9) e (10):

- Simulação de manobra de bordo entre situação de contravento de 50° por boreste e contravento de 50° por bombordo:

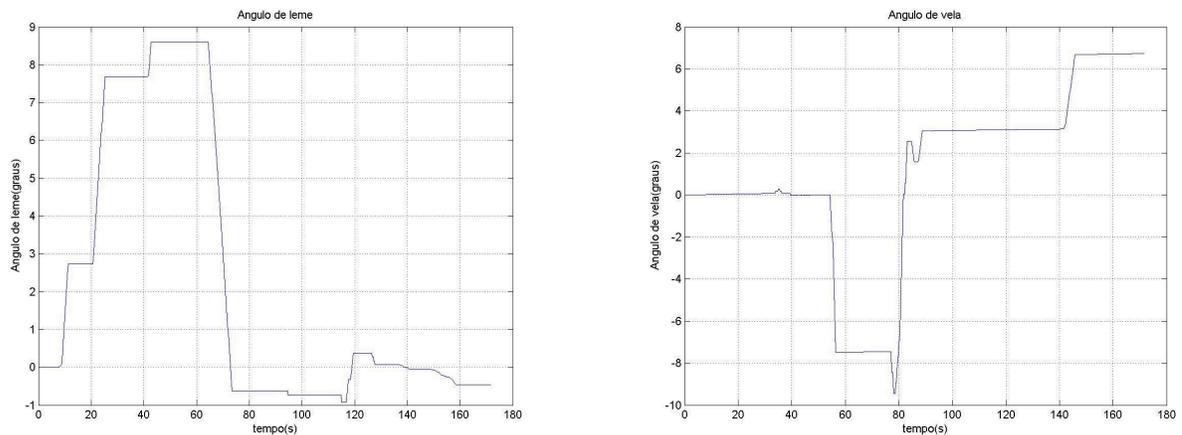


Figura 8 - Controles do usuário. Ângulo de leme (esq.) e ângulo de vela mestra (dir.)

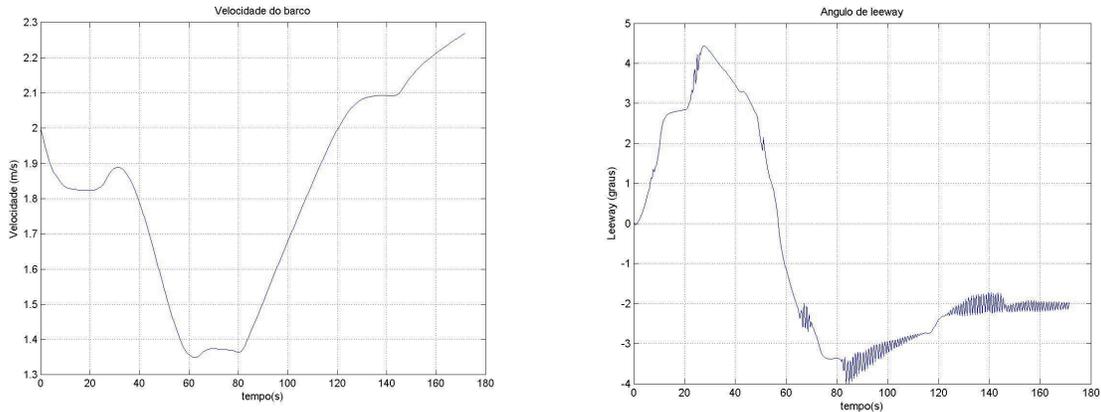


Figura 9 - Módulo da velocidade da embarcação (esq.) e ângulo de deriva (dir.)

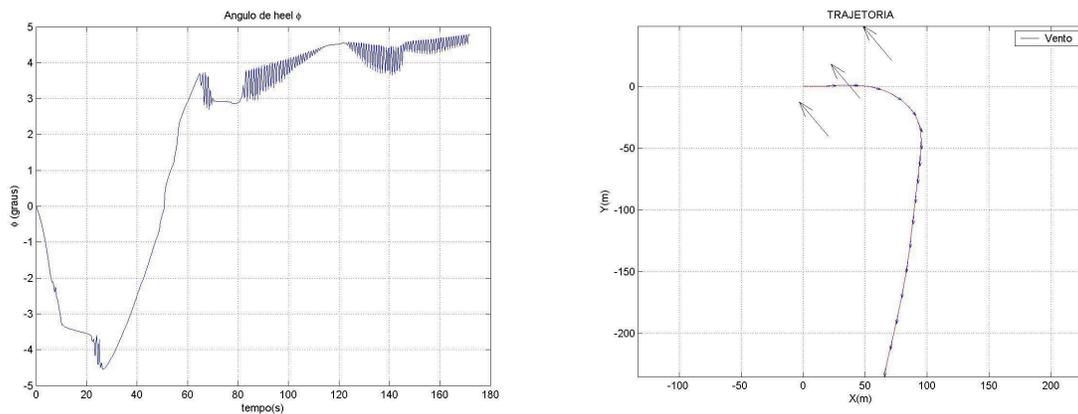


Figura 10 - Ângulo de inclinação (esq.) e trajetória da embarcação (dir.)

As oscilações rápidas e de pequena magnitude observadas nos ângulos de deriva e inclinação (especialmente a partir de 80 (oitenta) segundos de simulação) parecem estar sendo provocadas pelo movimento de guinada (*yaw*), com reflexo no ângulo de inclinação devido à variação rápida do ângulo de vento aparente. Indicam que certos ajustes ainda se fazem necessários nas inércias e amortecimentos, mas não parecem comprometer os resultados médios das simulações. Um modelo que represente de forma razoável o amortecimento em *yaw* está sendo estudado neste momento.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um programa de predição de velocidades (VPP) e um simulador dinâmico de veleiros, ambos realizados no DENO-EPUSP. O VPP é uma ferramenta de auxílio de grande importância para o projeto de um veleiro, pois permite avaliar a influência de modificações nos parâmetros de projeto sobre o desempenho final da

embarcação. O VPP em questão trabalha com 4 equações de equilíbrio e fornece as estimativas de velocidade, ângulo de deriva, inclinação e ângulo de leme.

O simulador de veleiros, por sua vez, permite estudar as respostas dinâmicas do barco, no domínio do tempo, em qualquer situação de vento. Através desta ferramenta é possível prever o comportamento do veleiro durante manobras e, assim, por exemplo, seu desempenho em uma regata. Em conjunto com o VPP fornece informações valiosas para o projeto da embarcação.

O desenvolvimento destes dois programas se insere em um contexto mais amplo de pesquisa na área de vela dentro do DENO-EPUSP. Nesta área estão sendo realizadas também pesquisas na área de estruturas e materiais, entre outros tópicos. Está em fase final de montagem um veleiro de 19 pés que servirá como laboratório para medidas de campo e futuras validações experimentais dos programas apresentados neste trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o auxílio recebido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), através da bolsa IC (05/51902-8). O segundo autor é bolsista de IC PIBIC e expressa seus agradecimentos ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Claughton, A., “Developments in the IMS VPP Formulations”, 14th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, MD, 1999.
2. Gerritsma, J., Onnink, R., Versluis, A., “Geometry, Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht Hull Series”, Int. Shipbuilding Progress 28(328), pp.276-97, 1981.
3. Gerritsma, J., Keuning, J. A., Onnink, R., “Results and Analysis of the Delft Systematic Series II Yacht Hull Form Experiments”, 10th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1991.
4. Gutelle, P. “The Design of Sailing Yachts”, Nautical Books, London, 1984.
5. Henry, R. G., Miller, R. T., “Sailing Yacht Design - An Appreciation of a Fine Art”, Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1963.
6. Larsson, L. & Eliasson, R.E., “Principles of Yacht Design”, International Marine, 1994;
7. Martin, E. D., Beck F. R., “PCSAIL, A Velocity Prediction Program for a Home Computer”, 15th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1996.
8. Marchaj, C.A. “Aero-Hydrodynamics of Sailing”, 2nd edition, London: Adlard Coles Nautical, 1979;

9. Marchaj, C.A. "Sail Performance, Theory and Practice", London: Adlard Coles Nautical, 1996;
10. Marchaj, C. A. "Seaworthiness. The Forgotten Factor", London : Adlard Coles Nautical,1986;
11. Oossanen,P. van , "Predicting the Speed of Sailing Yachts", SNAME – Transactions , Vol 101, pp 337 – 397, Amsterdam,1993.
12. E. J. de Ridder, K.J. Vermeulen, J.A. Keuning, "Mathematical model for the tacking maneuver of a sailing yacht", International HISWA symposium on yacht design and yacht construction 2004
13. Keuning, J.A., Sonnenberg, U.B. "Aproximation of the hydrodynamic forces on a sailing yacht based on the DSHYS", International HISWA symposium on yacht design and yacht construction 1998
14. Klaka, K., Penrose, J. D., Horsley, R. R., Renilson, M. R., "Roll motion of yachts at zero froude number", International Journal of Small Craft Technology - The Royal Institution os Naval Architects (RINA), 2004.
15. Masuyama, Y., "Stability analysis and prediction of performance for a hydrofoil sailing boat", Part 1 – Equilibrium Sailing State Analysis, pp 134 – 143, 2000.