

ALGORITMO FAST-TIME E INDICADORES GRÁFICOS PARA ANÁLISE DE TRAJETÓRIAS ASSISTIDAS POR REBOCADORES EM ÁGUAS RESTRITAS E CONDIÇÕES AMBIENTAIS DIVERSAS

FELIPE LOPES DE SOUZA¹, FELIPE RUGGERI², RODRIGO SAURI LAVIERI³,
EDUARDO AOUN TANNURI⁴

RESUMO

Esse trabalho apresenta uma proposta de implementação de um algoritmo fast-time para simulação de manobras de navios, ou seja, um simulador com modelos simplificados que permite análises rápidas tanto para simulações massivas, usadas para otimizações e levantamentos estatísticos, como para auxiliar a tomada de decisões de operação em tempo real. Nesse contexto, também são propostos indicadores gráficos que facilitam a interação com o usuário, cada qual justificado dentro de seu escopo com exemplos de aplicação. Mantendo o foco em trajetórias assistidas por rebocadores em águas restritas, condição das manobras portuárias, os modelos dinâmicos são selecionado com base no trade-off entre tempo de execução e precisão, de modo que fatores como forças ambientais de vento, correnteza e onda, ou a dinâmica dos rebocadores e propulsores envolvidos, tenham o mínimo de representatividade para garantir a confiabilidade dos resultados. Ao final, são propostas algumas melhorias e outras aplicações que podem ser exploradas com algumas modificações no algoritmo.

PALAVRAS-CHAVES: ALGORITMO FAST-TIME. SIMULADOR. MODELO DINÂMICO. FORÇAS AMBIENTAIS. ALOCAÇÃO DE EMPUXO.

FAST-TIME ALGORITHM AND CHART INDICATORS FOR TUGBOAT ASSISTED TRAJECTORIES ANALYSIS AT RESTRICTED WATERS WITH VARIETY OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS

ABSTRACT

This work proposes a fast-time algorithm implementation to simulate vessels maneuvers, in other words, a simulator with simplified models to execute fast analysis for massive simulations, for optimization purposes and statistical tests, and to assist decisions in real time operations. Some chart indicators are, also, proposed, as guidelines for user-software interaction, each one justified with applications examples. Focusing in tugboat assisted trajectories in restricted waters, the condition of port maneuvers, each dynamic model is selected based on the trade-off between execution time an accuracy, hence, environmental forces of wind, current and wave, and the dynamic of thrusters and tugboats, have models just as much accurate as they need to guarantee representative results. At the end, some improvements are proposed and other possible applications with some changes in the original algorithm.

^{1,2,3,4} Universidade de São Paulo, Tanque de Provas Numérico.

¹Engenheiro Mecatrônico, ^{2,3}Mestres em Engenharia Naval e Oceânica, ⁴Professor Livre-Docente em Engenharia Mecatrônica;

e-mails: ¹felipe.lobes.mecatronica@gmail.com; ²felipe.ruggeri@gmail.com;

³rlavieri@gmail.com; ⁴eduat@usp.br

KEYWORDS: FAST-TIME ALGORITHM. SIMULATOR. DYNAMIC MODEL. ENVIRONMENT FORCES. THRUST ALLOCATION.

1. INTRODUÇÃO

Em se tratando da operação de embarcações, a navegação em águas restritas, principalmente atracação e desatracação, exige um estudo cuidadoso. Reconhecendo a dificuldade associada à tarefa, assim como antevendo os custos envolvidos em um eventual acidente, a legislação brasileira estabelece que o aportamento de navios de grande porte deve contar, de forma obrigatória, com a presença de um prático habilitado. Nesse contexto, algumas ferramentas são utilizadas com o objetivo de auxiliar a tomada de decisões como a escolha do número de rebocadores, as posições dos mesmos e a possibilidade de execução de trajetórias dadas condições ambientais arbitrárias.

Dentre as ferramentas disponíveis, simuladores fast-time apresentam um elevado custo-benefício, permitindo a análise massiva de uma combinação de fatores através de simulações computacionais com modelos dinâmicos simplificados (com menos graus de liberdade e interações aproximadas), provendo, dessa forma, informações preliminares para embasar decisões em tempo real ou, até mesmo, simplificando possíveis ensaios em simuladores full-mission, com modelos mais realistas e intervenção humana. Nesse contexto, os simuladores fast-time são utilizados para selecionar condições críticas a serem verificadas no real-time, além de proverem métricas estatísticas quantitativas com relação à dificuldade da manobra em condições adversas.

Organizando o algoritmo na estrutura: definição do estudo (trajetória, posição e características dos rebocadores e propulsores, condições de vento, corrente e onda), cálculo de forças ambientais (considerando forças de corrente, vento e onda), cálculo das forças de manobra (através de modelos dinâmicos simplificados), alocação dos propulsores (necessária no caso de problemas sobre-atuados) e pós-processamento (exposição de resultados para auxiliar a tomada de decisões), o desenvolvimento de um simulador fast-time será apresentado, assim como propostas para indicadores gráficos, suas justificativas e exemplos de aplicação.

2. MODELOS

Os modelos utilizados para a dinâmica da embarcação e para o cálculo das forças ambientais foram baseados nas deduções de Tannuri et al. [3].

2.1 Dinâmica da Embarcação Principal

A formulação a seguir é válida no contexto de baixas velocidades e regiões limitadas no espaço, em que uma aproximação plana da calota esférica pode ser adotada (da ordem de dezenas de quilômetros). A baixa velocidade da manobra permite que os acoplamentos com os graus de liberdade fora do plano horizontal possam ser ignorados.

Parte-se da definição de dois sistemas de coordenadas, OXYZ, fixo, e oxyz, solidário à embarcação (FIGURA 1):

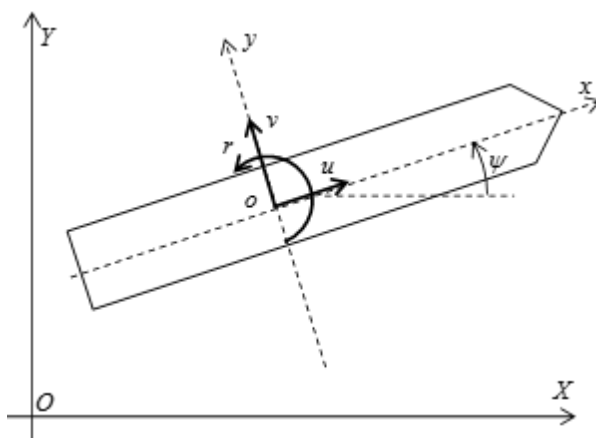


Figura 1: Sistemas de coordenadas e velocidades do navio [3].

Em seguida, aplicam-se as leis de Newton, obtendo-se as relações nas Equações 1-3:

$$M(\dot{u} - rv - x_G r^2) = F_{x_{ext}} \quad (1)$$

$$M(\dot{v} + ru + x_G \dot{r}) = F_{y_{ext}} \quad (2)$$

$$I_Z \dot{r} + M \cdot x_G (\dot{v} + ru) = M_{ext} \quad (3)$$

sendo M a massa da embarcação, I_Z a inércia, x_G a posição do centro de massa (em relação às coordenadas adotadas), $F_{i_{ext}}$ as forças externas, M_{ext} o momento externo, u e v as velocidades nas direções surge e sway e r a velocidade angular no grau de yaw.

As forças externas são classificadas em forças de manobra (causadas por propulsores e rebocadores), forças ambientais e forças potenciais. As forças potenciais

são descritas na forma de massas adicionais, desprezando os amortecimentos potenciais para o movimento horizontal. Dessa forma, assumindo simetria ao longo de ox, o modelo final é descrito nas Equações 4-6:

$$(M + M_{11})\dot{u} - (M + M_{22})rv - (M \cdot x_G + M_{26})r^2 = F_{1E} + F_{1M} \quad (4)$$

$$(M + M_{22})\dot{v} + (M + M_{11})ru + (M \cdot x_G + M_{26})\dot{r} = F_{2E} + F_{2M} \quad (5)$$

$$(I_z + M_{66})\dot{r} + (M \cdot x_G + M_{26})\dot{v} + (M \cdot x_G + M_{26})ru = F_{6E} + F_{6M} \quad (6)$$

com M_{ij} as massas adicionais, F_{iE} as forças ou momentos devido a fatores ambientais, F_{iM} as forças ou momentos de manobra e os subscritos 1, 2 e 6 referentes, respectivamente, aos graus de liberdade surge, sway e yaw.

A conversão entre os sistemas OXYZ e oxyz é descrita em Fossen [2], Equações 7 e 8:

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\eta}(\psi)\dot{\mathbf{x}}_{XYZ} \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{U}} = \boldsymbol{\eta}(\psi)\ddot{\mathbf{x}}_{XYZ} + \dot{\boldsymbol{\eta}}(\psi)\dot{\mathbf{x}}_{XYZ} \quad (8)$$

Dessa forma, é possível descrever uma trajetória no plano e calcular as forças de manobras necessárias utilizando as velocidades, $\dot{\mathbf{x}}_{XYZ}$, acelerações, $\ddot{\mathbf{x}}_{XYZ}$, e a matriz de rotação em função do aproamento, $\boldsymbol{\eta}(\psi)$.

2.2 Interações Ambientais

Foram consideradas as interações ambientais de vento, correnteza e onda, sendo as características de cada componente constantes em toda região da manobra.

As forças de correnteza são estimadas através da integração numérica de forças atuantes em seções da embarcação, sendo que a velocidade na seção, $\vec{\mathbf{V}}_{crx}$, e a incidência, ψ_{crx} , em cada posição x são obtidas pelas Equações 9 e 10, em função das velocidades do navio e da velocidade da correnteza no estudo, $\vec{\mathbf{V}}_c$.

$$\vec{\mathbf{V}}_{crx} = \begin{pmatrix} u_{rx} \\ v_{rx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v + rx \end{pmatrix} - \vec{\mathbf{V}}_c \cdot \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\psi_{crx} = \pi + \arctan(v_{rx} / u_{rx}) \quad (10)$$

A integração é realizada levando-se em conta a massa específica da água ρ , o comprimento do navio L , o calado T e os coeficientes de força de corrente C_i para cada direção, obtidos com ensaios em águas rasas, Equações 11-13:

$$X_c = \frac{1}{2} \rho T \int_{-L/2}^{L/2} C_x(\psi_{crx}) V_{crx}^2 dx \quad (11)$$

$$Y_c = \frac{1}{2} \rho T \int_{-L/2}^{L/2} C_y(\psi_{crx}) V_{crx}^2 dx \quad (12)$$

$$N_c = \frac{1}{2} \rho T \int_{-L/2}^{L/2} (C_y(\psi_{crx}) V_{crx}^2 - C_x(\psi_{cr}) V_{cr}^2) x dx - \frac{1}{2} \rho T L^2 C_z(\psi_{cr}) V_{cr}^2 \quad (13)$$

Sendo as forças obtidas X_c , Y_c e o momento N_c .

As forças de vento seguem uma estrutura semelhante, porém são simplificadas desprezando-se as variações de velocidade e direção de incidência nas seções (Equações 14-16):

$$X_v = \frac{1}{2} \rho_a C_{Vx}(\beta_v) A_F V_v^2 \quad (14)$$

$$Y_v = \frac{1}{2} \rho_a C_{Vy}(\beta_v) A_L V_v^2 \quad (15)$$

$$N_v = \frac{1}{2} \rho_a C_{Vz}(\beta_v) L A_L V_v^2 \quad (16)$$

sendo ρ_a a massa específica do ar, V_v a velocidade relativa do vento, A_F e A_L as áreas emersas frontal e lateral, C_{V_i} os coeficientes de vento e β_v o ângulo de incidência relativo aos eixos do corpo. As forças finais são X_v , Y_v e o momento N_v .

Ao final, as forças de deriva em função das ondas são calculadas a partir da teoria potencial, considerando velocidade de avanço igual à zero para a definição dos coeficientes, aproximação válida pra manobras de baixa velocidade.

2.3 Dinâmica dos Propulsores e Rebocadores

A dinâmica dos propulsores e rebocadores é considerada como uma restrição ao algoritmo de alocação de empuxo, servindo como indicador de variações bruscas de

forças de manobra, situação importante para evidenciar trajetórias extremas para uma dada condição ambiental.

Para evitar uma penalização excessiva do tempo de execução e evitar utilizar informações não obtidas facilmente, optou-se por simplificar a dinâmica pela máxima variação possível nos valores de força (valores em tf/s – tonelada força por segundo, 9,8 kN/s) e ângulo ($^{\circ}$ /s – graus por segundo), sendo o último utilizado no caso de lemes, propulsores azimutais e rebocadores com cabo longo. Dessa forma, os rebocadores podem ser tratados como propulsores extras.

No caso dos propulsores principais, a atuação dos lemes é considerada como se toda a força do propulsor fosse inclinada na direção do leme, sendo que tal inclinação é desconsiderada quando o propulsor reverte.

Aliando a dinâmica com as restrições limites de ângulos e forças, a aproximação é suficiente para descrever propulsores principais, propulsores azimutais (sem restrições de ângulo), propulsores em túnel (restrições fixas de ângulo), rebocadores com cabos curtos (ângulo fixo, permitindo a atuação em reverso) e rebocadores com cabos longos (amplitude maior de ângulos, sem permitir atuação em reverso), representando a maior parte das configurações adotadas nas aplicações alvo. A FIGURA 2 contém um exemplo da simplificação, mostrando os intervalos possíveis de ângulos e forças para um rebocador de cabo longo na proa, dois rebocadores de cabo curto no costado e propulsores principais com os respectivos lemes na popa:

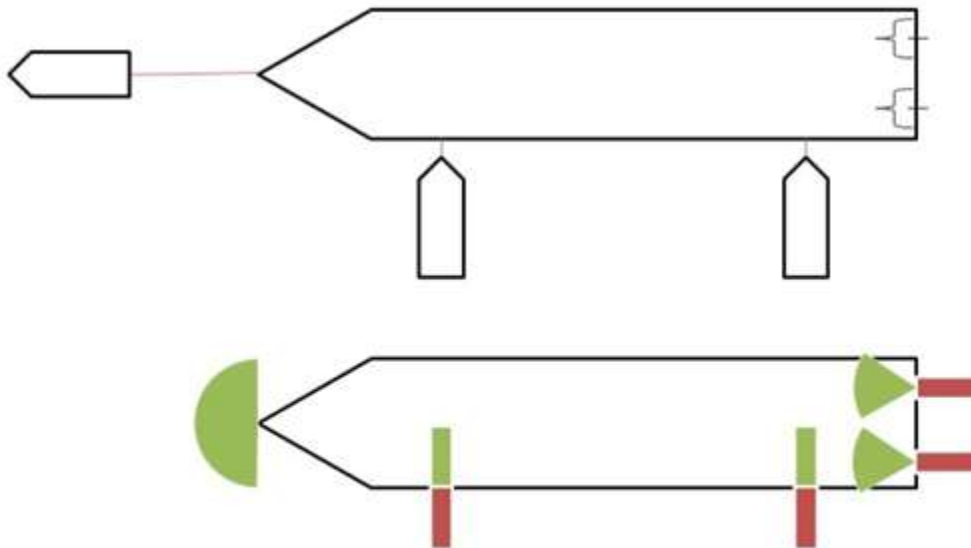


Figura 2: Simplificação da dinâmica dos propulsores e rebocadores, atuação normal em verde e em reverso em vermelho.

3. ALGORITMO FAST-TIME

3.1 Organização Geral

Com os modelos definidos, o algoritmo é estruturado objetivando estimar a utilização dos rebocadores e dos propulsores da embarcação. Para tanto, uma trajetória é definida, as forças de aceleração são calculadas a partir da mesma e as forças ambientais subtraídas, obtendo-se as forças de manobra. As forças resultantes são alocadas entre os propulsores disponíveis, minimizando a potência total dado um conjunto de restrições. O fluxograma do algoritmo é apresentado na FIGURA 3. Antevendo futuros avanços na área, execuções em que os instantes de tempo são paralelizáveis estão representadas em verde.

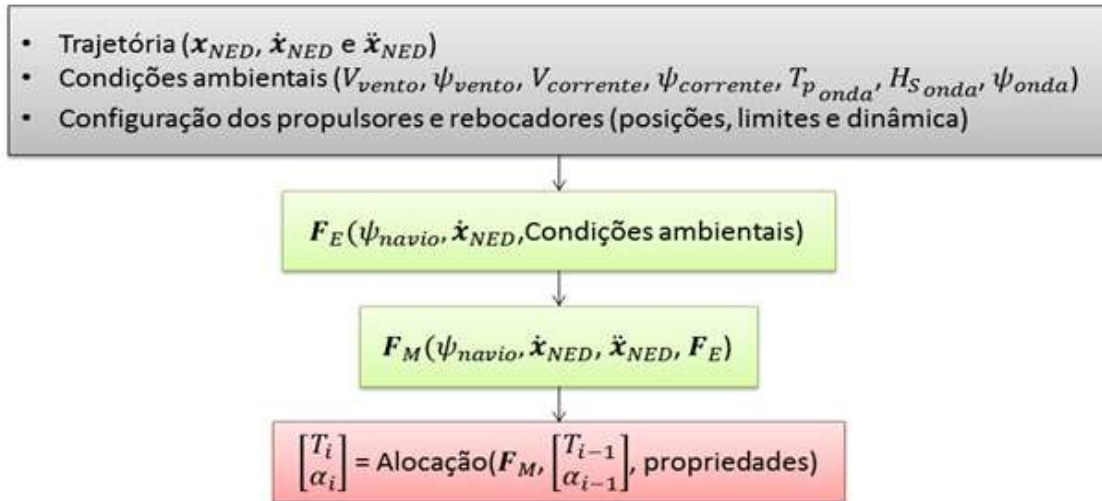


Figura 3: Fluxograma do algoritmo.

Devido às restrições dinâmicas, a alocação em um instante depende da posição dos propulsores no instante anterior, não podendo ser executada de forma distribuída.

3.2 Algoritmo de Alocação

O algoritmo de alocação de empuxo tenta minimizar a potência total demandada por uma dada tríade de forças de manobra. Essa abordagem é interessante pois equilibra a utilização dos propulsores, adiando, tanto quanto possível, a saturação dos mesmos, além do reflexo natural nos custos da operação (consumo de combustível).

A função objetivo foi escolhida com base na relação típica entre a potência necessária P e o empuxo T gerado por um motor [1], Equação 17:

$$\begin{cases} Pot(T) = (P_{\max} - P_{\min}) \left(\frac{|T|}{T_{\max}} \right)^{\eta} + P_{\min} \\ 1,3 < \eta < 1,7 \end{cases} \quad (17)$$

As restrições impostas levam em conta os limites dos propulsores, as dinâmicas dos mesmos e a somatória de forças de manobra que deve ser fornecida. A formulação final do problema consta na Equação 18:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min Pot(T_i) = \sum k_i |T_i|^{1,5} \\ \sum F_{Prop}(\alpha_i, T_i) = F_M \\ T_i > \lambda_{T_i}^-, T_i < \lambda_{T_i}^+ \\ \alpha_i > \lambda_{\alpha_i}^-, \alpha_i < \lambda_{\alpha_i}^+ \end{array} \right. \quad (18)$$

A potência foi simplificada de forma a necessitar de um único parâmetro k para descrever cada propulsor, $\lambda_{T_i}^-$ e $\lambda_{T_i}^+$ são, respectivamente, os limites inferiores e superiores de empuxo e $\lambda_{\alpha_i}^-$ e $\lambda_{\alpha_i}^+$ os limites inferiores e superiores de ângulo.

As não linearidades da função objetivo e da restrição de somatória de forças exigem o uso de programação não linear para encontrar o mínimo local. Dentre os algoritmos possíveis, optou-se pelo SQP (*Sequential Quadratic Programming*), que permite, se valendo da existência da segunda derivada tanto da função objetivo como das restrições, aproximar regiões do espaço por uma sequência de problemas de otimização quadrática, utilizado, com sucesso, por De Wit [1].

4. INDICADORES GRÁFICOS

Dois tipos de indicadores gráficos foram estudados: os que mostram informações para uma manobra específica, com o intuito de facilitar decisões sobre a mesma, e os que mostram estatísticas sobre um conjunto de manobras, permitindo análises por período ou comparações em estudos massivos.

De forma a facilitar a leitura dos usuários, os gráficos foram expressos em unidades recorrentes na área, a TABELA 1 estabelece a relação entre as mesmas e o sistema internacional de unidades.

Tabela 1: Conversão entre unidades utilizadas e o sistema internacional.

Utilizado	SI
Tonelada força (tf)	9800 N
Nós (knots)	0,514 m/s
Graus por minuto (°/min)	0,0003 rad/s

4.1 Gráficos para manobras específicas

O intuito desse primeiro grupo de indicadores é fornecer informações detalhadas sobre a execução de uma determinada manobra.

Inicialmente, são mostradas as propriedades específicas da manobra, que independem do número de rebocadores e propulsores e da alocação dos mesmos, contidas nos gráficos de forças ambientais (FIGURA 4), e de forças de manobra (FIGURA 5).

O intuito dos gráficos iniciais é servir como base de comparação pra avaliar os gráficos de alocação, assim como revelar as forças ambientais críticas, evidenciando, por exemplo, condições em que a corrente, ventos ou ondas superam níveis aceitáveis.

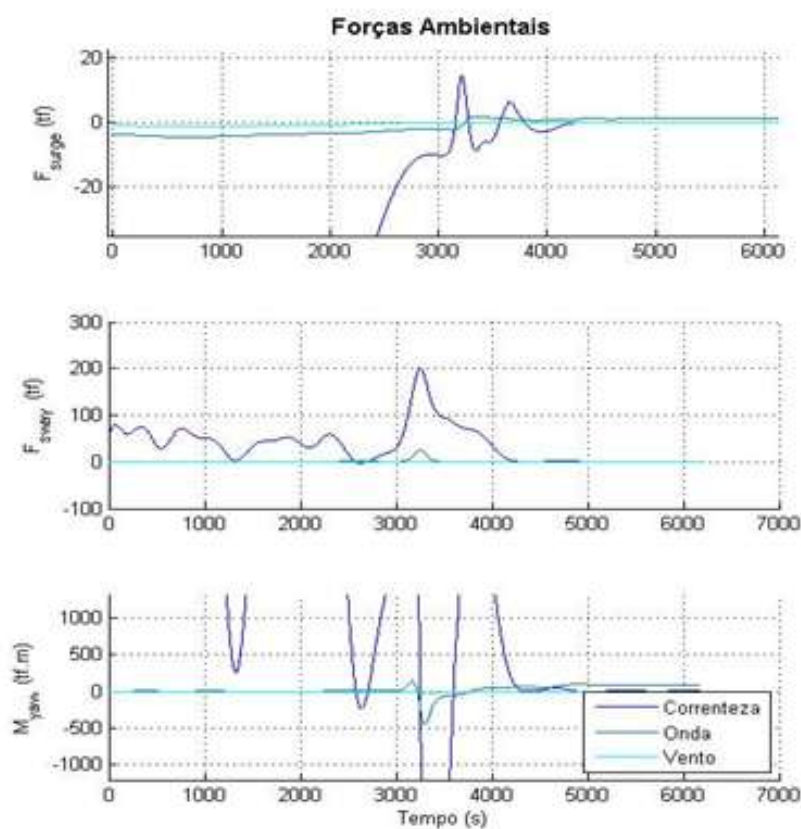


Figura 4: Forças ambientais por componentes, evidenciando forte correnteza.

Em seguida, gráficos mostram a força e os ângulos alocados em cada propulsor e rebocador, como exemplificado na FIGURA 6. Tais gráficos podem ser interessantes para indicar regiões em que o número de rebocadores deve ser alterado, para mais ou para menos, ou então indicar trajetórias em que é possível um único rebocador atuando em posições diferentes durante etapas complementares, se movendo da popa para o costado, por exemplo.

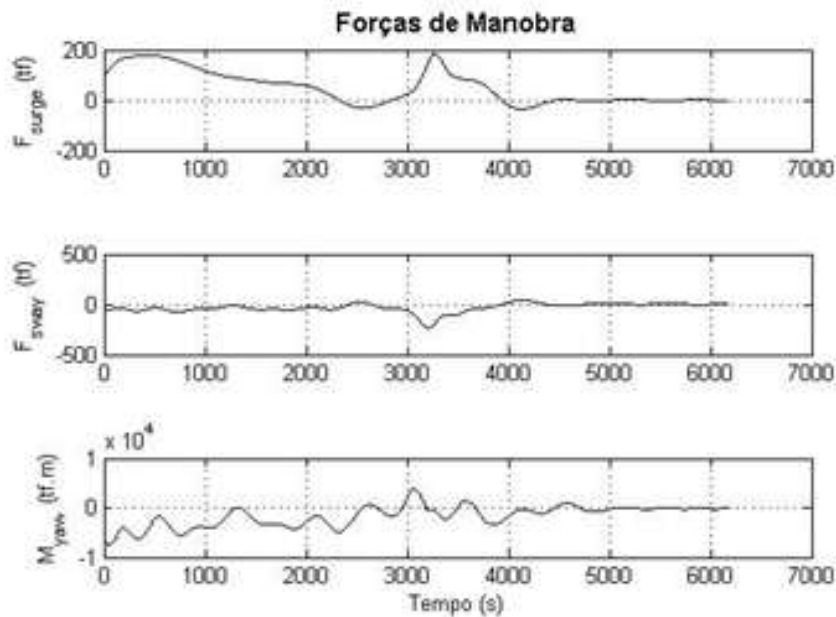


Figura 5: Forças de manobra

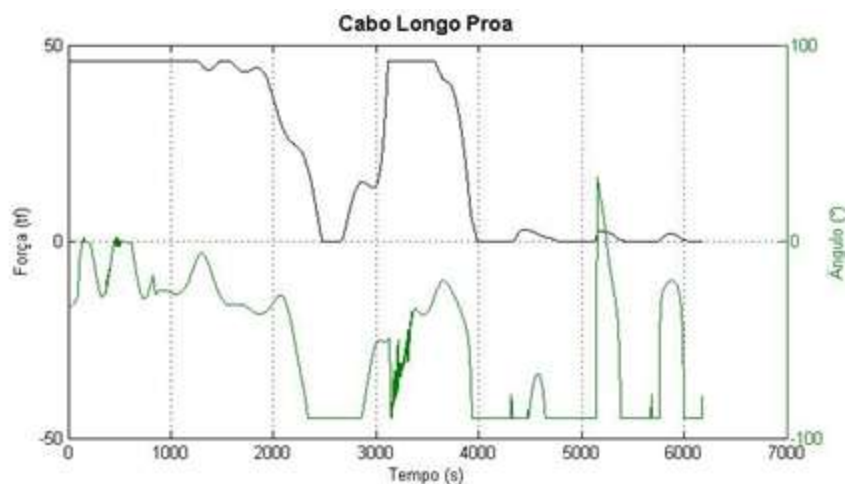


Figura 6: Exemplo de gráfico de alocação de propulsor, evidenciando saturação do mesmo.

De forma a sumarizar as informações apresentadas nos gráficos de alocação, um gráfico de porcentagem de utilização compara os diferentes propulsores (FIGURA 7). Espera-se que, na maior parte do tempo, a utilização dos propulsores esteja abaixo de 60%, indicando que existe segurança na manobra. O gráfico também pode ser interessante para previsões de gasto de combustível, quando analisando condições ambientais médias para diferentes períodos do ano.

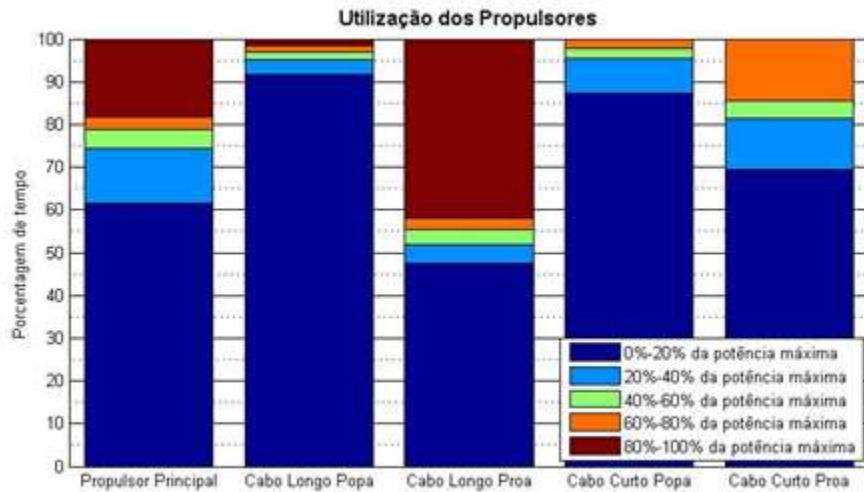


Figura 7: Porcentagem de utilização dos propulsores, indicando uma manobra não segura.

Por fim, é possível visualizar a manobra na carta náutica, permitindo verificar se a trajetória estudada encontra-se na zona permitida. Também são desenhados vetores representando as forças dos rebocadores e as forças ambientais com seus respectivos pontos de aplicação, podendo ser utilizados para definir a posição de rebocadores (FIGURA 8).

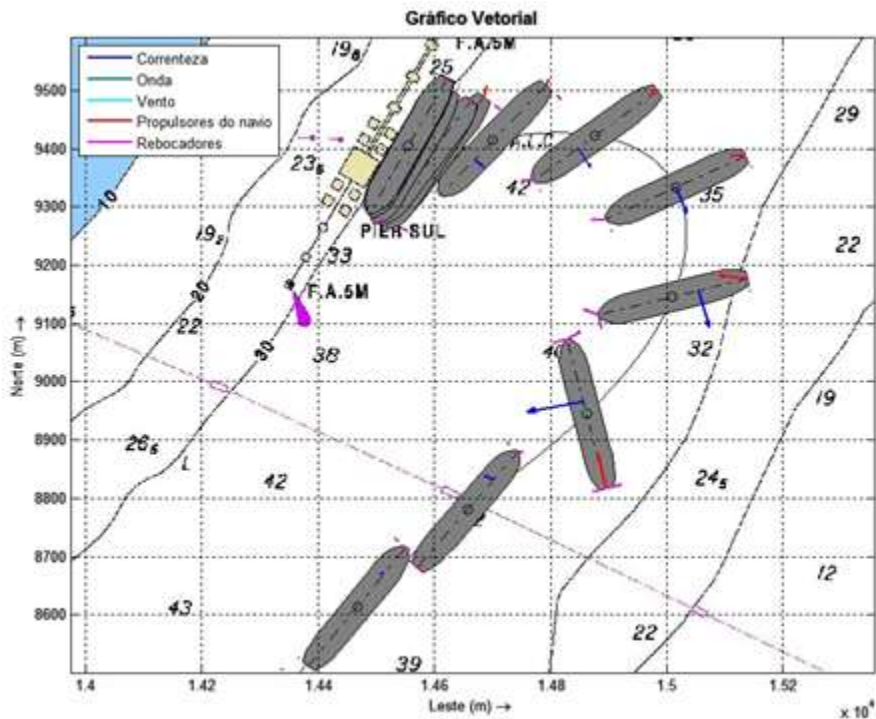


Figura 8: Gráfico vetorial, evidenciando que um rebocador no centro do costado pode ser mais eficiente.

4.2 Gráficos para longos períodos e estudos massivos

O objetivo do segundo tipo de gráfico é fornecer estatísticas mais genéricas que permitam planejamentos de longo prazo de custos, janela de operação, rodízio de rebocadores, etc, e métricas mais simples para comparar estudos massivos com diversas trajetórias, condições ambientais e configurações de rebocadores.

O gráfico de carga média nos rebocadores (Figura 9) é interessante tanto para análises massivas, como o estudo de diferentes configurações de rebocadores ou trajetórias possíveis, permitindo descartar várias soluções consideravelmente piores, como para elaborar histogramas em relação à segurança de uma dada trajetória sob a influência de condições ambientais em diferentes períodos do ano, ou até mesmo horas do dia (influência da maré). Um exemplo de utilização seria organizar a escolha de berços de atracação de acordo com o horário, permitindo que manobras mais simples ocorram em períodos do dia em que as correntes são desfavoráveis.

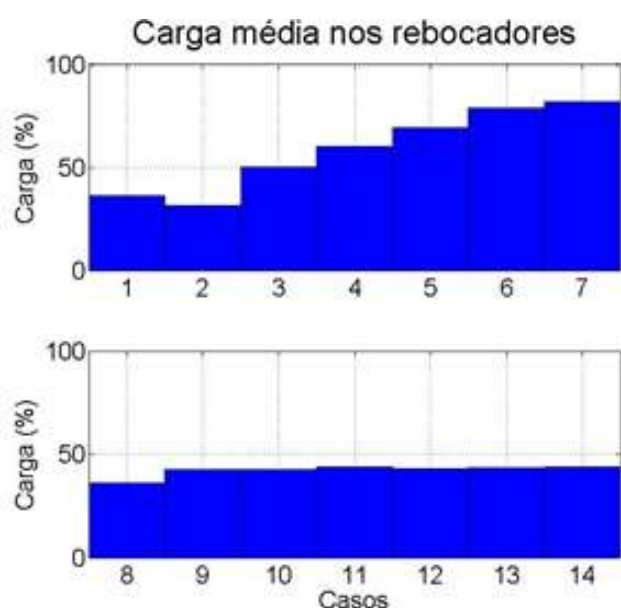


Figura 9: Gráfico de carga média nos rebocadores

Gráficos de carga média nos rebocadores em função das condições ambientais (FIGURA 10) são interessantes para as análises de janelas de operação de uma dada configuração. Exemplos seriam determinar até qual condição é seguro realizar uma determinada trajetória ou até qual condição é seguro usar um número reduzido de rebocadores.

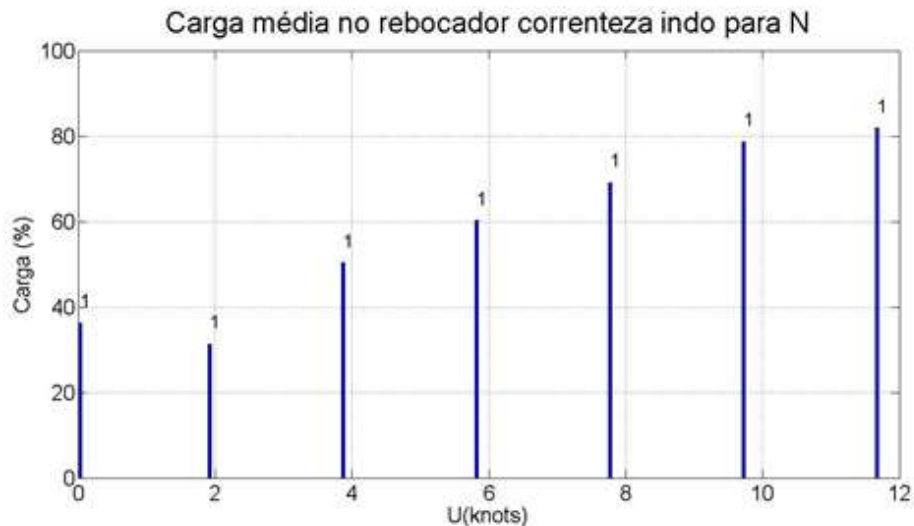


Figura 10: Gráfico de carga média nos rebocadores por condição ambiental.

O último gráfico, também baseado em carga média, foca-se na carga média em cada posição de rebocador ao longo de um período de tempo (FIGURA 11). Esse gráfico pode ser interessante para pautar decisões sobre o tipo de rebocador a ser utilizado ou, até mesmo, para definir configurações padrões que respondem bem em um determinado período do ano ou determinada trajetória, simplificando estudos futuros mais detalhados.

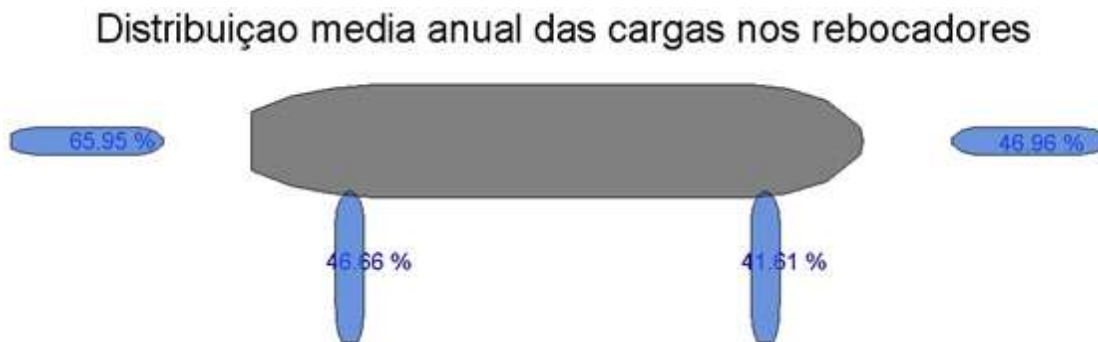


Figura 11: Gráfico de carga média por rebocador.

5. FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Algumas mudanças de modelo ainda podem ser feitas objetivando reduzir o tempo de execução do algoritmo, aumentando o número de casos avaliados e, por

Vetor, Rio Grande, v. 26, n. 1, p. 86-101, 2016

consequente, permitindo resultados mais acurados tanto em simulações para levantamentos estatísticos quanto em otimizações de trajetória que exijam uma resposta em tempo real para tomada de decisões. Dentre as mudanças, o pré-processamento das forças ambientais pode vir a ser interessante para análises massivas (diversas trajetórias, condições ambientais e configurações de rebocadores), buscando simplificar o modelo na forma de superfícies interpoladas em função das velocidades relativas de cada condição, diminuindo o tempo de cada iteração.

Aplicações extras também podem vir a ser desenvolvidas. Como o algoritmo proposto permite análises de diversas trajetórias, o mesmo pode ser tratado como modelo de um algoritmo maior, que objetive encontrar a trajetória ótima para uma dada configuração de propulsores aliada a uma dada condição ambiental, podendo vir a servir no desenvolvimento de controladores sofisticados.

Outra extensão possível seria alocar as curvas de atuação de propulsor, ao invés de forças ponto a ponto. Dessa forma, iterações de otimização que não convergiram por violar restrições dinâmicas podem vir a encontrar soluções através de mudanças em iterações anteriores, abordando o problema de forma completa (piloto onisciente). A implementação de uma lógica em malha fechada também poderia resolver o problema, guiando o sistema quando algumas forças não podem ser alocadas e a trajetória se deteriora.

6. CONCLUSÕES

Cumprindo o objetivo de ser veloz, o algoritmo, aliado aos indicadores, é capaz de fornecer informações prévias valiosas para os operadores, como reforçam as conclusões obtidas nas análises gráficas.

Em relação aos modelos, a simplificação dos rebocadores e propulsores permitiu diminuir o custo computacional de cada iteração, evitando prejudicar o modelo da embarcação principal. Dessa forma, a dinâmica total do sistema ficou próxima ao real, já que o navio principal é o maior responsável tanto pelas forças ambientais como pelas forças de aceleração oriundas de sua dinâmica.

Em uma próxima etapa, é interessante que o algoritmo e os indicadores propostos sejam testados pelos usuários finais, a fim de adequá-los às realidades e necessidades da área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] DE WIT, C. **Optimal thrust allocation methods for dynamic positioning of ships**. Master (Thesis in Applied Mathematics), Delft Institute of Applied Mathematics, Delft University of Technology, Holland, 2009.

[2] FOSSEN, T. **Marine control systems – guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles**. Marine Cybernetics AS, 2002.

[3] TANNURI, E. A.; RATEIRO, F.; FUCATU, C. H.; FERREIRA, M. D.; MASETTI, I. Q.; NISHIMOTO, K. Modular mathematical model for a low-speed maneuvering simulator. In: **Proceedings of the ASME 33th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2014**, São Francisco, 2014.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Gerência de Novas Operações da Petrobras, pela motivação e participação nos desenvolvimentos aqui relatados, e às agências FAPESP, ANP, CAPES e CNPQ pelas bolsas de estudo e pesquisa concedidas.