



XXIV CREAM
Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica



Universidade Federal
do Rio Grande



INSTITUTO FEDERAL
RIO GRANDE DO SUL
Campus Rio Grande

XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017 – Rio Grande - RS

ANÁLISE NUMÉRICA DOS MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO IDEALIZADA

Augusto Silva

Universidade Federal do Rio Grande
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil
auuguustoo@hotmail.com

Phelype Haron Oleinik

Universidade Federal do Rio Grande
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil
phe.h.01@gmail.com

Wiliam Correa Marques

Universidade Federal do Rio Grande
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil
wilian_marques@yahoo.com.br

RESUMO: Os navios petroleiros representam grande parte do meio de transporte de petróleo no cenário mundial, porém, esse meio pode proporcionar inúmeros danos à natureza, sendo assim, necessária a intensificação dos estudos sobre os riscos de acidentes e ferramentas as quais busquem minimizar os problemas oriundos dessa atividade. Simulação numérica pode ser uma ferramenta bastante útil para auxiliar nesse problema, pois é relativamente simples e possui baixo custo de aplicação, além de fornecer resultados satisfatórios. Sendo assim, no presente estudo, simulações foram realizadas através do acoplamento dos modelos numéricos SHIPMOVE, TELEMAT e TOMAWAC, buscando observar o comportamento de uma embarcação idealizada diante de condições hidrodinâmicas adversas. A partir dos resultados obtidos, pode ser concluído que as influências do casco, vento e onda não devem ser desprezadas, uma vez que a embarcação, quando simulada com essas forças separadamente, tem um grande desvio de rota e um deslocamento final maior. A força externa oriunda do propulsor é necessária para auxiliar a embarcação a se aproximar da rota final desejada, além do fato que altura significativa de onda e a intensidade das correntes pode fazer a embarcação ter um desvio grande em relação à rota ideal.

Palavras-Chave: SHIPMOVE, Embarcações, Modelagem numérica

ABSTRACT: The petroleum ships represent a huge part of the ways to transport petroleum in the world scenario, however, this kind of transportation can impact the environment in countless ways, so it turns to be necessary the intensification of the study about accident risks and development of tools to minimize the problems caused by this activity. Numerical simulation can be a useful tool to solve this problem since it is relatively easy to work with and it is not expensive, providing satisfactory results as much. In this study, simulations have been done through the coupling of numerical models called SHIPMOVE, TELEMAT and TOMAWAC, seeking to understand vessel's behaviour in front of different hydrodynamics conditions. It can be concluded, from the final results, that the hull, wind and wave influences should not be despised, once the vessel, when simulated with this forces acting individually, has a big change of route and a bigger final trajectory. The external force from propeller turns to be necessary to help the vessel to get closer to the ideal route, beside the fact that the significant wave height and current intensity can make the vessel change its route from the ideal route.

Keywords: SHIPMOVE, Vessels, Numerical modelling

INTRODUÇÃO

As fontes energéticas possuem um grande papel na economia mundial, pois a maioria das atividades no setor econômico da indústria moderna são ligadas à geração e utilização de energia. Logo, essas fontes acabam fazendo parte de uma estratégia geopolítica importante para o desenvolvimento do país no cenário global. Para um país se desenvolver

economicamente, é necessário que o mesmo possua fontes energéticas suficientes para suprir a demanda da sua população e indústria.

O mundo que nos cerca está em constante mudança, e a população está aumentando. Em 1950, era cerca de 2,6 bilhões, passando para 5 bilhões em 1987, atingindo 6 bilhões de pessoas em 1999. Agora, o número de habitantes no planeta Terra é cerca de 7 bilhões. Este crescimento traz algumas implicações graves em quase todos os aspectos da vida, como por exemplo, o consumo de energia e recursos para sobrevivência (água, alimentos), que está aumentando (ONUBR, 2017).

As fontes energéticas disponíveis, na sua maior parte, são recursos naturais, os quais o homem tira proveito. Estas fontes podem ser carvão, óleo, gás natural, urânio (energia nuclear), energia eólica, solar, fontes marinhas, entre outras (Gadonneix *et al.*, 2013). Segundo Schiffer *et al.* (2016), óleo foi a fonte mais utilizada em 2015, com 32,94% das fontes, seguindo o carvão, com 29,20%. Aproximadamente 63% do óleo extraído é utilizado no setor de transportes, ainda este setor consome cerca de 27% da demanda total de energia. De acordo com números disponibilizados por Schiffer *et al.* (2016), em 2015 a produção de óleo alcançou 94,2 milhões de barris por dia, com um aumento de 3% em relação ao ano de 2014.

O consumo de óleo e carvão será amenizado por conta da substituição destas fontes por energias limpas e renováveis, porém, isso não está ocorrendo na velocidade desejada pelo Conselho Mundial de Energia, e a previsão é que isso não ultrapasse 5% pelos próximos cinco anos (Schiffer *et al.*, 2016). Segundo ANP (2016), o Brasil se encontra na 15ª posição no ranking mundial de reservas provadas de petróleo, totalizando 13 bilhões de barris. A ANP/MME (2015) afirma que a maior parte das reservas de petróleo está localizada no mar (aproximadamente 94,85%). Para transportar este material extraído *offshore*, geralmente são utilizados dutos submarinos ou navios petroleiros (*tankers*), os quais levam o petróleo para os terminais aquaviários, onde está concentrada a capacidade de armazenagem de 69,6% (Armudi, 2016).

A zona costeira do sul do Brasil desempenha um papel de região com risco de acidentes marítimos devido à grande movimentação de embarcações na zona portuária na cidade de Rio Grande, localizada no estado do Rio Grande do Sul. Esta zona é composta pelo Porto de Rio Grande, Terminal Aquaviário da Transpetro (Petrobrás) e Refinaria de Petróleo Riograndense S/A, conseqüentemente, há um fluxo grande de petróleo e seus derivados, oferecendo risco à natureza (Armudi, 2016).

O derramamento de produtos químicos no mar pode provocar danos, tanto para o meio ambiente quanto para os animais em geral, sendo o ideal minimizar estes incidentes. Com a simulação numérica, isso pode ser realizado com baixo custo operacional além de contribuir para reduzir o custo de projeto, operação e estudo sobre a trajetória e transporte. Com a facilidade e praticidade do uso dessa ferramenta, essas etapas se tornam mais rápidas, viabilizando a utilização de rotas melhores para a embarcação.

Para um modelo numérico que simula os movimentos de uma embarcação ser eficiente, o mesmo deve levar em consideração as forças externas, como a influência das ondas, o vento agindo diretamente sob a embarcação e indiretamente através das próprias ondas, do atrito entre o fluido (água do mar) e casco do navio, bem como marés e correntes marinhas (Chen *et al.*, 2013), pois assim, o modelo se torna mais realístico, além de avaliar a segurança da embarcação (Tello Ruiz *et al.*, 2016).

Em cenários marítimos com ondas possuindo elevadas alturas, pode ocorrer o caso de a água ultrapassar o nível do convés e ficar sobre o mesmo, chamado água verde ou de transporte, se tornando perigosa, pois pode danificar equipamentos, a carga ou até mesmo afundar a embarcação (Shibata *et al.*, 2012). Simulações nas quais o navio navega por ambientes ríspidos são importantes a fim de avaliar os riscos aos quais a embarcação estará envolvida durante o seu trajeto (Bennett *et al.*, 2013).

Portanto, no presente estudo, serão realizadas simulações numéricas utilizando acoplamento do TELEMAC3D, TOMAWAC e SHIPMOVE, afim de estudar os movimentos de uma embarcação idealizada. Será utilizada uma metodologia conhecida como modelo MMG (*Manoeuvring Mathematical Modeling Group*) para determinar as forças externas que ocasionam a deflexão da rota pré-estabelecida pelo navio.

METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado através de uma simulação numérica onde foram acoplados os modelos TELEMAC3D, TOMAWAC e SHIPMOVE. O modelo TELEMAC3D foi o responsável pela hidrodinâmica da simulação, o TOMAWAC pela geração de ondas através do vento, e por último, o SHIPMOVE, responsável pela dinâmica das embarcações do ambiente marinho.

TELEMAC3D

O TELEMAC3D é um módulo que resolve as equações de Navier-Stokes, tendo a possibilidade de assumir as condições de pressão hidrostática ou não. Este módulo faz parte do sistema chamado open TELEMAC-MASCARET

(www.opentelemac.org), que é um sistema formado por um conjunto de módulos assumindo duas e/ou três dimensões, que pode ser aplicado no estudo de hidrodinâmica, transporte de sedimentos e ondas geradas pelo vento nas regiões oceânicas e costeiras. Este modelo considera a evolução da superfície livre em função do tempo, utilizando as equações de difusão e advecção para simular propriedades do fluido, como salinidade e temperatura (Hervouet, 2007).

O TELEMAC3D resolve as equações diferenciais através do método de elementos finitos, discretizando espacialmente e verticalmente em coordenadas sigma, tendo como limites o fundo e superfície livre. Com a utilização dos elementos finitos, é possível aplicar um refino maior na grade numérica, ou malha computacional, em lugares onde há grandes mudanças de cenários, como a região costeira e onde se deseja maior precisão de resultados, além de refinar menos em lugares onde não possuem grande importância para a simulação, como em lugares muito afastados da costa, otimizando o custo e tempo computacional.

Para este estudo, os resultados importantes em cada ponto da malha são as velocidades nas três direções, concentração de quantidades transportadas, bem como a elevação da superfície livre. Algumas propriedades da água como temperatura, salinidade e sedimentos são definidas como escalares, podendo ser ativos ou passivos, dependendo da sua interação com a hidrodinâmica. Esses escalares evoluem de acordo com processos advectivos e difusivos, controlados por correntes e ventos e processos turbulentos.

TOMAWAC

Como afirmado anteriormente, é importante simular a influência das ondas na dinâmica da embarcação, e para isso foi utilizado o módulo TOMAWAC (TELEMAC-Based Operational Model Addressing Wave Action Computation), que faz parte do sistema open TELEMAC-MASCARET, bem como TELEMAC3D.

TOMAWAC se baseia na equação da conservação de densidade de ação das ondas, e leva em consideração alguns processos envolvidos na formação da onda, como empolamento, *whitecapping*, dissipação de energia pela fricção com o fundo, além da interação entre as próprias ondas e refração pela batimetria, porém, não leva em consideração a difração e reflexão das ondas.

SHIPMOVE

O modelo SHIPMOVE (SHIP MOVEMENT MODEL – BR12014001163-1) foi criado e está em constante desenvolvimento pelo Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos (LANSD – www.lansd.furg.br), localizado na Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Este modelo completa o grupo de módulos utilizados na simulação deste trabalho. É o responsável pela dinâmica do navio, descrevendo o seu comportamento e movimentos ao longo do tempo, utilizando a teoria do cálculo variacional e mecânica Lagrangeana.

Permite que a embarcação se movimente em seis maneiras distintas nas três dimensões, ou seja, seis graus de liberdade. O sistema de coordenadas é demonstrado na Fig. 1. Os graus são os movimentos de translação em x (avanço), y (deriva) e z (afundamento), e os de rotação em α (jogo), β (arfagem) e γ (guinada).

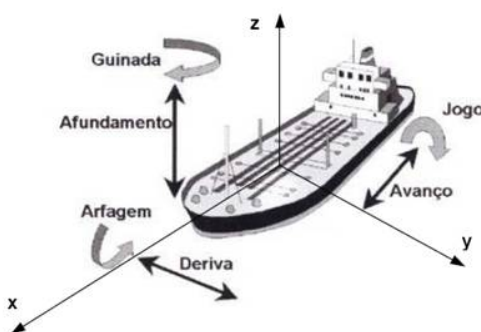


Figura 1. Movimentos de translação (avanço, deriva e afundamento) e rotação (jogo, arfagem e guinada)

Para simplificar o sistema de equacionamento utilizado nesse trabalho foi utilizada a mecânica Lagrangeana, uma vez que assim, é possível obter sistematicamente as equações que descrevem a dinâmica da embarcação. Em termos de equações, a Lagrangeana pode ser representada pela Eq. (1), onde T representa a energia cinética total do sistema e U a energia potencial total. A energia cinética é descrita na Eq. (2), onde m é a massa do navio (kg), V é a velocidade ($m.s^{-1}$) descrita na Eq. (3) e a potencial na Eq. (4), onde g é a aceleração da gravidade em $m.s^{-2}$ e h é a altura no eixo vertical z (m).

$$L = T - U \quad (1)$$

$$T = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

$$V^2 = u^2 + v^2 + w^2 \quad (3)$$

$$U = mgh \quad (4)$$

Ao obter a energia cinética total, é possível desenvolver e calcular a Lagrangeana do sistema, sendo assim, possível encontrar, através do princípio da ação mínima, um conjunto de equações diferenciais conhecidas como equações de Euler-Lagrange para um sistema não-conservativo (Eq. 5).

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \sum_i^n F_i^{ext} \quad (5)$$

Onde, q_i são coordenadas generalizadas da Lagrangeana do sistema, \dot{q}_i é sua derivada temporal, n representa o número de graus de liberdade utilizado, e por fim F_i^{ext} as forças externas aplicadas ao sistema. Ao aplicar a Lagrangeana do sistema nas equações de Euler-Lagrange e obter as forças externas, é possível estabelecer equações diferenciais ordinárias para representar a dinâmica da embarcação nos seis graus de liberdade do sistema x, y, z, α, β e γ . Assim, é possível obter um conjunto de equações para representar a dinâmica nos seis graus de liberdade, já que o modelo é tridimensional, na forma matricial (Eq. 6).

$$(I + M_A)\ddot{\sigma} + B_p\dot{\sigma} + [F_c(\alpha, \dot{\alpha})] = [T_m] + [F_{ext}] \quad (6)$$

Na qual, I representa a matriz inercial, M_A representa a matriz de massa adicional, B_p a matriz do amortecimento potencial, F_c o vetor das forças centrífugas, T_m representa o vetor do torque do motor da embarcação e F_{ext} vetor das forças externas atuando sobre o navio.

A matriz da massa adicional representa a quantidade de massa do fluido que é deslocada devido ao movimento da embarcação e devido às forças hidrodinâmicas causadas pelo casco quando este corpo rígido realiza um movimento de translação ou rotação de acordo com seu grau de liberdade. Esta matriz também está relacionada à energia que as partículas do fluido terão ao serem aceleradas pela embarcação (Levi & Salhua, 2007).

Já a matriz de amortecimento potencial condiz à energia dissipada através das ondas geradas pelo movimento da própria embarcação (Levi & Salhua, 2007). Amortecimento potencial existe quando há interação entre um corpo e um meio fluídico no momento em que este corpo realiza algum movimento, e ao realizar quaisquer movimentos, o corpo sofre uma perda de energia cinética por duas razões, basicamente. A primeira é através do arrasto, devido à diferença de pressões na superfície de interação corpo-fluido, sendo esta força sempre contrária ao sentido do movimento do corpo sobre o fluido. A segunda razão é devido às forças de cisalhamento nesta superfície de interação. Estas frações de energia dissipada são transformadas em energia térmica, devido ao atrito, e em ruídos, se dissipando no meio onde a embarcação se encontra.

No SHIPMOVE foram utilizadas duas contribuições diferentes para totalizar a força de arrasto. A primeira delas é o atrito devido à tensão de cisalhamento que ocorre entre o casco do navio e o fluido, porém, esta parcela depende não só da distribuição dessa tensão sobre o casco, mas também do formato físico da parte da embarcação a qual está sob o fluido, que neste caso é água do mar (Munson *et al.*, 2004).

A segunda contribuição para o arrasto é a dissipação de energia pela geração das ondas quando o corpo desloca no fluido ao qual está submetido. Esta depende basicamente da velocidade do navio e possui um efeito menor nos movimentos quando relacionada à primeira contribuição. Por ser dependente do número de Froude e do formato do corpo, essa parcela pode se tornar complexa (Munson *et al.*, 2004).

Para obter a trajetória da embarcação, foi utilizada FORTRAN95 (Fortran 95 language features) para integrar o conjunto de equações apresentado no estudo, o qual foi forçado com condições iniciais e de contorno. Para a inversão da matriz de inércia foi utilizado o método de Gauss, sendo as equações diferenciais resolvidas através do método de integração de Runge-Kutta de quarta ordem.

A embarcação utilizada é um navio *tanker* denominado *HIGH PROSPERITY* (IMO 9292357), responsável por transportar produtos oriundos do petróleo. Possui massa total de $2,88 \times 10^7$ kg, 173 m de comprimento, 32 m de largura e calado com 12,62 m.

FORÇAS EXTERNAS

Objetivando tornar a simulação mais realística, e para isso adicionando a influência do fluido sobre o corpo, foi utilizado um método de forças hidrodinâmicas conhecido como MMG (*Manoeuvring Mathematical Modeling Group*). Esse modelo foi criado por japoneses entre 1976 e 1980, bastante utilizado em estudos de movimentos de manobras, consiste em considerar as características individuais de mar aberto do casco, ondas, leme, propulsor e vento, além das interações entre os mesmos. A ideia sugere que, desta maneira, os cálculos tenham um significado físico, bem como, uma formulação mais simples possível (Yoshimura, 2005).

As forças hidrodinâmicas em X e Y, além do momento N, segundo MMG e com sistema de coordenadas fixo na própria embarcação como visto na Figura 1, são descritas como:

$$X_H + X_P + X_R + X_W + X_A = X \quad (7)$$

$$Y_H + Y_P + Y_R + Y_W + Y_A = Y \quad (8)$$

$$N_H + N_P + N_R + N_W + N_A = N \quad (9)$$

Onde, os subscritos H, P, R, A, W correspondem, respectivamente, à *hull* (casco), *propeller* (propulsor), *rudder* (leme), *air* (ar) e *wave* (onda), segundo Chen *et al.* (2013).

As forças causadas pelo ar, ou vento, são decompostas sobre o eixo x, y e z, da seguinte maneira:

$$X_A = \frac{\rho_A}{2} V_A^2 A_T C_{XA}(\theta) \quad (10)$$

$$Y_A = \frac{\rho_A}{2} V_A^2 A_L C_{YA}(\theta) \quad (11)$$

$$N_A = \frac{\rho_A}{2} V_A^2 L A_L C_{NA}(\theta) \quad (12)$$

Onde, ρ_A é a densidade do ar, θ significa a direção relativa do vento com a embarcação, V_A é a velocidade relativa do vento, A_L é a área frontal e A_T é a área lateral da embarcação, L é o comprimento do navio, C_{XA} , C_{YA} e C_{NA} são os coeficientes os quais variam de acordo com a direção θ (Yoshimura, 2005). Estes coeficientes, no presente estudo, foram considerados constantes para fins de simplificação e obtenção de resultados rápidos. A descrição da contribuição das ondas pode ser descrita, como:

$$X_W = \rho g h^2 B^2 / \overline{LC_{XW}} \quad (13)$$

$$Y_W = \rho g h^2 B^2 / \overline{LC_{YW}} \quad (14)$$

$$N_W = \rho g h^2 B^2 / \overline{LC_{NW}} \quad (15)$$

Onde, ρ é a densidade da água do mar, g é a aceleração da gravidade, h é a altura significativa de onda, B é a largura da embarcação e L o seu comprimento, os coeficientes $\overline{C_{XW}}$, $\overline{C_{YW}}$ e $\overline{C_{NW}}$ são médias de coeficientes estimados e calculados por Research Initiative on Oceangoing Ships (RIOS), localizado na Universidade de Osaka (Yoshimura, 2005). Os coeficientes citados acima foram considerados constantes, pois não foram encontrados, visto que são obtidos de pesquisas privadas e de difícil acesso.

Segundo Yasukawa *et al.* (2015), as contribuições do casco do navio para as forças em X, Y e momento em N correspondem pelas Eq. 16, Eq. 17 e Eq. 18. Os coeficientes X'_H e Y'_H foram adimensionalizados por $\frac{1}{2}\rho L d U^2$ e N'_H por $\frac{1}{2}\rho L^2 d U^2$, e suas formulações foi de acordo com o mesmo autor:

$$X_H = (1/2) \rho L d U^2 X'_H \quad (16)$$

$$Y_H = (1/2) \rho L d U^2 Y'_H \quad (17)$$

$$N_H = (1/2) \rho L^2 d U^2 N'_H \quad (18)$$

Onde U é a velocidade do navio, ρ é a massa específica do fluido, L o comprimento do navio e d é o calado. Os coeficientes X'_H , Y'_H e N'_H foram aproximados para o modelo de embarcação de Yasukawa *et al.* (2015), retirados da Tabela 3 do respectivo trabalho.

Em relação ao leme, X_R , Y_R e N_R são expressos pelas Eq. 19, Eq. 20 e Eq. 21, onde F_N é a força normal do leme, t_R , a_H e x_H são coeficientes os quais representam basicamente a interação entre o casco e leme da embarcação (Yasukawa *et al.*, 2015), x_R corresponde à posição do leme nas coordenadas da embarcação, ou seja, $x_R = -0,5$ e δ ângulo entre o leme e a embarcação. A equação para calcular a F_N foi retirada de Yasukawa *et al.* (2015).

$$X_R = -(1 - t_R)F_N \sin \delta \quad (19)$$

$$Y_R = -(1 + a_H)F_N \cos \delta \quad (20)$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \quad (21)$$

Onde, t_R , a_H e x_H foram aproximados de Yasukawa *et al.* (2015), bem como x_R . Já o δ foi simplificado para somente um ângulo.

EMPUXO

Nesse estudo o navio não terá empuxo já que este trabalho foi dedicado a estudar a influência das forçantes separadamente. A embarcação partirá de um ponto próximo à costa sul do Brasil, adjacente a cidade de Rio Grande, no qual há bastante movimentação de navios, indo em direção ao oceano com uma velocidade inicial de 5 m.s^{-1} na direção do eixo x e -5 m.s^{-1} na direção y , totalizando, vetorialmente, $7,1 \text{ m.s}^{-1}$ ou 13,1 nós. Esta energia cinética inicial será dissipada devido às forças citadas na seção do SHIPMOVE (massa adicional, amortecimento potencial), porém, a embarcação terá uma influência oriunda das forças hidrodinâmicas citadas anteriormente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para estudar os movimentos da embarcação sob diferentes cenários, foram simuladas 5 horas do dia 4 de janeiro do ano de 2013 por ser um dia o qual possui grande intensidade e altura significativa de ondas, de acordo com Armudi (2016). O referente dia apresentou altura de $2,05 \text{ m}$ e a Fig. 2 mostra onde será o ponto de partida da embarcação, com as condições hidrodinâmicas iniciais, sendo o ponto vermelho, a própria embarcação.

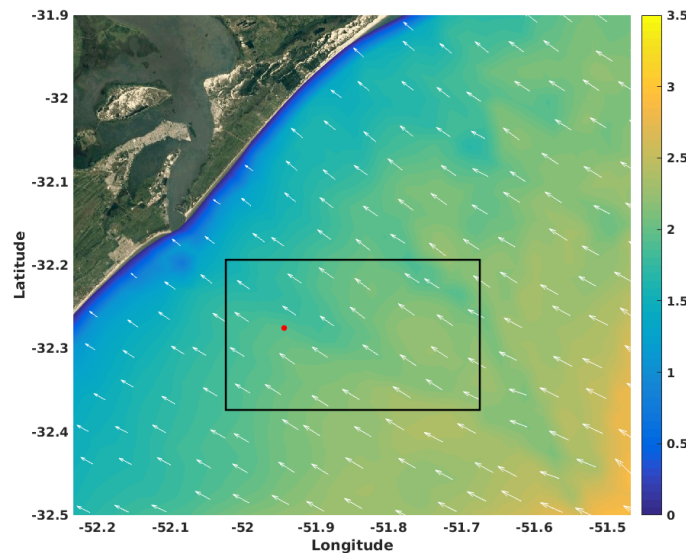


Figura 2. Área de estudo dos movimentos da embarcação, altura significativa de onda (cores), direção das ondas e corrente (vetor) para o dia 04 de janeiro de 2013.

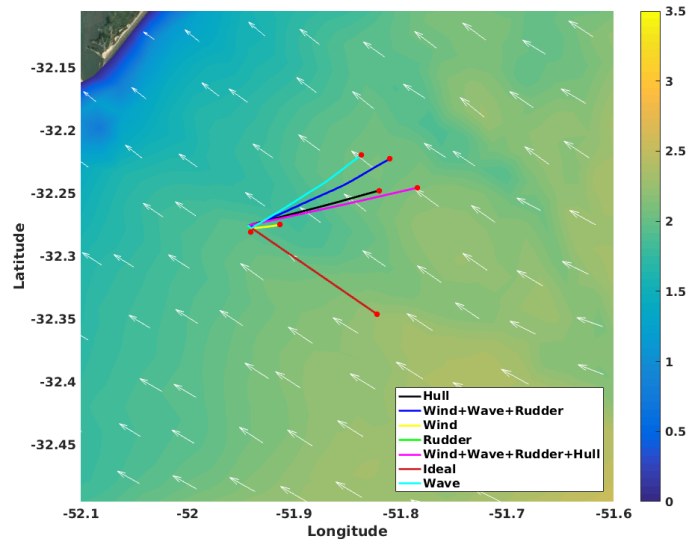


Figura 3. Deslocamentos totais da embarcação com diferentes influências, altura significativa de onda (cores), direção das ondas e corrente (vetor) para o dia 04 de janeiro de 2013.

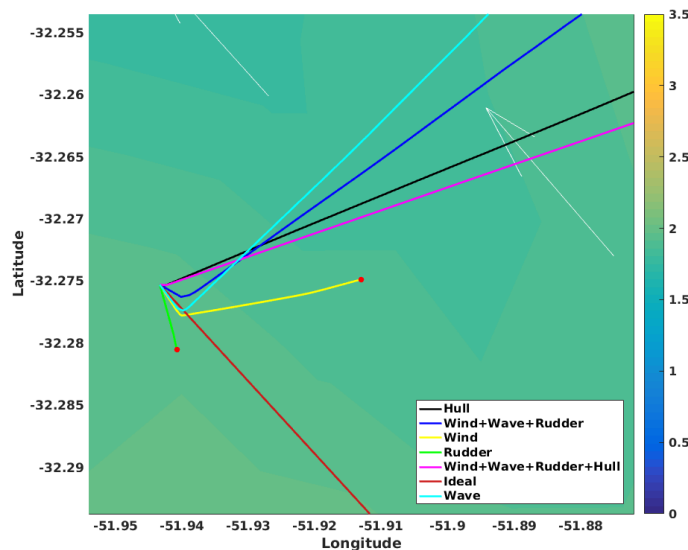


Figura 4. Deslocamentos iniciais da embarcação com diferentes influências, altura significativa de onda (cores), direção das ondas e corrente (vetor) para o dia 04 de janeiro de 2013.

A Fig. 3 representa os deslocamentos finais da embarcação de acordo com a influência externa, a Fig. 4 mostra com maiores detalhes a parte inicial dos deslocamentos, a Fig. 5 apresenta os movimentos lineares e a Fig. 6 os movimentos angulares sofridos pela embarcação sob as diversas influências.

INFLUÊNCIA DO VENTO

Nesta seção, será estudada a influência do vento sob a trajetória da embarcação. O deslocamento total do navio no dia 4 de janeiro foi de, aproximadamente, 2,9 km (Fig. (3)), e a velocidade média neste dia foi de $0,163 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (0,31 nós). Por ter a sua velocidade baixa, o deslocamento final não é muito grande. Segundo a Fig. 3, é possível notar que a trajetória do navio sofreu uma mudança de direção inicial, pois o mesmo deveria seguir na direção Sudeste, se afastando da costa (trajetória ideal. Logo, o vento tem a capacidade de influenciar na direção do navio quando o mesmo não possui empuxo, tanto diretamente agindo na embarcação, quanto indiretamente, por conta das ondas e correntes. Em relação aos movimentos lineares (Fig. 5), é possível notar que o navio não teve um grande avanço, visto que sofreu uma brusca alteração na direção. A deriva também não é muito significativa quando comparado com as demais influências, já o

afundamento foi similar aos demais casos. As variações angulares (Fig. 6) mais significativas ocorrem na primeira hora de simulação e as maiores variações ocorrem no Jogo e Guinada.

INFLUÊNCIA DAS ONDAS

Através da Fig. 3 é possível notar que a embarcação sofre uma deflexão em sua trajetória, indo na direção Nordeste. Ela percorreu 11,8 km com uma velocidade média de $0,607 \text{ m.s}^{-1}$ (1,18 nós). Esta influência hidrodinâmica contribui para um aumento de $0,444 \text{ m.s}^{-1}$ na velocidade média da embarcação quando comparada com a influência do vento. Quanto aos movimentos lineares (Fig. 5), pode ser observado que a embarcação possui um avanço maior que com o vento, confirmando o que se observa na Fig. 3. Neste caso ocorre um movimento de deriva maior que no efeito de vento, sofrendo desvio lateral apenas no início da trajetória e o afundamento similar aos demais. Os movimentos angulares (Fig. 6) apresentam maiores variações apenas na primeira hora, com uma posterior estabilização devido à velocidade baixa da embarcação. O movimento Arfagem tem a quarta maior amplitude de todos, bem como Guinada e o Jogo, que desta vez possuem o quinto maior valor.

INFLUÊNCIA DO CASCO

Sobre a influência do casco é possível afirmar o mesmo que sobre a influência das ondas. O navio sofre grande desvio da sua rota, significando que essa influência, caso não existisse, mudaria bastante o trajeto final. Com deslocamento final de 11 km e velocidade média de $0,606 \text{ m.s}^{-1}$ (1,18 nós), os movimentos lineares são regulares até a quinta hora de simulação. Os movimentos angulares são quase constantes, porém há uma pequena variação entre a segunda e quarta hora, igual à influência da onda com vento e leme, mas de menor intensidade. Já a Arfagem foi o movimento de maior amplitude em relação às demais forças.

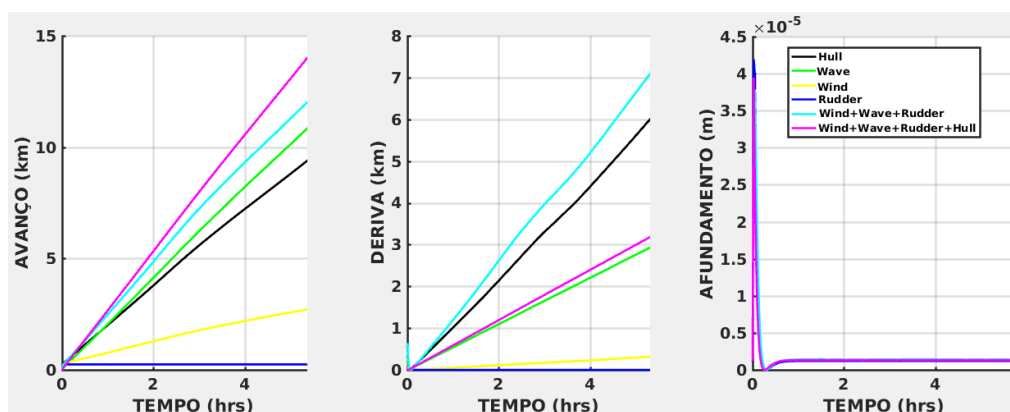


Figura 5. Variação dos movimentos lineares avanço (km), deriva (km) e afundamento (m)

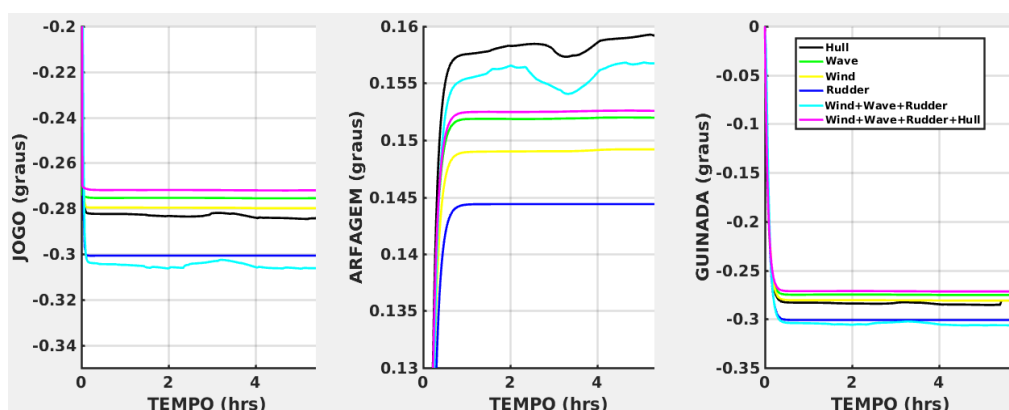


Figura 6. Variação dos movimentos angulares jogo (graus), arfagem (graus) e guinada (graus)

INFLUÊNCIA DO LEME

Quando simulada a influência do leme, a embarcação obteve um deslocamento final de 0,6 km, sendo o menor de todos os deslocamentos, e sua velocidade média de $0,044 \text{ m.s}^{-1}$ (0,09 nós), explicando porque o deslocamento foi tão pequeno. Teve o movimento de avanço próximo a zero, confirmado pela Fig. 3, sofrendo muito pouco desvio lateral, o que também é possível de ver através da mesma figura. Um contraste pode ser observado, pois pelo fato de a embarcação ter apresentado uma pequena deriva, ela mostrou um maior avanço quando comparado com o efeito do vento. De acordo com a Fig. 5, o movimento de afundamento foi similar aos demais durante toda simulação. O Jogo com essa influência teve o segundo maior valor, em módulo, cerca de -0,3 graus, e se mantendo constante no decorrer das 5 horas. Já Arfagem teve o menor valor de todos os casos, ficando próximo a 0,145 graus, e a Guinada cerca de -0,3 graus, ficando com o segundo maior valor em módulo.

INFLUÊNCIA DO VENTO, ONDA E LEME

Para possuir uma base de comparação melhor, foram feitas mais duas simulações com conjunto de influências diferentes. O primeiro conjunto foi a soma das influências do vento, da onda e do leme. Na Fig. 3 é possível notar que a embarcação possui um deslocamento maior do que qualquer outro quando as influências estão separadas.

Possui um deslocamento total de 13,9 km, com velocidade média de $0,698 \text{ m.s}^{-1}$ (1,357 nós), confirmado pela Fig. 3, tendo o segundo maior deslocamento e segunda maior velocidade média. Segundo a Fig. 5, teve o segundo maior Avanço e a maior Deriva. Pode ser observado, através da Fig. 4, que no início do trajeto, a embarcação sofre um grande desvio lateral, originando essa amplitude de Deriva. Para os movimentos angulares, teve o maior valor de Jogo, e uma variação significativa entre a segunda e quarta hora de simulação, bem como a influência do casco, porém, com maior intensidade e por mais tempo. A Arfagem foi a segunda maior amplitude de todos os casos simulados, variando todo o tempo da simulação, concentrando essa variação entre a segunda e quarta hora, e a Guinada teve o menor valor de todos tendo uma pequena variação no decorrer da simulação, ficando com valores muito próximos a -0,3 graus.

INFLUÊNCIA DO VENTO, ONDA, LEME E CASCO

Para finalizar, foi feita uma simulação onde se somou a influência do vento, da onda, do leme e do casco para investigar o quão diferente a trajetória ficaria da ideal e das demais influências separadas. Nessa simulação, o navio teve uma trajetória total de 15,4 km, sendo o maior deslocamento de todos os casos estudados, e uma velocidade média de $0,771 \text{ m.s}^{-1}$ ou aproximadamente 1,5 nós, a maior registrada, o que faz sentido pela Fig. 3.

Teve o maior avanço, como esperado, e pouco desvio lateral, pois com uma velocidade maior, a embarcação possui uma resistência maior à desvios. De acordo com a Fig. 4 pode ser notado que o navio não teve desvios iniciais como em outros casos, podendo significar, dessa maneira, que o corpo já possui energia suficiente para vencer as forças hidrodinâmicas ocasionadas pelo atrito e ondas, se aproximando de um trajeto ideal. Porém, o fato de o navio não possuir empuxo contribui muito para que o mesmo não siga na direção a qual foi forçado no início da simulação, direção Sudeste.

A embarcação possui um deslocamento final próximo ao ideal com poucos desvios, menor valor de Jogo, valores de Arfagem e Guinada próximos à zero, mas percorreu uma direção diferente da proposta inicialmente. Cha & Wan (2015) observaram que a não linearidade dos movimentos de afundamento e deriva é oriunda do aumento da velocidade, o que também pode ser constatado aqui. A embarcação possui uma linearidade bastante visível, pois a velocidade média em todos os casos é extremamente baixa.

CONCLUSÃO

Simulações numéricas foram realizadas no presente estudo através do acoplamento do TELEMAC3D, TOMAWAC e SHIPMOVE, com o objetivo principal de estudar as influências das diferentes forças externas quando estas atuam sobre a embarcação. Essas influências foram observadas através do deslocamento total do navio, movimentos lineares (Avanço, Deriva e Afundamento) bem como seus movimentos angulares (Jogo, Arfagem e Guinada).

A partir dos resultados obtidos, pode ser concluído que a força externa resultante oriunda do leme poderia ser desprezada por apresentar uma trajetória muito pequena quando simulada sozinha. Porém, as influências do casco, vento e onda não devem ser desprezadas, uma vez que a embarcação, quando simulada com essas forças separadamente, teve um grande desvio de rota e um deslocamento final maior.

É necessário observar a falta que a força externa oriunda do propulsor faz para auxiliar a embarcação a se aproximar da rota final desejada, pois foram feitas simulações contendo as parcelas mais significativas, segundo a classificação MMG, e o navio terminou a rota bem distante da ideal. Também pode ser concluído que altura significativa de onda e intensidade da corrente pode fazer a embarcação ter um desvio grande em relação à rota ideal.



XXIV CREEM
Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica



**Universidade Federal
do Rio Grande**



INSTITUTO FEDERAL
RIO GRANDE DO SUL
Campus Rio Grande

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas fornecidas. Os autores também agradecem ao CNPq por patrocinar essa pesquisa por meio do contrato 304227/2016-1.

Outros agradecimentos vão para a Marinha do Brasil por disponibilizar os dados batimétricos para a região costeira; a NOAA por disponibilizar o banco de dados de vento, ao open TELEMAT-MASCARET (www.opentelemat.org) por proporcionar a licença acadêmica do software TELEMAT. Os autores também agradecem ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP) e ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) por disponibilizar seus recursos para o desenvolvimento dessa pesquisa. Por último, mesmo que alguns dados tenham sido retirados de organizações governamentais, esse trabalho não representa necessariamente opiniões governamentais.

REFERÊNCIAS

- ANP/MME, 2015. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis, 2015. Relatório técnico.
- ANP/MME, 2016. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis, 2016. Relatório técnico.
- Armudi, A., 2016, “Desenvolvimento e aplicação de um sistema de modelagem da dinâmica de embarcações”. TCC, 64p.
- Bennett, S.S., Hudson, D.A. & Temarel, P., 2013, “The influence of forward speed on ship motions in abnormal waves: Experimental measurements and numerical predictions”. *Journal of Fluids and Structures*, Vol 39, Pp. 154–172.
- Cha, R. & Wan, D. 2015. Numerical investigation of motion response of two model ships in regular waves. *Procedia Engineering*, Vol 116, no 1, Pp. 20–31.
- Chen, C., Shiotani, S. & Sasa, K., 2013, “Numerical ship navigation based on weather and ocean simulation”. *Ocean Engineering*, Vol 69, Pp. 44–53.
- EPE, E.d.P.E. 2015. Balanço Energético Nacional 2015. Relatório técnico, Ministério de Minas e Energia-MME.
- EPE, E.d.P.E. 2016. Balanço Energético Nacional 2016. Relatório técnico, Ministério de Minas e Energia-MME.
- Gadonneix, P., Kim, Y.D., Meyers, K., Ward, G. & Frei, C. 2013. World Energy Resources 2013. Relatório técnico.
- Hervouet, J.M., 2007, *Free Surface Flows: Modeling with Finite Element Methods*.
- Levi, C. & Salhua, C.A., 2007, “Massa adicional e amortecimento potencial de esferóides submersos”. Em “*Annales COPINAVAL2007, 20o Congresso Pan-Americano de Engenharia Naval*”, São Paulo - SP, 2007.
- Munson, B.R., Young, D.F. & Okiishi, T.H., 2004, “*Fundamentos da mecânica dos fluidos*, 2004, 4 edição.
- ONU, 2017. “A ONU e a população mundial”. Disponível em 07 de Ago. De 2017 em: <https://nacoesunidas.org/acao/populacao-mundial/>
- Schiffer, H.W., Nadeau, M.J., Kim. 2016. World Energy Resources 2016. Relatório técnico.
- Tello Ruiz, M., Delefortrie, G. & Vantorre, M., 2016, “Induced wave forces on a ship manoeuvring in coastal waves”. *Ocean Engineering*, Vol 121, Pp. 472–491.
- TOMAWAC, 2011. TOMAWAC Technical Report - software for sea state modelling on unstructured grids over oceans and coastal seas. Release. EDF R&D, 2011.
- Yasukawa, H., Yoshimura, Y., 2015, “Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions”.
- Yoshimura, Y., 2005, “Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion (MMG Model)”.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O autor é o único responsável pelo material impresso contido neste artigo.