

# MANOBRA DE SUBMARINOS EM SIMULADORES\*

CARLOS EDUARDO GUEDES DO NASCIMENTO\*\*  
Capitão-Tenente (EN)

---

## SUMÁRIO

Introdução  
A manobrabilidade  
A modelagem  
O submarino  
Resultados  
Conclusão

## INTRODUÇÃO

O Tanque Numérico de Provas da Universidade de São Paulo (TPN-USP) possui um Centro de Simulações de Manobras credenciado na International Towing Tank Conference (ITTC). Trata-se do estado da arte no que diz respeito a simulações de navios e presta um papel

fundamental na sociedade ao efetuar anualmente dezenas de simulações, que contribuem para diversos projetos de engenharia e operações relacionados aos portos e à indústria *offshore*. O modelo numérico do TPN-USP tem como característica e foco a simulação de embarcações que operam na superfície, como navios, rebocadores e estruturas oceânicas. Isso

---

\* Artigo baseado em trabalho acadêmico. Orientador: Professor Eduardo Aoun Tannuri, titular do Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP). Coorientador: Capitão de Mar e Guerra (RM1-EN) Ricardo Sbragio.

\*\* Graduando em Engenharia Naval pela Poli-USP.



Figura 1 – Simulador de Manobras do TPN-USP

permite, com embarcações para diversos fins, simulações de entrada e saída de portos, como viabilidade da navegação, análise dos riscos, influência dos fatores ambientais etc. Simulações de operações com plataformas de petróleo e rebocadores também são possíveis, representando diversas condições e muito contribuindo com empresas, como a Petrobras.

O trabalho consistiu, entre outros estudos, em adaptar o modelo numérico do TPN, realizando as alterações necessárias para permitir que não só embarcações de superfície, mas também submersíveis e submarinos, fossem simulados. O produto final é que o TPN agora também é capaz de simular submarinos, possibilitando diversos testes e análises relacionados à manobrabilidade, além de todas as possibilidades que essa nova ferramenta oferece.

## A MANOBRABILIDADE

A manobrabilidade de uma embarcação é um aspecto muito importante,

principalmente em águas restritas e portuárias. No caso de navios de guerra e submarinos, a manobrabilidade tem fins táticos e operacionais de fundamental importância. A controlabilidade é o estudo desse desempenho e se resume a três principais áreas ou funções:

– *Coursekeeping*, ou seja, a capacidade de o navio manter seu aproamento. Está diretamente relacionado à estabilidade direcional.

– *Maneuvering*, ou seja, a capacidade de mudança controlada de aproamento. Busca avaliar quão fácil é essa mudança, bem como o raio e a distância necessária para concluí-la.

– *Speed changing*, ou seja, a mudança controlada da velocidade, incluindo parada ou máquinas a ré. Contempla o interesse nas distâncias e nos tempos para as manobras.

Assim sendo, existem diversos tipos de manobras, para avaliar o desempenho da embarcação, com controles fixos ou com controles atuantes. Por esse motivo,

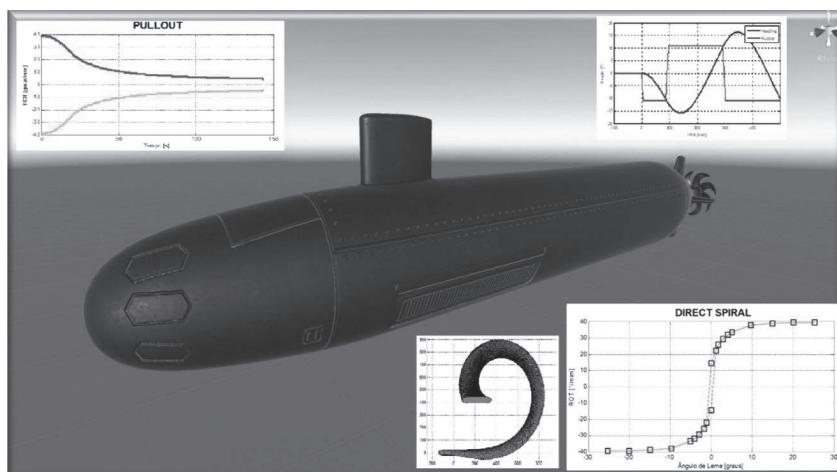


Figura 2 – Exemplo de curvas de manobras de uma embarcação geradas pelo simulador do TPN-USP

a execução e avaliação dessas manobras é de fundamental importância para entender o comportamento e o desempenho do navio. Muito sobre o embasamento teórico da manobrabilidade pode ser encontrado na literatura, sendo necessário, porém, um entendimento básico do assunto para compreensão dos aspectos de cada manobra. Os parâmetros e índices de controlabilidade determinam o comportamento do navio ou submarino nas diversas manobras; assim, é possível avaliar os riscos e as possibilidades do acesso a um porto ou terminal portuário, bem como nos casos de condições ambientais mais desfavoráveis ou de emergência.

É muito vantajoso saber previamente o comportamento da embarcação em cada tipo de manobra, para que se possa ter noção das capacidades e limitações daquele navio em cada situação e, assim, decidir acertadamente qual manobra executar ou não executar. A Figura 2 mostra os gráficos de algumas manobras padronizadas executadas para se caracterizar a manobrabilidade de uma embarcação – como *pull-out*, espiral e zigue-zague.

## A MODELAGEM

A modelagem do submarino é baseada no equacionamento hidrodinâmico para corpos em fluidos. No plano horizontal, manteve-se a modelagem já utilizada pelo TPN para embarcações de superfície, e não cabe aqui citar seu extenso e complexo funcionamento. Para modelagem do plano vertical, foi adotado inicialmente o equacionamento de Spencer, que opera apenas com as derivadas hidrodinâmicas lineares, conforme as equações

$$(m - Z_{\dot{w}})\dot{w} - wZ_w - (mU + Z_q)q - wZ_q = Z(t)$$

$$(I_y - M_q)\dot{q} - qM_q - wM_w + mg\overline{BG}. \theta = M(t)$$

que representam o movimento de *heave* e *pitch* respectivamente. Dessa maneira, são desconsiderados os acoplamentos cruzados entre os planos verticais e horizontais. Tal equacionamento não foi capaz de representar as características de baixas velocidades, como operar invertido. Assim, fez o aprimoramento para o equacionamento de Feldman e, então, o modelo



Figura 3 – Simulador de Submarinos, cenário do Rio de Janeiro, Baía de Guanabara. Submarino na superfície



Figura 4 – Simulador com submarino submerso

numérico se comportou de maneira condizente a um submarino real em todas as condições, o que foi verificado por testes no simulador, comparando-se com testes de submarinos reais. O *software* que gera a simulação teve que sofrer uma série de adaptações em relação à programação, para que fosse modelado um submarino em vez de um navio, uma vez que ele estava todo adaptado para navios. Um exemplo foram os lemes horizontais, não existentes em navios. Esses lemes tiveram que ser modelados e implementados por meio de funções de Matlab, que operam em tempo real com o simulador.

## O SUBMARINO

O intuito foi criar um modelo numérico que representasse um submarino do porte de um submarino nuclear de 80 metros de comprimento para operar totalmente

submerso. O casco escolhido foi o do Darpa Suboff, uma vez que é um casco com dados abertos e adequado para este tipo de trabalho acadêmico. A velocidade de projeto foi de 25 nós, e o propulsor foi inspirado no propulsor utilizado pela Marinha do Brasil (MB) no seu Modelo Livre de Submarino Número 02. As superfícies de controle (lemes) também foram as mesmas do Darpa. A parte gráfica foi produzida pela equipe do TPN, o que inclui o visual do submarino, alguns painéis de operação e a visualização embaixo d'água.

Os coeficientes hidrodinâmicos foram obtidos pelos testes efetuados pela Marinha norte-americana publicados por Roddy (1990) e também por CFD, uma vez que, para o modelo operando na superfície, não haviam tais coeficientes disponíveis. Uma análise de estabilidade no plano vertical foi feita, utilizando-se das equações do movimento por

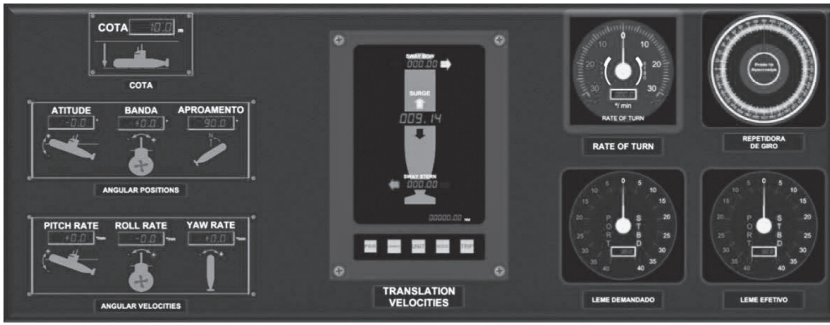


Figura 5 – Painel indicador de Ponta, Banda, Aproximamento, Profundidade, Velocidades e outros

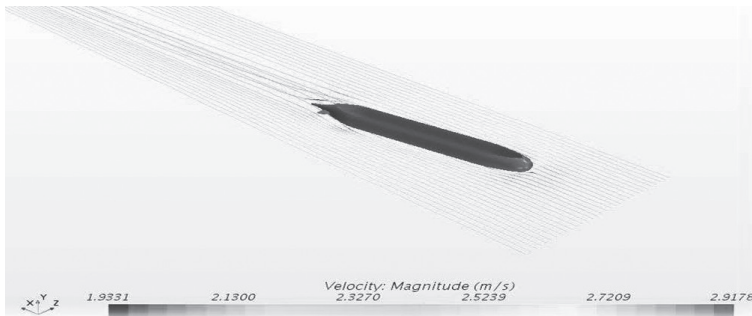


Figura 6 – Simulação por CFD no Star-CCM+ para obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos

derivadas hidrodinâmicas lineares. Uma peculiaridade importante dos submarinos é a restauração hidrostática, que torna o submarino estável direcionalmente (*straight line stability*) para baixas velocidades, pois, ao adquirir velocidades moderadas, hidrodinâmica do casco se torna dominante e o submarino pode voltar a ser instável, dependendo da forma do casco e da área do leme.

Foi mostrado que para o casco Darpa Suboff, na configuração original com lemes de 8,85 m<sup>2</sup> cada (em escala real), é instável, porém com lemes de 12 m<sup>2</sup> já é estável em qualquer velocidade.

A estabilidade pode ser observada pelos índices, conforme a Figura 7, onde nota-se que, até 5 nós, o submarino é muito estável direcionalmente, perdendo

estabilidade até aproximadamente 10 nós e se tornando instável em velocidades superiores a 10 nós.

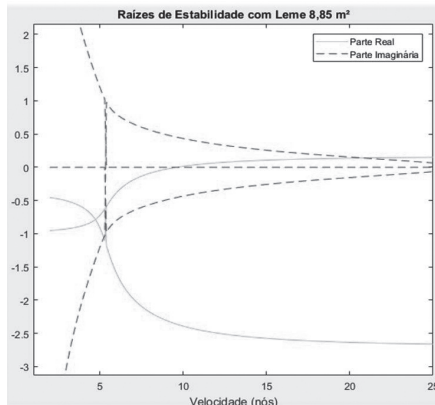


Figura 7 – Índices de Estabilidade para o movimento no plano vertical

## RESULTADOS

Foi desenvolvida uma interface de manobra que gera os resultados de em *fast-time*, ou seja, sem a necessidade de dezenas de horas de operação para se obterem os resultados. Dessa maneira, essa interface permite analisar as características de manobra do submarino de forma muito mais rápida, tornando o processo de análise ou projeto muito mais eficiente. Foi implementado também um piloto automático de aprofundamento e profundidade; assim, a operação do submarino fica muito mais simples e confiável, permitindo a análise de sistemas de controle e a efetividade dos lemes.

Além de um modelo para operar submerso, que foi o foco do trabalho, foi criado também um modelo de submarino na superfície, uma vez que, ao entrar e sair dos portos, essa é sua condição de operação. Assim, é possível simular entradas e saídas de portos levando em consideração o uso de rebocadores e fatores ambientais, inclusive nas localidades de Itaguaí e da Baía de Guanabara, onde existem bases de submarinos da MB.

A partir do modelo pronto, foi possível realizar diversas manobras no plano horizontal e vertical: curva de giro, zigue-zague no plano horizontal para diversos ângulos de leme; *pullout*; espiral direta, zigue-zague no plano vertical e meandro no plano vertical.

Na Figura 8, podemos observar o resultado de uma curva de giro realizada com a velocidade inicial de aproximadamente 12 nós. Cada manobra foi efetuada em diversas velocidades e condições, o que, em tempo real, levaria centenas de horas. Um programa que gera manobras e compila os dados automaticamente e em *fast-time* foi desenvolvido, permitindo a realização das manobras em um tempo muito menor, tornando a pesquisa e o desenvolvimento muito mais práticos e viáveis. Um manobra de curva de giro, por exemplo, nesse caso leva em torno de 15 minutos para toda sua execução e mais dez minutos para análise e geração da curva. Com o programa de *fast-time*, a manobra e os dados são gerados em menos de 30 segundos, conforme mostrado na Figura 8.

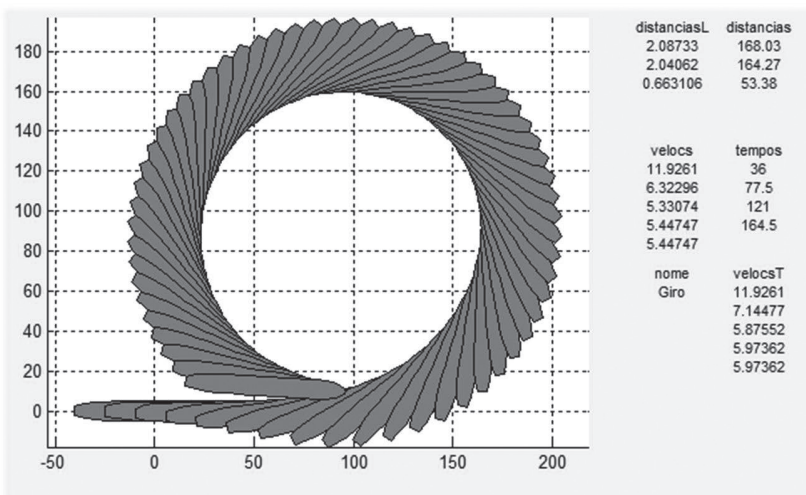


Figura 8 – Curva de giro com o submarino submerso

## CONCLUSÃO

Este artigo resume a criação do Simulador de Submarinos do TPN-USP, talvez o primeiro simulador de submarinos totalmente nacional.

Este trabalho pode ser aprimorado, ou outros pesquisadores podem utilizá-lo como ponto de partida/ferramenta. Tais possibilidades futuras são:

- fundir modelo da superfície com submerso e incluir a hidrodinâmica próxima à superfície para representação da simulação em qualquer situação;
- aperfeiçoamento do equacionamento do modelo numérico, incluindo termos cruzados e acoplamento do movimento vertical com horizontal;
- aperfeiçoamento da modelagem do sistema propulsivo (incluindo baterias no caso de convencionais);
- aperfeiçoamento da dinâmica da máquina do leme;

- inclusão do sistema dinâmico de tanques de lastro e tanques de compensação;
- calibração para representar submarinos existentes;
- criação de um digital *twin* para manobra;
- análise de riscos em diversas áreas (manobrabilidade, entrada/saída porto);
- aprimoramento do modelo na superfície para avaliação entrada/saída de porto e uso de rebocadores/navegação;
- aprimoramento para avaliação da influência dos fatores ambientais (superfície e submerso);
- determinar os *Manoeuvring Limitation Diagram* a partir de um modelo calibrado;
- desenvolver um piloto automático aperfeiçoado que funcione em qualquer condição de velocidade e de forma otimizada; e
- utilizar o simulador de submarino como ambiente para teste de algoritmos de torpedo “teleguiado”.



Figura 9 – Simulação do submarino operando na superfície em frente à Base de Submarinos de Itaguaí

📁 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:  
<CIÊNCIA & TECNOLOGIA>; Simulação; Submarino;

## REFERÊNCIAS

- ARENTZEN E.S.; MANDEL P. *Naval Architectural Aspects of Submarine Design*.  
 FELDMAN J. *DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion*. SPD0398-09. David Taylor Research Center, 1979.
- FOSSEN T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Trondheim, Norway, 2011.
- FUCATU, C. H. *Dynasim, Theoretical Manual*, 2010.
- GROOVES, N.C.; HUANG, T.T.; CHANG, M.S. *Geometric Characteristics of the Darpa Suboff Models* (DTRC Models nº 5.470 and 5.471). DTRC/SHD-1298-01, David Taylor Research Center, Bethesda, MD, USA), 1989.
- RENILSON M. *Submarine Hydrodynamics*. Launceston, TAS, Australia, 2015.
- RODDY R.F. *Investigation of the Stability and Control Characteristics of Several Configurations of the Darpa Suboff Model* (DTRC Models nº 5.470). AD-A227715, David Taylor Research Center, Bethesda, MD, USA, 1990.
- SPENCER, J.B. *Stability and Control of Submarines*. Ship Department, Ministry of Defense, USA. Reprint of the Royal Naval Scientific Service, vol. 23, pp. 187-345, 1968.