

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

THIAGO FRANCISCO FUCKNER VAZ

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR PARA VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS
COM INTERFACE 3D E ANÁLISE DE CONFIGURAÇÕES DE PROPULSORES.

Joinville, 2015

THIAGO FRANCISCO FUCKNER VAZ

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR PARA VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS
COM INTERFACE 3D E ANÁLISE DE CONFIGURAÇÕES DE PROPULSORES.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador: Dr. Lucas Weihmann

Joinville, 2015.

RESUMO

A necessidade da utilização de veículos não tripulados controlados remotamente vem crescendo bastante no mundo, devido à crescente demanda por estes veículos na indústria petrolífera. Neste trabalho será criado um ambiente virtual para a simulação da dinâmica de ROVs (Veículos Remotamente Operados), possibilitando assim a análise de configurações de propulsores. A análise que será feita é a penas um primeiro passo, não tendo aqui a intenção de encontrar a configuração ótima, mas trabalhos futuros que visam aperfeiçoar o sistema propulsivo do ponto de vista de manobras poderão utilizar-se das ferramentas e informações desenvolvidas, sendo assim, a extração de petróleo tem muito a ganhar com qualquer melhoria alcançada. Também será construído um primeiro ambiente 3D para visualização da atuação do ROV no ambiente oceânico.

Palavras-chave: Simulação, hidrodinâmica, pseudo-inversa, petróleo.

ABSTRACT

The need of using remotely controlled unmanned vehicles has been growing a lot in Brazil, due to increased demand for these vehicles in the oil industry. In this paper a tool for ROVs (Remotely Operated Vehicles) simulation will be created and used for study different configurations of propellers. The analysis that will be done is just the first step that hasn't the intention to find de optimum configuration, but further works which tries to optimize the trust system in the maneuvering point of view would use this tools and information, with that, the oil drilling industry has a lot to earn any improvement achieved. There will be built a 3 dimensional environment to visualize the ROV work in the ocean.

Keywords: Simulation, hydrodynamics, pseudoinverse, oil.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. OBJETIVO GERAL	9
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1. DESCRIÇÃO DE UM ROV E HISTÓRIA	11
2.2. TIPOS DE ROVS	13
2.3. SERVIÇOS EXECUTADOS	16
2.4. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	18
2.4.1. <i>Tether e umbilical</i>	18
2.4.2. <i>TMS LARS</i>	18
2.4.3. <i>Sistemas acústicos de localização</i>	20
2.1. PROPULSORES UTILIZADOS EM ROVS	21
2.2. SISTEMA SUBTUADOS DE PROPULSÃO DE ROVS – UTILIZAÇÃO DA PSEUDO-INVERSA	23
2.3. MODELAGEM E EQUACIONAMENTO DA DINÂMICA DE UM ROV	26
2.3.1. <i>Sistemas de Coordenadas de um ROV</i>	27
2.3.2. <i>Transformações Entre Sistemas de Coordenadas</i>	30
2.3.3. <i>Dinâmica de um ROV</i>	31
2.3.4. <i>Equacionamento da Dinâmica</i>	31
2.3.5. <i>Matriz de Inércias</i>	33
2.3.6. <i>Matriz de Forças Centrípetas e Coriolis</i>	35
2.3.7. <i>Efeitos Hidrodinâmicos</i>	38
2.3.8. <i>Experimento para obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos</i>	42
2.3.9. <i>Matriz de Forças Gravitacionais e Restauradoras</i>	47
2.3.10. <i>Modelagem dos Propulsores e Matriz de Acoplamento</i>	50
2.3.11. <i>Arranjo Final</i>	54
3. SIMULADOR IMPLEMENTADO	56
4. CONFIGURAÇÕES ESTUDADAS	59
4.1. RESULTADOS DA CONFIGURAÇÃO PADRÃO	61
4.1.1. <i>Procedimento Para as Simulações</i>	64
4.1.2. <i>Surge</i>	64
4.1.3. <i>Sway</i>	66
4.1.4. <i>Heave</i>	67
4.1.5. <i>Yaw</i>	67
4.2. RESULTADOS DAS VARIAÇÕES	68
4.2.1. <i>Variações em β com μ fixado em zero</i>	68
4.2.2. <i>Variações em β e μ</i>	72
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	79
REFERÊNCIAS	80
APÊNDICE A – PROPULSORES RRCROV	81
APÊNDICE B – ARRANJO FINAL SIMULINK	82
APÊNDICE C – MOVIMENTOS INDESEJÁVEIS	83

Lista de Figuras

Figura 1 - Irmão do CURV, o CURVII	12
Figura 2 - Kaiko, primeiro ROV a atingir o ponto mais profundo do planeta.	13
Figura 3 – OCROVs.....	14
Figura 4 - ROV médio (Mohican).....	15
Figura 5 - WORK CLASS ROV	15
Figura 6 - ROV lançado com gaiola.....	19
Figura 7 - Estrutura tipo A	19
Figura 8 – Moonpool.....	20
Figura 9 - Comunicação via acústica	21
Figura 10 - Tipos de posicionamentos de propulsores em ROVs	22
Figura 11 - Aproximação por mínimos quadrados	24
Figura 12 - Velocidades incidentes no ROV.....	27
Figura 13 - Sistema móvel e fixo	28
Figura 14 - Atitude em relação ao referencial fixo.....	28
Figura 15 - Bloco Principal (dinâmica do ROV)	32
Figura 16 - Componentes do RRCROV	34
Figura 17 - Coriolis de corpo rígido	37
Figura 18 - Coriolis massa adicional	37
Figura 19 - Resistência hidrodinâmica em baixa e alta velocidade de um veículo.	39
Figura 20 - Linhas de corrente CFD.....	39
Figura 21 - Coeficiente de arrasto x Re	40
Figura 22 - Arrasto x velocidade (surge, sway e heave)	40
Figura 23 - Torque x velocidade angular	41
Figura 24- Experimento de decaimento livre em água.....	42
Figura 25 - Comparação entre resultados experimentais e CFD (velocidade x arrasto hidrodinâmico) ..	46
Figura 26 - Bloco Arrasto Hidrodinâmico	47
Figura 27 - Forças gravitacionais e hidrostáticas no SIMULINK.....	50
Figura 28 - Configuração dos propulsores RRCROV	51
Figura 29 - Gráfico da Relação entre tensão e empuxo	54
Figura 30 - Ft no SIMULINK	54
Figura 31 - Solução da equação da dinâmica de um ROV no MATLAB	55
Figura 32 - Bloco VR SINK (seleção dos parâmetros de translação e rotação do ROV	56
Figura 33 - Ambiente 3D de simulação	57
Figura 34- Blocos ligados ao ambiente virtual.....	57
Figura 35 - Blocos de criação de gráficos e de carregamento de variáveis.....	58
Figura 36 - Disposição dos propulsores.....	59
Figura 37 - Sway com anomalia.....	61
Figura 38 - Yaw seguido de surge com anomalia.....	62
Figura 39- À esquerda o movimento subamortecido, à direita com maior amortecimento.....	63
Figura 40 - Erro relativo (a cima) e erro absoluto (abaixo)	65
Figura 41 - Erro relativo da velocidade no eixo y.....	66
Figura 42 - Erro relativo em heave	67
Figura 43 - Posições com acionamento de yaw	68

Figura 44 - Erro relativo em sway em função de Beta	69
Figura 45 - Velocidade do ROV no referencial móvel em sway	70
Figura 46 - Empuxo total em sway	70
Figura 47 - Empuxo em heave	71
Figura 48 - Empuxo total para surge, variando apenas μ	72
Figura 49 - Erro em sway	73
Figura 50 - Erro em sway (diâmetro do giro)	73
Figura 51 - Velocidade em sway ref móvel	74
Figura 52 - Empuxo em heave	74
Figura 53 - Diâmetro de giro em yaw	75
Figura 54 - Empuxo total em yaw	75
Figura 55 - Velocidade residual em z	76

Lista de Tabelas

Tabela 1- Características dos Veículos	16
Tabela 2 - Velocidades de serviço do RRCROV	27
Tabela 3 - Dimensões e peso do RRCROV	27
Tabela 4 - Coeficientes lineares e quadráticos	41
Tabela 5 - Medias dos arrastos hidrodinâmicos	45
Tabela 6 - Constantes dos propulsores	53
Tabela 7 - Variações de ângulos estudadas	60
Tabela 8 - Resultados variando apenas Beta	78
Tabela 9 - Resultados numéricos para variações em Beta e M_i	78

1. INTRODUÇÃO

Indispensáveis no cenário de extração de petróleo brasileiro que ocorre predominantemente em plataformas no mar, os veículos autômatos (ou autônomos) subaquáticos (*autonomous underwater vehicle* - AUVs) e veículos subaquáticos remotamente operados (*remotely operated underwater vehicles* - ROVs) são empregados no lançamento, construção e atuação dos equipamentos utilizados para extração de petróleo (CHRIST, 2014). Esses equipamentos são essenciais para instalação, manutenção e monitoramento de poços de petróleo e dos dutos de grande profundidade, sendo necessária alta confiabilidade e robustez.

Como, em geral, as tarefas a serem executadas por estes veículos encontram-se em elevadas profundidades e precisam em certas ocasiões operar por longos períodos de tempo, o funcionamento apenas com baterias não é viável. Torna-se necessária a utilização de ROVs de grande porte, com cabo umbilical para alimentação e controle que, muitas vezes pode chegar a milhares de metros, tornando o equipamento demasiadamente caro. Portanto, a busca por alternativas e melhoramentos nos projetos desses veículos tanto para a diminuição do custo, quanto para melhor funcionalidade é um campo de pesquisa bastante ativo.

Outra questão é o desenvolvimento de tecnologia nacional para a construção e controle desses equipamentos, para que não se tenha dependência tecnológica em um ramo onde nosso país tanto necessita.

A simulação computacional é uma ferramenta amplamente usada para o desenvolvimento de tecnologias, em diversas áreas. É um grande aliado ao processo de criação de produtos, e inclusive veículos de todas as espécies. Esta ferramenta é muito utilizada para a verificação dos requisitos, testes no ambiente de trabalho com as funções desejadas. Isto possibilita a descoberta de falhas de projeto antes da construção do protótipo, gerando uma grande economia para as empresas. De forma semelhante, a simulação também propicia a geração de conhecimento, já que é possível de forma muito simplificada estudar o comportamento do objeto estudado sob todo tipo de influência. A simulação também permite o treino e formação de pilotos, motoristas, práticos, que podem se utilizar da realidade virtual para o desenvolvimento de suas habilidades.

Este trabalho busca o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação para ROVs, que torne possível a análise de configurações de propulsores, análise das respostas e

trajetórias desenvolvidas, implementação de controlador, que futuramente possa ser utilizada para, por exemplo, realizar trabalhos mais pesados, no caso de ROVs médios, gerando assim uma grande redução no custo de operação, já que o equipamento envolvido com um ROV *work class* é mais complexo e mais caro.

Este é um estudo voltado principalmente para hidrodinâmica e comportamento no mar, resposta do equipamento tendo objetivo é desenvolver uma maneira prática e rápida da escolha de características para melhorar o funcionamento do veículo utilizando para isso simulação em computador, sem utilizar ferramentas de controle, analisando o comportamento puro do ROV sob as condições de trabalho.

Na análise de quais aspectos devem ser estudados, os propulsores formam o conjunto mais importante, pois eles estão diretamente ligados ao comportamento do veículo no mar. Aspectos como número de propulsores, características de cada um, posicionamento podem ser variadas no intuito de se conseguir a melhor opção. A propulsão é a parte fundamental para ser analisada, pois futuramente num estudo de implementação de um sistema de controle o sistema propulsivo será diretamente responsável pela resposta.

O software utilizado foi o MATLAB juntamente com o SIMULINK e sua plataforma 3D.

1.1. Objetivo Geral

Construir uma ferramenta de simulação computacional para análise de ROVs, criação de um ambiente 3D para a visualização em realidade virtual e análise de configurações de propulsores em um ROV.

1.2. Objetivos Específicos

- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a análise da dinâmica de um ROV genérico, podendo ser alterado a configuração de seus propulsores.
- Construção de um ambiente virtual 3D para a visualização da atuação de um ROV

- Análise dos erros de trajetória no uso da pseudo-inversa.
- Estudo sobre o método utilizado para a obtenção das características do veículo.

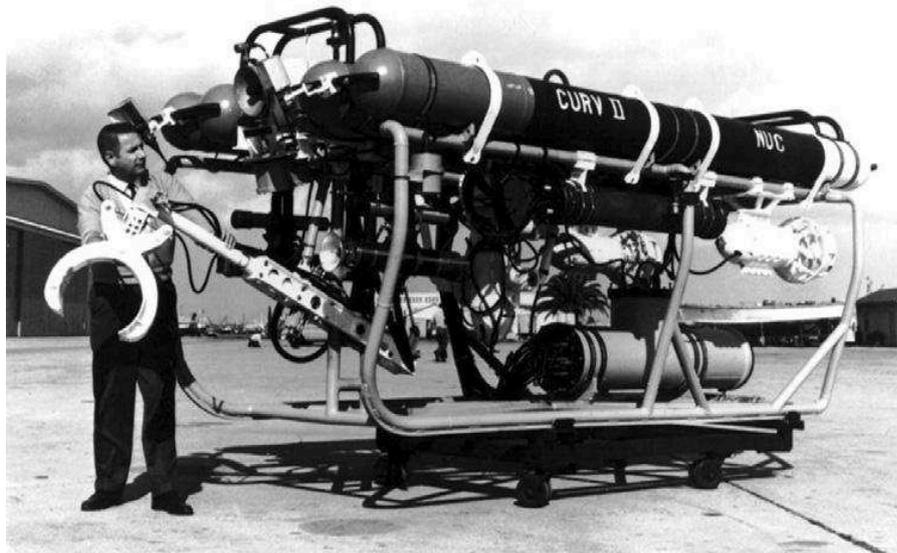
2. Fundamentação Teórica

2.1. Descrição de um ROV e história

O ROV, Veículo Remotamente Operado, teve como início, como em qualquer tecnologia grandes dificuldades. Os primeiros eram desajeitados, barulhentos, nada confiáveis. O primeiro veículo feito com essa tecnologia e que pode ser chamado de bem sucedido foi o POODLE em 1953 por Dimitri Rebikoff, que foi utilizado basicamente para pesquisa arqueológica (CHRIST, 2014).

O segundo ROV de destaque foi o CURV (*Cable-controlled Underwater Research vehicle*), fruto da parceria da Marinha Americana e a empresa VARE Industries, no ano de 1961. O CURV foi concebido para recuperar torpedos perdidos no solo marítimo, uma grande preocupação da Marinha. Um grande impasse político, uma bomba atômica perdida perto do litoral da Espanha foi um grande marco. Mesmo operando além de seu limite de profundidade, houve sucesso na recuperação da bomba à profundidade de 869 m no ano de 1966 (ROVCMTS, 2015).

Figura 1 - Irmão do CURV, o CURVII



Fonte (CHRIST, 2014).

O CURV II (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e CURV III, sucessores do CURV, sendo o CURV III responsável por outro grande feito por essa tecnologia, um resgate da tripulação do submersível PISCES III preso no solo marítimo a uma profundidade de 480 metros no ano de 1973 na costa da Irlanda, com poucas horas de ar as duas pessoas conseguiram ser resgatadas com vida (CHRIST, 2014).

Posteriormente ROVs da classe observação foram desenvolvidos, juntamente com a iniciativa da indústria para o desenvolvimento de ROVs voltados para os mais diversos objetivos, na maior parte na Indústria de Óleo e Gás. Logo o primeiro ROV de baixo custo foi desenvolvido, para até mesmo pequenas empresas terem a possibilidade de usufruir dessa tecnologia, o MiniRover, foi desenvolvido por Chris Nicholson.

Então não demorou muito para um ROV atingir o pondo mais profundo dos oceanos, nas Fossas Marianas, 10.909 m, o Kaiko (Figura 2) da empresa japonesa JAMSTEC.

Figura 2 - Kaiko, primeiro ROV a atingir o ponto mais profundo do planeta.



FONTE (ROVCMTS, 2015)

2.2. Tipos de ROVs

As características de um ROV dizem respeito às necessidades, que o tipo de trabalho efetuado geram. Existe uma gama de características que variam de acordo com o tipo de trabalho executado. A profundidade é uma das mais importantes, pois influenciará diretamente na pressão em que o ROV estará submetido. Outras características surgem em decorrer com o tipo de trabalho em si, tais como necessidade de garras, atuadores, sensores, tipo e tamanho de carga a ser manipulada.

Em termos gerais, os ROVs podem ser subdivididos em três grandes grupos (CHRIST, 2014).

- OCROV (*Observation Class/Classe de Observação*) – Vão dos menores ROVs até os de 100 kg de massa. Alguns exemplos de OCROV são apresentados na Figura 3. Normalmente de corrente contínua, usados para acompanhar mergulhadores ou sozinho para inspeções subaquáticas. Normalmente podem atuar em profundidades de até 300 m e podem ser lançados ao mar manualmente.

Figura 3 – OCROVs



Fonte – (SEATREPID,2015)

- MSROV (*Mid-Sized ROV/ROV médio*) – Indo de 100 a 1000 kg normalmente, com profundidades de serviço que podem chegar até 3000 m, sendo um exemplo mostrado na Figura 4. E com transmissão de energia pelo umbilical com corrente alternada, havendo uma queda de tensão no ROV para o funcionamento dos componentes em AC ou DC.

Figura 4 - ROV médio (Mohican)



Fonte: (SEATREPID, 2015)

- WCROV (*Work Class ROV*) – São ROVs com mais de 1000 kg que se utilizam de uma fonte de alta tensão (>3000 v) AC e que possui equipamentos eletromecânicos (hidráulicos) para a manipulação de objetos. Um exemplo é mostrado na Figura 5.

Figura 5 - WORK CLASS ROV



The Triton XL, manufactured by Perry

Fonte - (ROVCMTS, 2015).

- Veículos especiais – São aqueles que não possuem a capacidade de nadar, que podem ser dos tipos: rastejadores ou rebocados ou qualquer veículo que não tenha a capacidade de nadar livremente.

A Tabela 1 mostra o resumo de algumas características relevantes das classes de ROV.

Tabela 1- Características dos Veículos

Tamanho/Categoria	Tensão Fonte	Tensão Veículo	Telemetria	Profundidade	Lançamento	TMS	Propulsor/ferramentas
OCROV	110/220	Baixa DC	Cobre	300m	Manual	não	elétricos
MSROV	440/480	Média AC ou DC	Cobre ou Fibra	>1000m	Guindaste	opcional	elétrico/hidráulico
WCROV	440/480	Alta AC	Fibra	>3000m	A-frame	sim	hidráulico/hidráulico

Fonte (CHRIST, 2014).

No geral, micro-ROVs são olhos para acompanhar operações e inspeções, enquanto os de médio tamanho possuem boas capacidades de intervenção e ferramental com maior profundidade, tendo os *Work Class* como superiores em força devido ao ferramental hidráulico.

2.3. Serviços executados

Os ROVs são utilizados em inúmeras tarefas que podem variar de acordo com as características do veículo. No geral podem ser divididas em tarefas auxiliares e tarefas principais.

Os serviços auxiliares são aqueles em que o ROV estará acompanhando um mergulhador, o que para certas profundidades é indispensável por quesito de segurança, servindo apenas de monitoramento do mergulhador e do ambiente ao seu redor, e podendo servir também no transporte de ferramentas.

As tarefas principais são aquelas em que o ROV será o principal realizador da tarefa, normalmente em profundidades onde mergulhadores não podem chegar, ou optou-se por utilizar apenas o ROV. São tarefas que podem ser desde a inspeção de dutos até mesmo intervenção, manutenção e montagem de equipamentos no fundo marítimo. Dentre as tarefas mais comum na indústria de óleo e gás, pode-se destacar (CHRIST, 2014):

- inspeção do fundo para instalação de equipamentos
- inspeção de perfuração
- Instalação de cabeças de poços nas árvores de natal
- Inspeção, reparação e manutenção de instalações submersas.
- Inspeção das plataformas e *risers*

Do ponto de vista do tipo de indústria, alguns exemplos de trabalhos efetuados se seguem. (CHRIST, 2014).

Ciência – Utilizados para pesquisas governamentais, industriais ou para universidades, são utilizados para obtenção de dados através de sensores e de amostras dos materiais em questão. Normalmente ROVs são utilizados ao invés de submersíveis pelo fato de maior tempo de permanência e menor custo, sem envolver riscos a vidas humanas. Como nenhum serviço pesado é feito os ROVs mais utilizados são da classe de observação e ROVs médios.

Pesca – ROVs são usados em criações de peixes e na pesca para inspeção dos criadouros e redes, para verificação de buracos e retirada de peixes mortos para a manutenção da limpeza.

Militar – Neste campo os ROVs podem servir para ações contra minas marítimas, que são localizadas através de outros meios do tipo sonares, laser scanner, sendo o ROV o equipamento que atuará no desarmamento da bomba, recuperação de objetos, que utilizam ROVs de grande capacidade de carga, e inspeções de segurança, que podem ser feitas com ROVs de observação.

Segurança pública – Em casos de naufrágios podem ser necessário o uso de ROV para resgate, mas normalmente é utilizado para a localização e recuperação de vítimas. Podendo também ser utilizados em casos de crimes na recuperação de cadáveres afundados.

Óleo e gás – Na busca por petróleo em águas profundas o uso de ROVs tornou-se seu campo de maior utilização, para o suporte na perfuração de poços e várias outras tarefas envolvidas. Com as cabeças de poço e válvulas indo da superfície para o fundo do mar todas as intervenções são feitas através de robôs. Estes ROVs normalmente possuem um manipulador de sete funções para a realização do trabalho e um manipulador de cinco funções para agarrar e estabilização do ROV.

2.4. Equipamentos Utilizados

2.4.1. *Tether* e umbilical

Em ROVs o *tether* e o umbilical são partes fundamentais do equipamento, pois é através deles que todas as informações irão transitar, juntamente com a potência necessária para a operação do veículo. É também um grande problema para os ROVs, pois acarreta numa resistência, devido ao seu grande comprimento pode causar uma grande força de arrasto no ROV. Assim o estudo do diâmetro do umbilical, visando a diminuição do mesmo, é extremamente necessária. Existem umbilicais que utilizam fibra óptica para a transmissão de dados em alta velocidade, que resultam num diâmetro muito inferior aos comuns. A transmissão de potência em alta tensão alternada também é um fator que acaba diminuindo o diâmetro desses condutores.

2.4.2. TMS LARS

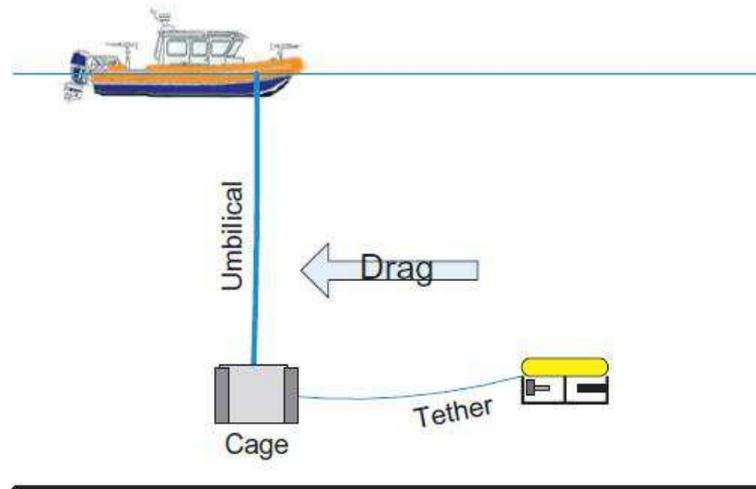
O LARS (*launch and recovery systems*), sistema de lançamento e recuperação, e o TMS (*tether management systems*), sistema de controle do umbilical, são sistemas que vem a facilitar e a garantir a segurança do ROV e dos operadores. Por tratar-se de um equipamento muito pesado, o sistema de lançamento deve garantir o correto manejo do ROV em condições adversas do tempo e do mar. Existem sistemas em que o ROV é lançado numa piscina interna no navio, chamada de *moonpool*, que se mostra o sistema mais seguro possível. Já o TMS garante que não exista umbilical demais na água e facilita a operação sendo inteiramente automático (CHRIST E WERNLI, 2014)

O TMS pode ser configurado de algumas formas. Com um peso para levar o umbilical até a profundidade de atuação do ROV, assim a corrente não causará arrasto no umbilical, somente no *tether*, que será razoavelmente mais curto.

Outra opção é o lançamento do ROV em gaiola, (

Figura 6) que pode ter um sistema de enrolamento do *tether*, podendo assim alcançar uma distância bem maior que com o método do peso, cujo *tether* é de comprimento fixo.

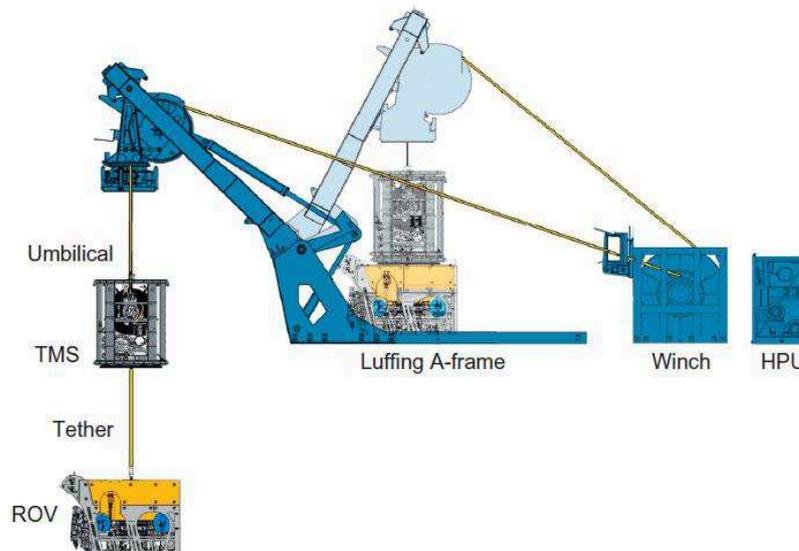
Figura 6 - ROV lançado com gaiola



Fonte - (CHRIST E WERNLI, 2014)

Outra vantagem é a possibilidade da gaiola carregar ferramentas diminuindo assim o peso no ROV, já que o mesmo tem a capacidade de retornar a gaiola e trocar de ferramentas.

Figura 7 - Estrutura tipo A



Fonte - (CHRIST E WERNLI, 2014)

Dentre os tipos de LARS, pode-se destacar a plataforma do tipo A (Figura 7), *moonpools* (Figura 8), telescópicas e por portas laterais.

Figura 8 – Moonpool



Fonte – (FULTON-BENNETT, 2009), 2015

2.4.3. Sistemas acústicos de localização

Em um ambiente onde ondas de radiofrequência não se propagam, ondas sonoras são extremamente úteis, utilizadas como sonares simples, para posicionamento em relação a superfície e ao fundo, ou com sistemas como *long baseline*, *short baseline*, *ultrashort baseline* (Figura 9), ou até mesmo para imagem 3d por varredura via acústica. De qualquer forma esta é uma tecnologia extremamente presente em equipamentos subaquáticos (CHRIST E WERNLI, 2014).

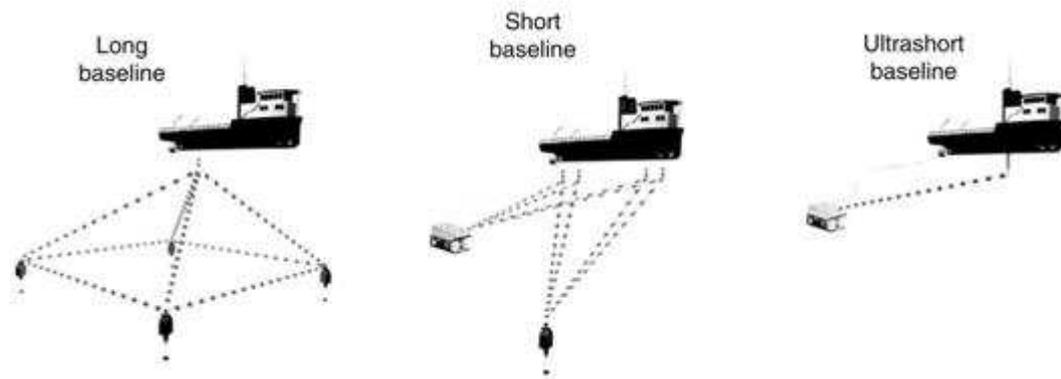
O *long baseline* (LBL) é caracterizado por possuir os transdutores acústicos (equipamentos para a emissão de ondas mecânicas) espalhados no fundo oceânicos em equipamentos fixos. O ROV possuindo um transdutor instalado pode utilizar essas ondas para

obter sua posição, sabendo as posições dos transdutores de referência, através do tempo de resposta entre os transdutores.

O *short baseline* (SBL) possui funcionamento semelhante ao *long baseline*, diferindo na distância entre os transdutores de referência, que podem ser instalados, por exemplo, no casco de uma embarcação, se distanciando tipicamente até 10 metros um do outro.

O *ultrashort baseline* (USBL) por sua vez possui os transdutores de referência extremamente próximos um do outro, mas seu funcionamento é bastante similar ao *short baseline*.

Figura 9 - Comunicação via acústica



Fonte - (CHRIST E WERNLI, 2014)

2.1. Propulsores utilizados em ROVs

Embora os veículos estudados nesse trabalho estejam submersos, muito do conhecimento que se tem sobre a hidrodinâmica de propulsores de navios podem ser aplicados aos propulsores de ROVs. A única observação mais importante é o fato de que a alta pressão, que é o que ocorre nos submersíveis, torna muito mais difícil a ocorrência de cavitação nas pás do propulsor, fenômeno muito comum observado em navios.

Existem vários tipos de propulsores usados na engenharia naval, tais como hélice de passo fixo, variável, com dutos, propulsores azimutais (*thrusters*), PODs, de contrarrotativos, sobrepostos, supercavitantes, e outros, mas no caso dos ROVs, os propulsores de passo fixo, e

com dutos na sua maioria, são os mais empregados e serão os únicos abordados neste trabalho.

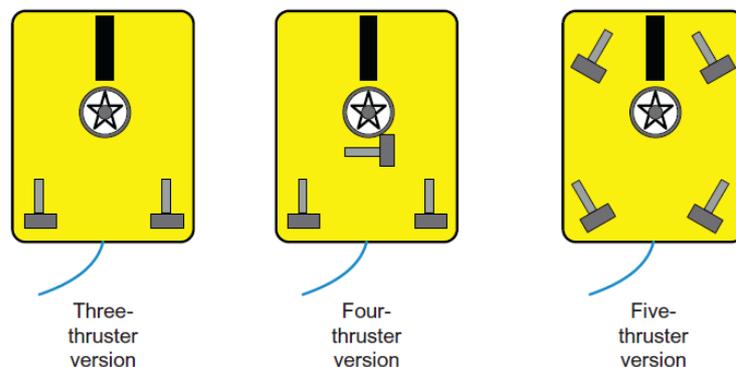
Os propulsores são parte fundamental de um ROV, pois será essencial para que o ROV possa realizar sua tarefa com as interferências do ambiente em que estará trabalhando. Isto depende da profundidade, correnteza suportada, comprimento e diâmetro do umbilical, tamanho do ROV e sua velocidade, que induzem o arrasto.

Os tipos de propulsão também variam de acordo com os requisitos do ROV, indo de elétrica à hidráulica, dependendo da força necessária para a realização do trabalho, sendo que ROVs da classe *work class* utilizam da propulsão hidráulica (CHRIST E WERNLI, 2014).

Na Figura 10 são mostrados alguns exemplos de configurações de propulsores. Com três propulsores, comum em ROVs de observação, é possível realizar manobra de *yaw*, *surge* e *heave*, já com quatro, mais comum na classe de ROVs médios, é possível realizar *sway*. Com cinco propulsores é possível realizar qualquer manobra no plano horizontal em qualquer direção, que se somando com mais propulsores vetoriais verticais poderia se acionar os movimentos de *roll* e *pitch* desejável em ROVs *work class*. Para o sistema de propulsão dos ROV's temos a seguinte afirmação, segundo Christ e Wernli (2014, p.124):

O sistema de propulsão do ROV é composto de dois ou mais propulsores que impulsionam o veículo de um modo que permita a navegação para o local de trabalho. Propulsores devem ser posicionados no veículo de modo a que o braço do momento da sua força de impulsão, em relação à massa central do veículo, permite que uma quantidade adequada de manobrabilidade e controlabilidade.

Figura 10 - Tipos de posicionamentos de propulsores em ROVs



(CHRIST E WERNLI, 2014)

2.2. Sistema Subatuados de Propulsão de ROVs – utilização da Pseudo-inversa

Supondo que se quer atuar um ROV com quatro propulsores em uma configuração construtiva, em um determinado grau de liberdade. Quais propulsores e qual o valor da propulsão necessária para a força naquela direção? Este é um problema encontrado em sistemas subatuados. No caso do ROV, a matriz T, ou matriz de acoplamento (discutida no item 2.3.10) é a responsável por responder qual a força resultante a partir da potência entregue nos propulsores.

Em sistemas lineares, com o mesmo número de equações e variáveis, um método utilizado para encontrar a solução única do sistema é a inversa da matriz dos coeficientes. Por exemplo, um ROV com seis propulsores, um para cada grau de liberdade, a solução de qual propulsor deve-se acionar para a movimentação em uma dada direção pode ser encontrada pela matriz inversa da matriz T. Mas vários ROVs não possuem essa configuração de propulsores, possuindo menos propulsores que graus de liberdade. Logo, existe um resultado ótimo para a solução do problema, mas com um erro evidente.

Uma forma de resolver este problema é utilizando a pseudo-inversa. Ela se trata de uma matriz próxima do que seria a inversa da matriz T, assim pode-se encontrar qual a potência dos propulsores numa determinada configuração que irá resultar no movimento desejado na direção desejada. Neste trabalho, a simulação do ROV foi possível através da utilização da matriz pseudo-inversa, pois os comandos enviados ao ROV, dizem a direção e potência requerida, que multiplicada pela pseudo-inversa de T resulta nas potências requeridas em cada propulsor. Isso facilita na simulação de várias configurações de propulsores, pois se não fosse a utilização dessa matriz, para cada configuração um estudo particular deveria ser feito sobre os acionamentos dos propulsores para cada movimento desejado. Assim, tudo que é necessário é a obtenção da matriz T, que a simulação já pode ser feita.

Por exemplo, um sistema com três equações e duas incógnitas mostrado em 2.1, pode-se perceber que a matriz A não é quadrada, tornando assim impossível sua inversa de forma direta. A pseudo-inversa é uma forma de realizar uma aproximação por mínimos quadrados, de forma que a resposta x^* seja uma aproximação, o melhor resultado para o sistema.

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \\ e & f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$A \cdot x = B$$

Uma forma de se obter essa aproximação de mínimos quadrados, é realizando as operações com matrizes mostradas em 2.2:

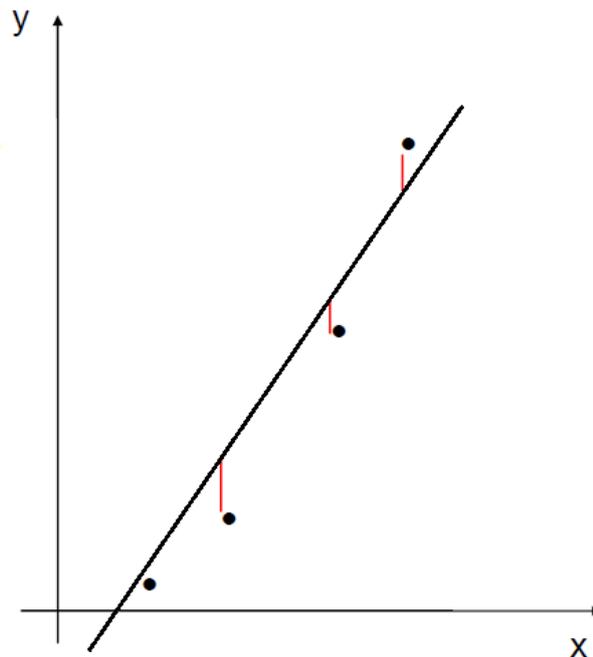
$$A^T * A * x = A^T * B$$

$$(A^T * A)^{-1} * (A^T * A) * x = (A^T * A)^{-1} * A^T * B \quad (2.2)$$

$$x^* = (A^T * A)^{-1} * A^T * B$$

Assim pode-se, por exemplo, encontrar a reta mais aproximada em um sistema linear com uma variável como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Aproximação por mínimos quadrados



Fonte – o autor

Uma forma de obter a matriz inversa é através do método de Moore-Penrose.

Nesta abordagem, dada uma matriz A do tipo mxn, obtém-se os valores singulares da matriz K, de forma que $K=A^T \cdot A$. Os valores singulares são a parte positiva da raiz dos

autovalores, ou valores próprios, da matriz K . Com os valores singulares ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_r$) será feita a fatoração em valores singulares de A .

$$p(\lambda) = \det(\lambda I - K) \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\lambda} > 0 \quad (2.4)$$

$$A = U\Sigma V^T \quad (2.5)$$

$U_{m \times r}$ e $V_{n \times r}$ são matrizes com colunas ortonormais, e Σ é uma matriz diagonal $r \times r$.

Para a construção de tais matrizes os valores singulares devem ser ordenados do maior para o menor, logo a matriz Σ fica sendo:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Já a matriz V é constituída pelos autovetores associados aos autovalores de K de tal forma que:

$$V = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_r] \quad (2.7)$$

E a matriz U é formada pelos vetores:

$$U = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_r] \quad (2.8)$$

Onde u é o vetor resultante da multiplicação da inversa dos valores singulares pela matriz A e pelos autovetores associados.

$$u_l = \frac{1}{\sigma_l} \cdot A \cdot v_l \quad (2.9)$$

Com a decomposição em valores singulares, pode-se agora construir a pseudo-inversa da seguinte forma:

$$A^+ = V\Sigma^{-1}U^T \quad (2.10)$$

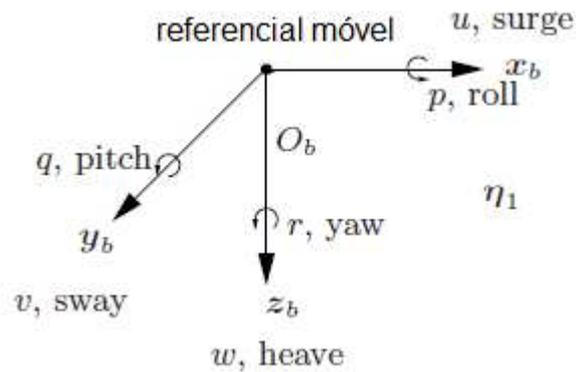
Assim, no caso da matriz de acoplamento T do ROV, na entrada da matriz pseudo-inversa diz-se a magnitude da força em cada grau de liberdade requerida, para que na saída ela forneça o empuxo necessário em cada propulsor de forma que a força resultante seja a mais próxima àquela requerida.

2.3. Modelagem e Equacionamento da Dinâmica de um ROV

Nesta parte, deve ficar claro que a modelagem da dinâmica do ROV foi estudada e implementada no MATLAB pelo autor Chin e citados no seu livro *Computer-Aided Control Systems Design: Practical Applications Using Matlab and Simulink*, ou seja, Chin realizou experimentos, utilizou CFD e programas CAD para encontrar as características referentes ao ROV, tais como inércias, coeficientes de resistência, massas adicionais, e também implementou no MATLAB/SIMULINK blocos referentes à dinâmica e à transformação de coordenadas, tendo o bloco da força de Coriolis de corpo rígido sendo excluída e substituída pelo autor do TCC. Blocos como ganho de tensão dos propulsores, transformação de tensão em empuxo, os coeficientes das matrizes T modificadas, blocos referentes ao joystick, referentes ao ambiente 3D foram introduzidos também pelo autor do trabalho de conclusão de curso. Ao longo do texto são descritos os procedimentos e os trabalhos de Chin em seu livro que serão reproduzidos neste trabalho.

A modelagem e o equacionamento de um sistema dinâmico de um ROV em um ambiente virtual são úteis de várias formas, podendo servir para o treinamento da operação em um ROV real, análise do funcionamento em diferentes condições, assim como no desenvolvimento de controladores mais eficientes. O modelo de ROV utilizado neste trabalho foi o RRCROV cujas configurações e características estão em (CHIN, 2013), sendo suas variáveis hidrodinâmicas, matriz de inércia, e outras características explicadas neste capítulo. Este ROV foi escolhido para a modelagem neste trabalho por suas características estarem descritas e disponíveis por Chin, que em seu livro às usa a como parte do projeto do RRCROV. As dimensões e velocidades de serviço consideradas estão descritas nas Tabelas 2 e 3, sendo *surge* a velocidade no eixo x, *sway* a velocidade no eixo y, *heave* no eixo z, *roll* em torno de x, *pitch* em torno de y e *yaw* a velocidade em torno de z. No caso do ROV analisado *roll* e *pitch* não são graus de liberdade atuados, pela limitação de propulsores, tendo esses movimentos estabilizados pela força restauradora. A Figura 12 mostra os eixos do referencial móvel juntamente com as velocidades consideradas.

Figura 12 - Velocidades incidentes no ROV



Fonte - (ANTONELLI, 2006)

Tabela 2 - Velocidades de serviço do RRCROV

velocidades de serviço		
surge	0,5	m/s
sway	0,5	m/s
heave	0,2	m/s
yaw	0,5	rad/s

Fonte - (CHIN, 2013).

Tabela 3 - Dimensões e peso do RRCROV

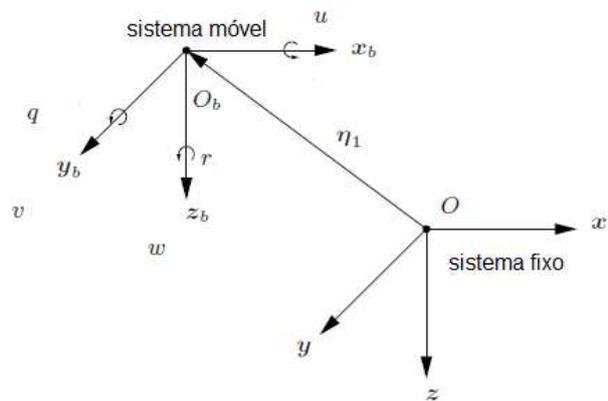
características do RRCROV	
comprimento	1 m
largura	0,9 m
altura	0,9 m
peso	115 kg

Fonte - (CHIN, 2013).

2.3.1. Sistemas de Coordenadas de um ROV

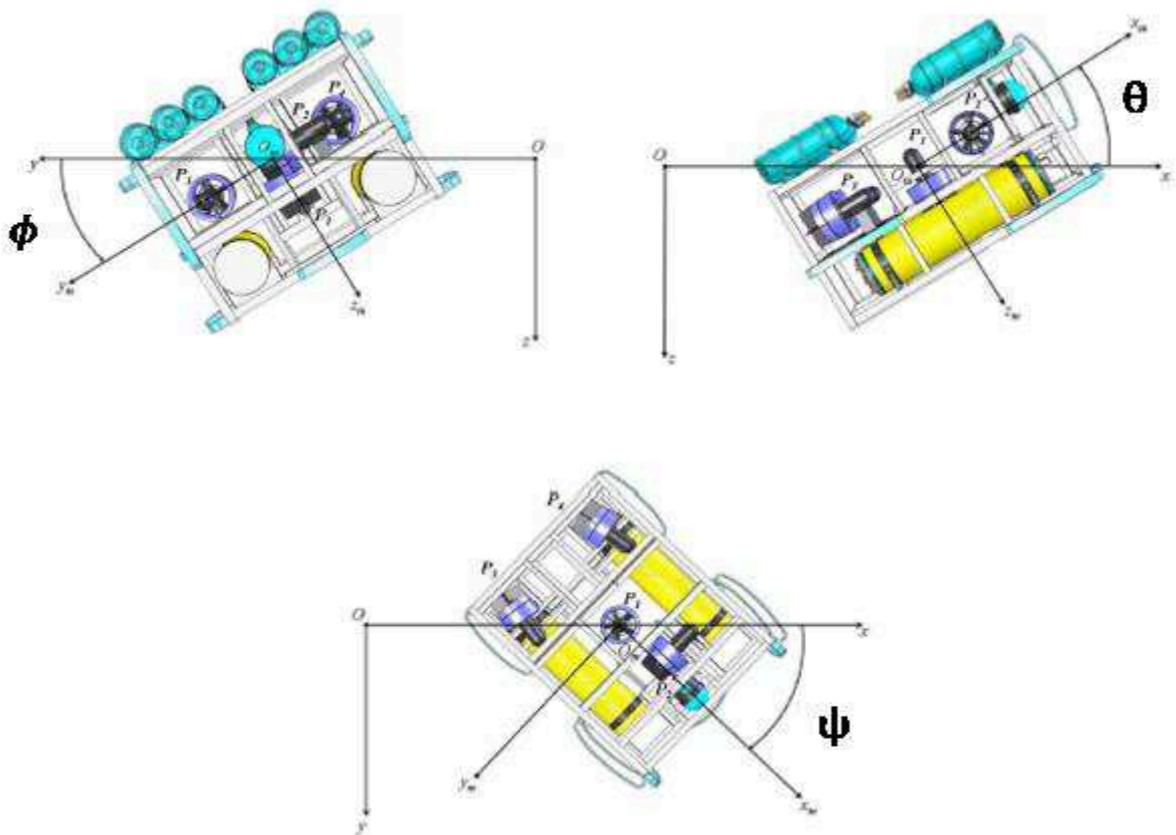
Para o equacionamento é necessário estabelecer sistemas de coordenadas condizentes. O sistema de coordenadas móvel está referenciado ao ROV, enquanto o sistema inercial estará referenciado ao centro da Terra (FOSSEN, 2011). As figuras Figura 13 e Figura 14 mostram as relações entre sistema móvel e fixo.

Figura 13 - Sistema móvel e fixo



Fonte - (ANTONELLI, 2006)

Figura 14 - Atitude em relação ao referencial fixo



Fonte - (Goulart 2007)

Sistema móvel (fixo em relação ao ROV):
 Om . . . origem do sistema móvel,

xm. . . eixo longitudinal, positivo à frente,

ym. . . eixo transversal, positivo à direita,

zm. . . eixo vertical, positivo para baixo.

Sistema inercial ou estacionário (fixo em relação à Terra):

O . . . origem do sistema,

x, y, z . . . eixos.

A atitude (ou orientação) do ROV no sistema de coordenadas estacionário é descrita pelos ângulos:

ϕ . . . ângulo de rolagem ou *roll* (ao redor do eixo x) [rad],

θ . . . ângulo de arfagem ou *pitch* (ao redor do eixo y) [rad],

ψ . . . ângulo de guinada, *yaw* ou *heading* (ao redor do eixo z) [rad].

Logo, pode-se escrever o vetor posição e atitude do ROV em relação ao centro da Terra como mostrado na equação 2.11.

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}, \quad \eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

Sendo η_1 dado em metros e η_2 dado em radianos.

Pode-se assim representar as velocidades lineares e angulares como em 2.12.

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix}, \quad \dot{\eta}_1 = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}, \quad \dot{\eta}_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

As velocidades com relação ao sistema móvel serão representadas em metros por segundo e radianos por segundo como em 2.13:

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad v_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad v_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

2.3.2. Transformações Entre Sistemas de Coordenadas

Para uma correta representação e análise é necessária a transformação de coordenadas do sistema móvel para o fixo e vice versa. A transformação do sistema fixo para o móvel é utilizada principalmente para o cálculo das forças de restauração, e a transformação do sistema móvel para o fixo é utilizada para a representação no ambiente 3D e análises do comportamento do ROV.

A transformação das velocidades lineares do sistema de coordenadas móvel para o fixo, utilizando ângulos de Euler, pode ser escrita como tendo as velocidades no referencial fixo escritas como em 2.12 e as no referencial móvel em 2.13 fica sendo $J(\eta_2)$ a matriz transformação do sistema móvel para o fixo. (CHIN, 2013):

$$\dot{\eta} = J(\eta_2)v \quad (2.14)$$

Com a matriz de transformação escrita da forma:

$$J(\eta_2) = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0 \\ 0 & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Onde as matrizes $J_1(\eta_2)$ e $J_2(\eta_2)$ são respectivamente:

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & -s(\psi)c(\phi) + c(\psi)s(\theta)s(\phi) & s(\psi)s(\phi) + c(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ s(\psi)c(\theta) & c(\psi)c(\phi) + s(\psi)s(\theta)s(\phi) & -c(\psi)s(\phi) + s(\psi)c(\theta)s(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s(\phi)t(\theta) & c(\phi)t(\theta) \\ 0 & s(\phi) & -s(\phi) \\ 0 & \frac{s(\phi)}{c(\theta)} & \frac{c(\phi)}{c(\theta)} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Aonde $c()$ cosseno do ângulo, $s()$ é o seno do ângulo e $t()$ é a tangente. Logo se percebe-se que a transformação não é definida em $\theta = 90^\circ$. Para a solução deste problema a utilização de quaternions pode ser utilizada (FOSSSEN, 2011).

2.3.3. Dinâmica de um ROV

Para o desenvolvimento de um simulador de ROV é necessário a modelagem da dinâmica deste veículo no ambiente marinho. Nos subitens que seguem será abordado o equacionamento de cada força e a forma com que elas podem ser implementadas no SIMULINK.

2.3.4. Equacionamento da Dinâmica

A dinâmica de um ROV pode de maneira simplificada ser representada como mostrado na equação 2.18, que é encontrada de forma semelhante na literatura por Fossen (2011) e Chin (2013). Esta equação é a aplicação da lei de Newton onde somatório de forças é igual a massa vezes aceleração.

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v) + G(\eta_2) = \tau \quad (2.18)$$

M – Matriz das inércias de corpo rígido e adicionais;

C – Matriz das forças centrípetas e de Coriolis;

D – Matriz das forças devido ao atrito

G – Matriz das forças restauradoras e gravitacionais

\dot{v} – é a aceleração referenciada ao próprio veículo

v – é a velocidade referenciada ao próprio veículo

η_2 – posição referenciada ao sistema fixo

τ – vetor de forças que atuam no ROV, como a propulsão.

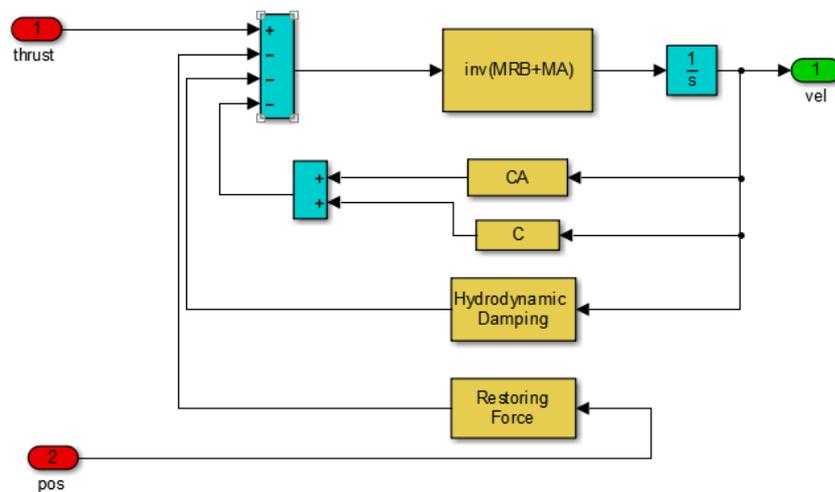
Para a implementação no MATLAB, como o que se deseja analisar são as velocidades e deslocamentos, ou seja, a reação do ROV aos propulsores, tendo o parâmetro de entrada uma velocidade desejada inserida por um joystick, algumas etapas ou blocos devem ser desenvolvidos.

Logo a equação utilizada no MATLAB foi a seguinte:

$$\dot{v} = M^{-1}[C(v)v - D(v) - G(\eta_2) + \tau] \quad (2.19)$$

Na Figura 15 é mostrado o bloco principal onde esta equação é implementada.

Figura 15 - Bloco Principal (dinâmica do ROV)



Fonte – (CHIN, 2013)

Como é possível identificar, a força resultante dos propulsores sobre o ROV é multiplicada pela inversa da matriz de inércia de corpo rígido e de massa adicional, resultando em acelerações nos graus de liberdade, que integrada resulta em velocidades. Utilizando a velocidade após o integrador $\frac{1}{s}$, pode-se obter as forças resultantes devido aos efeitos de Coriolis, força centrípeta e arrasto hidrodinâmico. Para as forças restauradoras é utilizado o vetor posição no sistema de coordenadas fixo.

2.3.5. Matriz de Inércias

A matriz de inércia é parte vital na modelagem, pois representa a dificuldade de impor um movimento ao ROV, ou seja, para cada grau de liberdade existe uma tendência natural do corpo permanecer em seu movimento atual, ou permanecer estacionário.

Para tanto, a matriz I pode ser dividida da forma mostrada em 2.20, 2.21, e 2.22 (FOSSSEN, 2011):

$$M_{11} = mI_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$M_{21} = mR_g x = \begin{bmatrix} 0 & -mz_G & my_G \\ mz_G & 0 & -mx_G \\ -my_G & mx_G & 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$M_{22} = I_0 = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Aonde:

m – é a massa do ROV [kg]

$R_g x$ – é o rotacional do vetor centro de gravidade (R_g) do ROV (representado no sistema móvel [m])

I_n – são os momentos de inércia nos eixos do sistema móvel [kg m²]

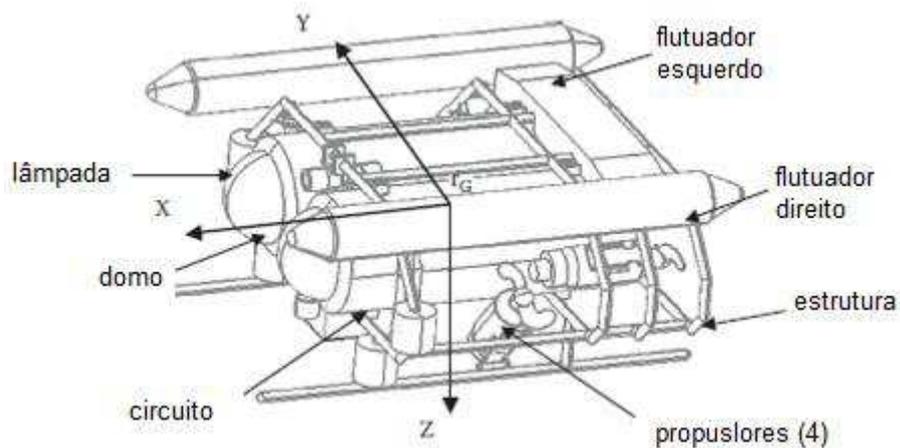
I_{nm} – são os produtos de inércia [kg m²]

Portanto a matriz de inércias de corpo rígido pode ser descrita na equação 2.23:

$$M_{CR} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{21}^T \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Para a determinação desses valores, o programa CAD Pro/ENGINEER foi utilizado, com o modelo 3D detalhado do ROV (CHIN, 2013). Na Figura 16 podem ser vistas algumas partes importantes do ROV em questão. Para se obter uma forma simplificada da matriz, o autor Chin utilizou o recurso de colocar o centro de gravidade CG do ROV no centro das coordenadas do sistema móvel, que é possível utilizando-se pesos para balancear o veículo real (CHIN, 2013):

Figura 16 - Componentes do RRCROV



Fonte: (CHIN, 2013)

A matriz obtida para esse ROV é mostrada em 2.24:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} 115 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 115 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 115 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6.1 & -0,00016 & -0,185 \\ 0 & 0 & 0 & -0,00016 & 5,98 & 0,0006 \\ 0 & 0 & 0 & -0,185 & 0,0006 & 5,517 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Somada à matriz de inércia do corpo rígido, está a matriz de inércias adicionais, devido ao efeito de massa adicional hidrodinâmica. Essa massa é devido à quantidade de água que se move junto com o corpo submerso, caracterizando uma mudança de massa em cada grau de liberdade.

Utilizando os softwares MULTISURF e o WAMIT o autor Chin (2013) encontrou os coeficientes da matriz de massa adicional. Posteriormente um experimento em um ROV em

escala foi conduzido e usando leis de similaridade o autor chegou a uma matriz final (CHIN, 2013). Os detalhes do experimento serão discutidos no t3pico 2.5.5.

As for7as e momentos adicionais surgem a partir da acelera73o que as part3culas do fluido sofrem quando encontram o ve3culo. O movimento do fluido ao redor do ve3culo em resposta ao movimento do ROV se manifesta como for7as e momentos hidrodin3micos que resistem ao movimento do ve3culo. O efeito parece como massa e in3rcia adicionada. Para um ve3culo completamente submerso a massa adicionada 3 independente da frequ3ncia da onda circular (CHIN, 2013).

Por exemplo, se existe uma acelera73o \dot{u} no eixo x a for7a hidrodin3mica X_A 3 dada por 2.25:

$$X_A = X_{\dot{u}} \dot{u} \quad (2.25)$$

$$\text{Com } X_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial \dot{u}}.$$

Ent3o a matriz que expressa a massa adicional 3 2.26:

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 21.1403 & 0 & 0.0619 & 0 & -0.5748 & 0 \\ 0 & 51.7012 & 0 & -2.0928 & 0 & -0.3767 \\ 0.0917 & 0 & 92.4510 & 0 & 0.5871 & 0 \\ 0 & -2.0090 & 0 & 3.6191 & 0 & 0.0235 \\ -0.5237 & 0 & 0.5594 & 0 & 2.6427 & 0 \\ 0 & -0.3783 & 0 & 0.0275 & 0 & 2.3033 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Como pode ser visto na matriz, a magnitude dos elementos fora da diagonal principal s3o desprez3veis se comparados com estes, logo pode-se simplificar esta matriz para uma matriz diagonal contendo somente os elementos da diagonal principal da matriz acima.

2.3.6. Matriz de For7as Centr3petas e Coriolis

Os efeitos devido 3 din3mica do corpo podem ser divididos em duas, a do corpo r3gido e a devido a massa adicionada. Segundo Fossen (2011) essas matrizes podem ser expressas como 2.27 (FOSSEN, 2011):

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & C1 \\ -C1^T & C2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Onde:

$$C1(v) = \begin{bmatrix} m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

e;

$$C2(v) = \begin{bmatrix} 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yz} r + I_{xz} p - I_y q \\ I_{yz} q + I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p \\ -I_{yz} r - I_{xz} p + I_y q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

E a matriz devido à massa adicional:

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Aonde os coeficientes são:

$$a_1 = X_{\dot{u}} u + X_{\dot{v}} v + X_{\dot{w}} w + X_{\dot{p}} p + X_{\dot{q}} q + X_{\dot{r}} r$$

$$a_2 = X_{\dot{v}} u + Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{w}} w + Y_{\dot{p}} p + Y_{\dot{q}} q + Y_{\dot{r}} r$$

$$a_3 = X_{\dot{w}} u + Y_{\dot{w}} v + Z_{\dot{w}} w + Z_{\dot{p}} p + Z_{\dot{q}} q + Z_{\dot{r}} r$$

$$b_1 = X_{\dot{p}} u + Y_{\dot{p}} v + Z_{\dot{p}} w + K_{\dot{p}} p + K_{\dot{q}} q + K_{\dot{r}} r$$

$$b_2 = X_{\dot{q}} u + Y_{\dot{q}} v + Z_{\dot{q}} w + K_{\dot{q}} p + M_{\dot{q}} q + M_{\dot{r}} r$$

$$b_3 = X_{\dot{r}} u + Y_{\dot{r}} v + Z_{\dot{r}} w + K_{\dot{r}} p + M_{\dot{r}} q + N_{\dot{r}} r$$

Como as derivadas hidrodinâmicas das massas adicionais fora da diagonal principal foram desconsideradas anteriormente, os elementos da matriz de Coriolis adicional também pode ser simplificada para.

$$a_1 = X_{\dot{u}} u$$

$$a_2 = Y_{\dot{v}} v$$

$$a_3 = Z_{\dot{w}} w$$

$$b_1 = K_p p$$

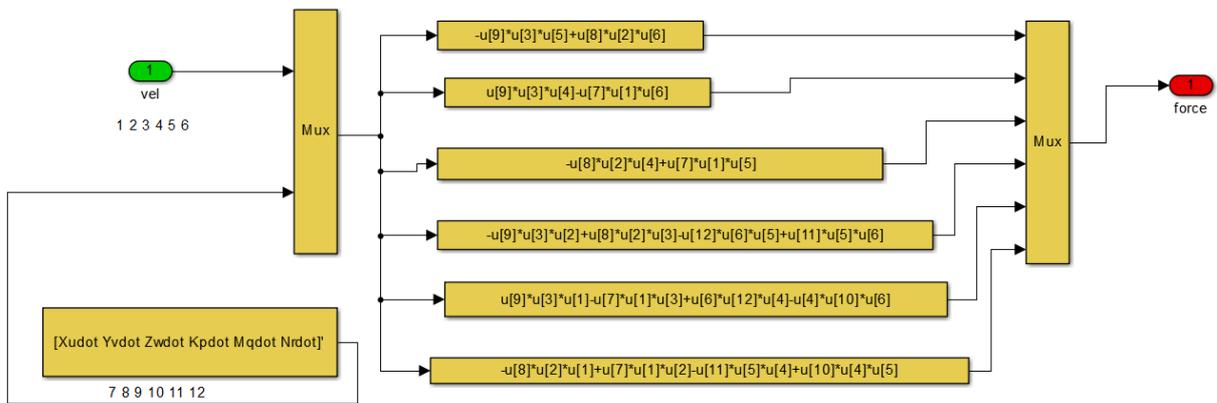
$$b_2 = M_{\dot{q}} q$$

$$b_3 = N_{\dot{r}} r$$

Os blocos que processam as forças de Coriolis são mostrados nas Figura 17 e **Erro!**

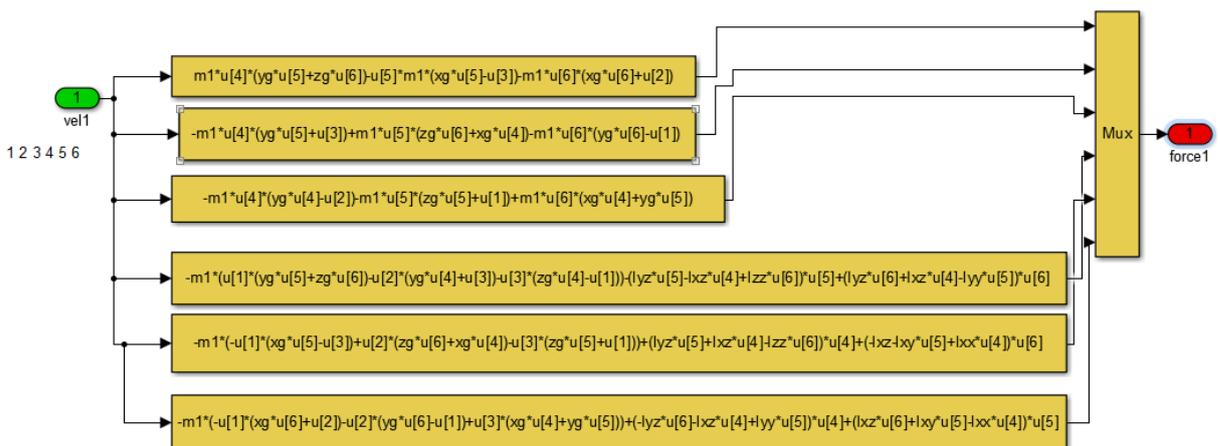
Fonte de referência não encontrada..

Figura 17 - Coriolis de corpo rígido



Fonte – (CHIN, 2013).

Figura 18 - Coriolis massa adicional



Fonte – o autor

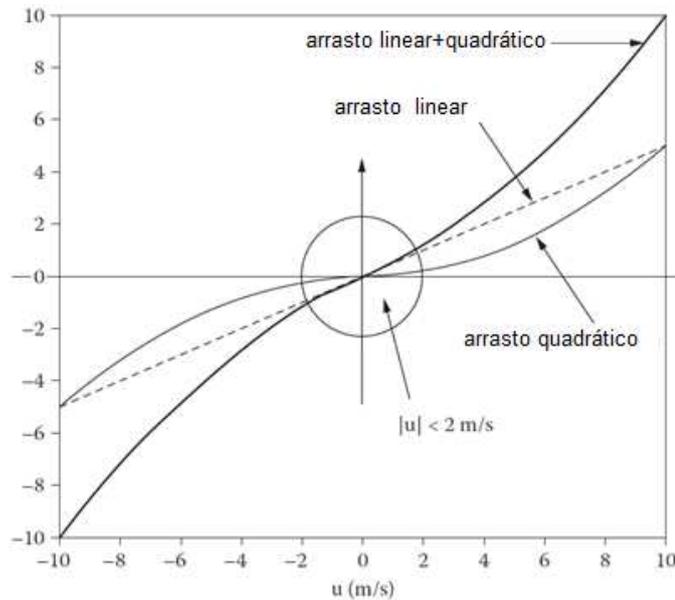
2.3.7. Efeitos Hidrodinâmicos

O arrasto é um fator importante para veículos subaquáticos e deve ser determinada para a precisa representação e simulação do modelo. O arrasto acontece devido à fricção das moléculas da água com um corpo, chamado arraste de fricção ou arrasto linear, e existe outro fator chamado de resistência de pressão devido à diferença de pressão existente na face de vante com a face à ré, gerando os termos chamados de arrasto quadrático.

Para a determinação do arrasto os coeficientes hidrodinâmicos devem ser encontradas e implementados no MATLAB. Foi utilizado a técnica CFD no ANSYS-CFX e experimentos em tanques para se encontrar os coeficientes lineares e quadráticos (CHIN, 2013). O autor também utilizou como método de verificação a comparação entre resultados numéricos e experimentais de um semi-esfera. Para validação dos dados averiguados por CFD, um ensaio de livre decaimento em um modelo em escala do ROV foi feito, e a comparação desses resultados com resultados na literatura também foi feito. Estima-se que pode existir um erro de 30% nos resultados obtidos, por isso a verificação com vários métodos e resultados. Para isto algumas considerações foram feitas, a de que sendo as velocidades de operação do veículo de 0,5 m/s linearmente e de 0,5 rad/s de velocidade angular, a parte do círculo mostrado na Figura 19 com velocidade até 2 m/s será a de análise. A segunda consideração é a de que os elementos fora da diagonal principal da matriz D são pequenos quando comparados com os da diagonal principal, logo a matriz D teria a forma da equação 2.31 (CHIN, 2013):

$$D = -diag\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \quad (2.31)$$

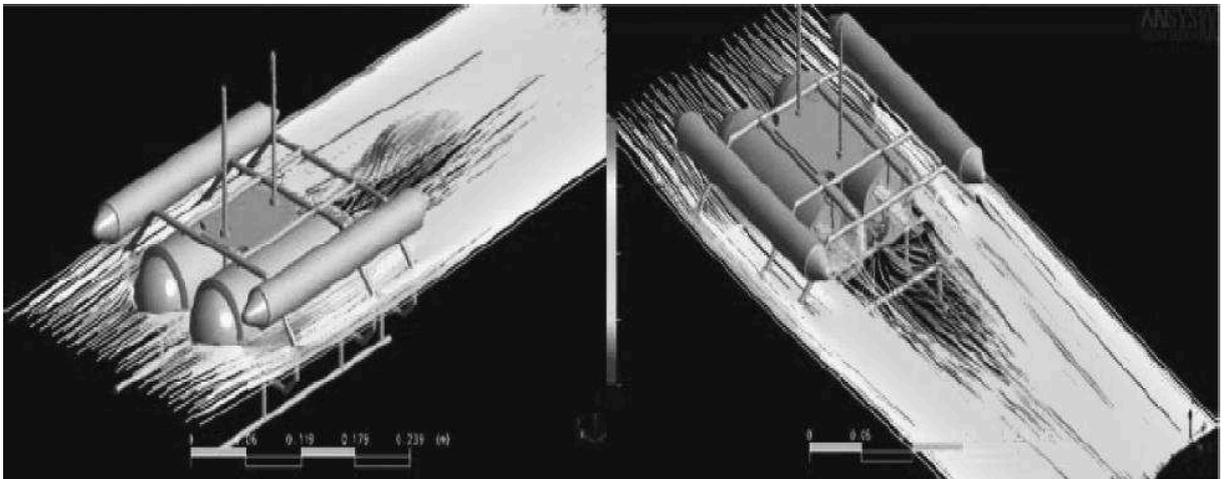
Figura 19 - Resistência hidrodinâmica em baixa e alta velocidade de um veículo.



Fonte - (CHIN, 2013).

A partir do modelo em CFD Chin observa que na Figura 20 a formação de esteira atrás do ROV, que cria uma zona de baixa pressão, geralmente turbulenta.

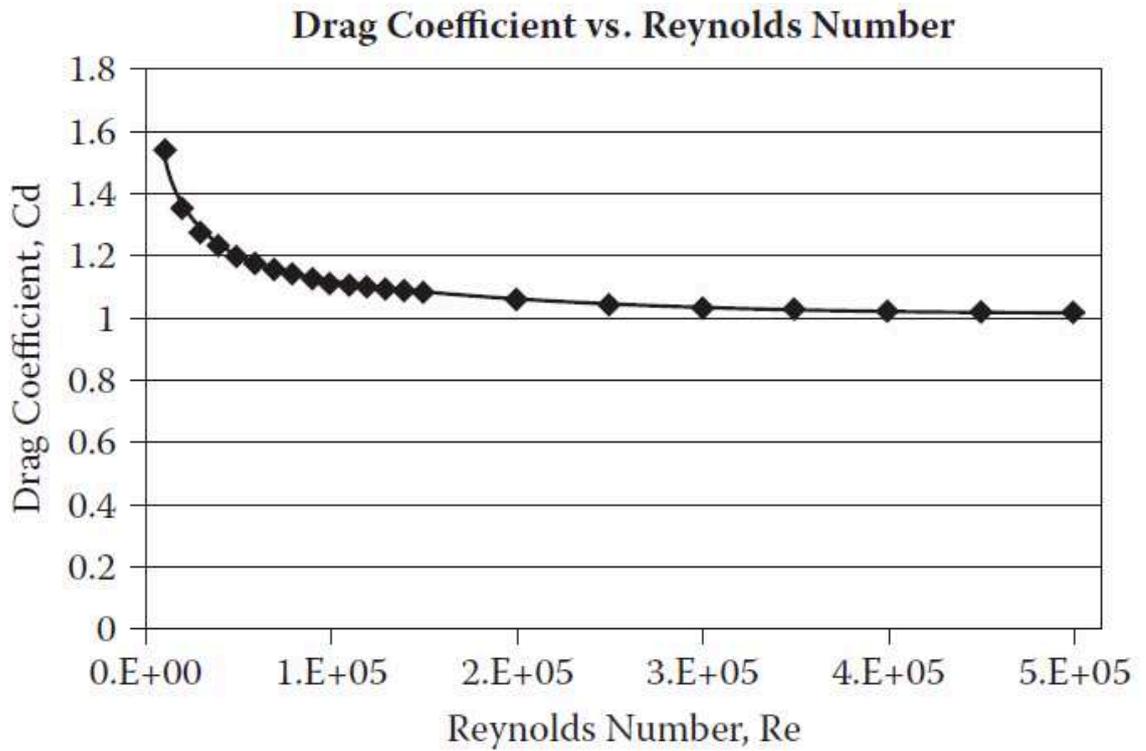
Figura 20 - Linhas de corrente CFD



Fonte - (CHIN, 2013).

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é visto que o coeficiente de arrasto converge para um valor constante provando que é insensível à variação de Reynolds, ou seja, no caso do ROV para um aumento da velocidade, o coeficiente de arrasto tende a uma constante.

Figura 21 - Coeficiente de arrasto x Re

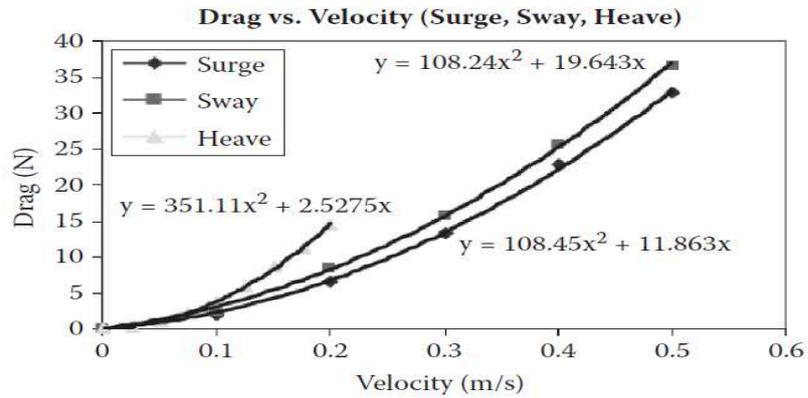


Fonte (CHIN, 2013).

As forças de arrasto estão mostradas na Figura 22, com a velocidade de *heave* até 0,2 m/s e as outras até 0,5 m/s, sendo essas as velocidades de operação do ROV. Como é possível verificar, o arrasto em *heave* é maior decorrente à maior área frontal nessa direção.

Na Tabela 4, é possível verificar os resultados numéricos obtidos.

Figura 22 - Arrasto x velocidade (surge, sway e heave)



Fonte - (CHIN, 2013)

Tabela 4 - Coeficientes lineares e quadráticos

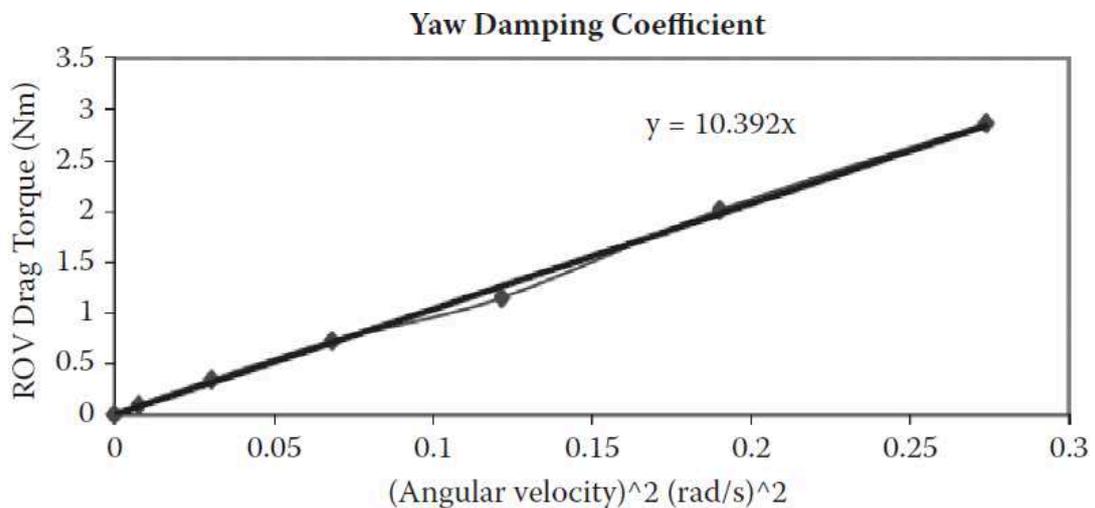
Drag Coefficient of Actual or Real ROV (by ANSYS-CFX)

Direction	Surge (0–0.5 m/s)		Sway (0–0.5 m/s)		Heave (0–0.2 m/s)		Yaw (0–0.5 rad/s)	
Range	K_L	K_Q	K_L	K_Q	K_L	K_Q	K_L	K_Q
Parameter								
ANSYS-CFX	11.863	108.45	19.64	108.24	2.3756	351.98	0	10.39

Fonte (CHIN, 2013)

Como mostrado na Figura 23, o arrasto em yaw depende praticamente somente do coeficiente quadrático, portanto desprezar a parte linear é uma boa aproximação.

Figura 23 - Torque x velocidade angular

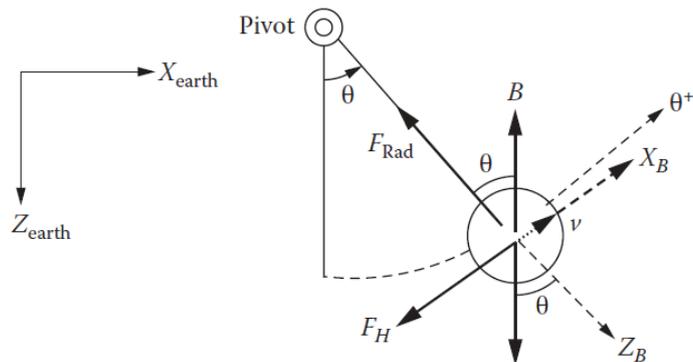


Fonte - (CHIN, 2013).

2.3.8. Experimento para obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos

Para corroborar com os resultados obtidos pelo método CFD, deve-se executar testes experimentais. Neste caso foi executado também pelo autor, (CHIN, 2013), o teste de decaimento livre na água com o modelo de ROV, como mostrado na Figura 24. Trata-se de um experimento onde o ROV foi fixado ao final de um pêndulo que submerso oscila, obtendo-se assim as forças e coeficientes.

Figura 24- Experimento de decaimento livre em água



Fonte - (CHIN, 2013)

A aproximação por mínimos quadrados foi utilizada para o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos. O teste de decaimento livre é uma boa opção para a verificação dos efeitos hidrodinâmicos em pequenos e médios ROVs, pois não são necessário grandes investimentos e os resultados são coerentes se comparados com o método CFD. O modelo do ROV foi preso à barra de alumínio e colocado à uma determinado ângulo, com o movimento sendo capturado por uma câmera digital, sendo feito esse experimento diversas vezes, para cada velocidade (CHIN, 2013).

A força hidrodinâmica F_H pode ser modelada com os coeficientes de massa adicional m_a , amortecimento linear K_L e quadrático K_Q pela seguinte equação:

$$F_H = m_a \ddot{x} + K_L \dot{x} + K_Q |\dot{x}| \dot{x} \quad (2.32)$$

Através das medidas da massa e da flutuação, o modelo pode ser representado da seguinte forma:

$$-m \cdot g \cdot \sin\theta + B \cdot \sin\theta - m_a \ddot{x} - K_L \dot{x} - K_Q |\dot{x}| \dot{x} = m \ddot{x} \quad (2.33)$$

Que pode ser reescrita como:

$$(B - mg) \sin\theta - K_L \dot{x} - K_Q |\dot{x}| \dot{x} = (m + m_a) \ddot{x} \quad (2.34)$$

$$\ddot{x} = \frac{(B - mg)}{(m + m_a)} \sin\theta - \frac{K_L}{(m + m_a)} \dot{x} - \frac{K_Q}{(m + m_a)} |\dot{x}| \dot{x} \quad (2.35)$$

Que para o movimento rotacional do pendulo pode ser modelado:

$$\dot{x} = r \dot{\theta} \quad e \quad \ddot{x} = r \ddot{\theta} \quad (2.36)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(B - mg)}{(m + m_a)r} \sin\theta - \frac{K_L}{(m + m_a)} \dot{\theta} - \frac{K_Q}{(m + m_a)} r |\dot{\theta}| \dot{\theta} \quad (2.37)$$

Pode-se simplificar esta equação considerando:

$$\alpha = \frac{(B - mg)}{(m + m_a)r}, \beta = \frac{K_L}{(m + m_a)}, \gamma = \frac{K_Q}{(m + m_a)} r \quad (2.38)$$

Que então tornam a equação do movimento na equação simplificada:

$$\ddot{\theta} = \alpha \sin\theta - \beta \dot{\theta} - \gamma |\dot{\theta}| \dot{\theta} \quad (2.39)$$

De acordo com Chin (2013), as variáveis α, β, γ , devem ser encontradas, e então é possível encontrar os coeficientes desejados. As matrizes seguintes são construídas a partir desses dados:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 & \dot{\theta}_1 & |\dot{\theta}_1|\dot{\theta}_1 \\ \sin\theta_2 & \dot{\theta}_2 & |\dot{\theta}_2|\dot{\theta}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + erro \quad (2.40)$$

$$A = B \cdot C \quad (2.41)$$

Podendo ser resolvida, de forma equivalente a uma pseudo-inversa, através:

$$C_{aprox} = (B^T B)^{-1} \cdot B^T \cdot A \quad (2.42)$$

Para a obtenção dos coeficientes no movimento de yaw, a inclusão de uma mola deve ser feita, com uma rigidez K, o equacionamento ficará sendo:

$$\ddot{\theta} = \frac{K}{I + I_a} \theta - \frac{K_L}{I + I_a} \dot{\theta} - \frac{K_Q}{I + I_a} |\dot{\theta}| \dot{\theta} \quad (2.43)$$

As medias do arrasto hidrodinâmico podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5 - Medias dos arrastos hidrodinâmicos

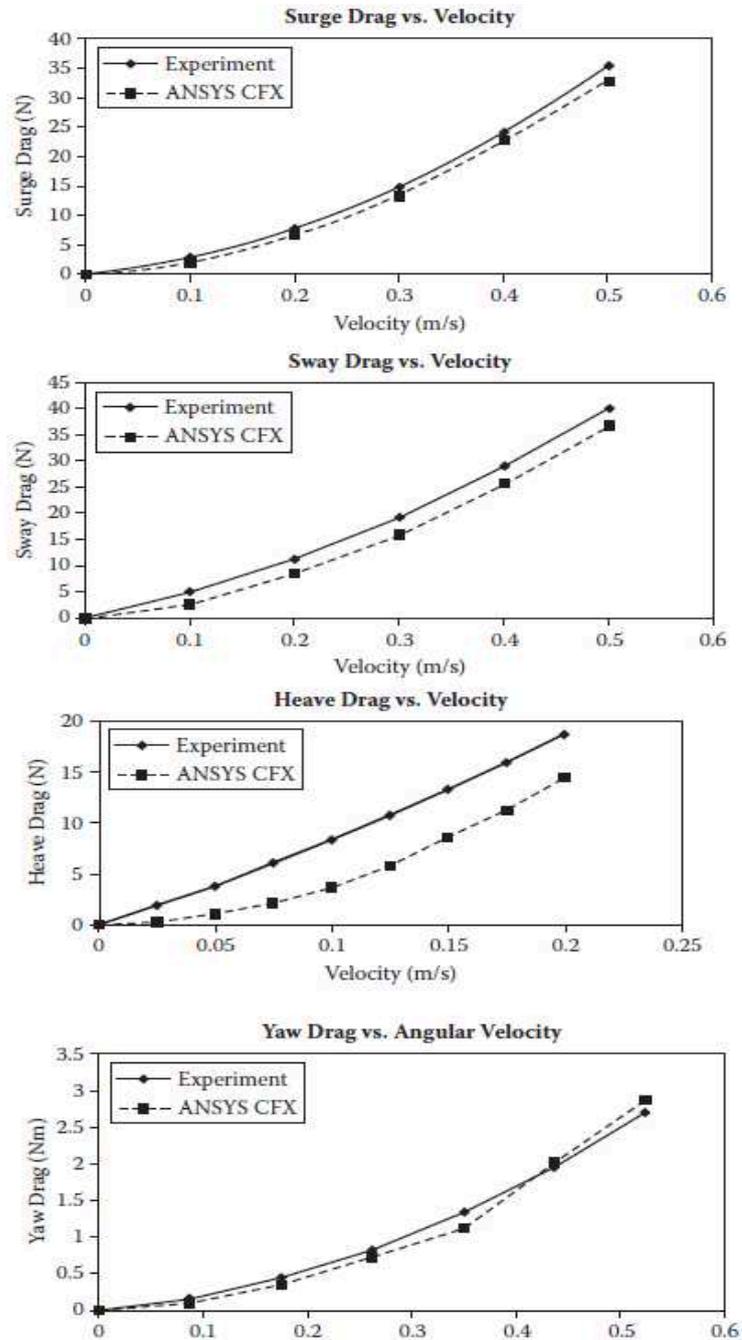
Hydrodynamic Parameters at Different Velocity (Surge, Sway and Heave Direction) [61-62]

Direction	Max Speed	Added Mass	K_L	K_Q	RMS Error	
Surge	0.55 m/s*	0.5581	1.2736	9.9392	0.0568	
		0.6054	1.7768	9.1907	0.0500	
		0.5765	1.6040	9.5018	0.0552	
			(Avg 0.580)	(Avg 1.550)	(Avg 9.540)	
	0.50 m/s	0.5134	1.2011	9.667	0.0572	
		0.5011	1.5800	9.008	0.0685	
		0.5125	1.4123	8.995	0.0717	
	0.35 m/s	0.3541	1.0192	7.0113	0.0632	
		0.4078	0.9988	7.0393	0.0541	
		0.4109	1.0078	7.4931	0.0797	
	Sway	0.55 m/s	1.5491	3.3456	8.0991	0.0266
			1.5578	3.4577	7.9981	0.0372
1.5713			3.5678	8.0113	0.0213	
0.50 m/s*		1.4347	3.1388	7.8691	0.0277	
		1.5465	3.6694	7.4974	0.0234	
		1.4878	3.4671	7.3418	0.0269	
			(Avg 1.489)	(Avg 3.420)	(Avg 7.560)	
0.35 m/s		1.2735	3.0069	6.1170	0.0294	
		1.1198	2.9977	7.0008	0.0333	
		1.1899	2.8997	7.0912	0.0459	
Heave		0.55 m/s	5.4789	8.0711	10.0125	0.0240
			4.9989	8.1113	10.0034	0.0331
	5.0811		7.9871	9.9874	0.0423	
	0.50 m/s	4.9976	8.0212	9.0982	0.0341	
		4.8126	7.8971	9.0124	0.0556	
		4.7894	7.8132	9.1492	0.0421	
	0.35 m/s*	3.0760	6.5011	8.9937	0.0239	
		3.1407	6.8327	8.1637	0.0219	
		2.9909	6.1905	11.035	0.0277	
			(Avg 3.069)	(Avg 6.520)	(Avg 9.390)	
	Direction	Max Speed	Added Mass	K_L	K_Q	RMS Error
	Yaw	0.35 rad/s	0.0037	0.00036	0.012	0.0311
0.0023			0.0012	0.009	0.0425	
0.0029			0.0027	0.0074	0.0511	
0.50 rad/s		0.0037	0.007	0.0011	0.0427	
		0.0043	0.0024	0.0092	0.0588	
		0.0057	0.0017	0.0084	0.0403	
0.55 rad/s*		0.0065	0.00073	0.0220	0.0320	
		0.0090	0.0031	0.0180	0.0300	
		0.0110	0.0054	0.0150	0.0380	
			(Avg 0.008)	(Avg 0.003)	(Avg 0.019)	

Fonte - (CHIN, 2013)

Com o ROV atuando numa velocidade constante nas direções de *heave*, *surge*, *sway* e *yaw*, o empuxo necessário pode ser definido como sendo igual ao arrasto hidrodinâmico. Por isso, as curvas da Figura 25 que relacionam o arrasto hidrodinâmico com a velocidade, podem ser consideradas para também relacionar os empuxos com as velocidades.

Figura 25 - Comparação entre resultados experimentais e CFD (velocidade xarrasto hidrodinâmico)



Fonte - (CHIN, 2013)

A diferença observada entre o experimento e o obtido pelo método CFD, segundo (CHIN, 2013), é devido a pequenas alterações no centro de gravidade, devido a ajustes feitos para a apropriada fixação do modelo no pêndulo, e ao fato de os propulsores não terem sido considerados no modelo CFD.

Os fatores dos movimentos de *roll* e *pitch* foram encontrados apenas por CFD devido às limitações experimentais.

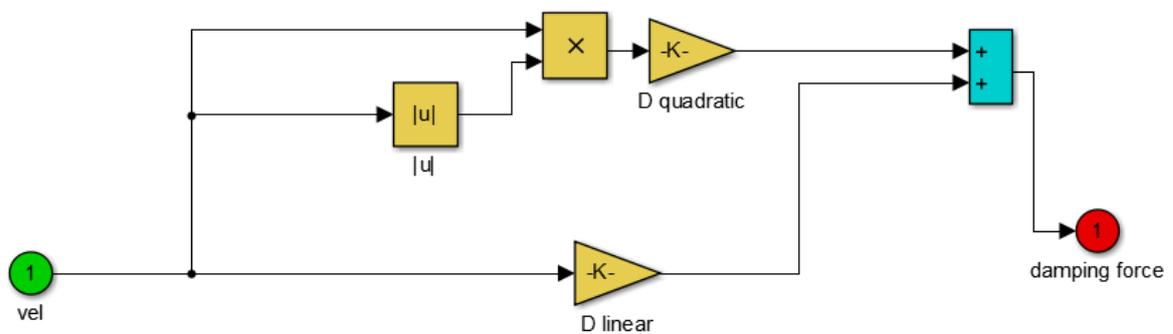
A matriz de coeficientes de arrasto D linear e quadrática utilizadas foram as mostradas em 2.44:

$$Dl = - \begin{bmatrix} 17.24 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 38.06 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 72.53 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.665 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.465 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.180 \end{bmatrix}$$

$$Dq = - \begin{bmatrix} 106,03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 84,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 104,41 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 65,59 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 85,26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7,51 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

No SIMULINK, o bloco das forças de arrasto hidrodinâmico é constituída da forma mostrada na Figura 26:

Figura 26 - Bloco Arrasto Hidrodinâmico



Fonte – o autor

2.3.9. Matriz de Forças Gravitacionais e Restauradoras

As forças restauradoras surgem devido ao empuxo e as gravitacionais devido a força da gravidade, essas combinadas restauram a posição do ROV na posição horizontal. A

flutuabilidade do ROV normalmente é positiva, ou seja, ele normalmente tende a vir à superfície. A flutuabilidade neutra é mais utilizada em AUVs, para que não se use energia para manter a profundidade, já a flutuabilidade negativa é desejável em veículos que atuem no fundo do oceano, que se utilizam de esteiras, por exemplo, para locomoção.

As forças de gravidade e restauradoras estão referenciadas ao sistema inercial, logo para ser somada na equação da dinâmica do ROV deve ser transformada para o sistema de referencias no veículo, assim como as outras forças.

$$\dot{v} = M^{-1}[C(v)v - D(v) - G(\eta_2) + \tau] \quad (2.45)$$

Logo, o vetor forças gravitacionais e de empuxo podem ser divididos e escritos como em 2.46 e 2.47:

$$f_G(\eta) = J_1^T(\eta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$f_B(\eta) = -J_1^T(\eta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Em que W é o peso do veículo dado por massa vezes aceleração da gravidade (m.g). Quanto totalmente submerso o empuxo é descrito como $B = \rho g \nabla$, densidade da água multiplicado por aceleração gravitacional e volume do ROV. Aqui é utilizada a transposta da matriz J_1 que é igual a inversa, por se tratar de uma matriz ortogonal, realizando assim o caminho inverso, do sistema fixo para o móvel.

No referencial móvel o vetor fica sendo:

$$G(\eta) = - \begin{bmatrix} f_G(\eta) + f_B(\eta) \\ r_G \times f_G(\eta) + r_B \times f_B(\eta) \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Expandindo tem-se:

$$G(\eta) = - \begin{bmatrix} (W - B)\sin\theta \\ -(W - B)\cos\theta\sin\phi \\ -(W - B)\cos\theta\cos\phi \\ -(y_G W - y_B B)\cos\theta\cos\phi + (z_G W - z_B B)\cos\theta\sin\phi \\ (z_G W - z_B B)\sin\theta + (x_G W - x_B B)\cos\theta\cos\phi \\ -(x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi - (y_G W - y_B B)\sin\theta \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Para descobrir os parâmetros faltantes, o autor (CHIN, 2013), usou da seguinte técnica e simplificações:

- 1) Assumindo que a flutuabilidade do ROV é nula. $W=B$
- 2) Colocando massa no ROV de forma que XY do centro de flutuação coincidir com XY do centro de massa. $x_G = x_B = 0, y_G = y_B = 0$, logo o vetor se torna.

$$G(\eta) = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ (z_G - z_B)W\cos\theta\sin\phi \\ (z_G - z_B)W\sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Assim, o autor Chin utilizou o PRO/ENGINEER pra se encontrar os parâmetros necessários.

O primeiro passo, antes de efetuar o balanceamento das simplificações acima, é medir as distâncias e as forças a seguir:

$$B = 95.25 \times 9.81 = 934N$$

$$W = 115 \times 9.81 = 1128N$$

$$x_G - x_B = 217 - 231 = -14mm$$

$$y_G - y_B = 0mm$$

$$z_G - z_B = 253 - 283 = -30mm$$

As medidas de x_B, y_B, z_B foram feitas em com respeito ao centro de flutuação.

O segundo passo é realizar o equilíbrio descrito anteriormente, adicionando massa ou flutuação, conseguindo uma flutuabilidade neutra, fazendo também que as coordenadas XY do centro de gravidade coincida com XY do centro de flutuação, obtendo-se assim:

$$W = B = 115 \times 9.81 = 1128N$$

$$x_G - x_B = 0mm$$

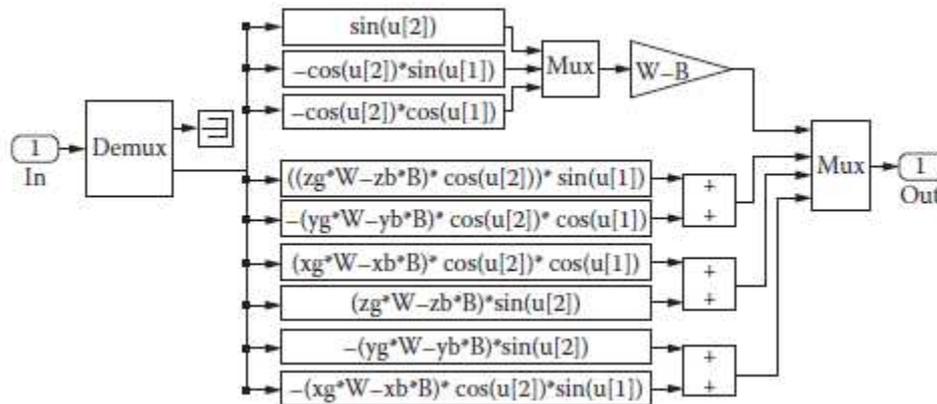
$$y_G - y_B = 0mm$$

$$z_G - z_B = 253 - 283 = -48mm$$

Tendo em vista que x_B, y_B, z_B foram medidos com respeito ao centro de gravidade.

O bloco responsável pelo cálculo das forças hidrostáticas e gravitacionais é mostrado na Figura 27:

Figura 27 - Forças gravitacionais e hidrostáticas no SIMULINK



Fonte – (CHIN, 2013)

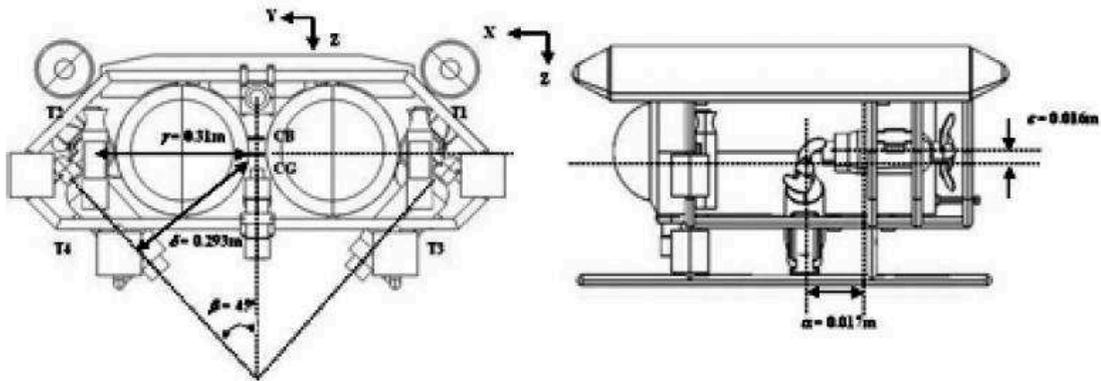
2.3.10. Modelagem dos Propulsores e Matriz de Acoplamento

Para a modelagem dos propulsores, existem dois fatores. A matriz de distribuição de forças e momentos causados pelos propulsores, matriz T, ou de acoplamento, e a matriz que dará o empuxo causado por cada propulsor a partir de uma tensão de entrada F_t .

A matriz de acoplamento T é definida a partir dos posicionamentos dos propulsores no ROV. De acordo com a orientação e distância em relação ao centro de gravidade do ROV o empuxo gerado resultará em determinadas forças e torques sobre o veículo.

No caso do RRCROV, os propulsores estão distribuídos como na Figura 28, e também podem ser observados no APÊNDICE A – Propulsores RRCROV.

Figura 28 - Configuração dos propulsores RRCROV



Fonte – (CHIN, 2013)

Dessa forma, são estabelecidas as equações 2.51 para cada grau de liberdade (CHIN, 2013):

$$\begin{aligned}
 u_1 + u_2 &= \tau_x \\
 u_3 \sin\beta - u_4 \sin\beta &= \tau_y \\
 u_3 \cos\beta + u_4 \cos\beta &= \tau_z \\
 -u_3 \delta + u_4 \delta &= \tau_\varphi \\
 -u_1 \varepsilon - u_2 \varepsilon - u_3 \alpha \cos\beta - u_4 \alpha \cos\beta &= \tau_\theta \\
 u_1 \gamma - u_2 \gamma + u_3 \alpha \sin\beta - u_4 \alpha \sin\beta &= \tau_\psi
 \end{aligned}
 \tag{2.51}$$

Onde,

$$\alpha = 0,017 \text{ m}$$

$$\beta = 45^\circ$$

$$\gamma = 0,31 \text{ m}$$

$$\delta = 0,293 \text{ m}$$

$$\varepsilon = 0,016 \text{ m}$$

Pode-se então montar a matriz de acoplamento T como 2.52:

$$\begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \\ \tau_\varphi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin\beta & -\sin\beta \\ 0 & 0 & \cos\beta & \cos\beta \\ 0 & 0 & -\delta & \delta \\ -\varepsilon & -\varepsilon & -\alpha\cos\beta & -\alpha\cos\beta \\ \gamma & -\gamma & \alpha\sin\beta & -\alpha\sin\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Onde u é são os empuxos produzidos por cada propulsor respectivamente, sendo a matriz T numericamente:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,7071 & -0,7071 \\ 0 & 0 & 0,7071 & 0,7071 \\ 0 & 0 & -0,2930 & 0,2930 \\ -0,0160 & -0,0160 & -0,0120 & -0,0120 \\ 0,31 & -0,31 & 0,0120 & -0,0120 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

O autor (CHIN, 2013), para a matriz de transformação F_t , realizou experimentos para estabelecer a relação entre a tensão de entrada nos motores e o empuxo gerado pelos propulsores. No experimento um amplificador PWM foi utilizado para controlar a tensão nos propulsores, um sensor de força do tipo ATI (*Industrial Automation Force/Torque Sensor model Gamma*) com sensibilidade de 0,1N e um alcance de -130 até 130 N. Um sensor de velocidade de fibra óptica (*Fuji Electric PH21A Series*) foi utilizado com um contador de frequência para medir a velocidade do propulsor.

Deste experimento pode-se escrever as seguintes relações:

$$J_m \dot{\Omega} + \frac{K_m K_e}{R_m} \Omega = \frac{K_m}{R_m} \bar{u}_i - Q \quad \text{para } i = 1,2,3,4. \quad (2.54)$$

$$\bar{u}_i = R_m I_t + L_m \frac{dI_t}{dt} + K_e \Omega, \quad 1 = 1,2,3,4. \quad (2.55)$$

Com isso pode-se escrever as relações entre rotação e empuxo ou momento:

$$u_i = K_{Td} \Omega^2 e Q = K_{Qd} \Omega^2 \quad (2.56)$$

J_m = é a inércia do rotor em N.m.s²/rad

Ω = é a velocidade de rotação em rad/s

Q = é o torque no propulsor em N.m

u_i = é o empuxo de cada propulsor

\bar{u}_i = tensão de entrada V

R_m = resistência da armadura em Ohms

I_t = é a corrente da armadura A

L_m = é a indutância em H

K_m = é a constante de torque do motor em N.m.s/A

K_e = constante da força contra-eletromotriz em V.s/rad

K_{Td} = é a constante de empuxo em N.s/rad

K_{Qd} = constante de torque em N.m.s/rad

Os valores numéricos destas constantes podem ser encontradas na

Tabela 6 - Constantes dos propulsores.

Tabela 6 - Constantes dos propulsores

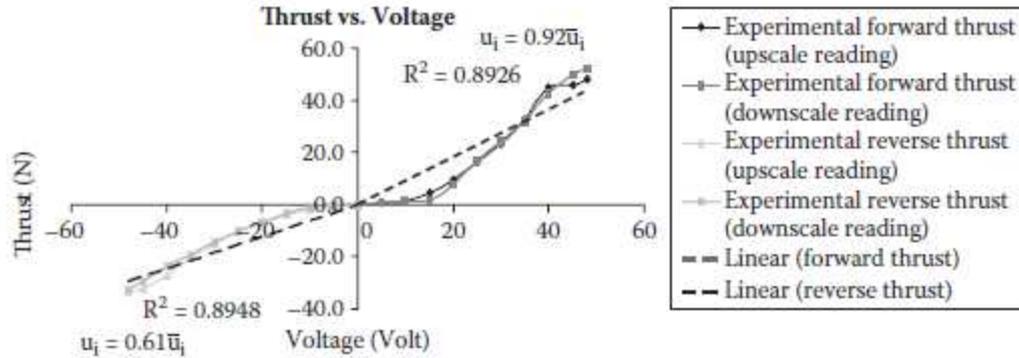
Summary of Thruster Constants [75]

Constant	Forward Thrust	Reverse Thrust
K_m	12.562 N·m/A	8.739 N·m/A
R_m	2.4 Ω	2.4 Ω
K_e	0.245 V·s/rad	0.245 V·s/rad
K_{Td}	0.0022 N·s/rad	-0.0013 N·s/rad
K_{Qd}	6.0×10^{-5} N·m·s/rad	-2.0×10^{-5} N·m·s/rad
L_m	0.491 H	0.491 H

Fonte – (CHIN, 2013)

Com o experimento e utilizando o gráfico da Figura 29, pôde-se chegar numa aproximação para a F_t , sendo que esta relação ficou sendo $F_t=0,92N/V$ e $F_t=0,61N/V$ para empuxo reverso.

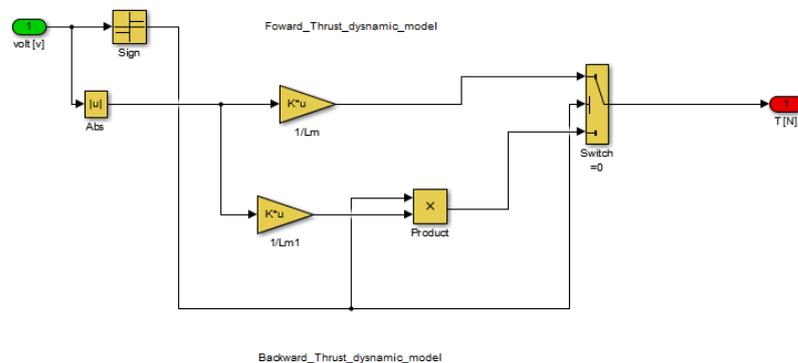
Figura 29 - Gráfico da Relação entre tensão e empuxo



Fonte – (CHIN, 2013)

Então no SIMULINK, foi feito um bloco para relacionar a tensão de entrada com a propulsão resultante, mostrado na Figura 30:

Figura 30 - Ft no SIMULINK



Fonte – (CHIN, 2013)

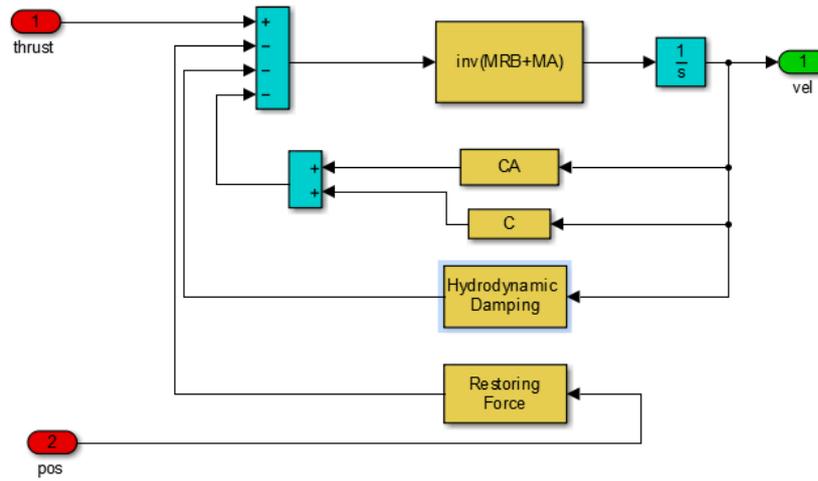
2.3.11. Arranjo Final

Portanto a equação 2.57 pode ser representada no MATLAB como mostrado na

Figura 31:

$$\dot{v} = M^{-1}[C(v)v - D(v) - G(\eta_2) + \tau] \quad (2.57)$$

Figura 31 - Solução da equação da dinâmica de um ROV no MATLAB



Fonte - (CHIN, 2013)

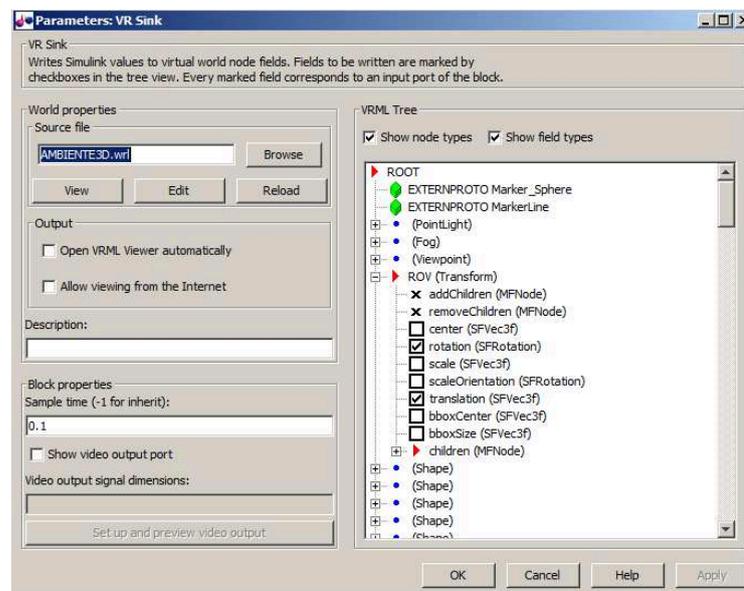
3. Simulador implementado

Um dos objetivos deste trabalho era exatamente criar uma ferramenta de simulação 3D para ROVs, onde em um ambiente virtual seria possível visualizar os movimentos do veículo, mas outras funções deveriam estar presentes, como análise do comportamento do ROV, em termos de velocidade e posição.

Tais ferramentas de simulação foram idealizadas para que pudessem ser analisadas diferentes configurações de propulsão.

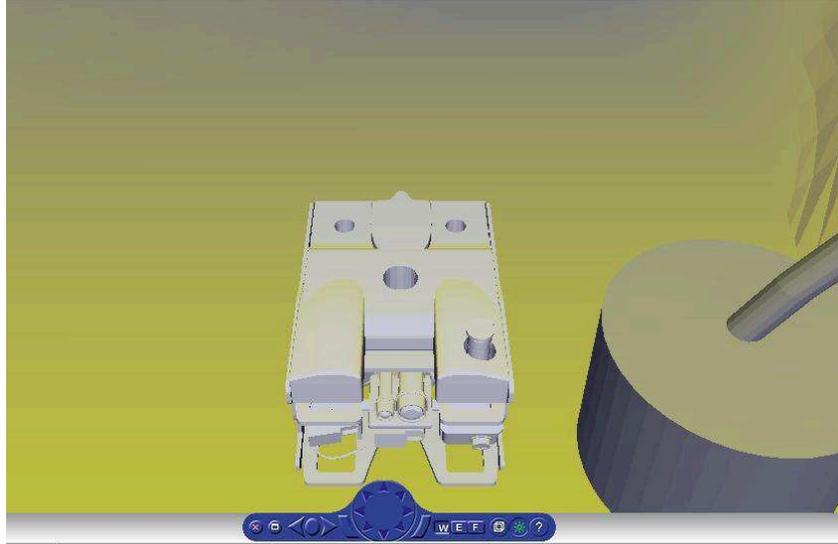
O ambiente 3D (Figura 33) foi inicialmente criado no software RHINOCEROS, posteriormente sendo utilizado o VREALM BUILDER para a finalização de alguns parâmetros, como visibilidade, pontos de visualização e iluminação. Posteriormente o objeto ROV fora importado para este ambiente pelo VREALM BUILDER, para que pudesse ser selecionado pelo bloco VR SINK no MATLAB (Figura 32).

Figura 32 - Bloco VR SINK (seleção dos parâmetros de translação e rotação do ROV)



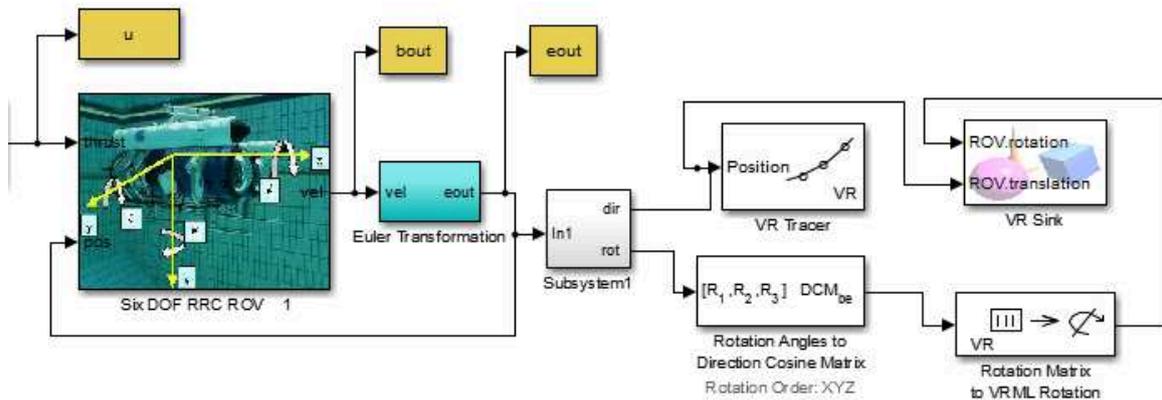
Fonte – O autor

Figura 33 - Ambiente 3D de simulação



Fonte – o autor

Figura 34- Blocos ligados ao ambiente virtual



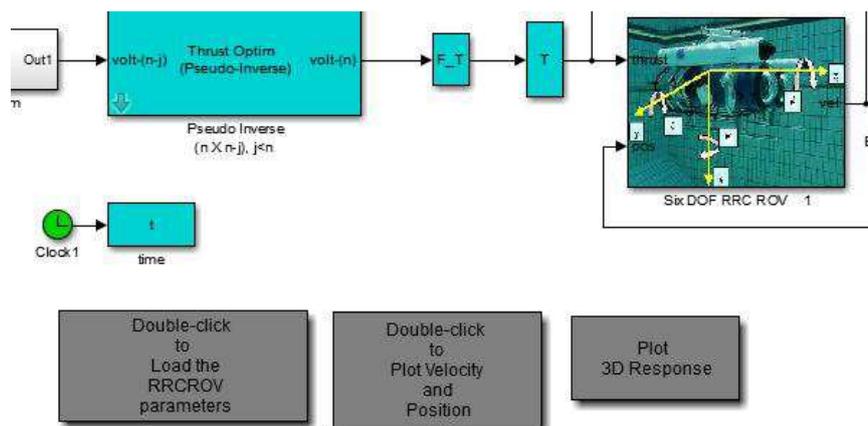
Fonte – o autor

Como é possível ver na Figura 34, os ângulos referentes a posição do ROV necessitam passar por uma transformação para que o ambiente 3d no VR SINK possa representar corretamente. Os blocos estão disponíveis na biblioteca do SIMULINK, onde uma transformação de ângulos eulerianos para matriz de cossenos, e posteriormente para um vetor de 4 elementos que pode ser lido pelo VR SINK. Além disso, um gerador de posições foi

utilizado através do bloco VR TRACER, para que a trajetória pudesse ser visualizada no ambiente 3D.

Além disso, as ferramentas de obtenção de dados foram utilizadas, para que ao longo de um período de simulação fossem adquiridos dados como posição e velocidade, para posterior comparação e até mesmo verificação dos movimentos no ambiente 3D. Para isso, dois blocos TO WORKSPACE foram utilizados. Estes blocos criam variáveis com o tempo para a simulação, podendo então serem representadas graficamente. Tais gráficos podem ser criados a partir do circuito no SIMULINK pelos blocos em cinza mostrados abaixo, que têm como finalidade chamar uma função, que utilizará os dados salvos no WORKSPACE para a criação dos gráficos. Também é possível visualizar o bloco responsável pelo carregamento das constantes utilizadas pelo modelo.

Figura 35 - Blocos de criação de gráficos e de carregamento de variáveis.



Fonte – o autor

Na entrada, os comandos são dados por um joystick de videogame comum, passando pela pseudo-inversa, pela matriz F_t e pela matriz T (Figura 35) para então chegar ao bloco de dinâmica do ROV. O arranjo final pode ser encontrado no APÊNDICE B – Arranjo Final SIMULINK.

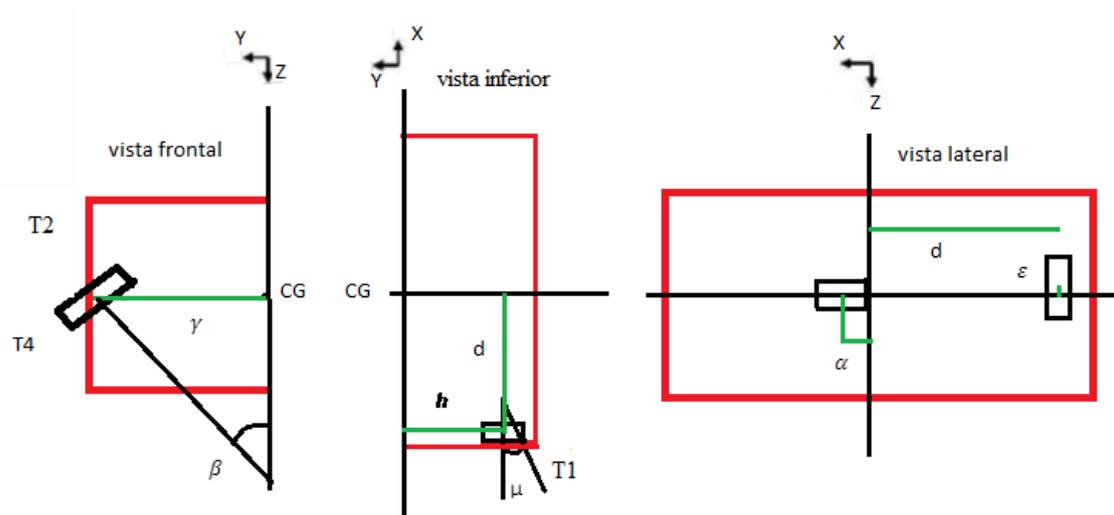
O bloco de Coriolis de corpo rígido apresentou problemas da forma que o autor Chin havia implementado, com resultados que aumentavam até ocorrer o erro de simulação com valores altos demais, tendendo ao infinito. Então foram implementadas as equações necessárias, não ocorrendo mais problemas nas simulações. O restante dos blocos da dinâmica do ROV foi originalmente disponibilizado pelo autor Chin (2013) e utilizado, alterando apenas os valores da matriz T de acordo com os valores dos ângulos estudados para cada simulação.

4. Configurações estudadas

Para o ROV RRCROV foram estudadas algumas possibilidades de configurações de propulsores, aproveitando os mesmos dados característicos do ROV, como coeficientes hidrodinâmicos e massa, mudando apenas os ângulos dos propulsores e avaliando os resultados, com o erro obtido na trajetória, comparando assim com os dados obtidos com a configuração padrão.

Para avaliar-se as mudanças e possíveis melhoras na dinâmica do RRCROV, os ângulos de atuação dos propulsores foram variados, para que por exemplo o erro obtido em *sway* possa ser reduzido. Para isso, os ângulos dos propulsores foram variados de forma que fora introduzido o ângulo μ nos propulsores traseiros, resultando nas seguintes equações de acoplamento (Figura 36).

Figura 36 - Disposição dos propulsores



Fonte – o autor

$$\begin{aligned}
 u_1 \cos \mu + u_2 \cos \mu &= \tau_x \\
 u_1 \sin \mu - u_2 \sin \mu + u_3 \sin \beta - u_4 \sin \beta &= \tau_y \\
 u_3 \cos \beta + u_4 \cos \beta &= \tau_z \\
 -u_3 h \cos \beta + u_4 h \cos \beta &= \tau_\varphi \\
 -u_1 \epsilon \cos \mu - u_2 \epsilon \cos \mu - u_3 \alpha \cos \beta - u_4 \alpha \cos \beta &= \tau_\theta \\
 u_1 (\gamma \cos \mu - d \sin \mu) + u_2 (-\gamma \cos \mu + d \sin \mu) + u_3 \alpha \sin \beta - u_4 \alpha \sin \beta &= \tau_\psi
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Onde,

$$\alpha = 0,017 \text{ m}$$

β =variável em graus

μ = variável em graus

d = distância entre propulsores traseiros e CG= 0,353m

$$\gamma = 0,31m$$

$$\varepsilon = 0,016m$$

$$h = 0,414$$

O ângulo μ pode ser variado até uma angulação de aproximadamente 41 graus, pois assim ele intercepta o centro de massa, não tendo efeito sobre o movimento lateral, logo para os simulações serão considerados ângulos como mostrados na Tabela 7 - Variações de ângulos estudadas:

Cada combinação de β e μ foi simulada reportando-se seus erros relativos, juntamente com uma análise do movimento em cada movimento principal atuado.

Tabela 7 - Variações de ângulos estudadas

variações estudadas	
β	μ
-70	-30
-60	-15
-50	0
-45	15
-30	30
-15	
15	
30	
45	
50	
60	
70	

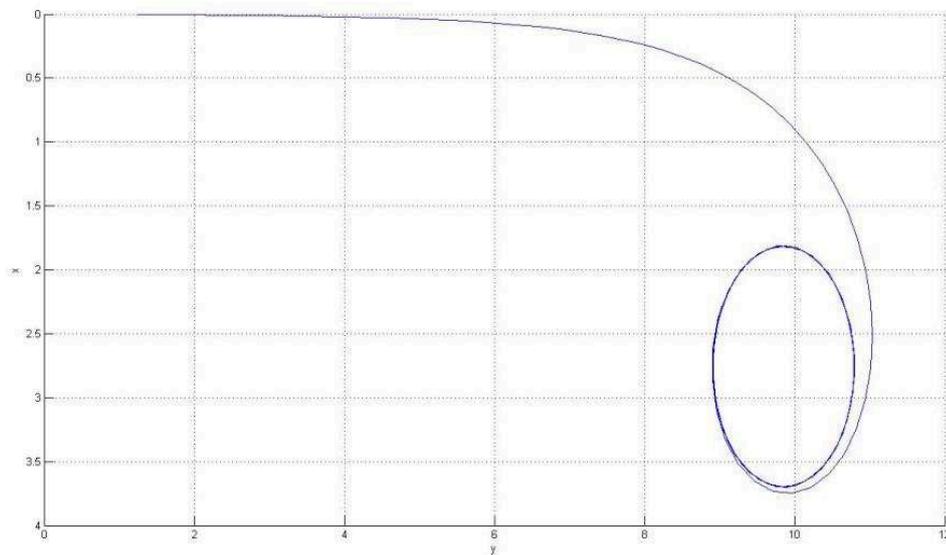
Fonte – o autor

4.1. Resultados da configuração padrão

Para se ter um referencial de desempenho, primeiramente será feito um estudo sobre o RRCROV no seu estado natural, com a configuração de propulsores de fábrica. Para tanto, o erro será medido em termos de velocidade linear desejada e adquirida em cada direção x , y e z . Já as velocidades de rotação, se dará atenção especial à velocidade de yaw , já que $pitch$ e $roll$ são sub-atuadas, mas nesses graus de liberdade será medido também as variações e influências sobre os outros movimentos, já que estas podem sim afetar os movimentos em outras direções.

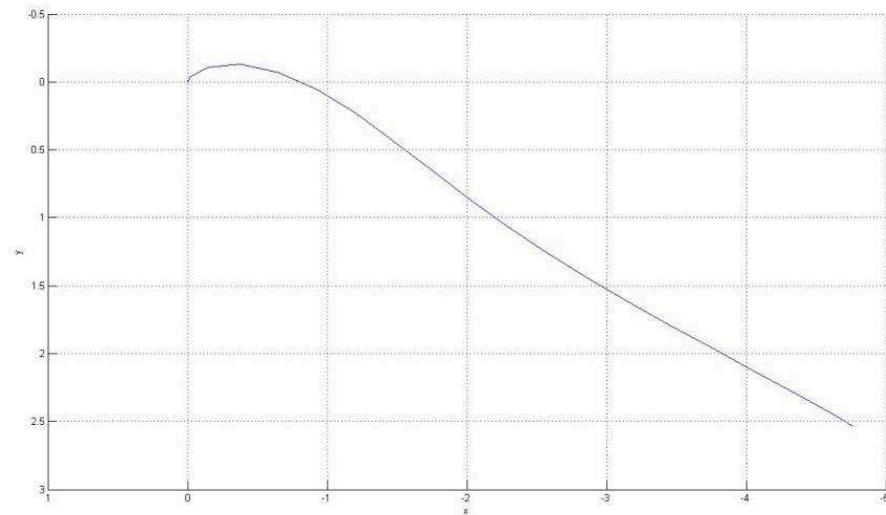
Ao realizar-se o teste do simulador percebe-se dois comportamentos inesperados no modelo com as informações fornecidas pelo autor CHIN em seu livro. Nas manobras de $sway$ e yaw seguido de surge, notam-se as trajetórias mostradas na Figura 37 e Figura 38.

Figura 37 - Sway com anomalia



Fonte – o autor

Figura 38 - Yaw seguido de surge com anomalia



Fonte- o autor

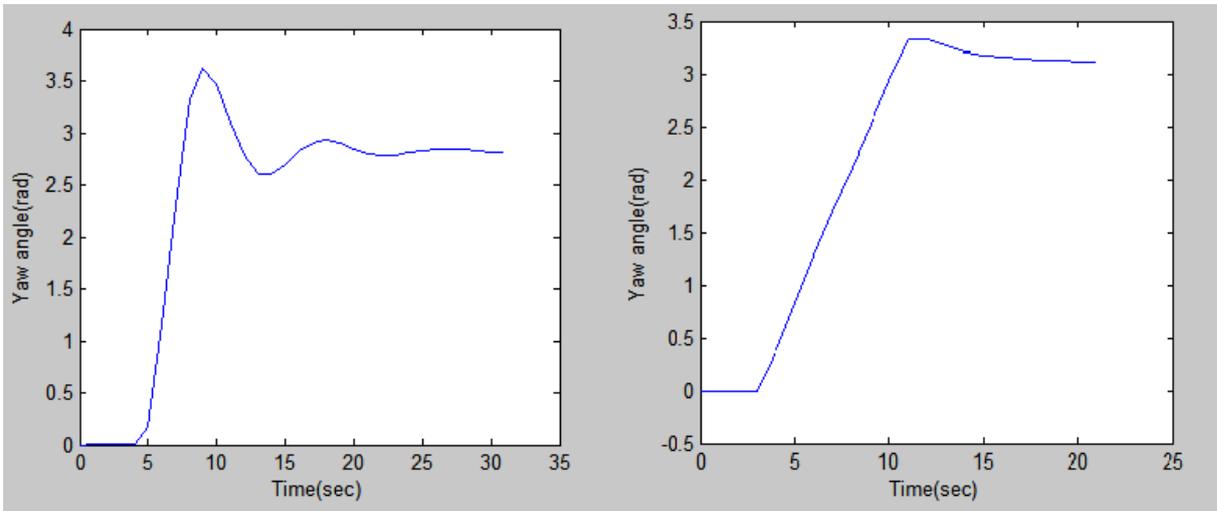
No primeiro caso, aplicando apenas uma força na direção de y puramente com os propulsores, surge uma força que induz o movimento de yaw . Já no segundo caso quando se aplica uma força em yaw e posteriormente retira-se esta força aplicando em surge, o efeito de ziguezague aparece.

Através da retirada do bloco de Coriolis e centrípeta do sistema percebe-se que esses efeitos não ocorrem. Logo, para o segundo caso, pode-se imaginar que o sistema é subamortecido, com coeficientes de amortecimento abaixo do esperado, que por sua vez não atenuam forças de Coriolis e centrípeta gerando esses efeitos inesperados mas naturais a partir dos dados do modelo e das simplificações feitas, lembrando que todo modelo é apenas uma aproximação da realidade.

Percebe-se então que o autor (CHIN, 2013) em seu trabalho disponibilizado no site do MATLAB, na forma de biblioteca, contém uma atualização das derivadas hidrodinâmicas referentes ao amortecimento, sendo estas bem maiores que as contidas no livro. Com a utilização destes coeficientes a primeira anomalia some completamente, o que indica que o ruído gerado no início do movimento gera uma força de Coriolis e centrípeta que é amplificada na realimentação, levando ao movimento circular.

Já no segundo caso, o amortecimento é sentido de forma a fornecer mais suavidade ao movimento, como pode ser notado na figura a seguir que faz uma comparação do movimento subamortecido com o com maior amortecimento (Figura 39).

Figura 39- À esquerda o movimento subamortecido, à direita com maior amortecimento.



Fonte – o autor

Portanto, devido às observações feitas sobre estas anomalias, adotou-se os coeficientes hidrodinâmicos que o autor disponibiliza na biblioteca do SIMULINK disponível na internet, tendo em vista que as encontradas no livro eram as variáveis iniciais, e que todo modelo de manobra necessita ser ajustado com mais testes para a melhor representação do modelo dinâmico. Os novos coeficientes hidrodinâmicos são mostrados nas matrizes a seguir.

$$\begin{aligned}
 Dl &= - \begin{bmatrix} 26,114 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 29,996 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 59,044 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 11,75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 29,522 \end{bmatrix} \\
 Dq &= - \begin{bmatrix} 145,76 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 170,52 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 351,98 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 65,592 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 85,26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10,636 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

4.1.1. Procedimento Para as Simulações

Para o movimento retilíneo sobre o eixo x , é desejável que qualquer outro movimento em outra direção seja nulo. Para tanto, a tomada das velocidades em relação ao sistema referencial fixo foi feita. Para modelar o erro, foram consideradas as abordagens do erro absoluto das velocidades e erro relativo, ou seja, estabeleceram-se as relações de 4.1, tomando como exemplo o erro quando a velocidade requerida é na direção x :

$$ERRO_{abs}[surge] = (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad ERRO_{rel} = \frac{|ERRO_{abs}|}{|u|} * 100 \text{ [%]} \quad (4.1)$$

Assim o erro absoluto fica sendo um vetor velocidade perpendicular ao vetor em análise e o erro relativo indica a proporção do erro revelando assim qual a precisão do movimento.

Outra forma de medir o erro é através das distâncias percorridas, sendo uma consequência das velocidades impostas, sendo este erro mensurável de maneira análoga ao erro da velocidade.

Os erros serão medidos à várias velocidades, para que possa ser analisada a influência desta no resultado final. Em cada direção linear será simulado um movimento de 40m para que o transiente inicial não interfira nos resultados.

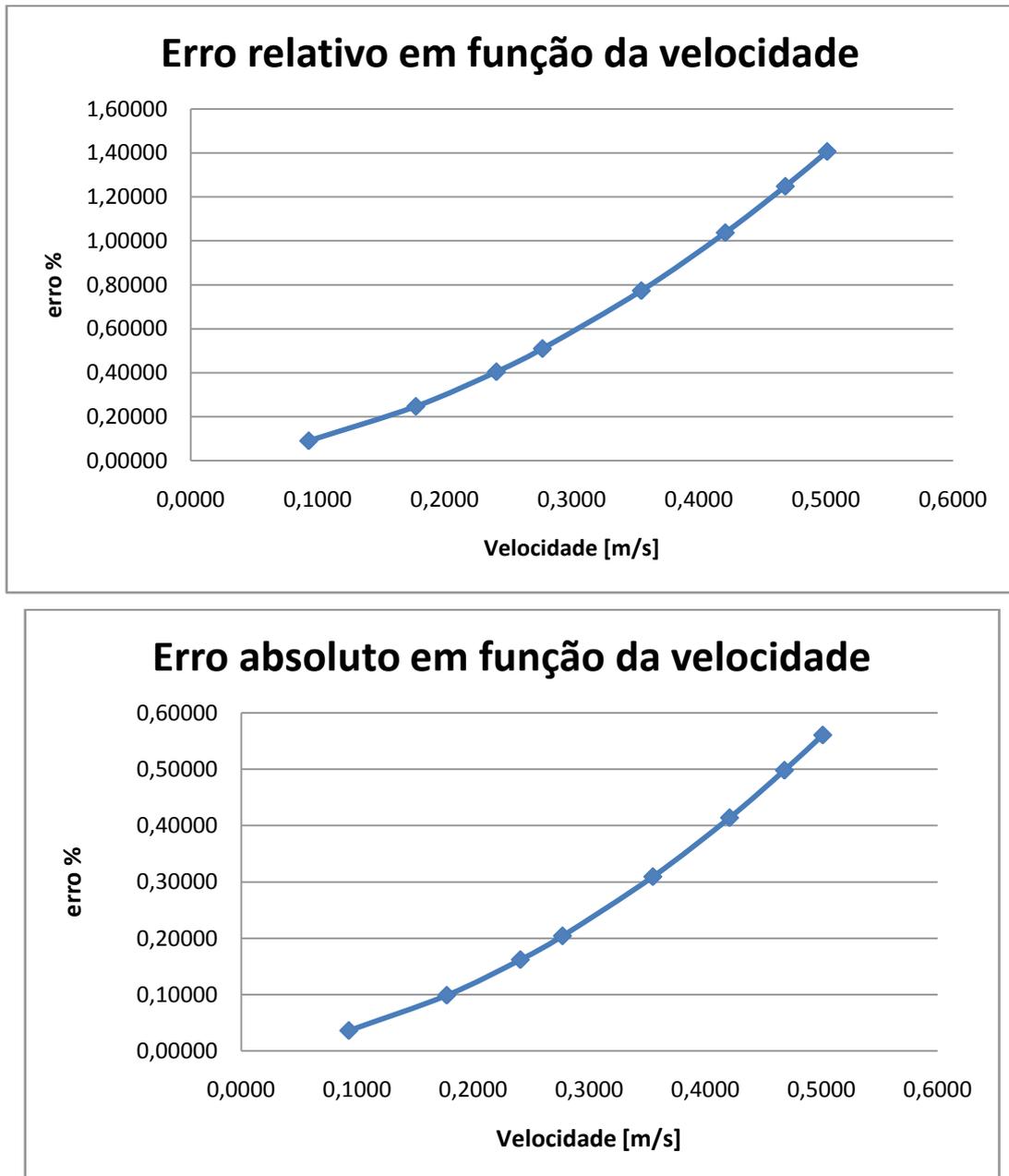
Para a representação do erro obtido no movimento de *yaw* irá se perceber o movimento no seu extremo, dando 10 voltas completas em várias velocidades de giro, até a velocidade máxima.

4.1.2. Surge

Várias velocidades foram testadas, podendo-se chegar a um gráfico que demonstra os erros absolutos e relativos nesta direção. Devido à ângulos de *pitch* que o ROV adquire quando desenvolve uma velocidade na direção x (*surge*), acaba também adquirindo uma velocidade de *heave*, que pode ser de até 1,4% da velocidade de *surge*. Como pode ser notado

no gráfico (Figura 40), se trata de uma distribuição não linear, que pode ser modelada por uma equação quadrática, tendo um distanciamento máximo no deslocamento de 40 m em x de 0,56m, que representa um erro bastante pequeno em relação a distância percorrida. Pode-se perceber que quanto maior a velocidade requerida maior será o erro consequente, devido ao maior ângulo de *pitch* que irá se adquirir.

Figura 40 - Erro relativo (a cima) e erro absoluto (abaixo)

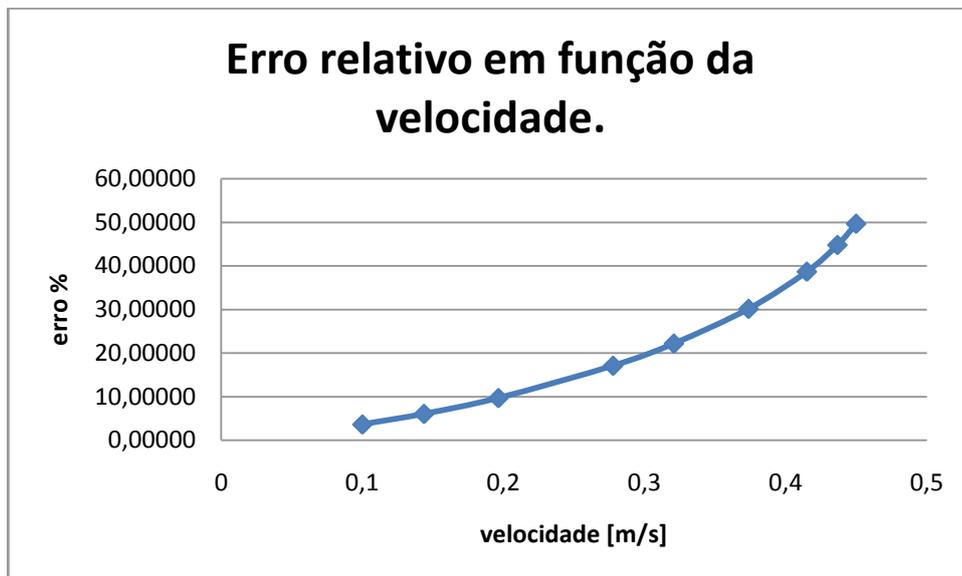


Fonte – o autor

4.1.3. Sway

Da mesma forma que as velocidades foram variadas no movimento em x, foram variadas em y para que os erros pudessem ser computados. Aqui nota-se um problema que ocorre no ROV devido à sua configuração de propulsores. Para efetuar este movimento, os propulsores laterais são acionados, um de forma direta e o outro de forma reversa, para que a força em *sway* seja gerada, a pseudo-inversa faz seu trabalho, atuando os dois propulsores corretamente, mas o que ocorre é que este é o mesmo procedimento para gerar a força em *roll*, que no caso deste ROV é equilibrada com a força de restauração. O ângulo adquirido em *roll*, diferentemente do ângulo adquirido em *pitch* no movimento de *surge*, é bem maior ocasionando um erro significativo na trajetória. Como é possível perceber no gráfico (Figura 41) o erro relativo na velocidade é de praticamente 50%, ou seja, para cada metro que o ROV desenvolve no eixo y ele também desenvolve meio metro no eixo z, no sentido negativo, devido ao ângulo de *roll*. Da mesma forma que o erro aumenta com a velocidade no movimento de *surge*, é observado o mesmo comportamento no movimento de *sway*.

Figura 41 - Erro relativo da velocidade no eixo y



Fonte – o autor

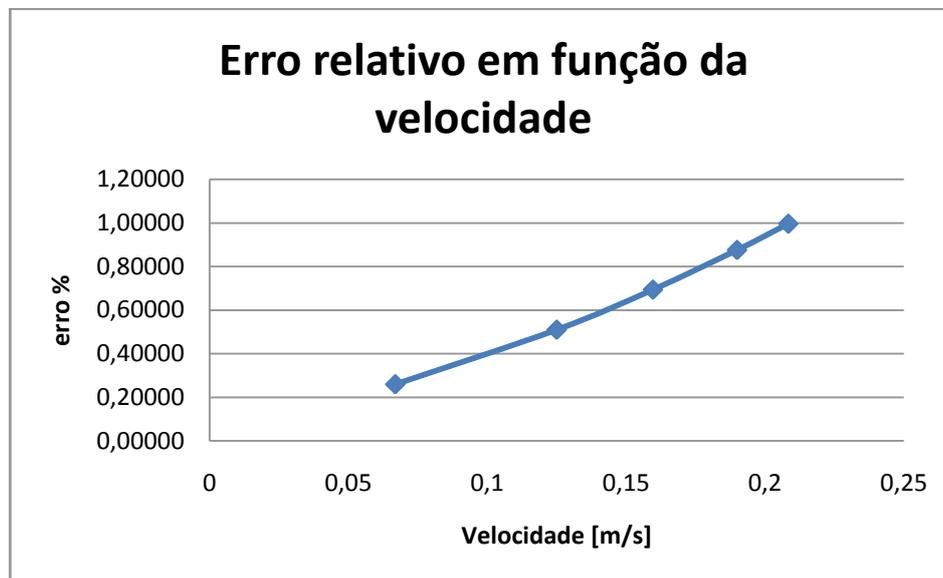
Portanto, um ponto importante no estudo é a diminuição do erro nesta direção, pois se tratando de posicionamento, está muito distante do aceitável, pois a velocidade de *sway* do ponto de visto do ROV é de 0,50 m/s aproximadamente, mas com o ângulo em *roll*, ele viaja a

0,44 m/s em y e 0,22 m/s em z, o que é extremamente fora dos requisitos de qualquer veículo tornando seu controle manual extremamente difícil e desperdiçando energia em um movimento indesejável.

4.1.4. Heave

O mesmo estudo foi executado no eixo z, para se verificar o movimento e o constatado foi que neste sentido o ROV mais uma vez apresenta uma pequena variação no movimento agora no eixo x, que em velocidade máxima não passa de 1% aproximadamente sendo aceitável.

Figura 42 - Erro relativo em heave

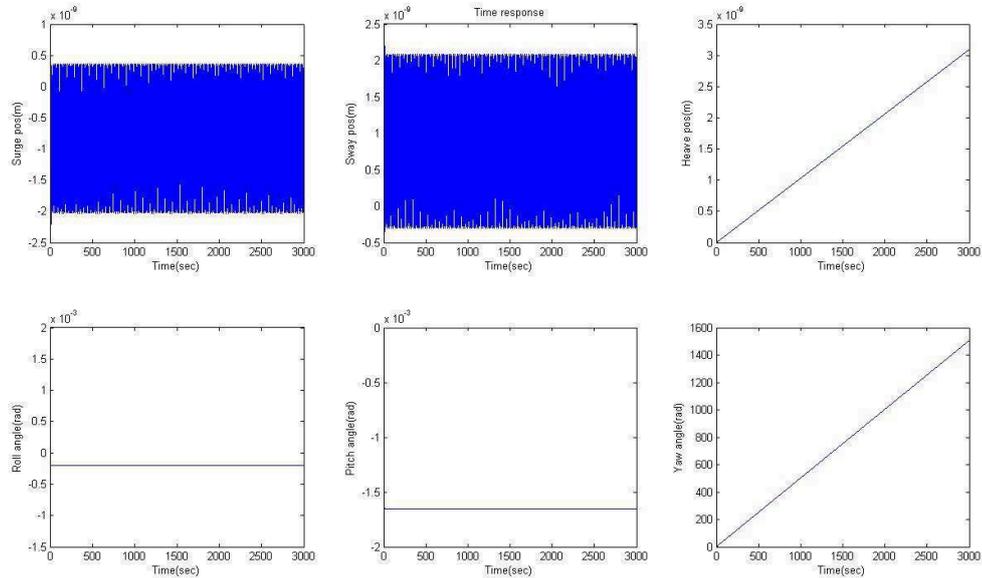


Fonte – o autor

4.1.5. Yaw

Para este movimento o ROV desempenha uma excelente performance, reportando erros na casa de 10^{-9} m, nas direções de surge *sway* e *heave*, como pode ser visto na Figura 43.

Figura 43 - Posições com acionamento de yaw



Fonte – o autor

4.2. Resultados das variações

4.2.1. Variações em β com μ fixado em zero

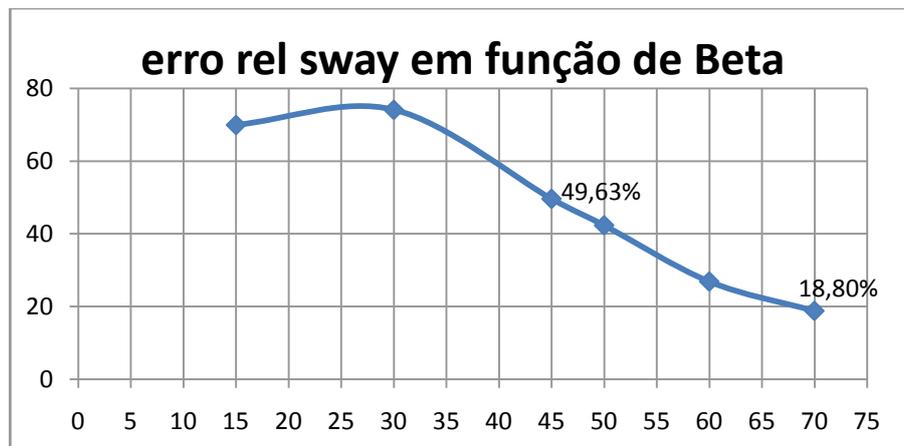
1. Surge

Na direção x o erro se manteve estável, já que os propulsores responsáveis pelo movimento nessa direção não foram alterados nessa etapa, mantendo o erro relativo da velocidade em 1,40%.

2. Sway

Para análise nessa direção o parâmetro erro foi identificado para cada ângulo beta, mas para uma análise mais profunda os parâmetros de empuxo total utilizado e velocidade alcançada no referencial móvel foram analisados.

Figura 44 - Erro relativo em sway em função de Beta

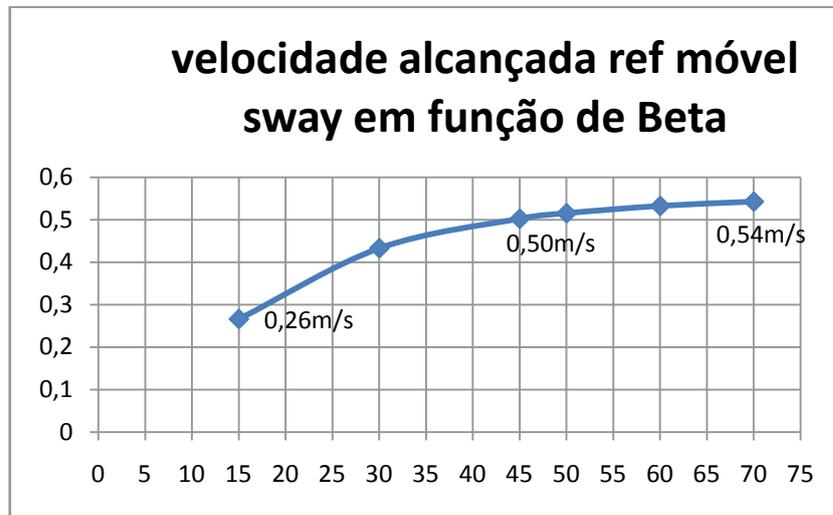


Fonte – o autor

Como é possível identificar na Figura 44, o erro de 49,63 % é superado e muito com o aumento de beta, pois para um beta maior o efeito de *roll* ocasionado pelos propulsores, se torna ainda maior, ocasionando um sistema propulsivo extremamente menos eficiente neste grau de liberdade. Para um ângulo de setenta graus o erro relativo atinge um patamar de 18,80%, o que é também compreensível, já que estando os propulsores em um ângulo que o deixe mais horizontal, o efeito de *roll* diminuído, diminuindo assim o erro.

Como para cada um dos ângulos estudados foi utilizada uma mesma força requerida naquele grau de liberdade, as velocidades atingidas com relação ao referencial móvel foram diferentes, sendo que para ângulos menores, menor foi a velocidade alcançada, como mostrado na Figura 45. Isso explica a o erro relativo menor em 15 graus.

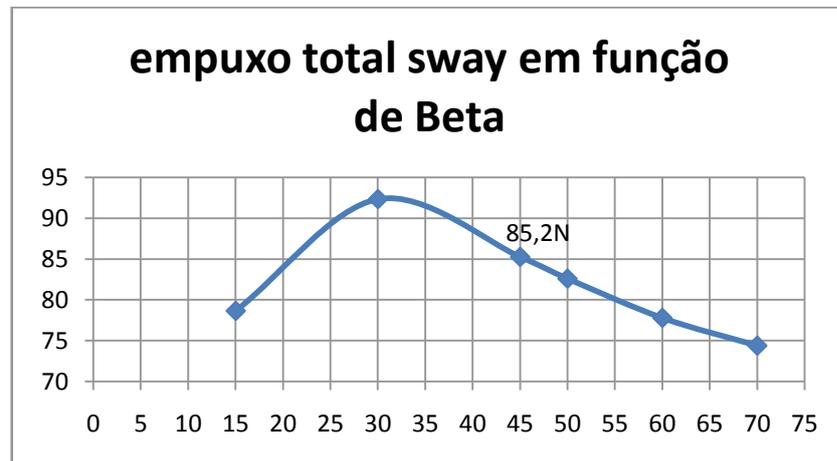
Figura 45 - Velocidade do ROV no referencial móvel em sway



Fonte – o autor

Portanto, o erro relativo encontrado anteriormente, que cresce com o aumento de Beta, está ainda abaixo do que seria se a velocidade alcançada fosse a mesma da velocidade base. Isso se deve pela impossibilidade de alcançar tal velocidade com o ângulo nesta magnitude, portanto a força proporcionada pela pseudo-inversa neste grau de liberdade é inferior à desejada, mas o resultado expressa o menor erro possível de ser alcançado.

Figura 46 - Empuxo total em sway



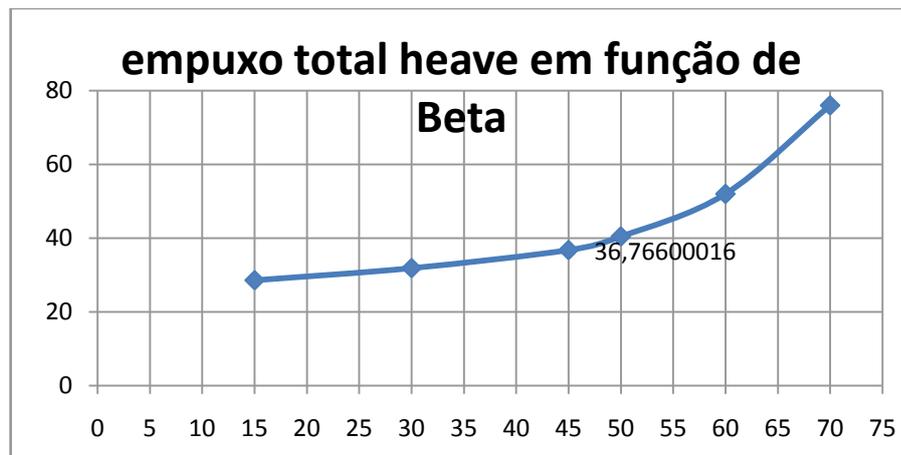
Fonte – o autor

Na Figura 46 pode-se observar o empuxo total necessário para cada ângulo Beta, sendo o empuxo em 15 graus reduzido justamente para evitar o erro em demasia que o sistema teria para gerar a força pedida na entrada.

3. *Heave*

No movimento de *heave*, que também depende dos propulsores 3 e 4, atingidos pela variação de Beta, o erro se mantém estável em 0,99%, mas o empuxo necessário se altera conforme o ângulo.

Figura 47 - Empuxo em heave



Fonte – o autor

Na Figura 47 é possível determinar que para ângulos Beta maiores, maior será o empuxo requerido dos propulsores para efetuar a manobra, logo, para ângulos elevados, a maior parte da força e empuxo é desperdiçada neste movimento.

4. *Yaw*

No caso de *yaw*, não houve alteração significativa no movimento, já que o principal responsável por isso são os propulsores 1 e 2 que não foram alterados nesta parte.

4.2.2. Variações em β e μ

1. Surge

Em surge, assim como em *heave* na seção anterior, o erro relativo se mantém em 1,40%, havendo apenas um aumento de propulsão exigida para executar a manobra, devido ao ângulo existente nos propulsores 1 e 2, que faz com que parte da propulsão desejada seja desperdiçada nesta direção (Figura 48).

Figura 48 – Empuxo total para surge, variando apenas μ



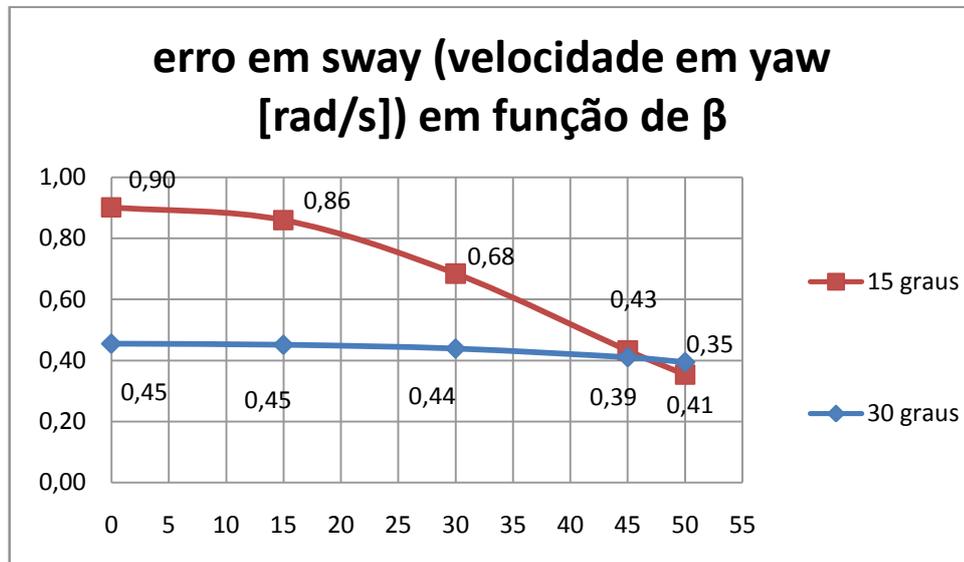
Fonte – o autor

2. Sway

Nesta direção o ângulo dado aos propulsores 1 e 2, que na matriz T estão também gerando empuxo para efetuar o movimento na direção y, acabam gerando também uma problema no movimento, um giro em *yaw* que impossibilita o movimento na direção y.

Nas figuras Figura 49, Figura 50, Figura 51 estão sendo mostradas algumas características desse movimento indesejável resultado dessa angulação. Pode-se perceber pela Figura 49 que β influencia no giro resultante, de forma que quanto maior for β menor será a velocidade de *yaw*. Os resultados para μ igual a 15° e 30° indicam uma diferença grande na influencia deste ângulo no movimento.

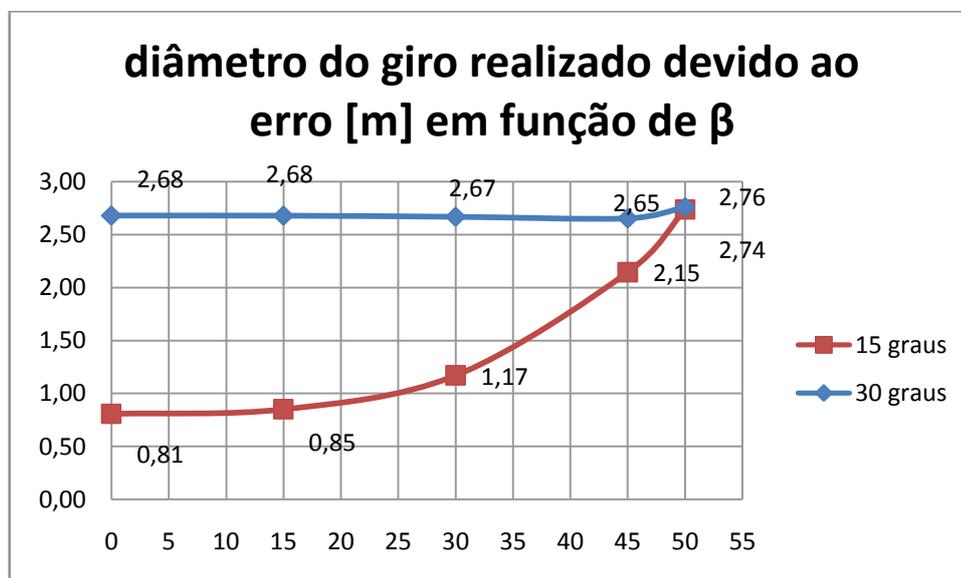
Figura 49 - Erro em sway



Fonte – o autor

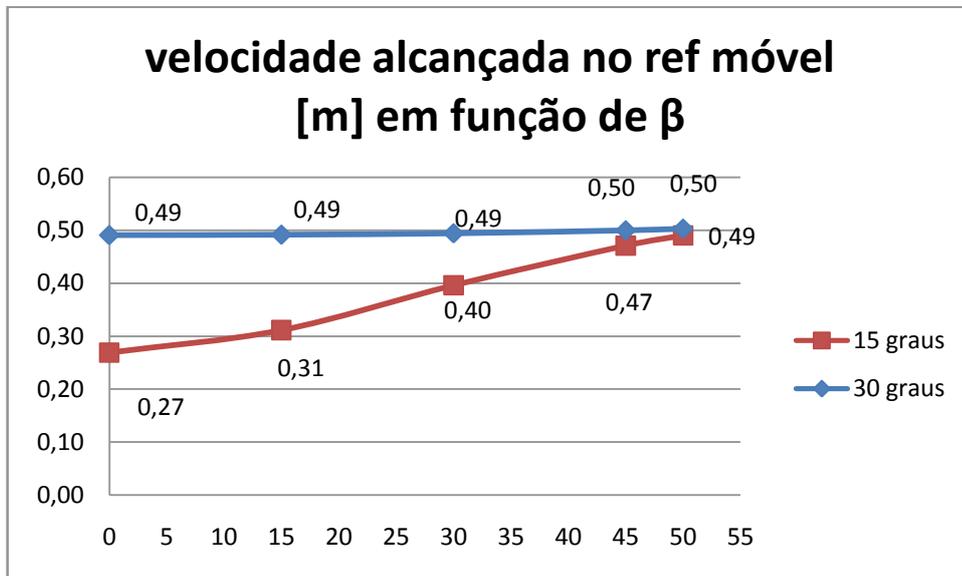
Na Figura 49 é possível perceber que com μ de 30 graus a influencia de β é ínfima na velocidade de giro que o ROV adquire. Diferentemente para μ igual a 15 graus. O mesmo pode ser observado nas Figura 50 e Figura 51.

Figura 50 - Erro em sway (diâmetro do giro)



Fonte – o autor

Figura 51 - Velocidade em sway ref móvel

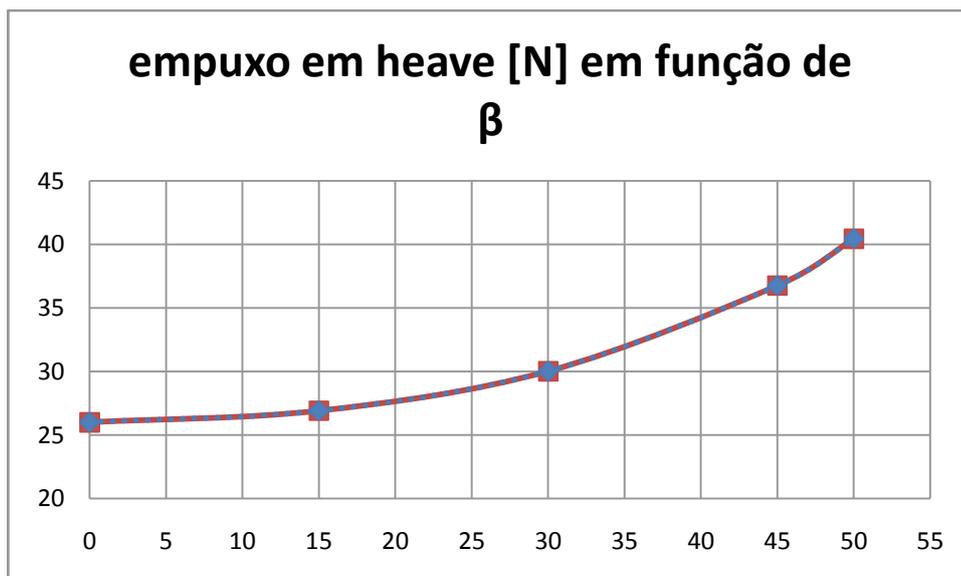


Fonte – o autor

3. Heave

No eixo z, o ângulo μ pouco não interfere no movimento, estando este dependente apenas de β , como é possível verificar nas curvas de 15 e 30 graus na Figura 52.

Figura 52 - Empuxo em heave

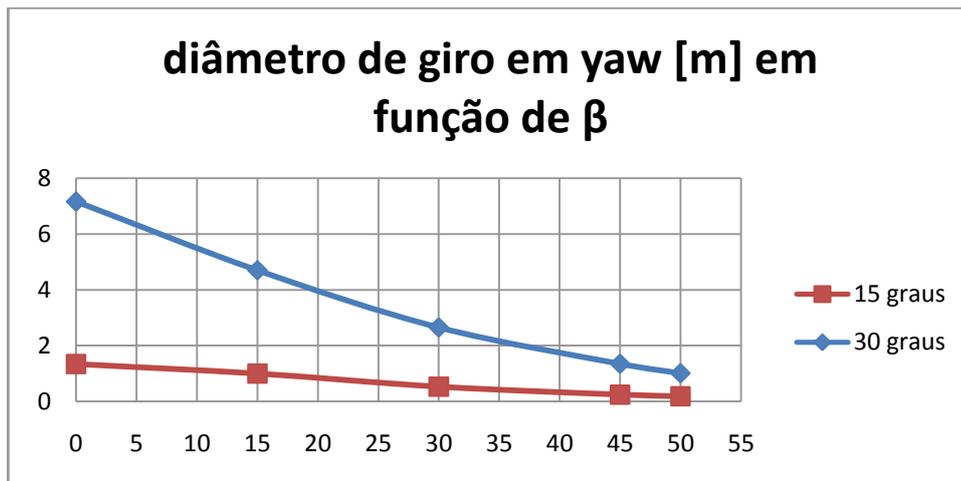


Fonte – o autor

4. Yaw

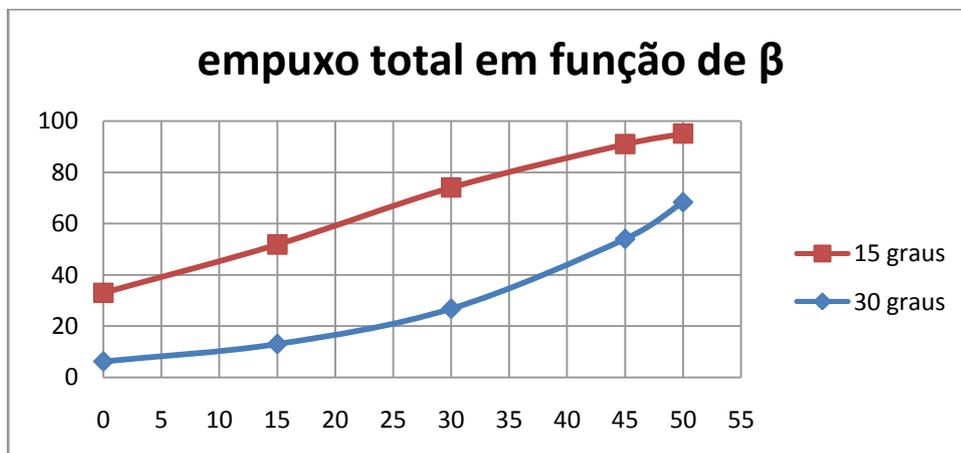
Em torno de z o ângulo μ causa interferência, pois atua diretamente neste movimento aumentando o braço de alavanca, sendo menor o empuxo necessário para realizar o movimento (Figura 54). É necessário ressaltar que com a matriz T original o diâmetro de giro em torno de z no movimento de *yaw* foi muito próximo de zero, não sendo o mesmo obtido com as angulações estudadas. É possível notar que este diâmetro aumenta com o aumento de μ , mas que diminui com o aumento de β (Figura 53). Já o empuxo é menor com μ maior, mas aumenta com o aumento de β (Figura 54). Na Figura 55 é também mostrado o aumento da velocidade indesejada em z , com o aumento de β em ambos os casos.

Figura 53 - Diâmetro de giro em yaw



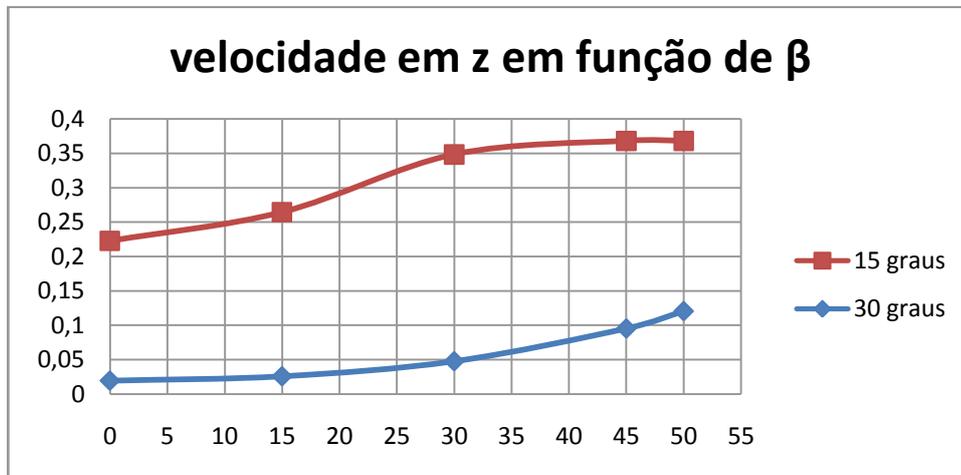
Fonte – o autor

Figura 54 - Empuxo total em yaw



Fonte – o autor

Figura 55 - Velocidade residual em z



Fonte – o autor

5. Análise dos Resultados

Os resultados obtidos, no geral, condizem com aqueles esperados, já que é possível prever que aumentando β sem alterar μ poderia se ter um erro maior em *sway* e diminuir o empuxo requerido em *heave*, e que a inclusão de um ângulo nos propulsores T1 e T2 resultariam em um *yaw* indesejável caso fossem acionados para a manobra de *sway*. Mas é importante ressaltar que este trabalho é apenas um passo inicial e uma demonstração e uma ferramenta desenvolvida para a simulação de ROVs. Na tabela 8 são encontrados os valores numéricos para as variações em Beta, dos quais foram gerados os gráficos mostrados na seção 5.2.1. Já na tabela 9 os valores que geraram as tabelas da seção 5.2.2.

Foi observado que para os propulsores T1 e T2 com ângulo μ maior que zero, a matriz T que considera o acionamento destes para o movimento em y (*sway*) causa um efeito indesejável no movimento de *yaw* que adquire um diâmetro, ou seja, o ROV se torna incapaz de girar em torno do eixo z sem nenhum movimento em x e y, devido a força que é gerada pelo sistema na direção y do ROV (referencial móvel), que acaba causando um giro em torno de uma circunferência, e não de um ponto.

Já nos movimentos de *sway*, fica claro que utilizar os propulsores traseiros para efetuar ou colaborar com tal movimento se torna complicado, por estarem diretamente ligados ao movimento de *yaw*. Configurações diferentes de propulsores neste ROV podem ser analisadas, podendo assim ser cabível o acionamento destes propulsores para efetuar movimentos no plano horizontal. Uma configuração possível é adicionando mais dois propulsores opostos à T1 e T2, que assim equilibrem as forças indesejáveis.

Fica claro que o movimento em y não é um ponto forte no RRCROV, sendo extremamente difícil configurar os propulsores T3 e T4 para que não ocorra *roll*, sem, no entanto perder a capacidade de executar a manobra de *heave*. Mas com uma variação de angulação, e com uma perda de eficiência no movimento de *heave* foi possível diminuir em 31% o erro obtido no movimento em y. Logo, a otimização deste parâmetro dependeria principalmente dos requisitos de projeto, se o movimento em *sway* é mais importante que a eficiência em *heave*, e a potência dos propulsores para que possa ser compensada a ineficiência no movimento na vertical. No APÊNDICE C – Movimentos Indesejáveis são ilustrados os movimentos referidos anteriormente. Algo possível de se pensar é na utilização

de propulsores móveis para T3 e T4, ou seja, para o movimento de *heave* utilizando o ângulo com maior eficiência, já para o movimento de *sway* o ângulo com menor erro. É previsível que esses ângulos seriam respectivamente 0 e 90 graus. Tecnicamente deveria ser feito um estudo sobre a viabilidade e a confiabilidade de tal sistema, já que quanto mais acionadores, maior a probabilidade de ocorrer alguma falha.

Portanto, seria possível ainda a análise dos resultados com a utilização de um controlador, e com configurações diferentes de propulsão, com propulsores com posicionamento variável, ou com mais propulsores. Tais estudos fogem dos objetivos deste trabalho, que eram de gerar um estudo do movimento de um ROV, utilizando uma ferramenta de simulação.

Tabela 8 - Resultados variando apenas Beta

ângulo β	erro rel x %	erro rel y %	velocidade alcançada movel y m/s	empuxo total y N	erro rel z %	empuxo total z N
-70	1,41	18,80	0,5426	74,40	0,996	76,00
-60	1,41	26,89	0,5325	77,80	0,996	51,99
-50	1,41	42,35	0,5153	82,62	0,996	42,93
-45	1,41	49,64	0,5024	85,25	0,996	36,77
-30	1,41	74,14	0,4329	92,33	0,996	31,87
-15	1,41	69,97	0,2662	78,66	0,996	28,57
15	1,41	69,96	0,2662	78,66	0,996	28,57
30	1,41	74,14	0,4329	92,33	0,996	31,87
45	1,41	49,64	0,5024	85,25	0,996	36,77
50	1,41	42,35	0,5153	82,62	0,996	40,44
60	1,41	26,89	0,5325	77,80	0,996	51,99
70	1,41	18,80	0,5426	74,40	0,996	76,00

Fonte - o autor

Tabela 9 - Resultados numéricos para variações em Beta e Mi.

ângulo β	ângulo μ	erro rel y (velocidade yaw) rad/s	diametro do giro m	velocidade alcançada movel m/s	yaw	diametro do giro m	empuxo total N	velocidade em z m/s
0	15	0,90	0,81	0,27		1,34	32,98	0,22
30	15	0,68	1,17	0,40		0,52	74,03	0,35
45	15	0,43	2,15	0,47		0,24	90,93	0,37
50	15	0,35	2,74	0,49		0,18	95,02	0,37
0	30	0,45	2,68	0,49		7,16	6,23	0,02
15	30	0,45	2,68	0,49		4,70	13,01	0,03
30	30	0,44	2,67	0,49		2,65	26,77	0,05
45	30	0,41	2,65	0,50		1,34	53,95	0,10
50	30	0,39	2,76	0,50		1,00	68,27	0,12

Fonte - o autor

6. Conclusões e Trabalhos futuros

A ferramenta de simulação foi indispensável para a realização deste trabalho, já que de outra forma seria muito mais difícil obter resultados de configurações diferenciadas para os propulsores. A parte 3D é útil no intuito de facilitar a visualização do que exatamente está acontecendo com o ROV, agilizando o processo de descobertas de eventuais erros na modelagem ou parâmetros utilizados, como os parâmetros de resistência que se mostraram inferiores.

Esta ferramenta tem a capacidade de simular vários tipos de ROVs, bastando apenas a alteração dos parâmetros e da matriz de acoplamento. Isso pode facilitar o desenvolvimento e a pesquisa de novas configurações e até mesmo de veículos inovadores que possam ajudar a indústria de veículos subaquáticos. É uma possibilidade o desenvolvimento de ROVs menores, com capacidades superiores das que existem atualmente, para o barateamento de operações e até mesmo de material para a construção dos mesmos.

O SIMULINK por sua vez se mostra uma ferramenta com capacidade de adaptações diversas, podendo inclusive ser implementado no modelo atual um controlador, capaz de perceber movimentos indesejáveis como os conseguidos no modelo de malha aberta deste trabalho, no sentido de ajustar os empuxos despejados nos propulsores para que a trajetória seja corrigida, podendo inclusive ser implementadas correntes marítimas no ambiente de operação, os efeitos do umbilical sobre o ROV, atuadores, e uma série de melhorias para que o simulador possa se tornar cada vez mais completa, e modelando com mais precisão a realidade do trabalho de um ROV. As melhorias podem ser visualizadas no ambiente virtual, possibilitando assim o desenvolvimento de um simulador de treinamento para pilotos.

Sobre os estudos feitos, o ROV em questão mostrou, pela sua configuração e número de propulsores, deficiente em certos aspectos da dinâmica, como fica claro no movimento de *sway*. Também foi possível identificar como a simulação pode ser útil para a visualização das reações e forças que surgem dos comandos enviados. Da mesma forma, é possível em outros trabalhos o uso da mesma ferramenta para a adição, por exemplo, de mais propulsores, e o estudo disso nos movimentos e eventuais melhorias para a dinâmica deste ROV.

REFERÊNCIAS

MOLLAND, Anthony F.; TURNOCK, Stephen R.; HUDSON, DominicA.. **Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation Of Ship Propulsive Power**. New York: Cambridge University Press, 2011.

CARLTON, John. **Marine Propellers and Propulsion**. 2. ed. Burlington: Butterworth-heinemann, 2007.

CHRIST, Robert D.; WERNLI, Robert L.. **The ROV Manual: A User Guide for Remotely Operated Vehicles**. 2. ed. Waltham: Butterworth-heinemann, 2014.

CHIN, Cheng S.; **Computer-Aided Control Systems Design: Pratical Applications Using Matlab and Simulink**; Boca Raton, FL; CRC Press, 2013.

FOSSSEN, Thor I.; **Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control**; West Sussex, UK; John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

ANTONELLI, G.; **Underwater Robots - Motion and Force Control of Vehicle-manipulator Systems**; 2. ed.; Berlim, AL; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

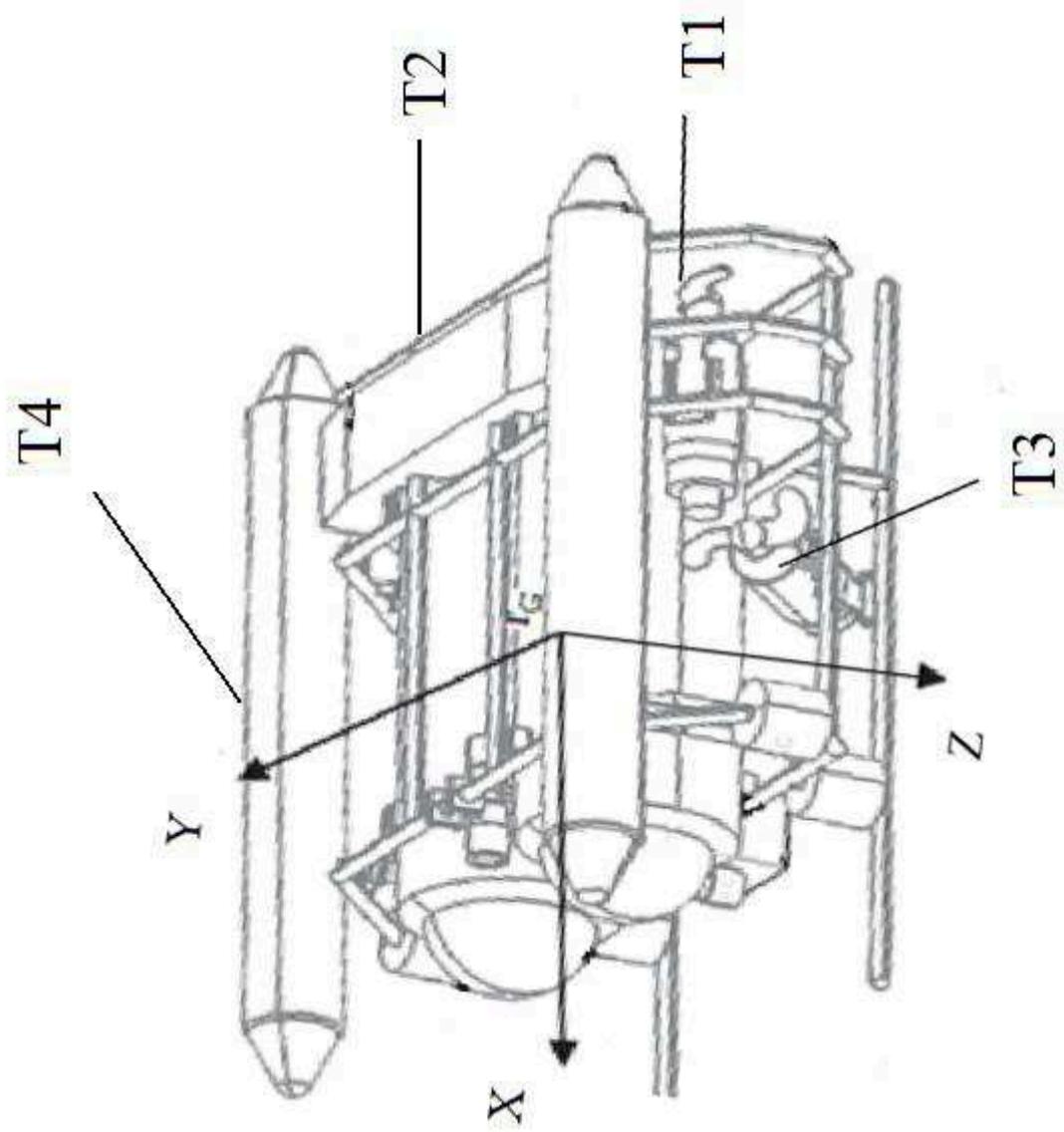
GOULART, Christiano; Modelagem, **Simulação E Controle De Um Veículo Submarino De Operação Remota**; Rio de Janeiro RJ; UFRJ, 2007.

ROV COMMITTEE OF MARINE TECHNOLOGY SOCIETY (ROVCMTS); **ROVs – A Breief History**; Disponível em: http://www.rov.org/rov_history.cfm.

SEATREPID; **Equipment: ROVs**; Disponível em: <http://www.seatrepid.com/equipment/rovs>.

FULTON-BENNETT, Kim; **MBARI's New Robot Submarine Completes First Research Dives**; Disponível em: <http://www.mbari.org/news/homepage/2009/rov-ricketts.html>

APÊNDICE A – Propulsores RRCROV



APÊNDICE C – Movimentos Indesejáveis

Movimento em sway com heave indesejável.



Movimento de yaw com velocidade indesejável em sway



Movimento em sway com yaw indesejável.

