UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JÚLIO CEZAR BERGAMASCHI BUELONI

ESTUDO DA CINEMÁTICA DE UM MODELO PROPOSTO DE ROV COM SEIS GRAUS DE LIBERDADE

VITÓRIA
2016

JÚLIO CEZAR BERGAMASCHI BUELONI

ESTUDO DA CINEMÁTICA DE UM MODELO PROPOSTO DE ROV COM SEIS GRAUS DE LIBERDADE

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Msc. Rafhael Milanezi de Andrade.

VITÓRIA

2016

JÚLIO CEZAR BERGAMASCHI BUELONI

ESTUDO DA CINEMÁTICA DE UM MODELO PROPOSTO DE ROV COM SEIS GRAUS DE LIBERDADE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Apresentado em 11 de Julho de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

____

Prof. Msc. Rafhael Milanezi de Andrade
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

____

Prof. Msc. Matheus Daros Pagani.
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

____

Marcos Tesch Cavicchia, Eng Mecânico
Aratu Equipamentos de Pesquisa
Examinador

"No reino da observação científica, a sorte
só é concedida aos que estão preparados."

Louis Pasteur

RESUMO:

ROVs são veículos subaquáticos controlados que podem ser remotamente utilizados para aplicações de observações e de intervenções em ambientes aquáticos, podendo substituir um mergulhador. Os ROVs são muito aplicados em inspeções de válvulas e risers, mapeamento e observar a vida marinha e apresentam elevados custos, o que dificulta sua aquisição. O presente trabalho apresenta um modelo cinemático para um ROV não manipulador de baixo custo. O veículo submarino é concebido em tubulação de PVC em uma plataforma *open*, visando o desenvolvimento de pesquisas com baixo custo. É apresentada a cinemática direta do dispositivo, avaliando a contribuição dos propulsores para os graus de liberdade do ROV.

Palavras chaves: ROV, cinemática, protótipo digital, veículo subaquático.

ABSTRACT:

ROVs are remotely controlled underwater vehicles used in applications of observations and interventions in aquatic environments, possibly replacing a diver. They are often used for inspections of valves and risers, mapping and to observe marine life and have high costs, making them difficult to be acquired. This paper presents a kinematic model for an inexpensive ROV without manipulator. The underwater vehicle is designed in PVC pipe in an open platform for the development and research with low cost. It is present the forward kinematics of the vehicle, evaluating the contribution of the propellers to the degrees of freedom of the ROV.

Key words: ROV, kinematics, digital prototype, underwater vehicle.

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

Os ROV são veículos tele-operados equipados normalmente com vários propulsores, utilizam um cabo, denominado umbilical, responsável pela troca de informações entre o veículo e a estação de operação (Wasserman et. al., 2003)

O veículo remotamente operado (ROV) permite que o operador fique em um ambiente confortável enquanto o veículo executa o trabalho. O ROV é controlado por um cabo umbilical (teather) que interliga os sinais da sala de operação ao controlador do veículo, enviando as informações das variáveis à sala. Em modelos mais complexos, são utilizados sistemas de gerenciamento de cabos, denominados TMS (Tether Managemente System). (Magalhães, 2007)

Os veículos são equipados com câmeras, sensores e manipuladores capazes de realizar inspeções e outras atividades em ambientes insalubres para a atividade humana. Entretanto, no Brasil sua utilização é restrita devido ao elevado custo de aquisição.

O veículo ROV desenvolvido nesse trabalho é denominado LCROV (*Low Cost Remote operated vehicle, Figura 1),* concebido com materiais de baixo custo como o PVC. O dispositivo conta com sensores para realizar a aquisição de dados dos ambientes submarinos.

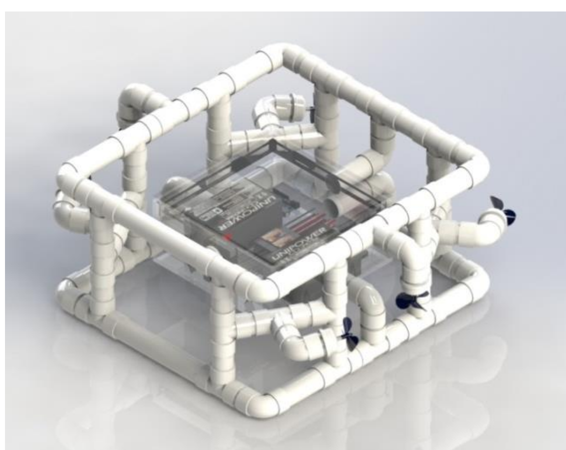

Figura 1- Modelo Proposto
Fonte: Própria

1.1 MOTIVAÇÃO

Atualmente a necessidade de energia encontra-se em crescimento, e se tem como principal fonte energética os combustíveis fósseis. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2015, feito pela ANP, o consumo de petróleo vem aumentando com o decorrer dos anos. Vale ressaltar que uma boa parte desse petróleo se encontra em reservas submarinas, cerca de 75% (Hernandez, 2012). Para a exploração são necessárias ferramentas especializadas, dentre elas os ROV.

Como os ROV mais simples custam pelo menos 6 mil dólares (Wernlin e Christ, 2009), muitos pesquisadores tem despendido esforços para desenvolver ROV mais acessíveis. Nesse cenário, surgiu o primeiro projeto *open*, denominado *open*ROV, criado por David Lang e Erick Stackpole.

A partir desse projeto, surgiu a ideia de criar uma plataforma *open* para estudos e desenvolvimentos de pesquisas no Laboratório de Mecatrônica (LabGuará) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), visando difundir o conhecimento na área de robótica subaquática. O projeto prevê o desenvolvimento de um robô capaz de observar e aquisitar dados debaixo d'água, servindo de plataforma aberta para desenvolvimento de pesquisas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é desenvolver o protótipo digital e o modelo cinemático de um *openROV* de baixo custo feito com materiais acessíveis, denominado de LCROV. A controlabilidade dos modelos propostos é avaliada através de um estudo cinemático.

Nesse projeto são propostos dois modelos construtivos e avaliados os graus de liberdade. Essa avaliação tem como objetivo verificar os movimentos alcançados pelo ROV e facilitar seu controle.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver o protótipo digital de um ROV de baixo custo;

- Avaliar a controlabilidade dos modelos desenvolvidos através do estudo cinemático.
- Propor protótipos de fácil fabricação de um OCROV baseado nos Open ROV;
- Desenvolver o estudo da cinemática desses protótipos propostos.

2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Nos últimos séculos os veículos submersíveis foram desenvolvidos e seus sistemas de propulsão aprimorados, passando desde sistemas em que o homem era responsável pela força a sistemas em que o homem foi substituído pela máquina. (Magalhães, 2007)

O primeiro veículo submersível, Figura 2, foi datado em 1578 pelo inglês Willian Bourne quando escreveu sobre um barco simples em que possuía um sistema que variava o peso total da embarcação, possibilitando que o mesmo ficasse submerso. O princípio descrito propunha uma embarcação com casco duplo sendo o casco externo com pequenas aberturas. Estas aberturas eram reguladas por bolsas de couro em que se movimentava através de parafusos que regulavam a quantidade de água nas bolsas.

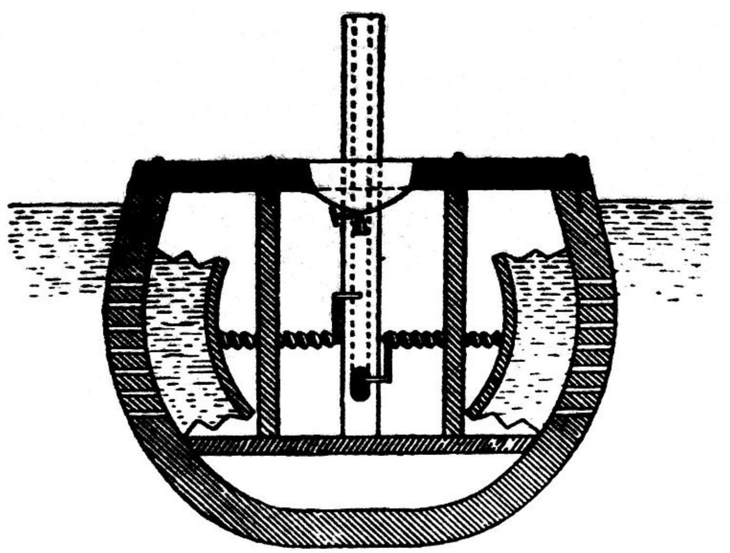

Figura 2 - Primeiro projeto de submarino.

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/William_Bourne_(mathematician)

Com o avanço da tecnologia e a exploração de regiões mais profundas, principalmente na área de petróleo e pesquisa, cresceu a necessidade de desenvolver equipamentos capazes de realizar os trabalhos sem oferecer risco homem. Estes equipamentos abrangem uma vasta gama de veículos, dentre eles o ROV. (Hover, 2002)

O veículo é utilizado para supervisionar e observar o fundo oceânico, auxiliando na montagem e manutenção de equipamentos e no estudo da vida marinha. (Adaptado de Jimenez, 2004 e Kim et. al. 1999).

A utilização do ROVs começou na década de 50 através do francês Dimitri Rebikoff com a criação do POODLE. Sua primeira utilização foi para o estudo de arqueologias marinhas (Christ e Wernli, 2014). Devido a ser uma atividade de pouca relevância financeira, os ROVs não receberam grande importância na época.

Os primeiros avanços ocorreram na década de 60, em que a Marinha Norte Americana criou o CURV, um veículo de exploração submarina controlado a cabos. O CURV tinha a função inicial de recuperar torpedos, desenvolvidos em Pasadena, no fundo do mar da Califórnia.

Em 1966 o ROV CURV, Figura 3, recuperou uma Bomba Atômica perdida na costa de Pelomares, na Costa do Sol, Espanha, na qual o veículo teve que submergir a 2850 pés, aproximadamente 870 metros de lâmina d’água.

Em sua terceira versão, o CURV III foi utilizado para resgatar o submarino Pisces III a 475 metros já que o submarino encontrava problemas no tranque de flutuação.

Figura 3 - ROV CURV III

Fonte: www.sonistics.com

A popularização do ROV ocorreu na década de 90. A indústria offshore perfurava poços de grandes profundidades, assim sendo obrigatório o uso de ROVs para realizar o acompanhamento dos serviços.

Com o avanço das tecnologias foram desenvolvidos ROVs para grandes profundidades. Muito desses equipamentos foram desenvolvidos para atividades ligadas a ciências. Como exemplo o Tiburon, Figura 4, que foi desenvolvido pelo Monterey Bay Aquarium (MBARI) localizado nos USA. O Tiburon auxiliou no trabalho de observação nas profundezas do oceano por períodos de tempo prolongados (Magalhães, 2007).

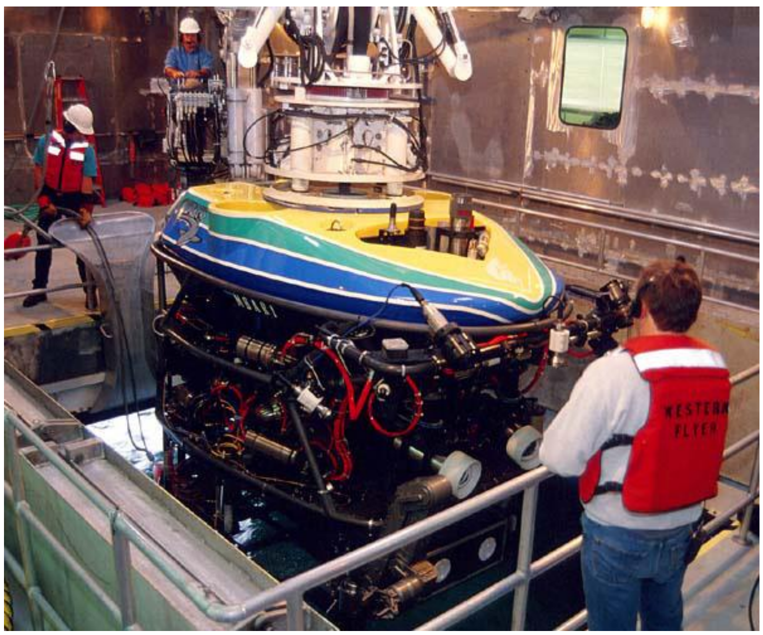

Figura 4- ROV Tiburon (MBARI)
Fonte: oceanexplorer.noaa.gov

Em 1995 o ROV KAIKO, Figura 5, desenvolvido no Japão, conseguiu atingir a maior profundida nas Fossas Marianas, atingindo 10911,4 metros. As fossas Marianas ficam localizadas no oceano Pacífico. O local da descida é conhecido como Challenger Deep considerado o local mais profundo em todos os oceanos.

Figura 5 - ROV Kaiko
Fonte: www-odp.tamu.edu

De acordo com Jimenez (2004) os veículos submersíveis podem ser classificados de uma forma generalizada como:

a) Submersíveis Tripulados:

- Submersíveis Militares;
- Submersíveis de Pesquisa;

b) Submersíveis Não Tripulados:

- Veículos rebocados;
- Veículos Operados Remotamente – ROV (remotely operated vehicle)
- Veículos Submersíveis Semi – Autônomo – UVV
- Veículos Submersíveis Autônomos – AUV.

Nesse trabalho é abordado sobre os Veículos Operados Remotamente – ROV.

2.1 CLASSES DE ROV

De acordo com a Maritme Technology Society a atual classificação é de acordo com o tipo de trabalho e profundidade que o mesmo alcança.

Micro – Tipicamente, ROVs da Classe Micro são pequenos em tamanho e peso. A classe Micro pode pesar menos de 3 kg. São utilizados como uma alternativa a um mergulhador, especificamente em locais de difícil acesso, tais como um cano de esgoto, oleoduto ou pequena cavidade.

Mini – Os ROVs da classe Mini pesam cerca de 15 kg e são utilizados como uma alternativa ao mergulhador. Uma pessoa pode ser capaz de transportar o ROV completo em um pequeno barco, implantá-lo e concluir o trabalho sem ajuda externa. Ocasionalmente tanto Micro e Mini são referidos como classe "globo ocular" para diferenciá-los dos ROVs que podem ser capazes de executar tarefas de intervenção.

General - Normalmente possuem menos de 5 HP de potência (propulsão), pequenos manipuladores de dedo e garras. Estes ROVS podem ser capazes de transportar uma unidade de sonar e geralmente são utilizados em aplicações de iluminação. Tipicamente, a profundidade máxima de trabalho é inferior a 1.000 metros, embora este tenha sido desenvolvido para ir a profundidades de 7.000 m.

Light Workclass – Possuem menos de 50 hp de potência (propulsão). Estes ROVs podem ser capazes de transportar alguns manipuladores. Seu chassi pode ser feito de polímeros tais como polietileno, em vez de ligas de aço inoxidável ou alumínio convencional. Eles atuam tipicamente a uma profundidade máxima de 2000 m.

Heavy Workclass – Dispõem de menos de 220 hp de potência (propulsão), com uma capacidade de transportar pelo menos dois manipuladores. Trabalham em profundidades de até 3500 m.

Trenching/Burial – Possuem entre 200 e 500 hp de potência de propulsão. Trabalham em profundidades de até 6000 m em alguns casos. Possuem esteiras para locomoção no solo marinho.

Autonomous underwater vehicle (AUV) – É um robô que navega debaixo d'água sem a necessidade de um operador. AUVs são parte de um grupo maior de sistemas submarinos conhecidos como veículos submarinos não tripulados, uma classificação que inclui veículos subaquáticos não-autônomos operados remotamente.

Tabela 1- Classificação ROV

Classe (Atuadores)	**Trabalho (Capacidade de Submersão)**	**Potência (kW)**
LCROV (Elétrico)	Observação (<100 metros)	< 3,75
Pequenos (Elétrico)	Observação (< 300 metros)	< 7,5
Grandes (Elétrico)	Observação/Trabalho Leve (< 3.000 metros)	< 15
Ultra-Profundos (Elétrico)	Observação/Coleta de Dados (>3.000 metros)	< 18,75
Médios (Elétrico/Hidráulico)	Trabalho Mediano (+-Pesado) (<2.000 metros)	< 75
Grandes (Elétrico/Hidráulico)	Trabalho Pesado/Grande Carga Extra (<3.000 metros)	< 225
Ultra-Profundos (Elétrico/Hidráulico)	Trabalho Pesado/Grande Carga Extra (>3.000 metros)	< 90

Fonte: Magalhães, 2007, citando Marine Technology Society.

2.2 SUBSISTEMAS DE UM ROV

Os veículos submersíveis são compostos por alguns subsistemas. Como exemplo é apresentado o ROV TROJAN (Figura 6), citado por Magalhães (2007), no qual as posições de seus principais componentes estão listadas abaixo.

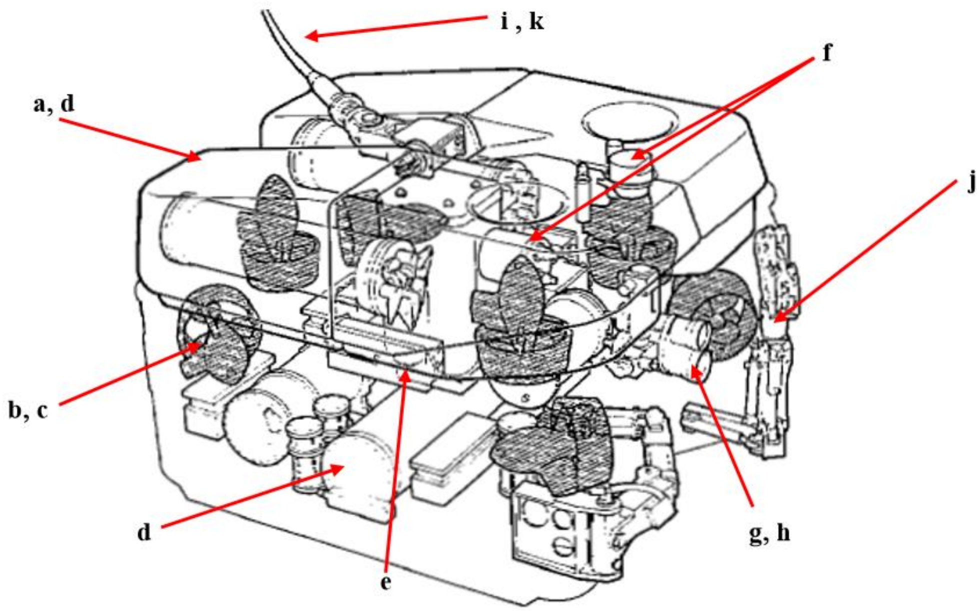

Figura 6 - ROV TROJAN e seus subsistemas
Fonte: Magalhães, 2007

- Subsistema Estrutural e de vaso de pressão (a): É responsável pela estrutura do ROV, é ele que suporta todos os esforços externo realizado pelo ambiente. O projeto deve seguir a NR 13 que é relativo a vasos de pressão.

- Subsistema de vetorização de empuxo ou direcionamento (b) e Subsistema de Propulsão (c): É o sistema que realiza a movimentação do veículo e é definido o tipo de hélice além do número de pás. A propulsão pode ser elétrica ou hidráulica.

- Subsistema de submersão e emersão (d): A força do campo gravitacional atua sempre no centro de gravidade do veículo e a força de empuxo atua sempre no centro de empuxo do veículo. O subsistema é composto por flutuadores e por lastros.

  Para a flutuação do ROV normalmente são adotados dois tipos a flutuação neutra e a positiva do veículo.

- Subsistema de controle (e): O subsistema de controle é necessário para o desenvolvimento de um sistema confiável, capaz de lidar com as não linearidades do sistema.

- Subsistema de transdutores e sensores (f): Os transdutores utilizados no ROV variam de acordo com sua aplicabilidade, sendo os internos para monitoramento de seus sistemas e os externos para aquisição de dados do ambiente.
- Subsistema de visão subaquática (g): É normalmente composto por câmeras podendo ser coloridas ou não. As câmeras são interligada aos computadores enviando as imagens obtidas.
- Subsistema de iluminação (h): É composto por lâmpadas de potência variável e compatível com o sistema de potência do ROV. É um sistema que atua de forma independente.
- Subsistema de cabo umbilical (i): É o sistema que interliga o operador ao ROV. É composto de cabo de fibra ótica e um cabo de potência. É nesse subsistema que transmite todas as informações entre o ROV e o operador.
- Subsistema de carga extra (j): O sistema de carga extra inclui se o projeto terá algum sistema de trabalho (Ferramentas, manipuladores, etc), sistema de sensoriamento e um sistema de potência. A inclusão dessas cargas altera a dimensão e o peso do veículo.
- Subsistema de energia e potência (k): A energia utilizada por um ROV provem do cabo umbilical, e assim é distribuído para os demais subsistemas. Apesar de ser uma prática comum, o uso tem desvantagens como alto custo de cabos e alta tensão.

A Figura 7 representa o esquema de interação entre o operador e o ROV.

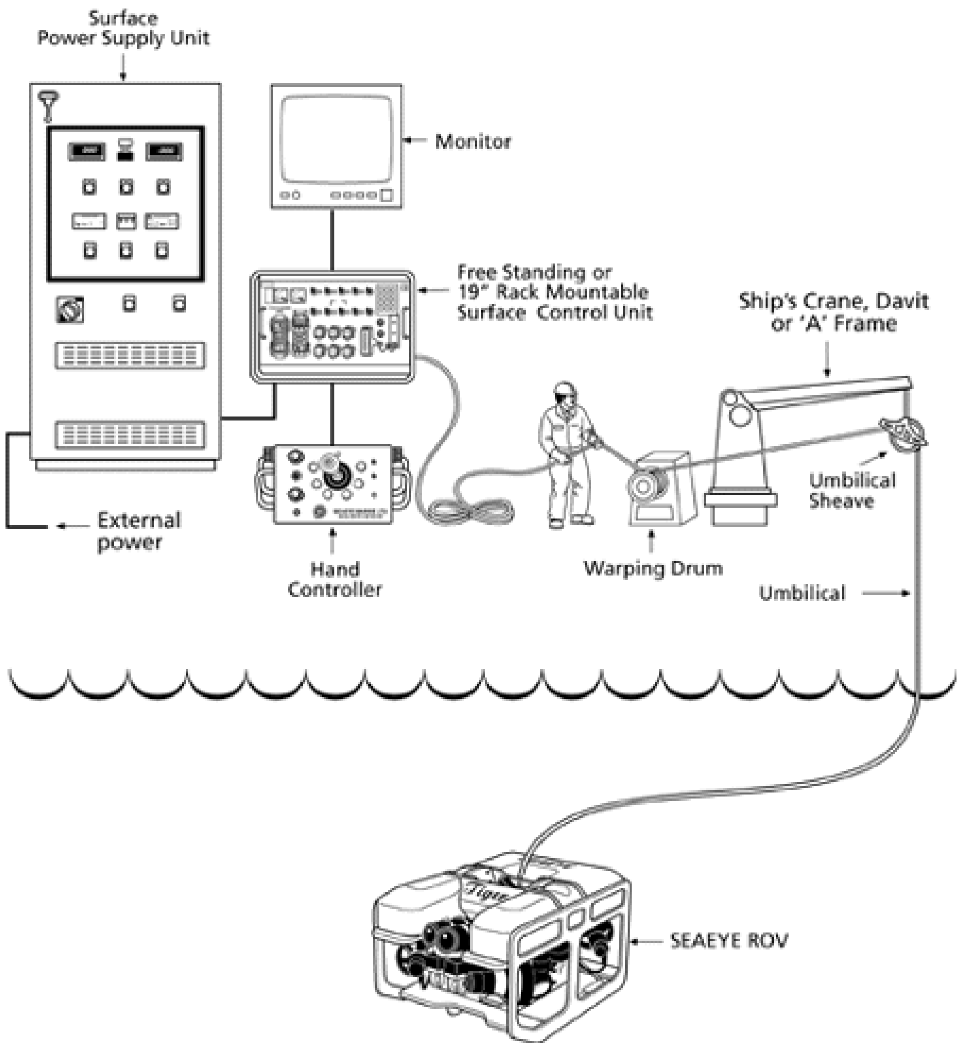

Figura 7 – Esquema de Conexão Operador Veículo
Fonte: http://www.seaeye.com/rovs.html

2.3 ROV PARA OBSERVAÇÃO – OCROV

Os ROVs de observação surgiram com a necessidade de se obter as condições visuais do ambiente, já que os ROVs de trabalho possuem um custo muito elevado. Os modelos são utilizados em manutenção offshore, exploração submarina, estudo da biologia marinha, arqueologia entre outros. (adap. Marine Technology Society)

Na Figura 8, são representados diversos OCROVs, sendo os menores com função de observação e os maiores portando sensores e câmeras para a operação.

Figura 8 - Modelos OCROV
Fonte: Wernlin e Christ, 2009

Os OCROVs são empregados em diferentes tipos de serviços, de acordo com Wernlin e Christ 2009, que são:

Mapeamentos: Mesmo os menores veículos normalmente são equipados com sensor de acústica, giroscópios com alta precisão para posicionamento e sensores de capitação. A Figura 9 apresenta um ROV usado para seguir e mapear o oleoduto juntamente com o leito marinho ao seu redor.

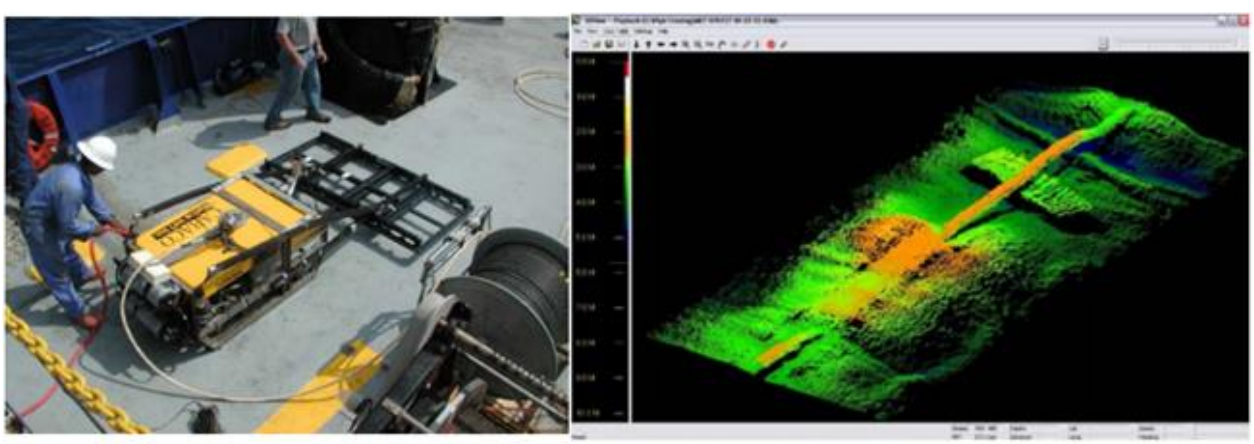

Figura 9 - ROV de mapeamento junto com o resultado computador.
Fonte: Wernlin e Christ, 2009

Inspeção: Devido à necessidade, surgiram OCROVs para inspeções em cascos de navios, risers, válvulas, entre outros equipamentos. Para executar essas tarefas, o ROV é equipado com sensores de ultrassom, para detectar defeitos de trincas internas, e sensores para detecção de partículas magnéticas usados para detecção de problemas superficiais de descontinuidade do material. Podem ser equipamentos também com sensores de radiação, de temperatura e outros.

Intervenção: Normalmente é empregado em pequenas intervenções, já que o custo de uma intervenção com um ROV WORKCLASS é muito superior. O OCROV para ser empregado em intervenções deve possuir uma ferramenta adequada ao serviço a ser executado. Normalmente são empregados pequenos manipuladores, escovas giratórias, serras e coletores.

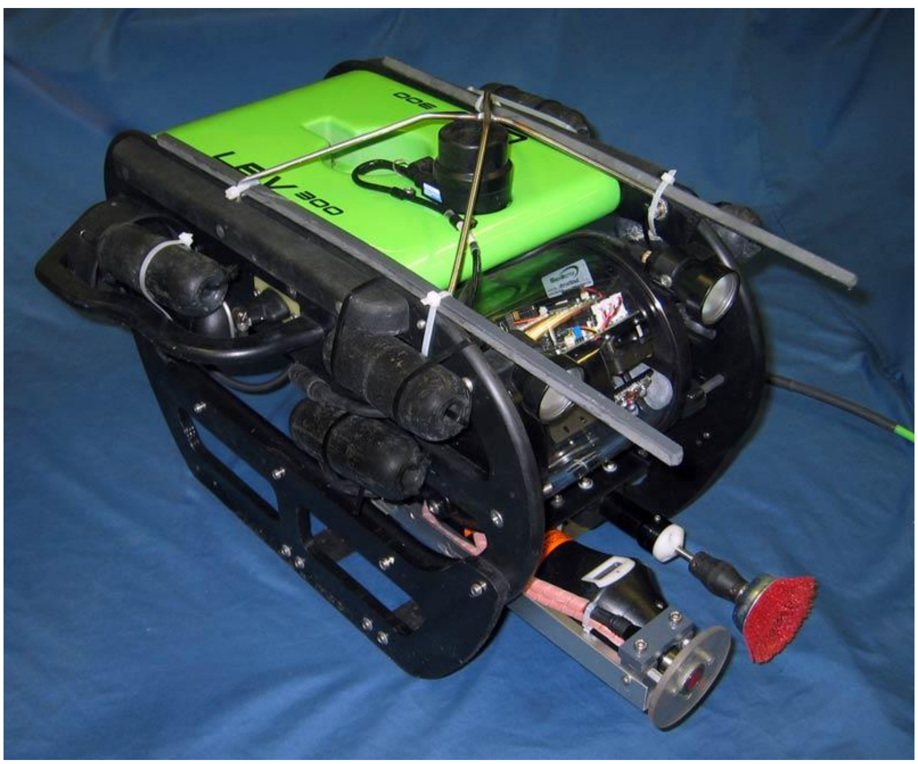

Figura 10 - OCROV com sensor de ultrassom e escova rotatória
Fonte: http://www.underwaterconsultants.com/

Sensor Móvel: Utilizado para alocar um sensor temporário necessário à operação, como câmeras de alta resolução, sensores de alta precisão para navegação e lasers para captação e formação de imagens tridimensionais.

Figura 11 - OCROV portando sensor ultrassônico de alta precisão.
Fonte: Wernlin e Christ, 2009

2.4 CENTRO DE GRAVIDADE E CENTRO DE EMPUXO

O estudo do centro de gravidade (CG) e do centro de empuxo é crítico no projeto do ROV. O centro de gravidade é o centro de massa do ROV, ou seja é nele que atua a forças gravitacionais. O centro de empuxo (CE) de um corpo é o local onde a força de empuxo atua no ROV e fica localizado no centro geométrico.

Os veículos submersíveis devem ser projetados de forma a garantir que o CG esteja sempre abaixo do CE. Isso permite a formação de um conjugue de força que tende a acertar o veículo e estabiliza-lo. A inversão das posições do CG e do CE provoca um binário de forças que tende a girar o veículo. Para evitar essa condição é utilizado lastro na embarcação. (Magalhães, 2007)

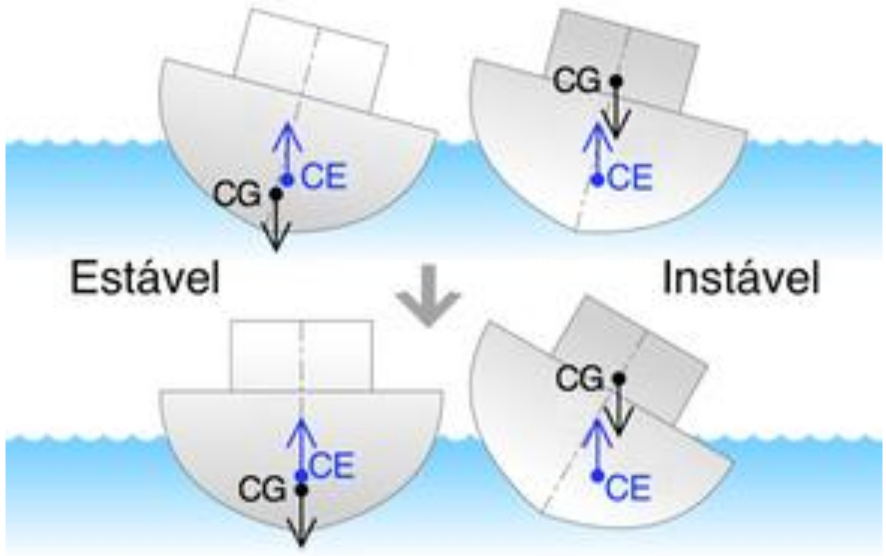

Figura 12 - Condição de estabilidade

Fonte: masimoes.pro.br

2.5 CINEMÁTICA DIRETA

A cinemática é a parte da física que estuda os movimentos, relacionando posição, velocidade e aceleração, desprezando as forças de ação e reação envolvidas. (McKerrow, 1991).

O vetor $\overrightarrow{r_0}$ define a posição do ROV em relação ao sistema inicial através de uma matriz de transição. A matriz de translação é uma matriz que relaciona as posições X, Y e Z entre os eixos do sistema Inercial e do sistema Móvel, sendo assim essa matriz translada a origem do sistema Inercial (O_o) para o sistema Móvel (O_R). Os ângulos roll (ϕ, de rolagem), pitch (θ, de direção do nariz) e yaw (ψ, de guinada/mergulho) fornecem a direção em relação ao sistema inicial. O ROV possui um sistema dinâmico sendo um corpo rígido de 6 graus de liberdade, conforme a Figura 13.

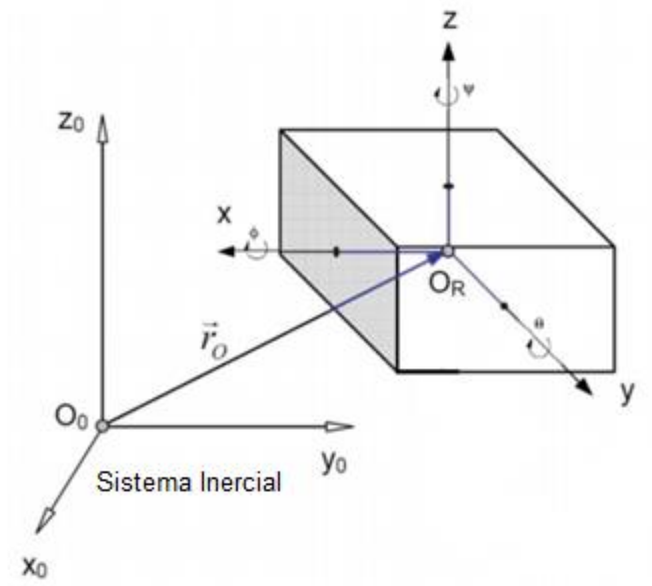

Figura 13 - Orientação ROV, vetor posição $\overrightarrow{r_0}$ e orientação *ϕ, θ, ψ.*

Fonte: Adaptado de Hoang, 2011

O modelamento cinemático descreve basicamente a função da velocidade e qual propulsor será ligado para dar a direção desejada.

De acordo com Pinto (2006), um bom modelo cinemático é o primeiro passo para uma estabilidade adequada dos ROV´s, já que a caracterização matemática do sistema real permite discussões sobre estabilidade e controlabilidade, assim como outras asserções sobre o comportamento do ROV nos domínios do tempo e da frequência.

Os modelos cinemáticos comuns são cinemática direta e inversa:

a) Cinemática direta: A posição e a orientação final é encontrada da posição e ângulos inicias.
b) Cinemática inversa: Dada a posição final, é possível encontrar os ângulos necessários.

Este trabalho utiliza apenas os conceitos da cinemática direta para desenvolvimento do projeto.

2.6 GRAUS DE LIBERDADE

Grau de liberdade é a quantidade de rotação e translação que um corpo rígido pode realizar de formas independentes. Um corpo rígido no espaço possui 6 graus de liberdades sendo 3 para rotação e 3 para translação. A Figura 14 mostra a representação espacial de graus de liberdade em um corpo rígido genérico.

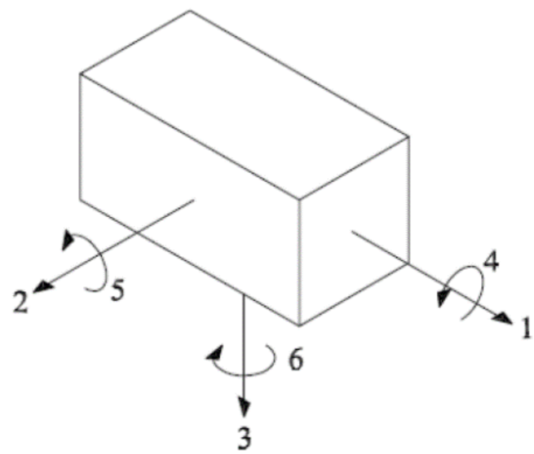

Figura 14 - Graus de Liberdade.

Fonte: Salles, 2011

Por definição o ROV opera submersível, o que o deixa livre para se movimentar em qualquer direção e em qualquer rotação. Sendo assim o corpo possui possibilidades de movimentação tais como movimento de avanço e ré, guinadas a direita e a esquerda, movimentação vertical de submersão e emersão, além dos deslocamentos laterais quando atuado o propulsor superior.

3 CINEMÁTICA DO ROV

Nesse capítulo são abordadas as definições do sistema de coordenada e em seguida é apresentada a cinemática do ROV.

3.1 SISTEMA DE COORDENADAS

Para representação da cinemática de um ROV são adotados dois sistemas de referências em coordenadas cartesianas. O primeiro é o sistema de coordenadas Inerciais, denotados de *XYZ*, este é fixo em relação à terra ou navio de apoio à operação, e o sistema de coordenadas local ou móvel, denotado por $X_0Y_0Z_0$ e fixo veículo.

O sistema de coordenadas é convencionado de acordo com a regra da mão direita. O eixo X e X_0 são representados pelo dedo indicador, o dedo médio indicará o eixo Y e Y_0 e o polegar, apontado para o centro da terra, o eixo Z e Z_0. Para convenção da rotação o polegar deverá ser posicionado na direção do eixo, e a rotação dos demais dedos em direção ao centro da mão convencionará a rotação.

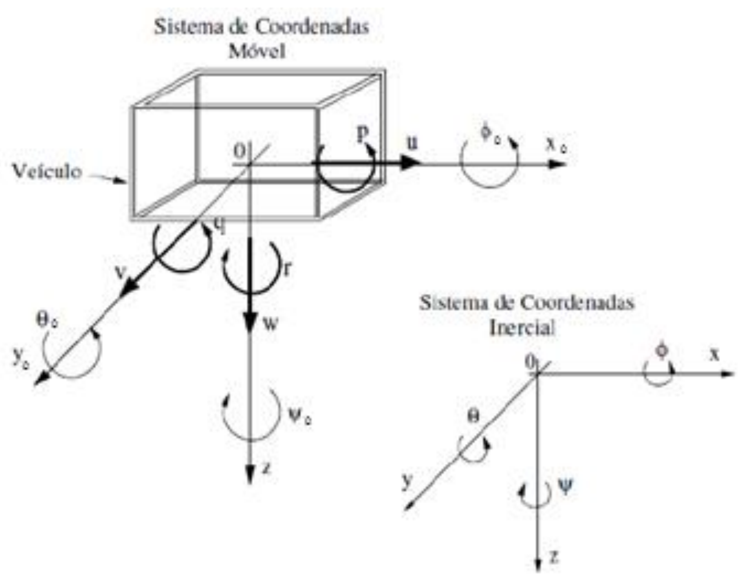

Figura 15-Sistema de coordenadas Moveis e Inerciais.

Fonte: Salles, 2011 (editado)

De acordo com Hernández (2012), a nomenclatura do sistema é:

Sistema de coordenadas Móveis (Fixo no veículo):

O_m: Origem do sistema de coordenada móvel

X_0: Eixo longitudinal, positivo e a frente

Y_0: Eixo Transversal, positivo a direita do veículo

Z_0: Eixo Vertical, positivo para baixo do veículo.

Sistema de coordenadas inercial ou estacionário:

O: Origem do sistema de coordenada inercial

X: Eixo longitudinal Absoluto

Y: Eixo transversal Absoluto

Z: Eixo vertical absoluto

Para as velocidades, tanto linear quanto angular, forças e os momentos que atuam no veículo são definidos em relação ao sistema de coordenada móvel. Porém para posição e rotação a análise é em relação ao sistema de coordenadas inercial. Desta forma as variáveis que descrevem a posição absoluta e os ângulos que descrevem a orientação do veículo são:

x: Posição Absoluta do Veículo no eixo Longitudinal X [m],

y: Posição Absoluta do Veículo no eixo Transversal Y [m],

z: Posição Absoluta do Veículo no eixo Vertical Z [m],

ϕ: ângulos de roll (ao redor do eixo x) [rad],

θ: ângulo de pitch (ao redor do eixo y) [rad],

ψ: ângulo de yaw (ao redor do eixo z) [rad],

3.2 VARIÁVEIS DE ESTADO

Variáveis de estado são definidas como o menor conjunto de variáveis que determina um sistema dinâmico. Se pelo menos *n* variáveis são necessárias para descrever um sistema dinâmico, então estas *n* variáveis formam um conjunto de variáveis de estado (Pinheiro, 2012).

Então agora é descrita a notação de posição e rotação do veículo em relação ao sistema de coordenadas inerciais (*O*) a origem para o veículo:

$$n = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}, dado\ n1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}\ e\ n2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \tag{1}$$

A variável *n1* representa a posição do veículo e a variável *n2* representa a orientação do veículo em relação ao sistema de coordenada inercial *O.*

Agora para encontrar a velocidade [*m/s*] e a velocidade angular [*rad/s*] deve-se realizar a derivada de *n1* e *n2*. Com base na notação anterior temos:

$$n = \begin{bmatrix} \dot{n_1} \\ \dot{n_2} \end{bmatrix}, dado\ n1 = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}\ e\ n2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \tag{2}$$

A velocidade linear e angular do sistema móvel de acordo com a convenção é:

$$\upsilon = \begin{bmatrix} \upsilon_1 \\ \upsilon_2 \end{bmatrix}, dado\ \upsilon_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}\ e\ \upsilon_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \tag{3}$$

Onde:

υ_1: Velocidade de translação do sistema móvel [m/s]

υ_2: Velocidade de rotação do sistema móvel [rad/s]

$[u, v, w]^T$: Componentes da velocidade de translação υ_1 na direção X_0, Y_0 e Z_0. [m/s]

$[p, q, r]^T$: Componentes da velocidade de rotação υ_2 na direção X_0, Y_0 e Z_0. [rad/s]

Conforme pode ser observado na Tabela 2, as variáveis para a resolução da cinemática, como posição, orientação, velocidade angular e velocidade linear estão relacionadas com os seis graus de liberdade do ROV.

Tabela 2 - Variáveis do veículo

G.L	Nome	Ref. Inercial		Ref. Móvel	
		Pos./ atit.	Veloc.	Pos./ atit	Veloc.
1	Surge	x	$\dot{x}$	x_m	u
2	Sway	y	$\dot{y}$	y_m	v
3	Heave	z	$\dot{z}$	z_m	w
4	Roll	ϕ	$\dot{\phi}$	ϕ_m	p
5	Pitch	θ	$\dot{\theta}$	θ_m	q
6	Yaw	ψ	$\dot{\psi}$	ψ_m	r

3.3 ÂNGULOS DE EULER

Os Ângulos de Euler definem a orientação de um corpo no espaço fornecendo suas rotações com relações aos eixos *x, y* e *z*. Para especificar a orientação do corpo fornecemos os ângulos de rotação no sentido anti-horário em relação a cada um dos eixos de coordenadas.

A convenção de Euler utilizada para descrever a orientação do veículo em relação a terra é z-y-x. Com isso o sistema de coordenadas móvel $O_oX_oY_oZ_o$ é primeiramente rotacionando em torno de Z, depois em torno de Y e por último em torno de X, tais rotações correspondem aos ângulos $\psi, \theta\ e\ \phi$, respectivamente. Assim é descrita a rotação do eixo $O_oX_oY_oZ_o$ em relação ao eixo OXYZ na equação abaixo:

$$T_1(n_2) = T_z^T(\psi)T_y^T(\theta)T_x^T(\phi) \tag{4}$$

Onde $T_z^T(\psi)$, $T_y^T(\theta)\ e\ T_x^T(\phi)$ corresponde as rotações com respeito aos eixos Z, Y e X respectivamente e são definidas por:

$$T_z^T(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$T_y^T(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$T_x^T(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \tag{7}$$

Agora, substituindo as matrizes 5, 6 e 7 na equação 4 se obtém matriz em que é possível definir a relação do sistema de coordenada móvel com o sistema de coordenada inercial. Assim realizando a substituição tem a matriz de transformação que é dada por:

$$T_1(n_2) = T_z^T(\psi)T_y^T(\theta)T_x^T(\phi) \tag{8}$$

$$T_1(n_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \mathrm{sixn}\,\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$T_1(n_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi \\ \cos\psi\sin\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi & -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\cos\phi \\ -\sin\theta & \sin\theta\cos\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \tag{10}$$

Nota-se que para a equação acima apresenta uma matriz de transformação linear de rotação nos eixos XYZ representada pelas rotações $T_z^T(\psi)$, $T_y^T(\theta), T_x^T(\phi)$. Isso é feito, para encontrar a relação do eixo Móvel com o eixo Inercial. Como pode se observar a ordem do produto matricial influencia diretamente no resultado, sendo assim a sequência final pode haver diversas combinações. Isso ocorre devido a operação matricial não ser uma operação comutativa.

Uma das principais propriedades obtida da matriz $T_1(n_2)$ é que a mesma é ortogonal, ou seja, sua transposta é igual a sua inversa. Assim temos:

$$T_1^T(n_2) = T_1^{-1}(n_2) \tag{11}$$

3.4 RELAÇÃO DE VELOCIDADES ANGULAR PARA O SISTEMA INERCIAL

As velocidades angulares n_2 se encontram referenciadas perante o sistema de coordenadas inerciais, e tais velocidades são avaliadas de acordo com a orientação do veículo que é dada por θ, ϕ e ψ.

Pode-se escrever a relação entre as velocidades de rotação, do veículo, do sistema móvel v_2 e $\dot{n}_2$ que é dada pela relação:

$$v_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + T_x(\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + T_x(\phi) T_y(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T_2^{-1}(n_2)\dot{n}_2 \qquad (12)$$

Manipulando a equação 12 obtém-se:

$$v_2 = T_2^{-1}(n_2)\dot{n}_2 \qquad (13)$$

Assim obtemos a relação final da transformada de velocidade de rotação do veículo em relação ao sistema de coordenada global, que é:

$$\dot{n}_2 = T_2(n_2) v_2 \qquad (14)$$

Assim, $T_2(n_2)$ é definido por:

$$T_2(n_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \dfrac{\sin\phi}{\cos\theta} & \dfrac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \qquad (15)$$

Observando a matriz (15) pode-se identificar que para os ângulos ϕ = 0° e θ = 0° a relação de velocidade será definida por uma matriz identidade, ou seja, a velocidade de rotação em ambos os referências será idêntica. Podemos também observar que para um ângulo de $\theta = \pm 90°$ ocorre uma singularidade que não será possível resolver utilizando o método de ângulos de Euler, assim é necessário utilizar outro modelo para a transformação, como o método dos Quatérnios. (Fossen et. al., 1994)

Com isso pode-se escrever tais transformações de seis graus de liberdade do sistema sendo:

$$\dot{n}_2 = T(n)v \tag{16}$$

Sendo T uma matriz de sexta dimensão, assim T é:

$$T(n) = \begin{bmatrix} T_1(n_2) & 0^{3x3} \\ 0^{3x3} & T_2(n_2) \end{bmatrix} \tag{17}$$

4 DINÂMICA DO ROV E SUAS EQUAÇÕES DE MOVIMENTOS

Nessa etapa do trabalho é abordada a dinâmica do ROV, onde envolve as forças atuantes no veículo.

4.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

A Figura 16 representa um movimento geral, de um corpo rígido genérico, de translação e rotação relativo ao sistema de coordenadas inerciais *XYZ* e $X_0Y_0Z_0$ pertencente ao corpo rígido.

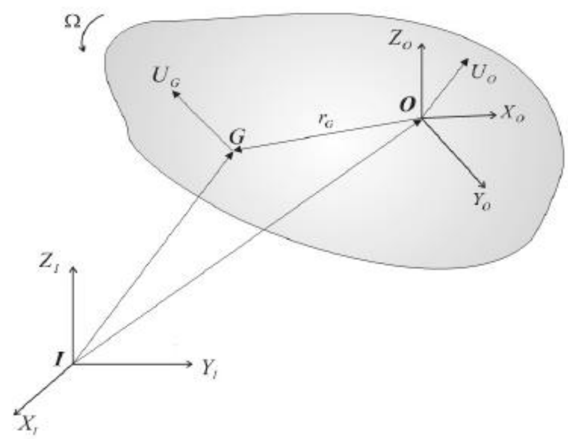

Figura 16 - Sistemas de coordenadas de um corpo rígido

Fonte: Hernández, 2012

As equações a seguir são deduzidas de modo genérico, onde o centro de gravidade do corpo (G) não coincide com eixo de coordenadas do móvel (O).

Agora são apresentadas as variáveis utilizadas no estudo da dinâmica do veículo submarino:

$\hat{\imath}$, $\hat{\jmath}$ e $\hat{k}$: Corresponde aos vetores unitários do sistema de coordenadas móveis $X_0Y_0Z_0$.

r_G: Vetor que define a posição do centro de gravidade (G) em relação ao sistema de coordenadas móveis (O)

U_o: Representa a velocidade de translação do corpo. É definida por $U_o = u\hat{\imath} + v\,\hat{\jmath}\, + w\hat{k}$

Ω: Define o vetor de velocidade angular do corpo em relação ao sistema de coordenadas móveis. É definida por $\Omega = \,p\hat{\imath} + q\,\hat{\jmath}\, + r\hat{k}$.

I_o: Tensor de inercia do corpo rígido em relação ao sistema de coordenadas móveis adotados $X_0Y_0Z_0$. O tensor inercial é a inercia de um corpo perante a um eixo de rotação arbitrário, no caso o adotado é o eixo do veículo.

$$I_o = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \tag{18}$$

F: Vetor força externa atuante no corpo rígido. $F = \,X\hat{\imath} + Y\,\hat{\jmath}\, + Z\hat{k}$

M: Vetor de momento externo atuante no corpo em torno do eixo de coordenadas móveis $X_0Y_0Z_0$ definidos como $M = \,K\hat{\imath} + M\,\hat{\jmath}\, + N\hat{k}$

(Hernández, 2012)

4.2 MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO DO CORPO

Para obter as equações de movimentos de translação é utilizada a segunda lei de Newton, onde a força resultado é denotada pela massa e a aceleração do corpo. Assim é descrita na Equação 19:

$$F = m\frac{dU_G}{dt} \tag{19}$$

Onde U_G corresponde a velocidade absoluta no centro de gravidade do corpo. O vetor U_G é definidor na Equação 20:

$$U_G = U_0 + \Omega \times r_G \tag{20}$$

Sendo que U_0 é a velocidade absoluta e a outra parcela leva em consideração a velocidade de rotação do móvel em relação ao sistema móvel. Com isso substituindo o termo na Equação 19 tem-se:

$$F = m\frac{d}{dt}(U_0 + \Omega \times r_G) \tag{21}$$

Uma das simplificações adotada é que os efeitos das forças de Coriolis e centrípeta produzida pela rotação da terra podem ser desprezados quando comparada com as forças que atuam diretamente no corpo, devido a diferença de ordem de grandeza.

Agora, é denotado também que o sistema de coordenadas móvel se encontra em movimento com respeito ao sistema de coordenadas global com isso esse sistema de coordenadas varia de acordo com o tempo. Assim de acordo com Hernández (2012), para o cálculo da força F é necessário o uso das expressões de conservação de energia, Equação 22:

$$\frac{d\hat{\imath}}{dt} = r\hat{\jmath} - q\hat{k}, \qquad \frac{d\hat{\jmath}}{dt} = p\hat{k} - r\hat{\imath}, \qquad \frac{d\hat{k}}{dt} = q\hat{\imath} - p\hat{\jmath} \tag{22}$$

Substituindo as variáveis da equação 22 na equação 21 se obtém três expressões que definem o movimento de translação do corpo, representadas nas Equações 23, 24 e 25:

$$X = m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \tag{23}$$

$$Y = m[\dot{v} - vr + wq - y_G(p^2 + r^2) + z_G(rq - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] \tag{24}$$

$$Z = m[\dot{w} - uq + vp - z_G(q^2 + p^2) + x_G(pr - \dot{q}) + y_G(qr + \dot{p})] \tag{25}$$

Expandindo a equação para definir os termos e representar mais a diante matricialmente se obtém a Equação 26:

$$X = m[\dot{u} - vr + wq + z_G\dot{q} - y_G\dot{r} + y_Gpq - x_G(q^2 + r^2) + z_Gpr] \tag{26}$$

Definindo as forças em que cada termo tem influência nas equações abaixo:

$m[-vr + wq]$: Representa as forças de Coriolis;

$m[z_G\dot{q} - y_G\dot{r}]$: Representa as forças de aceleração tangencial do centro de gravidade;

$m[y_G pq - x_G(q^2 + r^2) + z_G pr]$: Representa as forças centrífugas atuante na origem do corpo devido ao movimento de rotação do corpo em torno da origem.

Os termos acima apresentados se aplicam nos demais eixos Y e Z.

4.3 MOMENTOS ATUANTES NO VEÍCULO

O momento resultante M em relação ao centro de coordenadas do veículo (O) é igual ao momento atuante em relação ao centro de gravidade (G) somado da força externa atuante F a uma distância do centro de gravidade r_G. Com isso o momento M é definido pela Equação 27:

$$M = M_G + r_G \times F \tag{27}$$

A definição de momento angular, Equação 28, de um corpo rígido em relação ao sistema de referencial fixo, é dado como o produto dos tensores inerciais por sua velocidade angular. Assim:

$$H = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \tag{28}$$

Onde M_G é definido como a variação do momento angular em torno do centro de gravidade (G), ou seja:

$$M_G = \frac{d}{dt} H_G \tag{29}$$

Realizando as operações vetoriais da Equação 27, são encontradas as expressões das três componentes escalares para os momentos nas Equações 30, 31 e 32. Assim:

$$K = I_x\dot{p} + \left(I_z - I_y\right)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r_2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \tag{30}$$

$$M = I_y\dot{q} + (I_z - I_x)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (pq - \dot{r})I_{yz} \\ + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - up + vp)] \tag{31}$$

$$N = I_z\dot{r} + \left(I_y - I_x\right)pq - (\dot{q} + pr)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rp - \dot{p})I_{zx} \\ + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(u - vr + wq)] \tag{32}$$

De posse dos termos, são agrupados os termos em matrizes. Essa modelagem matricial é realizada de modo a facilitar a modelagem dinâmica e o projeto de controle. Para o cálculo das forças resultantes e momentos será utilizada a Equação 33 abaixo:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \tag{33}$$

Os termos da equação 33 apresentada são definidos por:

M_{RB} : Representa a matriz de inercia do corpo rígido, pode ser escrita por três matrizes de 3x3 são elas: M_{11}, M_{21}, M_{22}

$C_{RB}(v)$: Matriz de agrupamento dos termos pertencentes à força de Coriolis e força Centrípeta de corpo rígido.

$v = [u, v, w, p, q, r]^T$: Vetor de velocidade linear e angular do ROV em relação ao sistema de coordenadas móveis (O).

$\tau_{RB} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$: Vetor das forças resultantes e momentos resultantes do ROV.

Segundo Fossen, 1994, a matriz M_{RB} cumpre que $M_{RB}^T > 0_{6\times6}$ é a mesma é definida como:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{21}^T \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \tag{34}$$

Enquanto que a matriz $C_{RB}(v)$ é definida por:

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + y) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G q + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_G p - v) & m(y_G r - u) & m(x_G p + y_G q) \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) & 0 & I_z r & -I_y q \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G p + u) & -I_z r & 0 & I_x p \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) & I_y q & -I_x p & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

5 PROTÓTIPO DIGITAL

Com base no que foi exposto no trabalho, é proposto um modelo capaz de captar imagens e aquisitar dados em um ambiente de lamina rasa d’agua. O projeto tem como função desenvolver um ROV funcional de baixo custo.

O Modelo proposto foi desenhado em um programa de CAD 3D. Foram criadas duas versões e realizadas as análises dos protótipos.

Para a criação dos modelos foram utilizados como material:

- Tubos de PVC em formato de T’s;
- Tubos de PVC em formato de Joelhos de 90°;
- Tubos de PVC com diâmetro de 40mm;
- Propulsor tipo hélice 65mm;
- Caixa em acrílico para acomodação de componentes 300x300mm;
- Controlador tipo Arduino;
- Receptor RF;
- Controlador ESC para propulsor;
- Bateria 12V 7A;
- Câmera.

5.1 PRIMEIRO MODELO

No primeiro modelo são previstos propulsores laterais sem inclinação vertical.

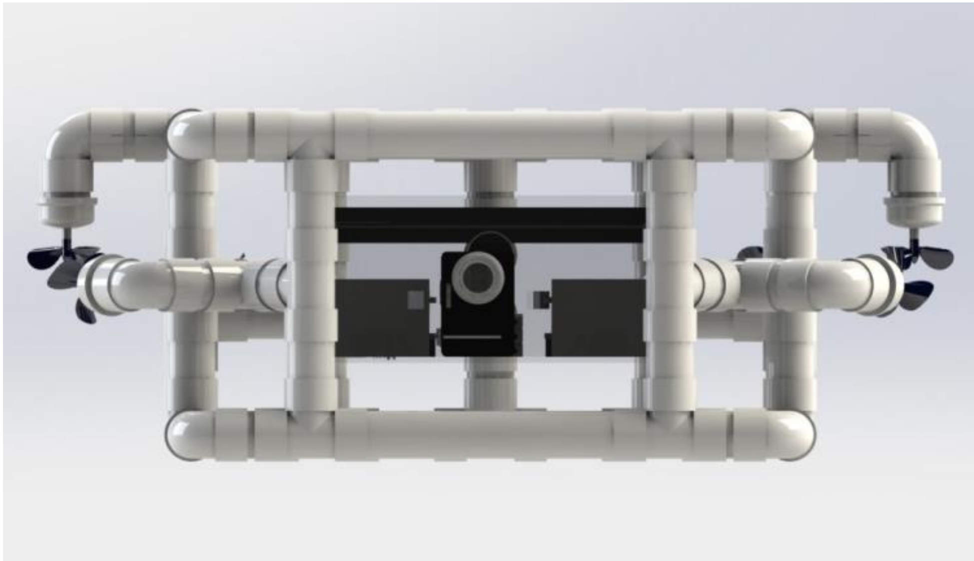

Figura 17 - Vista frontal primeiro modelo.

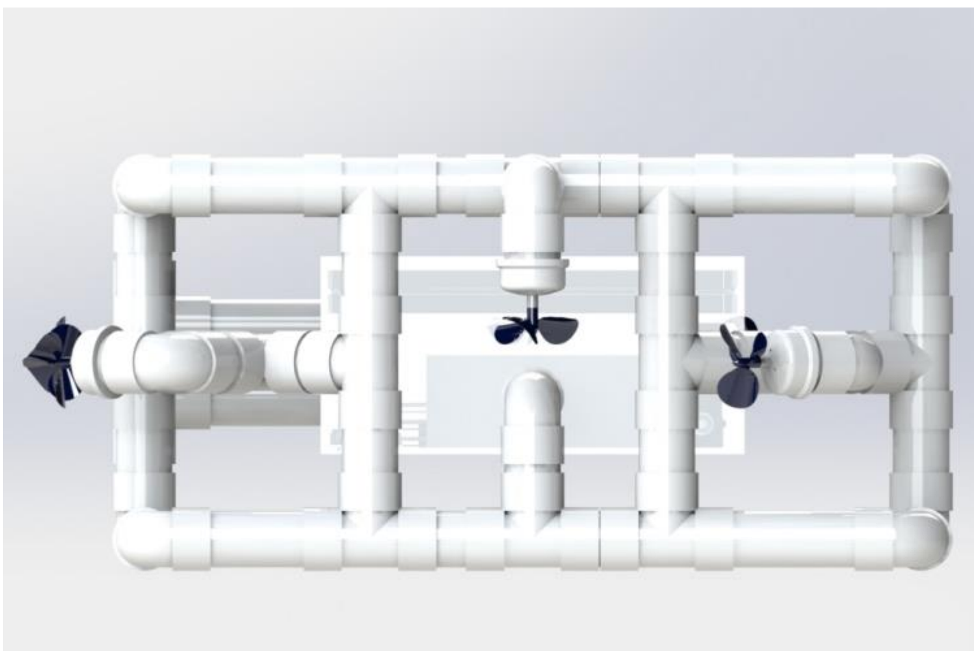

Figura 18 - Vista lateral primeiro modelo, propulsores laterais sem inclinação vertical.

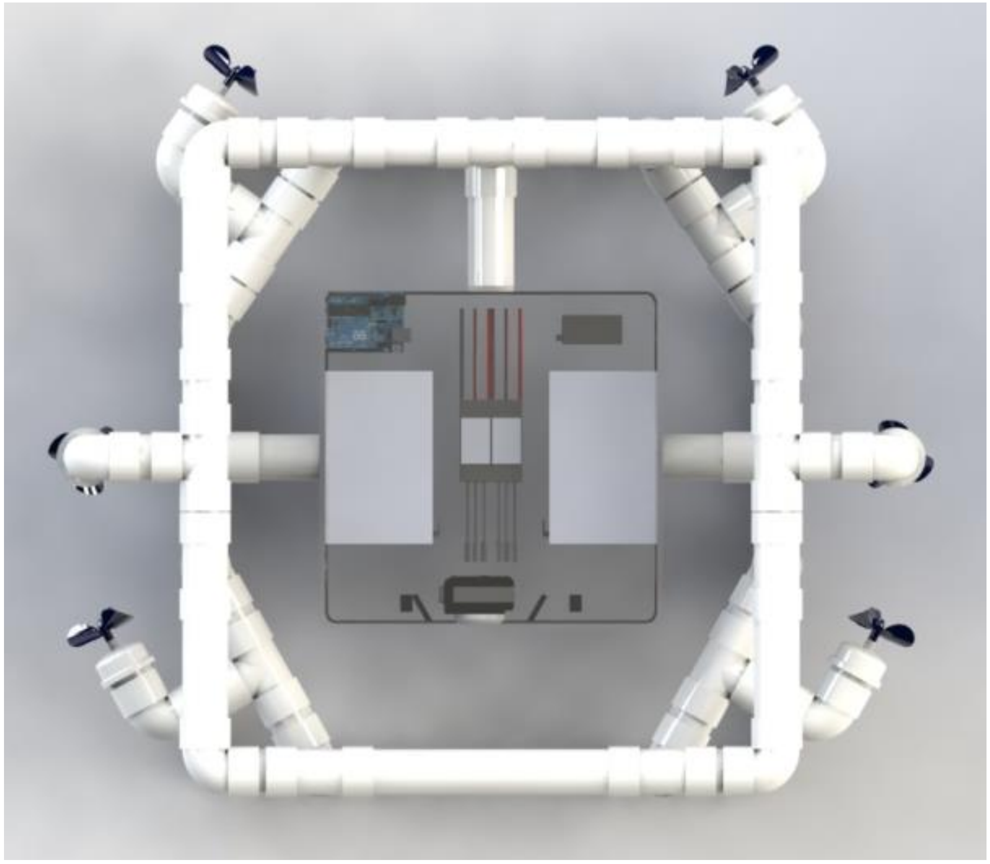

Figura 19 - Vista superior primeiro modelo

5.1.1 TABELAS DE MOVIMENTAÇÃO

Nessa parte do trabalho é analisado o diagrama de forças atuantes no primeiro protótipo do ROV e verificado o comportamento para saber em quais graus de liberdade atua de forma independente.

Para se observar a atuação das forças no primeiro modelo do LCROV tem-se o diagrama de corpo livre na Figura 20:

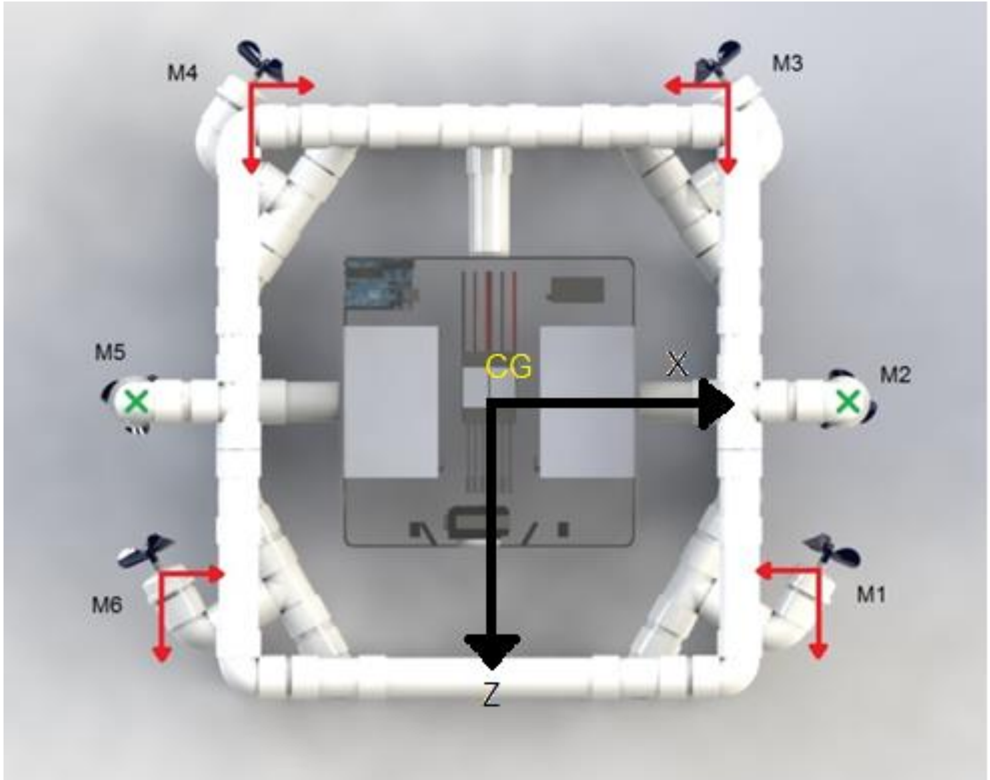

Figura 20 – Disposição de forças Primeiro Protótipo, x em verde representa forças verticais em Y.

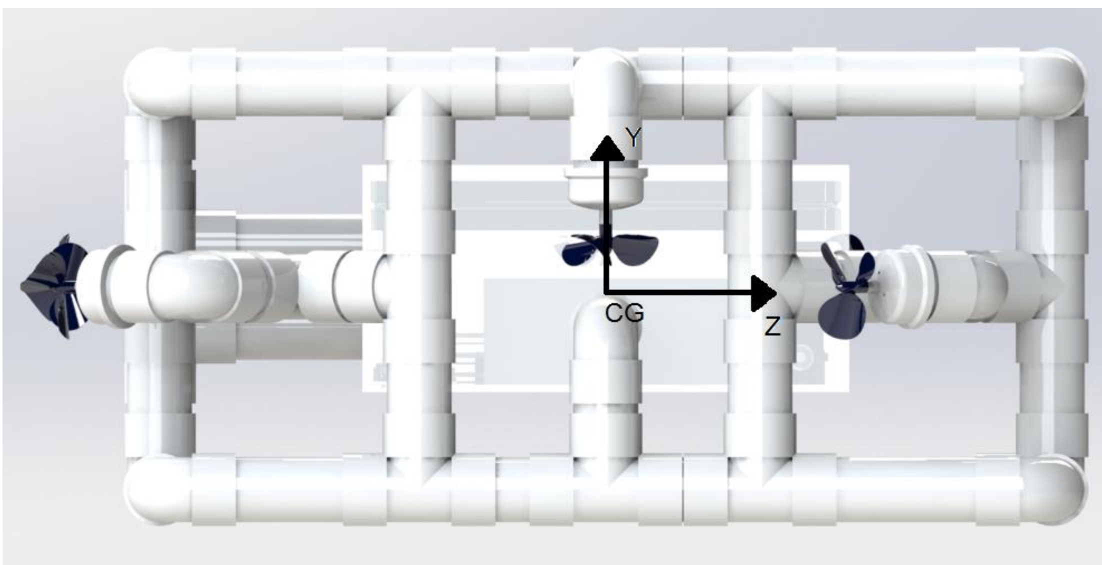

Figura 21 - Vista lateral com eixo de coordenadas

Utilizando o programa de CAD 3D são verificadas as coordenadas cartesianas dos propulsores e o centro de gravidade. A Tabela 3 apresenta uma translação do eixo de referência utilizado no programa de CAD3D para o centro de gravidade (CG). Essa operação é realizada, pois é em seu CG que o corpo gira. Assim na Tabela 3, X, Y e Z são as coordenadas dos propulsores no sistema inicial e DX, DY e DZ são as coordenadas dos propulsores no sistema de coordenadas com origem no CG.

Tabela 3 - Coordenadas cartesianas dos propulsores Modelo 1.

Posição Cartesianas [m]	X	Y	Z	DX	DY	DZ
Centro de Gravidade	0,001	0,122	-0,279	0,000	0,000	0,000
Motor 1	0,341	0,122	-0,129	0,340	0,000	0,150
Motor 2	0,388	0,200	-0,279	0,387	0,078	0,000
Motor 3	0,223	0,122	-0,613	0,222	0,000	-0,334
Motor 4	-0,223	0,122	-0,613	-0,224	0,000	-0,334
Motor 5	-0,388	0,200	-0,279	-0,389	0,078	0,000
Motor 6	-0,341	0,122	-0,129	-0,341	0,000	0,150

A partir das coordenadas obtidas e dos ângulos dos propulsores (25° com o eixo X nos propulsores 1, 3, 4 e 6), é feita a decomposição da força de atuação do veículo em relação aos eixos X, Y e Z de coordenadas (Figura 20 e Figura 21) e encontrado as contribuições de cada propulsor em cada grau de liberdade conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Contribuição dos propulsores nos graus de liberdade

Contribuição [N] / vetor de 1N	**X**	**Y**	**Z**	**Contribuição [N.m] / vetor de 1N**	**Mx**	**My**	**Mz**
Motor 1	-0,906	0,000	0,423	**Motor 1**	0,000	0,007	0,000
Motor 2	0,000	1,000	0,000	**Motor 2**	0,000	0,000	0,387
Motor 3	0,906	0,000	0,423	**Motor 3**	0,000	-0,209	0,000
Motor 4	-0,906	0,000	0,423	**Motor 4**	0,000	0,208	0,000
Motor 5	0,000	1,000	0,000	**Motor 5**	0,000	0,000	-0,389
Motor 6	0,906	0,000	0,423	**Motor 6**	0,000	-0,008	0,000
SOMATÓRIO	0,000	2,000	1,690	**SOMATÓRIO**	0,000	-0,002	-0,002

Com as contribuições de força dos propulsores é obtido os resultados das combinações de motores para movimentar o veículo em determinada direção.

Escrevendo na forma de um sistema linear a Tabela 4, que relaciona as contribuições de cada motor com o determinado grau de liberdade a ser atuado, tem-se a Equação (35):

$$[C_{6\times6}][M_{6\times1}] = [R_{6\times1}] \tag{35}$$

Sendo:

$C_{6\times6}$: Matriz de coeficientes de contribuição dos motores. É definida como:

$$C_{6\times 6} = \begin{bmatrix} -0.906 & 0 & 0.906 & -0.906 & 0 & 0.906 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.423 & 0 & 0.423 & 0.423 & 0 & 0.423 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.007 & 0 & -0.209 & 0.208 & 0 & -0.008 \\ 0 & 0.387 & 0 & 0 & -0.389 & 0 \end{bmatrix}$$

$M_{6\times 1}$: Matriz de disposição dos motores

$R_{6\times 1}$: Matriz de resposta do grau de liberdade

Det ($C_{6\times 6}$) = 0, logo C não é inversível.

Conforme pode-se observar, a matriz $C_{6\times 6}$ não é inversível, pois possui uma linha de zeros, tornando assim seu determinante igual à zero. Ou seja, independente da combinação de motores o ROV não é possível atuar no grau de liberdade θ.

Devido a tal condição, é criado o segundo modelo.

5.2 SEGUNDO MODELO

No segundo modelo proposto, são realizadas inclinações verticais nos propulsores frontais e traseiros, contornando o problema de limitação de graus de liberdade encontrado no primeiro protótipo.

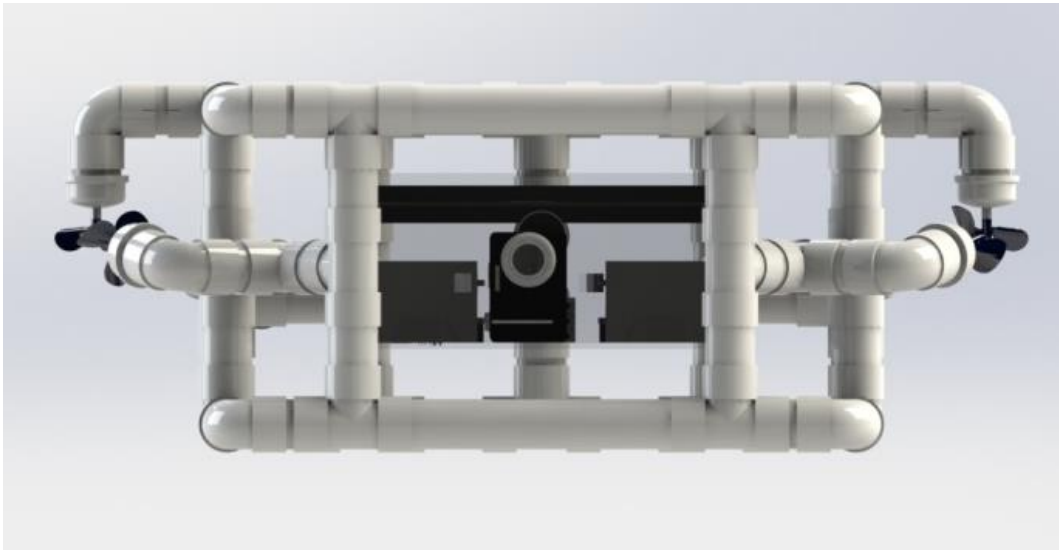

Figura 22 - Vista frontal segundo modelo

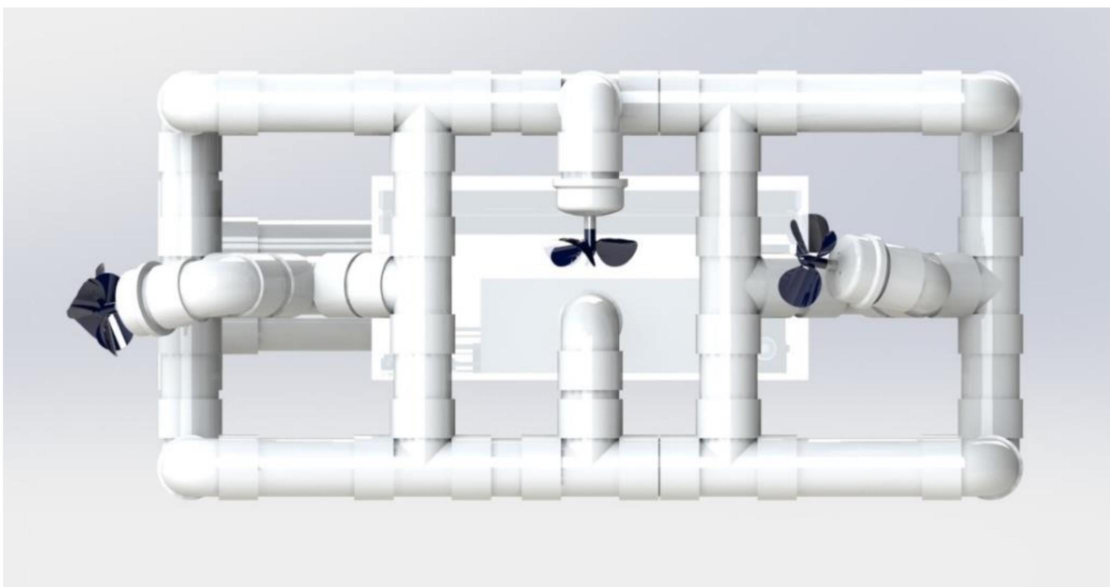

Figura 23 - Vista lateral segundo modelo, inclinação de 10° nos propulsores.

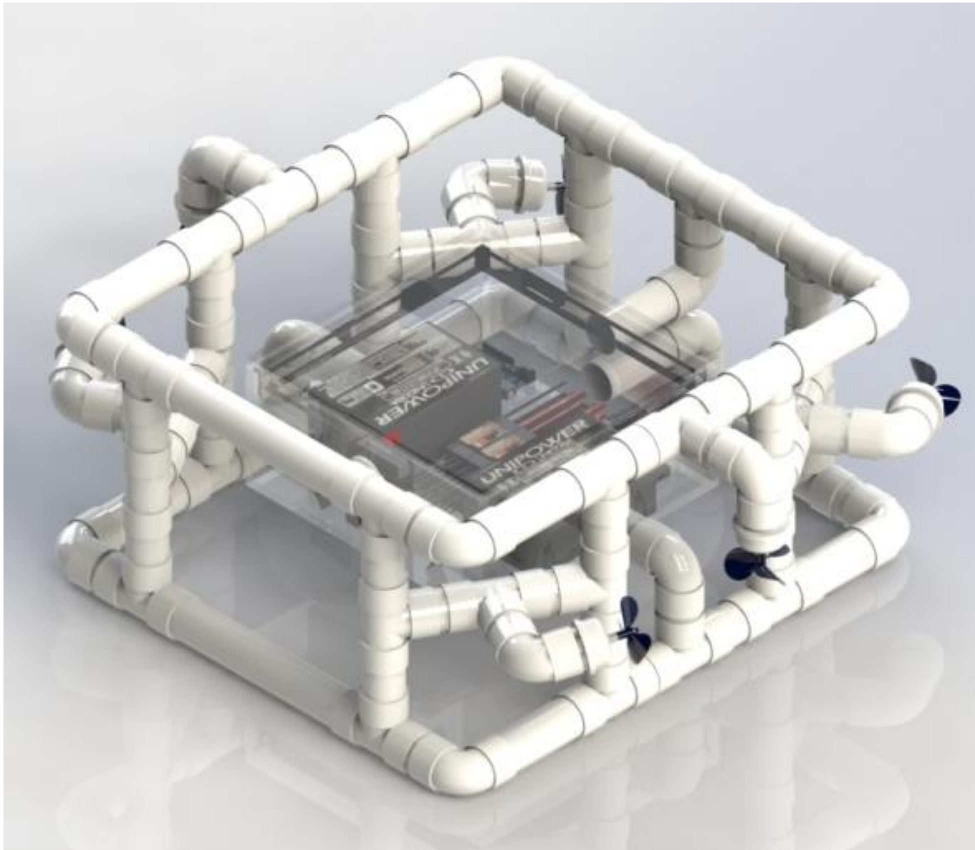

Figura 24 - Vista em perspectiva segundo modelo e disposições dos propulsores

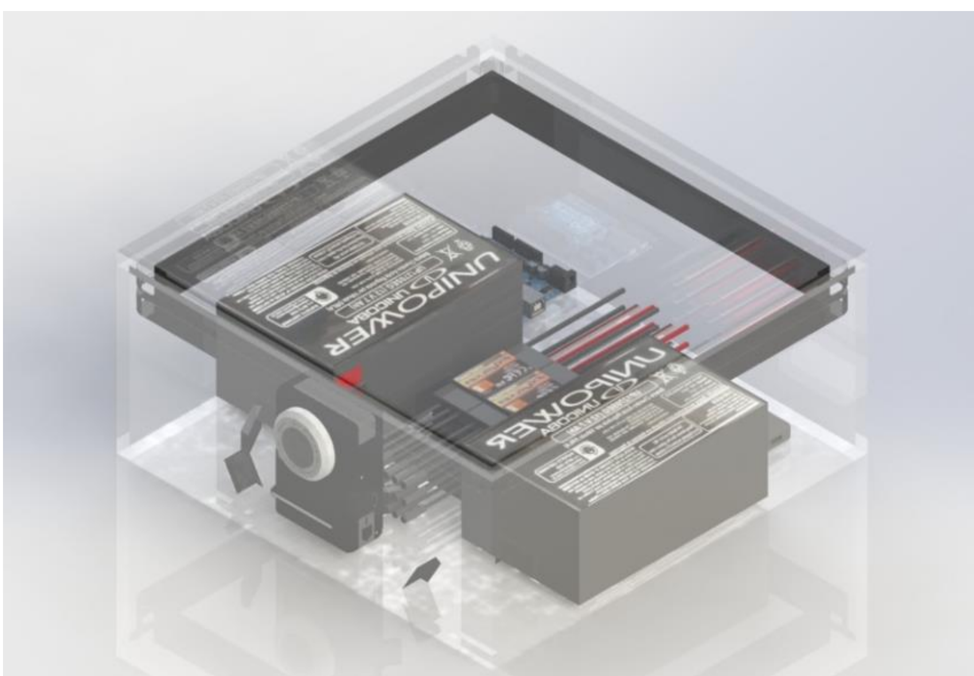

Figura 25 - Caixa em acrílico e seus componentes

Conforme observado no segundo modelo proposto é apresentado uma caixa de acrílico (Figura 25) de 300x300mm no centro da estrutura do LCROV. A caixa possui os seguintes componentes: uma placa Arduino, duas baterias de 12V e 7A, uma câmera para captura de imagem, seis controladores ESC sendo um para cada propulsor e um receptor RF para comunicação via rádio frequência.

5.2.1 TABELA DE MOVIMENTAÇÃO

Seguindo a análise do primeiro modelo, é feito o diagrama de força atuante no segundo protótipo do LCROV. Em seguida, é verificado o comportamento para saber em quais graus de liberdade atua de forma independente.

A Figura 26 apresenta a atuação das forças no segundo modelo do LCROV.

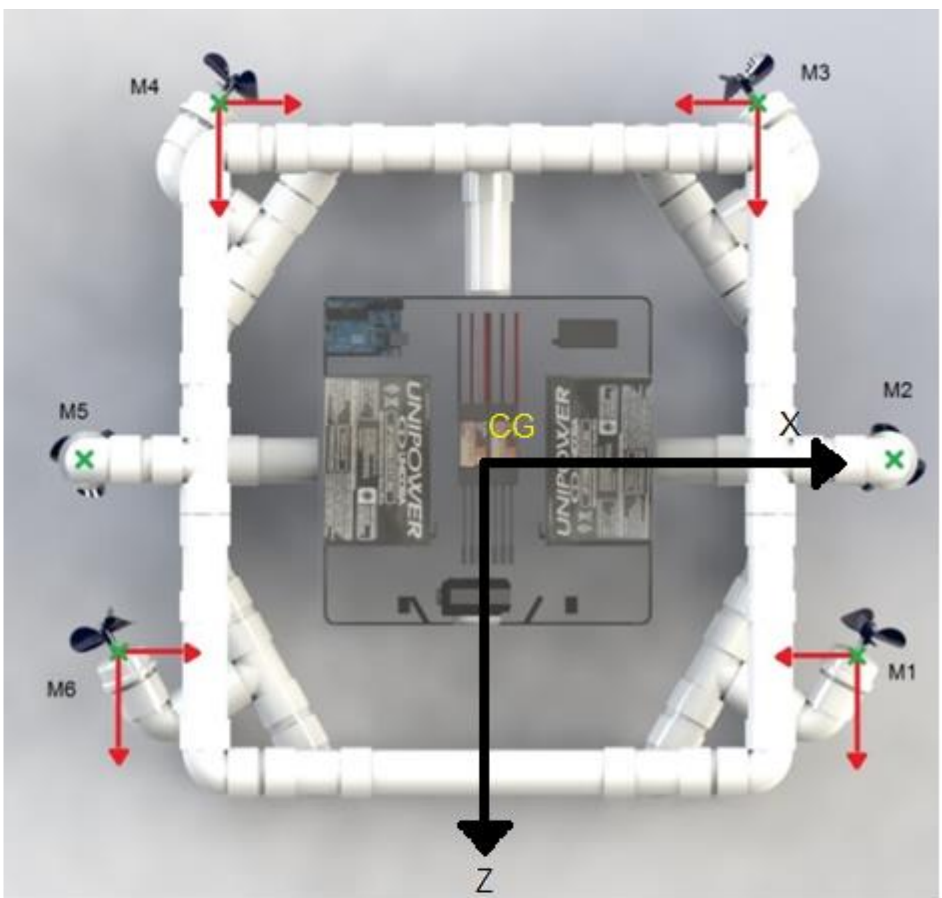

Figura 26 - Diagrama de forças atuantes, x em verde é forças atuante no eixo Y

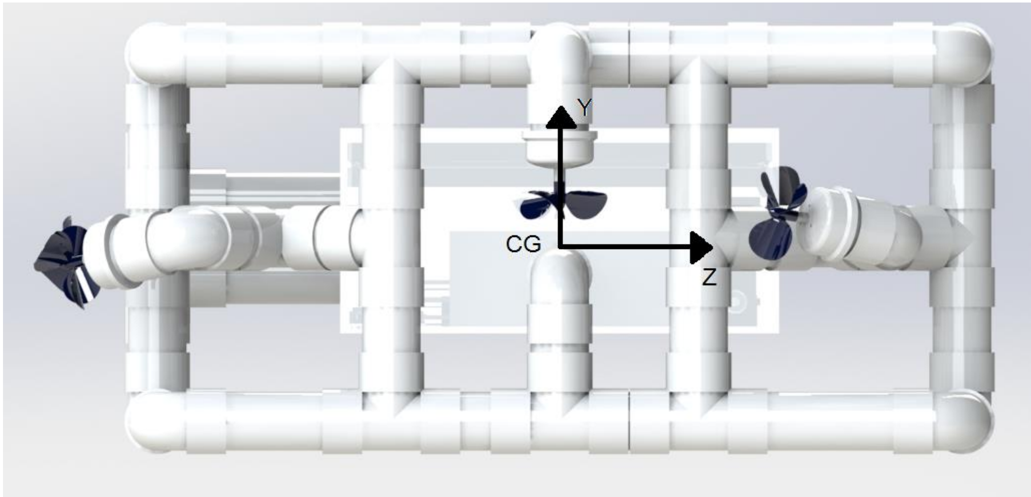

Figura 27 - Vista lateral com sistemas de coordenadas

Utilizando o programa de CAD 3D são verificadas as coordenadas cartesianas dos propulsores e do centro de gravidade (CG). As posições dos propulsores são obtidas da mesma maneira que o primeiro modelo. Com isso tem-se a Tabela 5:

Tabela 5 - Coordenadas cartesianas dos propulsores Modelo 2.

Posição Cartesianas [m]	X	Y	Z	DX	DY	DZ
Centro de Gravidade	0,001	0,122	-0,279	0,000	0,000	0,000
Motor 1	0,341	0,143	-0,129	0,340	0,021	0,150
Motor 2	0,388	0,200	-0,275	0,387	0,078	0,004
Motor 3	0,223	0,107	-0,613	0,222	-0,015	-0,334
Motor 4	-0,223	0,107	-0,613	-0,224	-0,015	-0,334
Motor 5	-0,388	0,200	-0,275	-0,389	0,078	0,004
Motor 6	-0,341	0,143	-0,129	-0,341	0,021	0,150

De posse das coordenadas obtidas na Tabela 5 e dos ângulos dos propulsores (25° com o eixo X nos propulsores 1, 3, 4 e 6, e ±10° de inclinação com o plano XZ), é encontrado as contribuições de cada propulsor decompondo as forças em todas as direções e encontrando o momento gerado por elas. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Contribuições dos propulsores nos graus de liberdade

Contribuição [N] / vetor de 1N	X	Y	Z	Contribuição [N.m] / vetor de 1N	θ	φ	ψ
Motor 1	-0,893	-0,174	0,416	**Motor 1**	-0,017	0,007	-0,078
Motor 2	0,000	1,000	0,000	**Motor 2**	0,004	0,000	0,387
Motor 3	0,893	0,174	0,416	**Motor 3**	-0,064	-0,206	0,025
Motor 4	-0,893	0,174	0,416	**Motor 4**	-0,064	0,205	-0,025
Motor 5	0,000	1,000	0,000	**Motor 5**	0,004	0,000	-0,389
Motor 6	0,893	-0,174	0,416	**Motor 6**	-0,017	-0,008	0,078
SOMATÓRIO	0,000	2,000	1,665	**SOMATÓRIO**	-0,155	-0,002	-0,002

Conforme é verificado na Tabela 6, são abordadas as contribuições dos propulsores para os graus de liberdade. Porém para acionar o ROV num determinado grau de liberdade é necessário encontrar as combinações de propulsores para atuar o ROV em uma determinada direção.

Na Equação (36), a Tabela 6 é escrita na forma de um sistema linear realizando as combinações necessárias para acionar os graus de liberdade:

$$[C_{6\times6}][M_{6\times1}] = [R_{6\times1}] \tag{36}$$

Sendo:

$C_{6\times6}$: Matriz de coeficientes de contribuição dos motores. E definida como:

$$C_{6\times6} = \begin{bmatrix} -0.893 & 0 & 0.893 & -0.893 & 0 & 0.893 \\ -0.174 & 1 & 0.174 & 0.174 & 1 & -0.174 \\ 0.416 & 0 & 0.416 & 0.416 & 0 & 0.416 \\ -0.017 & 0.004 & -0.064 & -0.064 & 0.004 & -0.017 \\ 0.007 & 0 & -0.206 & 0.205 & 0 & -0.008 \\ -0.078 & 0.387 & 0.025 & -0.025 & -0.389 & 0.078 \end{bmatrix}$$

$M_{6\times1}$: Matriz de disposição dos motores

$R_{6\times1}$: Matriz de resposta do grau de liberdade

Manipulando a Equação (36) se obtém:

$$[M_{6\times1}] = [C_{6\times6}]^{-1}[R_{6\times1}] \quad (37)$$

Invertendo a matriz C tem-se:

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \\ \mathrm{M5} \\ \mathrm{M6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.581 & -0.041 & 1.603 & 10.332 & -2.525 & 0 \\ -0.116 & 0.482 & 0.376 & 4.270 & -0.507 & 1.288 \\ -0.021 & 0.041 & -0.407 & -10.332 & -2.525 & 0 \\ 0.021 & 0.041 & -0.402 & -10.332 & 2.525 & 0 \\ 0.116 & 0.487 & 0.323 & 2.920 & 0.507 & -1.288 \\ 0.581 & -0.041 & 1.609 & 10.332 & 2.525 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} \quad (38)$$

Agora com a matriz já invertida é possível resolver qualquer sistema linear. De posse da Equação (38) é verificado todos os graus de liberdade individualmente. Com isso:

F_x = 1 = f(M1,M2,M3,M4,M5,M6) =

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \\ \mathrm{M5} \\ \mathrm{M6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.581 & -0.041 & 1.603 & 10.332 & -2.525 & 0 \\ -0.116 & 0.482 & 0.376 & 4.270 & -0.507 & 1.288 \\ -0.021 & 0.041 & -0.407 & -10.332 & -2.525 & 0 \\ 0.021 & 0.041 & -0.402 & -10.332 & 2.525 & 0 \\ 0.116 & 0.487 & 0.323 & 2.920 & 0.507 & -1.288 \\ 0.581 & -0.041 & 1.609 & 10.332 & 2.525 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.581 \\ -0.116 \\ -0.021 \\ 0.021 \\ 0.116 \\ 0.581 \end{bmatrix} \quad (39)$$

F_y = 1 = f(M1,M2,M3,M4,M5,M6) =

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \\ \mathrm{M5} \\ \mathrm{M6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.581 & -0.041 & 1.603 & 10.332 & -2.525 & 0 \\ -0.116 & 0.482 & 0.376 & 4.270 & -0.507 & 1.288 \\ -0.021 & 0.041 & -0.407 & -10.332 & -2.525 & 0 \\ 0.021 & 0.041 & -0.402 & -10.332 & 2.525 & 0 \\ 0.116 & 0.487 & 0.323 & 2.920 & 0.507 & -1.288 \\ 0.581 & -0.041 & 1.609 & 10.332 & 2.525 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.041 \\ 0.482 \\ 0.041 \\ 0.041 \\ 0.487 \\ -0.041 \end{bmatrix} \quad (40)$$

F_z = 1 = f(M1,M2,M3,M4,M5,M6) =

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \\ \mathrm{M5} \\ \mathrm{M6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.581 & -0.041 & 1.603 & 10.332 & -2.525 & 0 \\ -0.116 & 0.482 & 0.376 & 4.270 & -0.507 & 1.288 \\ -0.021 & 0.041 & -0.407 & -10.332 & -2.525 & 0 \\ 0.021 & 0.041 & -0.402 & -10.332 & 2.525 & 0 \\ 0.116 & 0.487 & 0.323 & 2.920 & 0.507 & -1.288 \\ 0.581 & -0.041 & 1.609 & 10.332 & 2.525 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.603 \\ 0.376 \\ -0.407 \\ -0.402 \\ 0.323 \\ 1.609 \end{bmatrix} \tag{41}$$

F_θ = 1 = f(M1,M2,M3,M4,M5,M6) =

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \\ \mathrm{M5} \\ \mathrm{M6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.581 & -0.041 & 1.603 & 10.332 & -2.525 & 0 \\ -0.116 & 0.482 & 0.376 & 4.270 & -0.507 & 1.288 \\ -0.021 & 0.041 & -0.407 & -10.332 & -2.525 & 0 \\ 0.021 & 0.041 & -0.402 & -10.332 & 2.525 & 0 \\ 0.116 & 0.487 & 0.323 & 2.920 & 0.507 & -1.288 \\ 0.581 & -0.041 & 1.609 & 10.332 & 2.525 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.332 \\ 4.270 \\ -10.332 \\ -10.332 \\ 2.920 \\ 10.332 \end{bmatrix} \tag{42}$$

F_Φ = 1 = f(M1,M2,M3,M4,M5,M6) =

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \\ \mathrm{M5} \\ \mathrm{M6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.581 & -0.041 & 1.603 & 10.332 & -2.525 & 0 \\ -0.116 & 0.482 & 0.376 & 4.270 & -0.507 & 1.288 \\ -0.021 & 0.041 & -0.407 & -10.332 & -2.525 & 0 \\ 0.021 & 0.041 & -0.402 & -10.332 & 2.525 & 0 \\ 0.116 & 0.487 & 0.323 & 2.920 & 0.507 & -1.288 \\ 0.581 & -0.041 & 1.609 & 10.332 & 2.525 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.525 \\ -0.507 \\ -2.525 \\ 2.525 \\ 0.507 \\ 2.525 \end{bmatrix} \tag{43}$$

F_ψ = 1 = f(M1,M2,M3,M4,M5,M6) =

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \\ \mathrm{M5} \\ \mathrm{M6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.581 & -0.041 & 1.603 & 10.332 & -2.525 & 0 \\ -0.116 & 0.482 & 0.376 & 4.270 & -0.507 & 1.288 \\ -0.021 & 0.041 & -0.407 & -10.332 & -2.525 & 0 \\ 0.021 & 0.041 & -0.402 & -10.332 & 2.525 & 0 \\ 0.116 & 0.487 & 0.323 & 2.920 & 0.507 & -1.288 \\ 0.581 & -0.041 & 1.609 & 10.332 & 2.525 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.288 \\ 0 \\ 0 \\ -1.288 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{44}$$

Esse cálculo comprova que o segundo modelo do LCROV tem a capacidade de se deslocar nos 6 graus de liberdade independente. Isso facilita trabalhos futuros relacionados ao controle do mesmo.

Vale notar que θ possui maior sensibilidade em relação aos demais graus, isso é devido a um binário que se forma entre os propulsores 1, 3, 4 e 6. O valor na prática dessa interferência poderá ser observado quando feita a dinâmica do LCROV, observando esse comportamento no tempo.

5.2.2 VALIDAÇÃO DO SEGUNDO MODELO

Para validação dos cálculos será feito o processo direto através da Equação (36) e com as combinações dos motores encontradas acima. Com isso tem-se:

$$[C_{6\times6}][M_{6\times1}] = [R_{6\times1}] \tag{45}$$

Sendo:

$M_{6\times1}$ = As matrizes respostas encontradas nas Equações (39) a (44):

Com isso tem-se:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.893 & 0 & 0.893 & -0.893 & 0 & 0.893 \\ -0.174 & 1 & 0.174 & 0.174 & 1 & -0.174 \\ 0.416 & 0 & 0.416 & 0.416 & 0 & 0.416 \\ -0.017 & 0.004 & -0.064 & -0.064 & 0.004 & -0.017 \\ 0.007 & 0 & -0.206 & 0.205 & 0 & -0.008 \\ -0.078 & 0.387 & 0.025 & -0.025 & -0.389 & 0.078 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \\ \mathrm{M5} \\ \mathrm{M6} \end{bmatrix} \tag{46}$$

Substituindo as Matrizes de (39) a (44) na equação (46) se obtém:

f(M1, M2, M3, M4, M5, M5) = Força (x, y, z, θ, Φ, ψ)

Verificando x:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.893 & 0 & 0.893 & -0.893 & 0 & 0.893 \\ -0.174 & 1 & 0.174 & 0.174 & 1 & -0.174 \\ 0.416 & 0 & 0.416 & 0.416 & 0 & 0.416 \\ -0.017 & 0.004 & -0.064 & -0.064 & 0.004 & -0.017 \\ 0.007 & 0 & -0.206 & 0.205 & 0 & -0.008 \\ -0.078 & 0.387 & 0.025 & -0.025 & -0.389 & 0.078 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.581 \\ -0,116 \\ -0.021 \\ 0.021 \\ 0.116 \\ 0.581 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Verificando y:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.893 & 0 & 0.893 & -0.893 & 0 & 0.893 \\ -0.174 & 1 & 0.174 & 0.174 & 1 & -0.174 \\ 0.416 & 0 & 0.416 & 0.416 & 0 & 0.416 \\ -0.017 & 0.004 & -0.064 & -0.064 & 0.004 & -0.017 \\ 0.007 & 0 & -0.206 & 0.205 & 0 & -0.008 \\ -0.078 & 0.387 & 0.025 & -0.025 & -0.389 & 0.078 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.041 \\ 0.482 \\ 0.041 \\ 0.041 \\ 0.487 \\ -0.041 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (48)$$

Verificando z:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.893 & 0 & 0.893 & -0.893 & 0 & 0.893 \\ -0.174 & 1 & 0.174 & 0.174 & 1 & -0.174 \\ 0.416 & 0 & 0.416 & 0.416 & 0 & 0.416 \\ -0.017 & 0.004 & -0.064 & -0.064 & 0.004 & -0.017 \\ 0.007 & 0 & -0.206 & 0.205 & 0 & -0.008 \\ -0.078 & 0.387 & 0.025 & -0.025 & -0.389 & 0.078 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.603 \\ 0.376 \\ -0.407 \\ -0.402 \\ 0.323 \\ 1.609 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Verificando θ:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.893 & 0 & 0.893 & -0.893 & 0 & 0.893 \\ -0.174 & 1 & 0.174 & 0.174 & 1 & -0.174 \\ 0.416 & 0 & 0.416 & 0.416 & 0 & 0.416 \\ -0.017 & 0.004 & -0.064 & -0.064 & 0.004 & -0.017 \\ 0.007 & 0 & -0.206 & 0.205 & 0 & -0.008 \\ -0.078 & 0.387 & 0.025 & -0.025 & -0.389 & 0.078 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10.332 \\ 4.270 \\ -10.332 \\ -10.332 \\ 2.920 \\ -10.332 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

Verificando Φ:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.893 & 0 & 0.893 & -0.893 & 0 & 0.893 \\ -0.174 & 1 & 0.174 & 0.174 & 1 & -0.174 \\ 0.416 & 0 & 0.416 & 0.416 & 0 & 0.416 \\ -0.017 & 0.004 & -0.064 & -0.064 & 0.004 & -0.017 \\ 0.007 & 0 & -0.206 & 0.205 & 0 & -0.008 \\ -0.078 & 0.387 & 0.025 & -0.025 & -0.389 & 0.078 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2.525 \\ -0.507 \\ -2.525 \\ 2.525 \\ 0.507 \\ 2.525 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

Verificando ψ:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.893 & 0 & 0.893 & -0.893 & 0 & 0.893 \\ -0.174 & 1 & 0.174 & 0.174 & 1 & -0.174 \\ 0.416 & 0 & 0.416 & 0.416 & 0 & 0.416 \\ -0.017 & 0.004 & -0.064 & -0.064 & 0.004 & -0.017 \\ 0.007 & 0 & -0.206 & 0.205 & 0 & -0.008 \\ -0.078 & 0.387 & 0.025 & -0.025 & -0.389 & 0.078 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1.288 \\ 0 \\ 0 \\ -1.288 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{52}$$

Conforme pode ser observado o valor está de acordo com o obtido anteriormente.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o protótipo digital e o modelo cinemático de um open ROV de baixo custo feito com materiais acessíveis, denominado de LCROV. Foram propostos dois modelos construtivos e avaliados os graus de liberdade, com o objetivo verificar os movimentos alcançados pelo ROV e facilitar seu controle.

Conclui-se que, para o primeiro protótipo foram identificados problemas de controlabilidade, já que o mesmo não atuaria em todos os graus de liberdade. O segundo protótipo corrigiu os problemas do primeiro, conseguindo atingir todos os graus de liberdade proposto, deixando com uma robustez e eficiência o modelo cinemático apresentado.

O modelo cinemático foi desenvolvido com sucesso, porém ele possui uma singularidade, ou seja, o mesmo não atua na condição de 90° em θ. Vale ressaltar que essa condição é fácil de contornar devido ao ROV não operar nessa angulação.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Desenvolver o estudo da modelagem dinâmica do dispositivo, encontrando as variáveis do veículo, sua interação hidrodinâmica entre outras variáveis.
- Desenvolver a modelagem dos propulsores, visando obter as curvas dos propulsores e medir seu empuxo, tempo de resposta, entre outros.

- Fazer um estudo da flutuabilidade do ROV, encontrando seu centro de flutuabilidade e seu centro de gravidade e ver sua influencia no ROV.
- Tentar modelar o ROV com uma quantidade menor de propulsores, tendo em vista que o custo de um propulsor é elevado, além dele não perder a característica dos graus de liberdade.
- Implementar um sistema de controle de navegação em um ambiente virtual, essa etapa deverá ser realizada somente após obter todas as variáveis do veículo.

7 BIBLIOGRAFIA

ANTONELLI, G., CHIAVERINI, S., SARKAR, N., WEST, M. *Adaptive Control of an Autonomous Underwater Vehicle: Experimental Results on ODIN*. IEEE Transactions on Control System Technology, Vol.9, No.5, 2011.

CHRIST, R. D., WERNLI SR., R. L., *The ROV Manual: A User Guide For Remotely Operated Vehicle*. Elsevier, 2014

CHRIST, R. D., WERNLI SR., R. L., *Observation Class ROVs Come of Age.* Sixth International Symposium on Underwater Technology, China – 2009.

ENCARNAÇÃO, P., PASCOAL, A. *3D Path Following for Autonomous Underwater Vehicle*. Institute for System and Robotics and Dept. Electrical Eng. Lisboa – Portugal

FOSSEN, T. I. *Guidance and Control of Ocean Vehicle*. John Wiley & Sons. Chichester –England, 1994.

HERNÁNDEZ, W. P. *Modelagem dinâmica de um robô submarino semi-autônomo (tipo ROV) para inspeção de risers*. Rio de Janeiro – RJ, 2012

HOANG, N. Q. *On the inverse kinematics of anunderwater vehicle - manipulator syste.* Vietnam Journal of Mechanics, VAST, Vol 34, 2011.

HOVER, F*. Autonomous underwater vehicles (auv's)*. Draft of Maneuvering Committe, 23 rd. Int. Towing Tank Conference, Venice, Italy, 2002.

JIMENEZ, T. S. *Contribution na la commade d'um robot sous-marin automale de type torpille*. UNIVERSITE MONTPELLIER II, 2004

KIM, S., JUNG, S. H., e KIM, C. H., *Preventive maintenance and remote inspection of nuclear power plants using tele-robotics*. IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems. 1999

KINSEY, C. J., EUSTICE, R. M., WHITCOMB, L. L. *A survey of underwater vehicle and navigation: Recent Advances and new challenges*. The Johns Hopkins University, Baltimore, Marylands – USA & University of Michigan, Ann Arbor, Michigan – USA.

MAGALHÃES, P. H. V. *Desenvolvimento de um submersível remotamente operado de baixo custo e caracterização dos sistemas de propulsão e vetorização de empuxo por hélice*. Belo Horizonte – MG, 2007

MCKERROW, P. J. *Introduction to Robotics. Addison-Wesley Publishing Company*. University of Michigan, Michigan – USA, 1991

PINHEIRO, J. R., *Notas de Aulas, Modelos Variáveis de estado*, 2012. Disponível em: www.ufsm.br/gepoc/renes/Templates/arquivos/elc1031/ELC1031.L3.1.pdf

PINTO, M. A. G., *Posicionamento e Calibração de um Manipulador Robótico Submarino com Uso de Visão Computacional*, Rio de Janeiro, PUC, 2006

SALLES, J. B. M. *Modelagem cinemática de um veículo submarino de operação remota: Estudo de caso VSI-02*. Ouro Preto – MG, 2012

VERVOOT, J.H.A.M., *Modeling and Control of an Unmanned Underwater Vehicle*. University of Canterbury, New Zeland, 2008.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, *Imagem ROV Tiburon.* Acessado em Junho de 2016. Disponível em http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/tiburon/tiburon.html

OCEAN DRILLING PROGRAM, *Imagem ROV Kaiko*. Acessado em Junho de 2016. Disponível em http://www-odp.tamu.edu/publications/prosp/195_prs/195f7.html.

SAAB, *Seaeyes ROVs.* Acessado em Junho de 2016. Disponível em http://www.seaeye.com/rovs.html

SIMÕES, M. A. *Centro de massa e condições de equilíbrio.* Acessado em Julho de 2016. Disponível em http://masimoes.pro.br/fisica/centro-de-gravidade-e-condi.html

UNDERWATER CONSULTANTS INTERNATIONAL, INC. *OCROV com sensor ultrasônico e escova giratória.* Acessado em Junho 2016. Disponível em http://www.underwaterconsultants.com/gallery-services-remotely-operated-vehicles.php