



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**“ DESENVOLVIMENTO DE UM SUBMERSÍVEL  
REMOTAMENTE OPERADO DE BAIXO CUSTO E  
CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO E  
VETORIZAÇÃO DE EMPUXO POR HÉLICE”**

**PAULO HENRIQUE VIEIRA MAGALHÃES**

**Belo Horizonte, 07 de Agosto de 2007**  
Paulo Henrique Vieira Magalhães

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**“DESENVOLVIMENTO DE UM SUBMERSÍVEL  
REMOTAMENTE OPERADO DE BAIXO CUSTO E  
CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO E  
VETORIZAÇÃO DE EMPUXO POR HÉLICE”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Calor e Fluidos

Orientador : Prof. Doutor Carlos Barreira Martinez  
(Universidade Federal de Minas Gerais)

Co-orientador : Prof. Doutor Eduardo Bauzer Medeiros  
(Universidade Federal de Minas Gerais)

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2007



**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Av Antônio Carlos, 6627 – Pampulha – 31270-901- Belo Horizonte – MG  
Tel.: ++ 55 31 3499-5145 3443-3783  
www.demec.ufmg.br – E-mail cpgmec@demec.ufmg.br

**“DESENVOLVIMENTO DE UM SUBMERSÍVEL  
REMOTAMENTE OPERADO DE BAIXO CUSTO E  
CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO E  
VETORIZAÇÃO DE EMPUXO POR HÉLICE”**

**PAULO HENRIQUE VIEIRA MAGALHÃES**

Tese defendida e aprovada em 07 de Agosto de 2007, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **“Doutor em Engenharia Mecânica”** na área de concentração **“Calor e Fluidos”**.

---

Prof<sup>o</sup> Dr. Carlos Barreira Martinez – EEUFMG – **Orientador**

---

Prof<sup>o</sup> Dr. Eduardo Bauzer Medeiros – EEUFMG – **Co-orientador**

---

Prof<sup>o</sup> Dr. Leonardo Antônio Borges Tôrres (DELT UFMG) – **Examinador**

---

Prof<sup>o</sup> Dr. Antônio Luiz de Menezes Osse – DCC / FUMEC – **Examinador**

---

Prof Dr. José Antônio Perrella Balestieri – DEN / UNESP – **Examinador**

---

Prof Dr. Paulo Kroeff de Souza – IPH / UFRGS - **Examinador**

## RESUMO

Neste trabalho são apresentados o projeto conceitual, o desenvolvimento, e a construção de um veículo submersível remotamente operado (ROV). O projeto e algumas soluções construtivas são discutidos em detalhe, além de características pertinentes ao comissionamento e operação do veículo. Os principais aspectos que foram considerados são: propulsão e vetorização de empuxo, verificação estrutural, controle, assim como uma variedade de sistemas embarcados, incluindo sistemas de energia e de visão do veículo. O objetivo foi desenvolver um ROV de baixo custo e alto desempenho que seja capaz de atuar em uma variedade de missões de inspeção, em particular em inspeções de usinas hidrelétricas. Várias características-chaves do projeto, tais como a chamada “flutuabilidade positiva”, que permite recuperar mais facilmente o veículo em caso de falha dos sistemas, são apresentadas e discutidas como parte da filosofia do projeto do ROV. Apesar de ainda haver margem para melhorias no protótipo atual, a concepção geral do projeto, particularmente no que se refere ao desenvolvimento de uma plataforma inercial e aos resultados dos testes de funcionamento preliminares realizados em um tanque com água, sugerem que o veículo seja capaz de realizar sua aplicação pretendida.

*Palavras Chaves: Projeto conceitual, Veículo submersível, ROV, Inspeção submersas, Propulsores, Controle.*

## ABSTRACT

The conceptual design, development, and construction of an underwater Remotely Operated Vehicle (**ROV**) is presented. The design and constructive solutions are discussed in detail together with the pertinent features of vehicle commissioning and operation. The main aspects which have been considered are: propulsion and thrust vectoring, structural verification, control, as well as a variety of on board systems including electric energy systems and vehicle vision. The objective has been to develop a high performance, low cost ROV suitable for use in a variety of inspection missions, more particularly in hydraulic power plant inspections. A variety of key features such as the so called positive buoyancy, which enables easier recovering of the vehicle in the case of total system failure, is presented and discussed as part of the overall design philosophy. Even though there is still some margin for improvement in the present prototype, particularly in specific items such as the introduction of an inertial platform, preliminary running tests carried out in a water tank show that the overall conception is sound and suggest that the vehicle is capable of carrying out its intended application.

*Key word: Conceptual Design, Underwater vehicles, ROV, underwater inspection, propellers, control.*

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS-----	10
LISTA DE QUADROS -----	15
LISTA DE TABELAS -----	16
LISTA DE GRÁFICOS -----	17
NOMECLATURA-----	18
1 INTRODUÇÃO-----	21
1.1 O veículo existente VSI-01-----	22
1.2 Objetivo do projeto do VSI-02-----	23
1.3 Organização do trabalho-----	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – ESTADO DA ARTE-----	26
2.1 Introdução-----	26
2.2 Veículos Submersíveis-----	28
2.2.1 Os Veículos Submersíveis não tripulados -----	29
2.2.2 Resumo das Tecnologias utilizadas em Veículos Submersíveis não Tripulados-----	32
2.2.3 Submersíveis não tripulados construídos no Brasil-----	32
2.3 ROV – Veículos Operados Remotamente-----	33
2.3.1 Classificação dos ROV-----	33
2.3.2 Subsistemas Componentes de um ROV-----	37
2.3.2.1 Subsistema Estrutural e de Vaso de Pressão-----	38
2.3.2.2 Subsistema de Vetorização de Empuxo e Propulsão-----	40
2.3.2.3 Subsistema de Emersão e Submersão-----	45
2.3.2.4 Subsistema de Controle-----	47

2.3.2.5	Subsistema de Transdutores ou Sensores-----	48
2.3.2.6	Sistema de Visão Subaquática-----	49
2.3.2.7	Subsistema do Cabo Umbilical-----	49
2.3.2.8	Subsistema de Iluminação-----	51
2.3.2.9	Subsistema de Carga Extra-----	51
2.3.2.10	Subsistema de Energia ou Potência-----	51
2.4	Inspeção de Barragens-----	53
2.4.1	Velocidades e pressões encontradas nos mecanismos que compõem uma Usina Hidrelétrica-----	54
2.4.2	Regimes de escoamento-----	58
2.5	ROV utilizado para inspeções em Usinas Hidrelétricas-----	59
2.6	Projeto e desenvolvimento do VSI-01-----	61
3	<b>METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE UM VEÍCULO SUBMERSÍVEL-----</b>	<b>63</b>
3.1	Introdução -----	63
3.2	Concepção e projeto de um veículo submersível-----	63
3.2.1	Projeto mecânico-----	67
3.2.2	Cinemática de um ROV-----	72
3.2.3	Subsistema de Propulsores-----	77
3.2.4	Projeto dos Vasos de Pressão-----	80
3.2.5	Subsistema de controle dos propulsores e de potência-----	81
3.2.6	Subsistema de visão-----	81
3.2.7	Integração dos subsistemas-----	82
4	<b>PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO VSI-02-----</b>	<b>83</b>
4.1	Introdução-----	83
4.2	Subsistemas embarcados no submersível VSI-02-----	87
4.2.1	Subsistema Estrutural-----	88
4.2.2	Subsistema de Emersão e Submersão ( <i>Buoyancy</i> )-----	99
4.2.3	Subsistema de Visão-----	103
4.2.4	Subsistema de Propulsão e Vetorização de Empuxo-----	104
4.2.5	Subsistema do Cabo Umbilical-----	108
4.2.6	Subsistema de Controle-----	110
4.2.7	Subsistema de Iluminação-----	112
4.2.8	Subsistema de Potência-----	114
5	<b>COMISSONAMENTO E TESTES DO VSI-02 -----</b>	<b>116</b>

5.1	Comissionamento e testes do VSI-02-----	116
5.1.1	Comissionamento e teste dos vasos de pressão-----	116
5.1.2	Testes do subsistema de emersão e submersão (Buoyancy)-----	118
5.1.3	Testes do subsistema de visão-----	121
5.1.4	Subsistema de Propulsão e Vetorização de Empuxo-----	123
5.1.5	Subsistema do Cabo Umbilical-----	130
5.1.6	Subsistema de Controle-----	131
5.1.7	Subsistema de Potência -----	133
5.2	Relação de custos de desenvolvimento do VSI-01 e VSI-02-----	133
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS-----	135
6.1	Análise dos resultados realizados no VSI-02-----	135
6.1.1	Vasos de pressão-----	135
6.1.2	Subsistema de emersão e submersão do VSI-02-----	135
6.1.3	Subsistema de visão-----	136
6.1.4	Subsistema de propulsão e vetorização de empuxo -----	136
6.1.5	Subsistema de cabo umbilical-----	136
6.1.6	Subsistema de controle-----	137
6.1.7	Subsistema de potência-----	137
6.2	Análise comparativa entre os custos de desenvolvimento dos submersíveis VSI-01 e VSI-02-----	138
6.3	Análise comparativa entre os custos de inspeção usuais de uma hidroelétrica e os custos de inspeção por um ROV-----	139
7	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS-----	141
7.1	Preâmbulo-----	141
7.2	Conclusão-----	141
7.3	Veículo Submersível de Inspeção (VSI-02) – Contribuições-----	144
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	145
	ANEXO A -----	156
	ANEXO B -----	158
	ANEXO C -----	173

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Inspeção visual de turbinas em Usinas Hidrelétricas utilizando equipe de mergulhadores	21
FIGURA 1.2	VSI-01 Submersível construído no CPH/UFMG	23
FIGURA 2.1	Resumo dos veículos não-tripulados e seus níveis de autonomia.	32
FIGURA 2.2	LCROV - Exemplos de ROVs de baixo custo utilizados em inspeções e observações subaquáticas	34
FIGURA 2.3	ROV STEALTH 17 da HITEC	35
FIGURA 2.4	ROV Tiburon do <i>Monterey Bay Aquarium Research Institute</i> (MBARI)	36
FIGURA 2.5	ROV KAIKO desenvolvido no Japão	37
FIGURA 2.6	ROV TROJAN e os subsistemas embarcados	38
FIGURA 2.7	Vetorização de empuxo por posicionamento dos motores propulsores	42
FIGURA 2.8	Vetorização de empuxo por superfícies direcionais	42
FIGURA 2.9	Descrição das partes de um hélice	43
FIGURA 2.10	Representação gráfica de um hélice, vista frontal e superior	44
FIGURA 2.11	Representação de um propulsor elétrico. Vistas: isométrica, frontal e lateral	45
FIGURA 2.12	Representação de um propulsor hidráulico do hélice	45
FIGURA 2.13	Equilíbrio Hidrostático	46
FIGURA 2.14	Flutuadores utilizados em ROV	47
FIGURA 2.15	Câmera utilizada no ROV MAX	49
FIGURA 2.16	Conexão do Cabo Umbilical ao veículo submersível	50
FIGURA 2.17	Conexão para Cabo Umbilical ( <i>theter</i> )	50
FIGURA 2.18	Desenho de uma tomada d'água	55
FIGURA 2.19	Tubo de sucção tronco-cônico	57
FIGURA 2.20	Tubo de sucção curvo	57
FIGURA 2.21	ROV Stingray Veículo Operado Remotamente	60

FIGURA 2.22	Stingray em ação, sendo utilizado em inspeção de UHE's	60
FIGURA 2.23	Visão do geral do VSI-01 no tanque de teste do laboratório	61
FIGURA 2.24	Vista geral e esquemática do VSI-01	62
FIGURA 3.1	Ciclo de Planejamento	67
FIGURA 3.2	Forças de flutuação e emersão exercidas sob o submersível	68
FIGURA 3.3	Desenho esquemático do VSI-02 com seus eixos coordenados	69
FIGURA 3.4	Diagrama unifilar do VSI-02 com numeração dos nós (início e término das barras)	70
FIGURA 3.5	Diagrama unifilar do VSI-02 com numeração das barras	71
FIGURA 3.6	Diagrama unifilar do VSI-02 com a combinação de carregamento 01	71
FIGURA 3.7	Segunda alternativa de posicionamento dos propulsores para o VSI-02	72
FIGURA 3.8	Diagrama unifilar do VSI-02 com a combinação de carregamento 02	72
FIGURA 3.9	Sistema de coordenadas aplicadas ao VSI-02 para definição da cinemática	73
FIGURA 3.10	Desenho da bancada de ensaios experimentais determinação do arrasto	77
FIGURA 3.11	Desenho da primeira bancada de ensaios experimentais de propulsores	78
FIGURA 3.12	Desenho Esquemático da segunda bancada de ensaio experimental de propulsores	79
FIGURA 3.13	Representação gráfica exemplificativa do desenvolvimento do ensaio	80
FIGURA 4.1	Primeiro projeto do veículo submersível VSI-02	83
FIGURA 4.2	Segundo projeto do veículo submersível VSI-02	84
FIGURA 4.3	Terceiro projeto do veículo Submersível VSI-02	84
FIGURA 4.4	Projeto do modelo passivo do ROV desenvolvido no CPH	85
FIGURA 4.5	Modelo reduzido passivo desenvolvido para teste de flutuação do submersível	85
FIGURA 4.6	Quarto projeto do veículo submersível VSI-02 e início da sua construção	85
FIGURA 4.7	Construção do corpo principal do quarto projeto do VSI-02	86
FIGURA 4.8	Re-projeto VSI-02 que influenciou na concepção final do submersível	86

FIGURA 4.9	Concepção do VSI-02 sem os flutuadores	87
FIGURA 4.10	Desenho esquemático da gaiola tubular	90
FIGURA 4.11	Foto da estrutura tubular em gaiola construída em aço inox	90
FIGURA 4.12	Detalhe dos vasos de pressão em planta e elevação	91
FIGURA 4.13	Vasos de pressão e reforços de cantoneira construídos em aço inox	92
FIGURA 4.14	Aberturas dos vasos de pressão construídos em aço inox	92
FIGURA 4.15	Representação da face do vaso de pressão como chapa engastada em todas as extremidades	93
FIGURA 4.16	Representação dos perfis submetidos à verificação dos esforços	94
FIGURA 4.17	Vaso de pressão da câmera de visão e visor acrílico do VSI-02	95
FIGURA 4.18	Foto dos conectores de alta pressão acoplados às mangueiras dos vasos	96
FIGURA 4.19	Conector de alta pressão conectado aos vasos de pressão	96
FIGURA 4.20	Vista geral dos conectores de alta pressão conectado ao VSI-02	96
FIGURA 4.21	Projeto das placas de base dos suportes dos propulsores	97
FIGURA 4.22	Suporte dos propulsores do VSI-02.	97
FIGURA 4.23	Suporte dos propulsores verticais do VSI-02	98
FIGURA 4.24	Diagrama unifilar do suporte dos propulsores do VSI-02	98
FIGURA 4.25	Perfil do suporte dos propulsores do VSI-02	98
FIGURA 4.26	Proteção do hélice do propulsor em aço inox	99
FIGURA 4.27	Posição do centro de massa e do centro de empuxo no VSI-02 e eixos do sistema O	100
FIGURA 4.28	Esquema do subsistema de visão do VSI-02	103
FIGURA 4.29	Imagem (a) fora da água, (b) alvo submerso e (c) imagem restaurada	103
FIGURA 4.30	Submersível VSI-02 em fase de montagem dos propulsores	104
FIGURA 4.31	Sistema de Vetorização de empuxo do VSI-02 (vista frontal)	104
FIGURA 4.32	Sistema de Vetorização de empuxo do VSI-02 (planta)	105
FIGURA 4.33	Utilização de quatro propulsores horizontais e dois verticais	105

FIGURA 4.34	VSI-02 utilizando quatro propulsores horizontais e dois verticais	106
FIGURA 4.35	Fotos dos componentes do propulsor a Hélice durante a fase de desenvolvimento	107
FIGURA 4.36	Vista superior do sistema de propulsores instalados no VSI-02	108
FIGURA 4.37	Sistema de acoplamento do cabo umbilical no VSI-02 com seis vias e dezoito vias	109
FIGURA 4.38	Cabo umbilical construído com: a)cabo manga de seis vias e b) cabo manga dezoito vias	109
FIGURA 4.39	Controle PWM da APEX modelo MSA240	110
FIGURA 4.40	Caixa de montagem do subsistema de controle composta por: conversor DC / DC, circuitos de controle PWM e terminais de conexão com a bateria	110
FIGURA 4.41	Suporte em acrílico utilizado no acoplamento das placas de controle do VSI-02	111
FIGURA 4.42	Caixa de controle externo, interligada ao VSI-02 através do cabo umbilical.	111
FIGURA 4.43	Controle de acionamento dos propulsores verticais	112
FIGURA 4.44	Sistema de iluminação e visão montado no VSI-02	113
FIGURA 4.45	Circuito de acionamento do sistema de iluminação	113
FIGURA 4.46	Submersível VSI-02 com as duas baterias embarcadas	115
FIGURA 5.1	Teste hidrostático realizado nos vasos de pressão do VSI-02	116
FIGURA 5.2	Sistema utilizado no teste hidrostático dos vasos de pressão	117
FIGURA 5.3	Foto do tanque construído para testes do VSI-02	119
FIGURA 5.4	Foto dos testes de emersão e submersão do VSI-02	121
FIGURA 5.5	Imagem recebida no monitor LCD com os motores desligados	122
FIGURA 5.6	Imagem recebida no monitor LCD com os motores ligados	122
FIGURA 5.7	Fotos da bancada de ensaio dos propulsores do VSI-02	123
FIGURA 5.8	Foto da segunda bancada de ensaio dos propulsores do VSI-02	125
FIGURA 5.9	Configuração utilizada para o sistema de propulsão e vetorização de empuxo do VSI-02	127

FIGURA 5.10	Verificação da distância percorrida vezes o tempo de um giro à direita do VSI-02	128
FIGURA 5.11	Verificação da distância percorrida vezes o tempo do movimento avante do VSI-02	128
FIGURA 5.12	Verificação da distância percorrida vezes o tempo de um giro à esquerda do VSI-02	129
FIGURA 5.13	Sinal gerado pelo PWM para rotação nula dos propulsores	132
FIGURA 5.14	Sinal gerado pelo PWM para a rotação do propulsor em velocidade máxima em sentido horário	132
FIGURA 5.15	Sinal gerado pelo PWM para a rotação do propulsor em velocidade máxima em sentido anti-horário	133
FIGURA 6.1	ROV Peewee 300 da IBERCO	138
FIGURA 6.2	ROV VideoRay	139

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1	Alguns submersíveis existentes e seus dispositivos de propulsão e vetorização de empuxo	31
QUADRO 2.2	Classificação dos Veículos Operados Remotamente (ROV)	34
QUADRO 2.3	Categorias de vasos de pressão	40
QUADRO 2.4	Desempenho e Características de fontes de energia	53
QUADRO 2.5	Velocidades médias e regimes de escoamento encontrados em algumas estruturas submersas de uma UHE	58
QUADRO 3.1	Matriz Metodológica para o Desenvolvimento de um Submersível de Inspeção	64
QUADRO 3.2	Manobras experimentais para o teste de vetorização de empuxo do submersível	70
QUADRO 4.1	Sistemas Embarcados no Veículo Submersível	87
QUADRO 4.2	Características mecânicas e físicas do aço AISI 304	91
QUADRO 4.3	Propriedades mecânicas e físicas do Metil-Metacrilato	95
QUADRO 4.4	Parâmetros considerados no cálculo do Centro de Gravidade do VSI-02	101
QUADRO 4.5	Relação de potência e força de cada propulsor do VSI-02 conforme dados dos fabricantes	108
QUADRO 4.6	Caracterização do sistema de iluminação do VSI-02	112

## LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1.	Lista de verificação pré-ensaio do VSI-02	120
TABELA 5.2	Dados do primeiro ensaio dos propulsores	124
TABELA 5.3	Dados do segundo ensaio dos propulsores	126
TABELA 5.4	Dados obtidos no ensaio de vetorização de empuxo dos propulsores	128
TABELA 5.5	Dados obtidos na simulação do sistema de vetorização de empuxo via diagrama unifilar do VSI-02 para o caso de Carregamento 01	129
TABELA 5.6	Dados obtidos na simulação do sistema de vetorização de empuxo via diagrama unifilar do VSI-02 para o caso de Carregamento 02	130
TABELA 5.7	Configuração do cabo e dos sistemas de transmissão e controle do VSI-02	131
TABELA 5.8	Testes de comunicação do cabo e dos sistemas de transmissão e controle do VSI-02	131
TABELA 5.9	Potência consumida por cada Subsistema do VSI-02	133
TABELA 5.10	Composição de custos do VSI-01	134
TABELA 5.11	Composição de custos do VSI-02	134

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1	Curva do ensaio dos vasos de pressão submetidos a diversos carregamentos em intervalos de tempo variado (primeira série de ensaio)	117
GRÁFICO 5.2	Curva do ensaio dos vasos de pressão submetidos a diversos carregamentos em intervalos de tempo variado (segunda série de ensaio)	118
GRÁFICO 5.3	Curva do ensaio dos vasos de pressão submetidos a diversos carregamentos em intervalos de tempo variado (todas as séries de ensaio)	118
GRÁFICO 5.4	Curva do primeiro ensaio dos propulsores	124
GRÁFICO 5.5	Curva do segundo ensaio dos propulsores	126
GRÁFICO 5.6	Relação entre a tensão e a corrente do propulsor	127
GRÁFICO 6.1	Valores comparativos entre os submersíveis comerciais e os desenvolvidos neste projeto	139
GRÁFICO 6.2	Comparação entre três possibilidades de inspeção em UHE's	140

# NOMENCLATURA

## Letras Latinas

CD	coeficiente de arrasto	[adimensional]
CE	centro de empuxo	[adimensional]
CF	centro de flutuação	[adimensional]
CM	centro de massa	[adimensional]
Fa	força de arrasto	[N]
Fp	força de propulsão	[kgf]
Fd	força lida no dinamômetro	[kgf]
g	aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
h	desnível da linha de centro da comporta até o nível d'água normal	[m]
H	desnível topográfico existente entre os níveis a montante e jusante do reservatório	[m]
k	coeficiente de arrasto	[adimensional]
L	comprimento característico do corpo (na direção do deslocamento no fluido)	[m]
P	é a potência fornecida à Bomba	[W]
P <sub>max</sub>	peso máximo definido para o submersível	[kgf]

$P_{\text{propulsor}}$	potência requerida para o propulsor [W]
$Q$	taxa do fluxo volumétrico [m <sup>3</sup> /s]
$Re$	Número de Reynolds [adimensional]
$V$	Velocidade do Submersível [m/s]
$V1$	volume do fluido deslocado [m <sup>3</sup> ]
$v$	velocidade média na abertura da comporta [m/s]
$v_1$	velocidade na saída de uma turbina Francis lenta
$v_2$	velocidade na saída de uma turbina Francis normal
$v_3$	velocidade na saída de uma turbina Francis rápida
$v_4$	velocidade na saída de uma turbina Francis extra-rápida
$v_5$	velocidade na saída de uma turbina Kaplan
$v_6$	velocidade na entrada de um tubo de sucção
$v_7$	velocidade na saída de um tubo curvo de uma turbina Francis

## Letras Gregas

$\alpha$  ângulo entre a reta de geração do hélice e a geratriz da mesma [graus]

$\zeta_i$  coeficiente de perda de carga na entrada do tubo [adimensional]

$\nu$  coeficiente de viscosidade [kgf/(m .s)]

$\rho$  massa específica do fluido [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma_r$  tensão de ruptura [kgf/cm<sup>2</sup>]

$\sigma_{af}$  tensão de dimensionamento [kgf/cm<sup>2</sup>]

$\sigma_{acz}$  tensão de cisalhamento [kgf/cm<sup>2</sup>]

## 1. INTRODUÇÃO

As transformações do setor elétrico, que ocorrem atualmente no cenário nacional e internacional, conduzem as empresas em geral a uma constante busca de melhoria da qualidade e da produtividade como alternativa para melhorar sua competitividade (em termos de confiabilidade) e garantir o fornecimento de seu produto conforme especificado, para um mercado cada vez mais exigente. Dada a necessidade constante de inspeção em partes componentes da turbina e a conseqüente indisponibilidade das unidades geradoras, tem-se que contabilizar um prejuízo substancial ao sistema energético.

A inspeção visual de estruturas submersas em usinas hidrelétricas é uma atividade para a qual normalmente se designam profissionais treinados, capazes de gerar opiniões e, se for o caso, intervirem sobre o item inspecionado. Entretanto, devido à diversidade de condições de trabalho, as dificuldades inerentes ao trabalho subaquático e à segurança do pessoal envolvido nestas inspeções, FIG. (1.1.), esta tarefa torna-se um problema de gerenciamento complexo e de alto risco para a equipe.

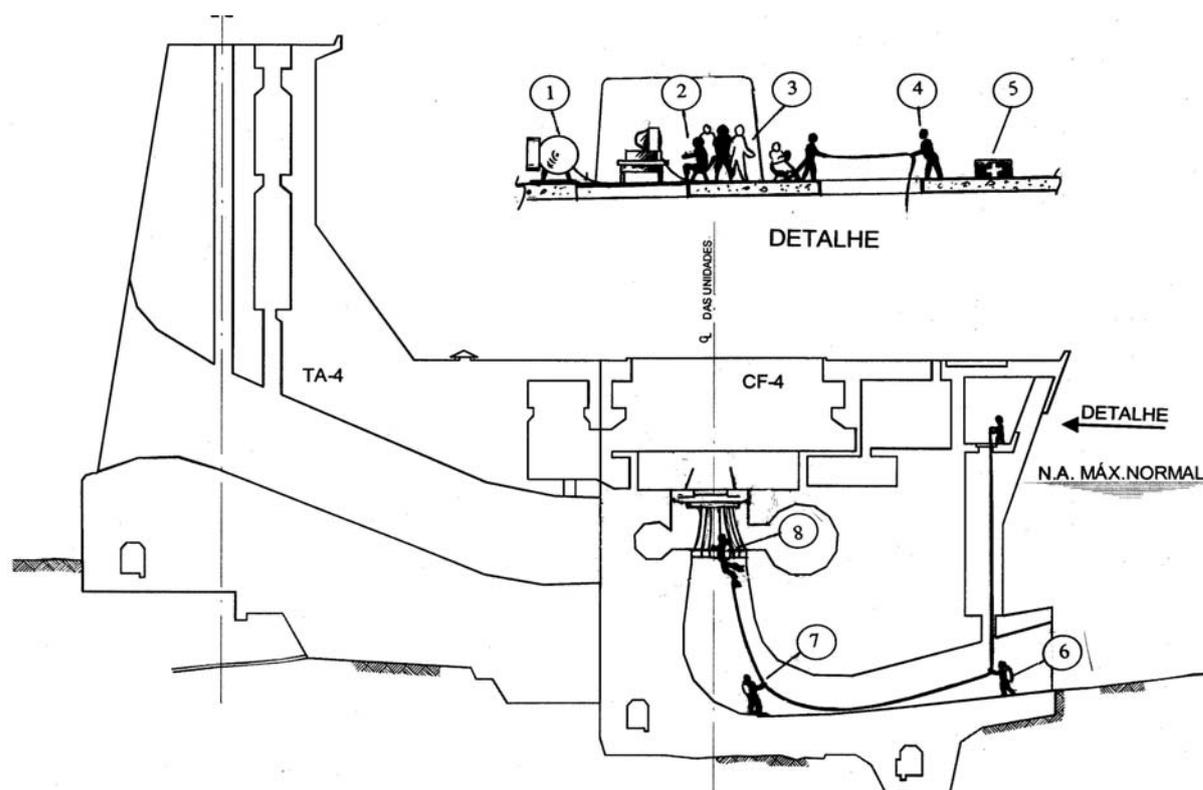


FIGURA 1.1. – Inspeção visual de turbinas em Usinas Hidrelétricas utilizando equipe de mergulhadores.

1)compressor de ar, 2)técnico de monitoramento, 3)equipe de apoio, 4)mergulhador reserva, 5) primeiros socorros, 6-8)equipe de mergulhadores

FONTE – CESP / 2º SEPOCH – 2000.

Com o objetivo de mitigar os impactos da indisponibilidade das unidades geradoras e visando propiciar melhores condições de trabalho, têm-se proposto a utilização de **veículos**

**submersíveis operados remotamente** (ROV - *Remote Operated Vehicle*) equipados com câmeras e sensores capazes de realizar as operações de inspeção com auxílio de um operador localizado em uma estação terrestre ou em uma embarcação. Este tipo de veículo é muito difundido no mundo; entretanto, no Brasil sua utilização ainda é restrita devido aos elevados custos de aquisição e locação destes equipamentos. Projetos de ROV desenvolvidos para trabalhar em inspeções de estruturas submersas em usinas hidrelétricas (TSUSAKA et al., 1986; COTE e LAVALLEE, 1995; POUPART et al., 2000; BATLLE et al., 2003) e nucleares (ROMAN, 1991; KIM et al., 1999) constituem aplicações típicas de ROV em ambiente de água doce (LAVAL et al, 2000).

O desenvolvimento de um ROV de baixo custo (quando comparado com os equipamentos disponíveis hoje para aquisição e locação), capaz de realizar o procedimento de vistoria de estruturas submersas e a caracterização dos sistemas de propulsão por hélice convencionais, tornam este trabalho inovador. Cabe ressaltar que o equipamento proposto prevê o emprego de alta tecnologia a partir de peças convencionais, o que torna sua implantação vantajosa economicamente.

### **1.1 O veículo existente VSI-01**

Motivados por estas questões, elaborou-se o projeto e o protótipo de um veículo de inspeções subaquático que teve como objetivo principal o estudo de uma solução viável e efetiva no quesito “eliminar riscos e prover melhores condições de trabalho”. Este veículo é um sistema móvel telecomandado capaz de captar imagens e transmití-las via cabo para um ponto distante, permitindo seu armazenamento e análise.

O veículo submersível de inspeção, concebido e desenvolvido no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG em pesquisas anteriores, teve como objetivo inicial permitir a formação de conhecimento básico sobre o problema através da caracterização dos principais subsistemas, quais sejam: flutuabilidade, capacidade de manobra, sistemas de refrigeração interna e sistemas de vídeo. O projeto foi assim denominado “VSI-01”, FIG. (1.2.).

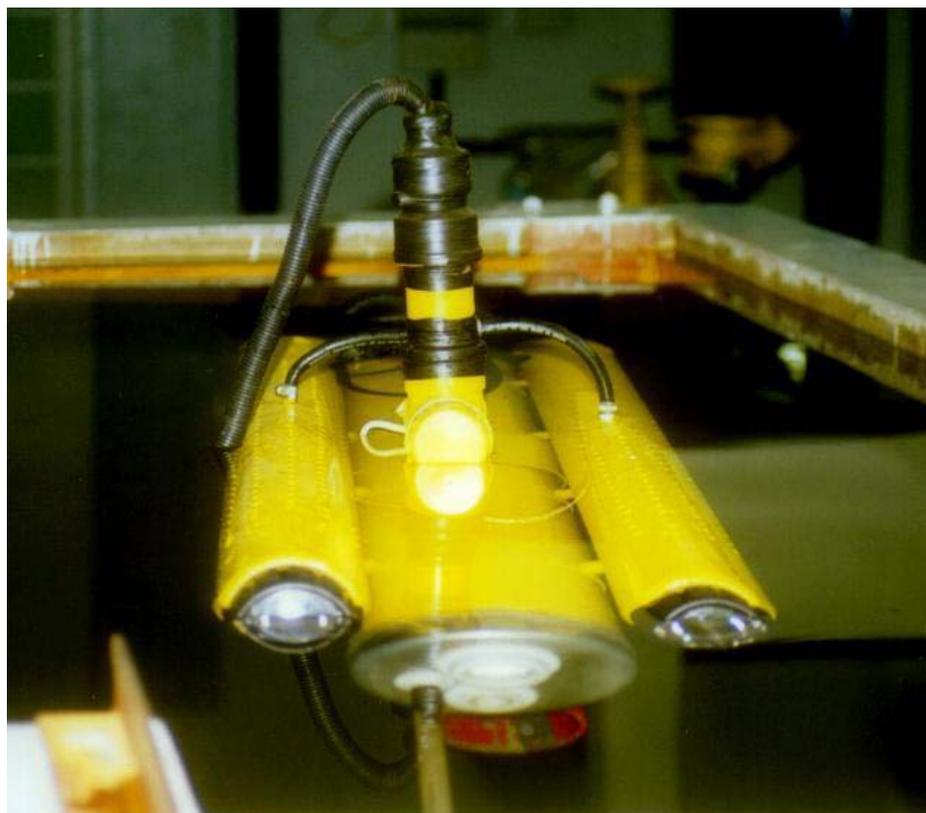


FIGURA 1.2. – VSI-01 - Submersível construído no CPH/UFMG

FONTE – CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG, 1986

O desenvolvimento do VSI-01 permitiu que problemas correlatos à montagem de ROV fossem estudados não só do ponto de vista teórico, mas através de ações práticas capazes de auxiliar o bom andamento de um novo projeto.

O conjunto destas soluções encontradas no projeto do VSI-01 gerou uma série de procedimentos a serem seguidos e questões foram levantadas na construção e desenvolvimento de um veículo submersível. Estes procedimentos e questões estão listados no anexo A.

## 1.2 Objetivo do projeto do VSI-02

São raros e muitas vezes fragmentados os estudos no Brasil relativos à estabilização, vetorização de empuxo, propulsão e caracterização dos subsistemas componentes dos veículos submersíveis.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um submersível de operação remota, de baixo custo, utilizando peças convencionais, e estudar a alternativa de propulsão e vetorização de empuxo por hélice que possa ser utilizada neste veículo.

A relevância do trabalho proposto consiste na possibilidade de apresentar uma alternativa capaz de impulsionar a utilização de veículos submersíveis remotamente operados. Esta possibilidade está diretamente relacionada às vantagens com relação à redução dos custos e eliminação de riscos à vida de mergulhadores, usualmente inerentes aos procedimentos adotados para a inspeção em usinas hidroelétricas.

Durante o desenvolvimento deste trabalho serão avaliados aspectos mecânicos, custos de desenvolvimento, capacidade de manobrabilidade e caracterização do sistema de propulsão e vetorização de empuxo por hélice.

### **1.3 Organização do trabalho**

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos. Neste primeiro, a introdução, apresenta-se um panorama geral sobre as motivações deste trabalho e apresenta-se a proposta deste trabalho e sua organização.

O capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, onde são apresentados os principais tipos de veículos submersíveis não tripulados: ROV (*Remote Operated Vehicle*) e AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), uma revisão histórica dos submersíveis construídos no Brasil e no mundo assim como as características e parâmetros básicos necessários para seu dimensionamento. É realizada uma sucinta revisão dos subsistemas componentes de um ROV: vasos de pressão, sistemas de estabilização, sistemas de vetorização e propulsão, emersão e submersão, sistemas de controle e visão subaquática. Apresentam-se as faixas de velocidade geralmente encontradas nos mecanismos que compõem uma usina hidroelétrica e seus regimes de escoamento (laminar e turbulento). Este capítulo é dedicado também à apresentação do projeto e do desenvolvimento do veículo submersível de inspeção VSI-01 anteriormente construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal de Minas Gerais.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia para o desenvolvimento e caracterização de um veículo submersível, abordando desde a concepção até os testes de comissionamento, determinação de suas características hidrodinâmicas assim como metodologias aplicadas às construções das bancadas de ensaio e dos procedimentos experimentais. Ao final do capítulo é apresentada a metodologia para a integração dos subsistemas embarcados no submersível.

No capítulo 4 são descritos o projeto e o desenvolvimento do veículo submersível de inspeção VSI-02, seus subsistemas componentes e o detalhamento de cada processo construtivo. Neste capítulo apresenta-se uma avaliação dos sistemas de propulsão, onde são estudadas suas principais estruturas componentes. Em seguida apresentam-se os equipamentos e os procedimentos para a identificação da potência despendida pelo ROV.

O capítulo 5 apresenta os testes de comissionamento gerados pelos estudos realizados no CPH na construção do VSI-02: os resultados obtidos do ensaio dos vasos de pressão, os resultados obtidos para o sistema de propulsão e vetorização de empuxo utilizado, os resultados dos ensaios de emersão e submersão. Apresenta-se a relação de custo de desenvolvimento que permitirá avaliar a viabilidade de uso e construção destes equipamentos.

A análise dos resultados e dos testes realizados é apresentada no capítulo 6, onde também é realizada uma análise técnica-econômica do desenvolvimento do VSI-02.

Finalmente, no sétimo capítulo, apresentam-se as considerações finais do trabalho, as conclusões e as propostas de investigações para estudos futuros dentro desta temática.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - O ESTADO DA ARTE

### 2.1 Introdução

Com o passar do tempo os submersíveis foram sendo desenvolvidos e seus sistemas de propulsão aprimorados, passando inicialmente por sistemas que utilizavam como força motriz o homem: (remos, manivelas, etc.) a sistemas que utilizavam inovações trazidas pela evolução humana (vapor, diesel, ar comprimido, reações químicas, molas, gases, motores e energia nuclear).

Segundo Harris (1997), a primeira descrição de um submersível data de 1578, quando William Bourne escreveu sobre um barco que possuía um sistema mecânico simples que permitia variar o peso total, possibilitando assim que o mesmo ficasse submerso. O princípio descrito por Bourne propunha uma embarcação com casco duplo e pequenas aberturas (furos) no casco externo. Estas aberturas eram fechadas por almofadas de couro localizadas entre os cascos, que podiam ser recuadas para dentro, criando uma câmara inundada. Estas almofadas se movimentavam através de um sistema de parafusos capazes de expulsar a água e fechar as aberturas. Este mecanismo representava o primeiro sistema de flutuação descrito para um submersível. O problema de renovação de ar interno foi resolvido através de um tubo de respiração. Não há qualquer registro da forma de propulsão.

Um histórico do desenvolvimento dos primeiros submersíveis é apresentado por Harris (1997), sendo descritos alguns dos equipamentos construídos ao longo de diversas épocas:

- 1623 - o holandês Cornelis Van Drebbel construiu dois submarinos movidos a remo, com o objetivo de realizar buscas e resgates em obras no leito do mar.
- 1776 – David Bushnell construiu o submersível chamado "tartaruga", por assemelhar a uma tartaruga do mar, que flutuava verticalmente na água. Seu sistema de propulsão era constituído por dois hélices, um horizontal e um vertical, movidos a manivela.
- 1799 - o americano Robert Fulton construiu o *Nautilus*, que dispunha de propulsão do hélice manual e era equipado com armas grosseiras de curto alcance. Nas experimentações, o "*Nautilus*" conseguiu sustentar uma velocidade máxima submersa de 2 m/s.

- 1856 - o submersível *Ictinel*, projetado pelo espanhol Narciso Monturiol, foi lançado ao mar e permaneceu submerso por duas horas.
- 1878 - em Liverpool, o Reverendo George Garrett construiu um pequeno submersível em forma de ovo. Um ano depois construiu o "*Resurgam*", que tinha 12 m de comprimento e utilizava vapor em sua propulsão. A grande dificuldade para este equipamento referia-se à propulsão sob a água, que melhorou com a utilização do motor elétrico. Entretanto, os primeiros geradores de eletricidade eram muito pesados e as baterias acumuladoras eram muito grandes.
- 1886 - um oficial naval espanhol projetou um barco propulsionado por dois motores de aproximadamente 22.370 W (30 hp) que usava energia armazenada em acumuladores.
- 1887 - os franceses lançaram seu primeiro submarino, o *Gymnote* ou “Enguia”. Suas baterias elétricas permitiam uma velocidade máxima teórica de 3,32 m/s. O *Gymnote* dependia inteiramente das baterias acumuladoras, que tinham de ser recarregadas por um gerador em terra ou em outro navio.
- 1896 - foi construído o submersível *Narval*, que tinha dois sistemas de propulsão: uma máquina a vapor de 164 kW para a navegação de superfície e um motor elétrico de 60 kW para a navegação submersa, sendo que a máquina a vapor podia girar um dínamo para recarregar as baterias, dando a este equipamento um alcance efetivo que ultrapassou em muito o de todas as outras embarcações elétricas já construídas.
- Em seguida, a *Holland Boat Company* construiu um submersível que obteve pleno êxito e que se chamou *Holland*. O projeto do *Holland* também apresentava um sistema duplo de propulsão, porém usava um motor à gasolina de 33 kW.
- 1906 – é lançado o *U-Boat*, que tinha um motor *Körting* a querosene, cujo desempenho era melhor do que o motor à gasolina dos *Hollands*. Apresentava, entretanto, um grave inconveniente: soltava densas nuvens de fumaça, sinalizando a todos sua localização.

- Por volta de 1904, as principais linhas tecnológicas mais utilizadas nos submersíveis já estavam definidas. Desde então, os três grandes marcos: a bateria acumuladora elétrica, o motor elétrico e o motor a diesel como fontes propulsoras foram continuamente melhorados. Somente após quase meio século surgiu algo fundamentalmente inovador.
- Em 1954 foi lançado ao mar o primeiro submarino movido à energia nuclear, o americano *Nautilus*. Seu reator era capaz de gerar vapor para propulsionar seus dois eixos motores.

Hoje existem exemplos de pequenos batiscafos tripulados capazes de atingir profundidades superiores a 6000 m. Já em 1960, o batiscafo *Trieste* de projeto suíço atingiu uma profundidade acima de 10000m na fossa oceânica de Mariana levando dois tripulantes. Esta marca só foi repetida em 1995 com o submersível não tripulado Kaiko de fabricação japonesa; entretanto, este equipamento foi perdido durante uma operação em 2003.

Também existem pequenos veículos submersíveis utilizados em pesquisas, dotados de sistemas de foto-filmagem e braços mecânicos, capazes de recolher amostras e efetuar pequenos consertos em estruturas subaquáticas.

No decorrer dos anos surgiram inúmeros submarinos que proporcionaram não apenas que o homem alcançasse cada vez maiores profundidades, mas que várias áreas da Tecnologia fossem beneficiadas com as inovações advindas do desenvolvimento destes equipamentos submersíveis.

## 2.2 Veículos Submersíveis

Os veículos submersíveis existentes hoje podem ser classificados de uma forma geral, segundo Jimenez (2004), em:

- Submersíveis Tripulados:
  - Submersíveis Militares;
  - Submersíveis de Pesquisa.

- Submersíveis Não Tripulados:
  - Veículos rebocados
  - Veículos Operados Remotamente – ROV (*remotely operated vehicle*);
  - Veículos Submersíveis Semi-Autônomos – UUV (*untethered underwater vehicle*).
  - Veículos Submersíveis Autônomos – AUV (*autonomous underwater vehicle*);

### 2.2.1 Os Veículos Submersíveis não tripulados

Segundo a Marine Technology Society of USA (1984), os méritos pelo desenvolvimento dos primeiros veículos submersíveis não tripulados podem ser atribuídos à empresa *Luppis-Whitehead Automobile* e à Dimitri Rebikoff. Esta empresa *Luppis-Whitehead Automobile*, desenvolveu em 1864, na Áustria, um veículo submersível que apresentava a forma de um torpedo que foi intitulado de PUV (veículo subaquático programado). Em 1953, o francês Dimitri Rebikoff (1921-1997) desenvolveu o “*Poodle*” para observação em águas profundas. Desde então, inúmeros submersíveis foram construídos para as mais diversas atividades, entre as quais a inspeção e vistoria de estruturas submersas.

A necessidade de realizar manutenção em equipamentos e estruturas localizadas a grandes profundidades e a exploração de áreas subaquáticas inacessíveis ao ser humano, principalmente para atividade petrolífera, levou ao desenvolvimento de equipamentos capazes de realizar com precisão e eficácia estes trabalhos sem oferecer risco ao ser humano. Estes equipamentos abrangem uma vasta gama de veículos, que vai dos mais simples submersíveis aos mais complexos (HOVER, 2002 e YUH, 1995).

Os veículos rebocados são os mais simples de serem construídos. São sistemas hermeticamente fechados, que embarcam uma série de transdutores capazes de coletar dados que são enviados à estação central. Os veículos rebocados representam os submersíveis utilizados em missões de mapeamento de superfícies submersas. Estes veículos são acoplados a uma embarcação através de um cabo e arrastados sobre a superfície a ser mapeada. Normalmente não apresentam nenhum sistema de propulsão e utilizam vetorização por superfícies direcionais (JIMENEZ, 2004).

Os ROV são veículos tele-operados equipados normalmente com vários propulsores e que utilizam um cabo, denominado umbilical, responsável pela troca de informações entre o

---

veículo e a estação de terra (WASSERMAN et. al., 2003). Estes veículos são usados principalmente para tarefas de inspeção, observação e manutenção (JIMENEZ, 2004 e KIM et. al., 1999). Os ROV são basicamente equipamentos controlados por uma estação e que são capazes de se deslocarem de acordo com a necessidade do operador. Normalmente os sistemas embarcados nestes equipamentos são constituídos por conjuntos de transdutores, sistemas de vídeo, sistemas atuadores, sistema de iluminação, sistemas de potência, sistema de flutuação e sistemas de controle.

Os UUV representam os veículos submersíveis semi-autônomos, que são veículos não tripulados capazes de realizar uma missão subaquática pré-estabelecida, mas que dependem em parte de operadores externos para executarem a missão. Estes veículos não utilizam cabo na comunicação com os operadores externos e sim sinais enviados à estação de terra ou a antenas de retransmissão posicionadas ao longo da área de inspeção.

A etapa seguinte na evolução dos equipamentos submersíveis corresponde ao desenvolvimento dos veículos submersíveis autônomos (AUV). Os AUV mostraram-se tecnologicamente mais avançados e apresentaram uma grande vantagem sobre os ROV: o fato de não estarem limitados por um cabo preso à superfície. Além disso, dispõem de uma semi-inteligência proporcionada pela integração da arquitetura de hardware e de softwares capazes de fornecerem uma semi-autonomia. Normalmente são utilizados em missões subaquáticas de longa duração, sem intervenção humana. Os AUV são dispositivos pré-programados, capazes de realizarem com certa precisão um re-planejamento de suas tarefas, caso necessário. Os sistemas embarcados em um AUV se equiparam aos sistemas embarcados nos UUV e nos ROV, diferenciando-se por apresentarem o subsistema de potência também embarcado. A limitação destes equipamentos reside na capacidade de carga extra que o AUV suporta. Esta limitação reflete na tendência atual de que os ROV evoluirão para um sistema híbrido, situação em que se pretende alcançar a capacidade de carga suportada pelos ROV aliada à autonomia dos AUV.

O QUADRO 2.1. apresenta as principais características de alguns exemplos de submersíveis construídos e utilizados em inspeção, pesquisas e manutenção de estruturas submersas YUH (2000).

## QUADRO 2.1

Alguns submersíveis existentes e seus dispositivos de propulsão e vetorização de empuxo .

Submersíveis	Desenvolvedor	Class.	Tipo de Propulsor	Tipo de Vetorização de Empuxo	Velocidade (m/s)	Peso (kg)
<b>Odsseya Iib 1995</b>	MIT	AUV	1 Hélice	Planos direcionais	1,00	-
<b>Autosub-1 1995</b>	Southampton Oc. Center	AUV	1 Hélice	Planos Direcionais	1,80	-
<b>Albac 1992</b>	IIS, Univ.Tokyo	AUV	Deslizamento	Deslocamento C.G.	0,50 – 1,00	45
<b>Remus 1997</b>	W. H. O. I.	AUV	1 Hélice	Planos Direcionais	0,25 – 2,80	37
<b>ARCS</b>	ISE Research	AUV	1 Hélice	Planos Direcionais	1,50	1360,80
<b>SAILARS</b>	ISE GROUP	AUV	2 Hélice	Planos Direcionais	-	-
<b>KORAL-AT</b>	Fac.Ocean Tech.	ROV	5 Hélices	4 Horizontais e 1 Vertical	1,00	60
<b>VORAM 1997</b>	Korea Research	AUV	3 Hélices	2 Horizontais e 1 Vertical	1,25	375
<b>VSI-02</b>	CPH / UFMG	ROV	6 Hélices	2 Horizontais e 4 Verticais	-	245
<b>NEKTOR</b>	Nektor	AUV	Planos Flexíveis	4 Horizontais e 4 Verticais	-	-
<b>Mini Max 2000</b>	DeepSea System	ROV	4 Hélices	2 Horizontais Popa 2 Vert./Transv. 45°	Lat – 0,75 Vert – 0,75 Hor – 1,90	636
<b>Power III</b>		AUV	1 Hélice	Leme	-	-
<b>Stingray</b>	Benthos	ROV	4 hélices	2 horizontais 1 vertical e 1 lateral	2,5 (horiz.) 0,40 – 0,50	86,8
<b>Phoenix 1992</b>	N. P. S. Monterey – CA	AUV	6 Hélices	8 superfícies de controle (2 hélices longitudinais, 2 transversais e 2 verticais)	1,75	225
<b>JHU</b>	Johns Hopkins University	ROV	6 Hélices	2 horizontais / 2 transversais Opostas e 2 verticais	-	140
<b>SubjuGator</b>		ROV	4 propulsores de hélice	2 horizontais e 2 verticais	-	40,82
<b>ANIMIDA (TUVAAQ)</b>		AUV	3 hélices	2 horizontais e 1 vertical	1,00	90
<b>TALON</b>	THETIS	ROV	4 hélices	2 horizontais e 2 verticais	0,50	50
<b>MARIDAN</b>		AUV	2 propulsores de hélice	Aileron	0,25 – 2,00	1700
<b>MiniRover Mk-II</b>	Benthos	ROV	3 hélices	Controle de Empuxo das hélices	0,50	35
<b>Phantom 300</b>	UNCW	ROV	3 hélices	-	0,25	32
<b>Phantom S2</b>	UNCW	ROV	6 hélices	4horizontais / 2 verticais	1,00	145
<b>Mk-I (2002)</b>	NURC	ROV	6 hélices	4 horizontais e 2 verticais	1,00	820
<b>C-Scout (2002)</b>		UUV	1 hélice	4 superfícies de controle	3,00 - 4,00	-
<b>MAGELLAN™ 725</b>	Oceaneering	ROV	7 propulsores de hélices	2 axial / 3 vertical 2 lateral e (reversíveis)	-	2100
<b>MAGELLAN 825</b>	Oceaneering	ROV	7 propulsores de hélices	2 axial / 3 vertical 2 lateral e (reversíveis)	-	3000
<b>PHOENIX</b>	DOE	ROV	8 propulsores de hélices	2 axial / 4 vertical 2 lateral e (reversíveis)	1,50	670
<b>QUEST</b>	Alstom Schilling Robotics	ROV	7 propulsores de hélices (elétricos)	3 Vertical 4 horizontais (reversíveis)	1,50 Lat. 1,25 Vert. 1,00	2000
<b>Xanthos Odyssey Iix</b>	MIT	AUV	1 hélice	Planos direcionais	0,50 – 1,50	200
<b>Odyssey III</b>	MIT	AUV	1 propulsor de hélice	-	1,50 – 2,00	400
<b>ODIN (1995)</b>	ASL Hawaii	AUV	8 propulsores de hélice	4 horizontais 4 verticais	1,00	-
<b>SHINKAI 6500</b>	JAMSTEC	AUV	1 hélice princ. e 3 hélices aux.	1 hélice principal / 1 transversal ao eixo e 2 verticais	0,70	-

FONTE – Adaptada de YUH (2000)

### 2.2.2 Resumo das tecnologias utilizadas em Veículos Submersíveis não tripulados

Segundo Jimenez (2004), todos os sistemas desenvolvidos e utilizados até hoje em processos de inspeção submersa apresentam vantagens e limitações. Por isso é necessário definir previamente as aplicações específicas que se pretende realizar a fim de que se possa estabelecer com clareza o tipo de sistema a adotar.

A FIGURA (2.1) permite uma visualização geral de todos os sistemas e seus níveis de automação.

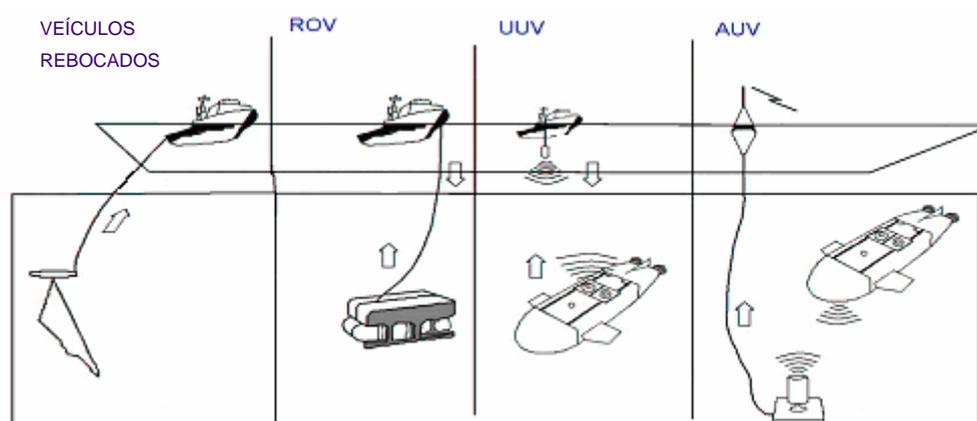


FIGURA 2.1 – Resumo dos veículos não-tripulados e seus níveis de autonomia.

FONTE – JIMENEZ, 2004.

Este trabalho tratará especificamente dos ROV (veículos submersíveis não tripulados e remotamente operados).

### 2.2.3 Submersíveis não tripulados construídos no Brasil

No Brasil existem poucos trabalhos na área de robótica subaquática. Dentre os trabalhos encontrados, as principais temáticas abordadas foram sobre dinâmica e controle. Dominguez (1989) apresenta um estudo sobre modelagem e desenvolvimento de um programa para simulação dinâmica de veículos submarinos. Cunha (1992) propõe um sistema de controle à estrutura variável de um ROV. Hsu et al.(2000) apresentam um procedimento para identificação do modelo dinâmico dos propulsores. Souza e Maruyama (2002) apresentam diferentes técnicas de controle para posicionamento dinâmico. Tavares (2003) desenvolveu um estudo sobre modelos cinemáticos e dinâmicos de veículos subaquáticos. Bastos (1998) apresentam o desenvolvimento e construção de veículo submersível de inspeção.

## 2.3 ROV – Veículos Operados Remotamente

Segundo a *Marine Technology Society of USA* (1984) e o *National Research Council of USA* (1996), o veículo remotamente operado (ROV) é descrito como um robô subaquático que permite que o operador permaneça em um ambiente confortável enquanto o ROV executa o trabalho subaquático. O ROV é controlado por um cabo umbilical (*tether*) que interliga os sinais do comando e de controle do veículo, enviando as informações dos sensores aos operadores. Em sistemas mais complexos, uma garagem submersa composta pelo cabo umbilical e o sistema de gerência (*Tether Management System* - TMS) é freqüentemente incluída.

### 2.3.1 Classificação dos ROV

Os ROV podem ser classificados quanto ao tamanho, à capacidade de submersão, à potência embarcada, dentre outras características, tais como os sistemas de atuadores: elétricos, hidráulicos ou eletro-hidráulicos.

Suas dimensões são diretamente relacionadas com o número de funções e conseqüentemente quantidade de sistemas embarcados. Existem pequenos ROV que são equipados apenas com uma câmera de vídeo, sendo geralmente utilizados em tarefas específicas de observação. E existem veículos maiores, equipados com sistemas mais complexos, como por exemplo: manipuladores, sistema de captação de imagem por diversas câmeras, ferramentas mecânicas e outros equipamentos embarcados.

O QUADRO (2.2) apresenta uma classificação fornecida pela *Marine Technology Society of USA* (1984), que relaciona a capacidade de submersão, o tipo de trabalho, a potência demandada pelos sistemas embarcados e os sistemas de atuadores.

QUADRO 2.2  
Classificação dos Veículos Operados Remotamente (ROV)

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

FONTE – Comitê da Sociedade de Tecnologia Marinha dos EUA, 1984.

Os veículos considerados pequenos incluem a maioria dos ROV de baixo custo ("*low-cost*"-LCROV). Estes veículos são usados primeiramente para tarefas de inspeção e de observação. Os ROV de baixo custo (LCROV) apareceram em 1981 com o RASCL da *International Submarine Engineering's* (ISE,2000). Em 1990, trinta e cinco novas versões de LCROV, FIG. (2.2) podiam ser encontradas, sendo construídas por vinte e sete fabricantes diferentes. Os LCROV representam hoje aproximadamente 22% de todos os ROV desenvolvidos no mundo (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1996).

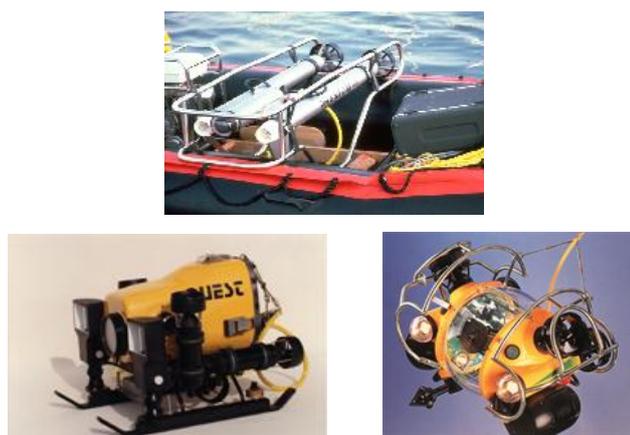


FIGURA 2.2 – LCROV- Exemplos de ROV de baixo custo utilizados em inspeções e observações subaquáticas.  
FONTE – <http://www.rov.org/educational/pages/Small%20Vehicles.html> acessado em 08/06/2007.

A classe dos ROV médios engloba veículos eletro-hidráulicos que variam de 15 a 75 kW de potência, e que podem carregar cargas extras moderadas. Esta escala de ROV pesam de 1.000

a 2.200 quilogramas, com capacidade de carga extra (*payload*) entre 100 e 200 quilogramas. Geralmente possuem um único manipulador, mas podem ser equipados com até dois. Estes veículos compreendem a classe mais extensamente usada de ROV e foi desenvolvida para executar trabalhos considerados moderados. As tarefas típicas desta classe de ROVS são: perfuração, inspeção de tubulações e manutenção.

Os ROV Super Scorpio, Cobra e Viper, que representam esta classe, foram desenvolvidos utilizando tecnologias mais antigas, consideradas ultrapassadas quando comparadas às utilizadas hoje em veículos com a mesma potência.

Os ROV classificados como grandes representam os que estão sendo usados para operações em até 3000 metros de profundidade com potências que variam de 15 a 225 kW. Os ROV desta classe, tais como o TRITON XLS da *Perry Tritech*, pesam aproximadamente (sem cargas de trabalho), de 2.000 a 6.500 quilogramas. São capazes de executar operações submersas em instalações profundas e de carregar e levantar grandes cargas.

Como exemplo de ROV utilizados especificamente para aplicações na exploração de óleo pode-se citar: o Stealth 17 da *HITEC*, FIG.(2.3), o TRITON XL da *Perry Tritech*, o HiROV 3000 e o HiROV 3500, o SCV-3000 da *Stolt Comex Seaway*, o Olympian da *Slingsby* e o Magnum do *Oceaneering*.



FIGURA 2.3 - ROV Stealth 17 da *HITEC*.

FONTE- <http://www.btinternet.com/~derek.mackay/offshore/images/rov/stealth17.jpg>  
acessado em 08/06/2007.

Uma outra classe de veículos é representada por aqueles ROV especiais (*Ultra-Deep*), construídos com a capacidade de trabalhar em profundidades acima de 3.000 metros. Estes veículos tendem a ter um menor consumo de potência o que permite manter um diâmetro

pequeno do cabo umbilical sendo usados principalmente para pesquisa oceânica, busca e missões de salvamento.

Muitos destes equipamentos para atuação em grandes profundidades são projetados para atividades ligadas à pesquisa e à ciência, tal como o Tiburon do *Monterey Bay Aquarium Research Institute* dos Estados Unidos (MBARI), FIG.(2.4). Este ROV auxilia no trabalho de observação da vida nas profundezas do oceano por períodos de tempo prolongados.



FIGURA 2.4 – ROV Tiburon do *Monterey Bay Aquarium Research Institute* (MBARI).

FONTE: <http://www.soest.hawaii.edu/hannides/galleries/Calbasins/Tiburon.html> acessado em 08/06/2007.

Finalmente, com a tecnologia desenvolvida para os ROV, estes veículos quebraram em 1990 a barreira dos 6.000 metros de profundidade. O primeiro ROV capaz de alcançar esta profundidade foi o veículo CURV III, operado pela *Eastport International* (agora *Oceanering Technologies Inc.*), que alcançou uma profundidade de 6.128 metros. Uma semana mais tarde, o registro anterior foi quebrado pelo mergulho do *Advanced Tethered Vehicle* (ATV) a uma profundidade de 6.279 metros.

O ROV KAIKO, desenvolvido no Japão, alcançou um dos pontos mais profundo da terra a 10.911,4 metros em 1995, FIG.(2.5).



FIGURA 2.5 – ROV KAIKO desenvolvido no Japão.

FONTE– <http://www.whoi.edu/science/GG/people/adeschamps/cruises/cruisee.html>  
acessado em 08/06/2007.

### 2.3.2 Subsistemas componentes de um ROV

Os veículos submersíveis pesquisados são compostos pelos seguintes subsistemas, FIG (2.6):

- a. Sistema Estrutural e de Vaso de Pressão;
- b. Sistema de Vetorização de empuxo ou direcionamento;
- c. Sistema de Propulsão;
- d. Sistema de Emersão e Submersão;
- e. Sistema de Controle
- f. Sistema de Transdutores ou Sensores;
- g. Sistema de Visão Subaquática;
- h. Sistema de Iluminação;
- i. Sistema do Cabo Umbilical;
- j. Sistema de Carga Extra;
- k. Sistema de Energia ou Potência;

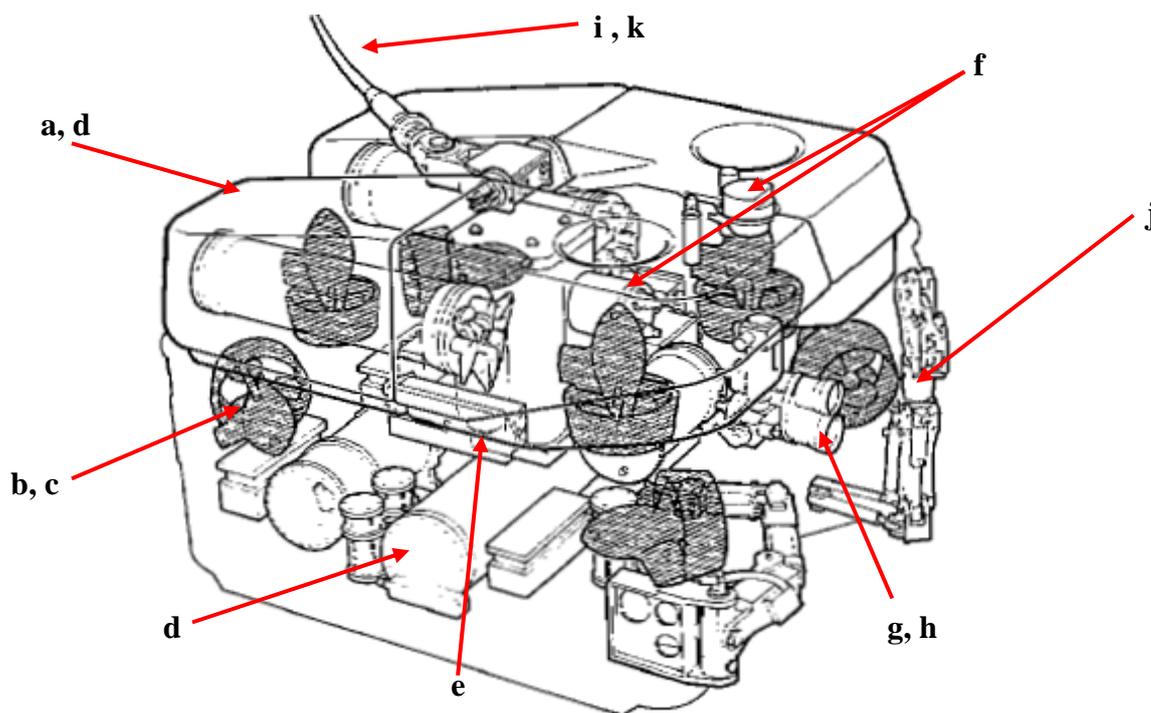


FIGURA 2.6 – ROV TROJAN e os subsistemas embarcados: a) Subsistema Estrutural e de Vaso de Pressão, b) Subsistema de Vetorização de empuxo ou direcionamento, c) Subsistema de Propulsão, d) Subsistema de Emerção e Submersão, e) Subsistema de Controle, f) Subsistema de Transdutores ou Sensores, g) Subsistema de Visão Subaquática, h) Subsistema de Iluminação, i) Subsistema do Cabo Umbilical, j) Subsistema de Carga Extra e k) Subsistema de Energia ou Potência.

FONTE: Adaptado de Liddle (1986)

Para cada um desses subsistemas foi realizado um levantamento das técnicas mais comuns empregadas no desenvolvimento de um ROV. Este levantamento é apresentado a seguir.

### 2.3.2.1 Subsistema Estrutural e de Vaso de Pressão

A definição adequada do material a ser utilizado pelo sistema estrutural de um ROV pode interferir no dimensionamento dos sistemas de potência, na capacidade de carga extra e conseqüentemente na autonomia, nos sistemas de atuadores e nos sistemas sensoriais (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1996).

Alguns sistemas submersíveis construídos utilizam fibra de carbono reforçada com resinas epoxy para a construção dos vasos de pressão principais, entretanto existe uma dificuldade em seu processo de fabricação além do alto custo de aplicação (STACHIW e FRAME, 1988; STACHIW, 1993). Outros submersíveis têm apresentado técnicas avançadas de utilização de materiais como o titânio e a cerâmicas como alternativas para o desenvolvimento de suas estruturas (MOONEY et al., 1996; SEYMOUR et al., 1994).

Uma análise do projeto estrutural mecânico dos diversos ROV apresentados nesta revisão bibliográfica, leva a uma percepção de que os mesmos utilizam uma concepção mecânica que facilita o processo de emersão e submersão e que privilegia a utilização de materiais leves, de alta resistência, com capacidades de agregar flutuação ao ROV.

Percebe-se também a utilização de gaiolas estruturadas que facilitam o acoplamento e posicionamento de cada subsistema embarcado, além de agregar proteção aos mesmos.

Em todos os ROV estudados o subsistema de flutuação é estrategicamente posicionado na parte superior dos ROV, enquanto que os subsistemas embarcados são acondicionados em vasos de pressão hermeticamente fechados e localizados abaixo dos flutuadores, garantindo que o centro de empuxo permaneça acima do centro de massa.

Os vasos de pressão são equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa e estão classificados por categorias, conforme apresentado no QUADRO (2.3). As categorias I, II, III, IV e V representam o risco do vaso de pressão e os ensaios aos quais devem ser submetidos.

As recomendações da NR-13 Norma Regulamentadora do Ministério do Trabalho (BRASIL,1978) que trata de caldeiras e vasos de pressão deverão ser aplicadas aos equipamentos em que o resultado do produto da pressão vezes volume (P.V) seja superior a 8 MPa.m<sup>3</sup>, sendo “P” a máxima pressão de operação em MPa e “V” o volume interno em m<sup>3</sup>.

A NR-13 estabelece que todo vaso de pressão deverá sofrer inspeção extraordinária sempre que:

- a. O vaso for danificado por acidente ou outra ocorrência que comprometa sua segurança;
- b. O vaso for submetido a reparo ou alterações importantes, capazes de alterar sua condição de segurança;
- c. Antes de o vaso ser recolocado em funcionamento, quando permanecer inativo por mais de 12 (doze) meses;

Quadro 2.3

Classificação dos vasos de pressão por Categorias (I,II,III, IVe V)

Classe	Fluído	Categorias				
		P.V $\geq 100$	P.V $\geq 30$ P.V < 100	P.V $\geq 2,5$ P.V < 30	P.V $\geq 1$ P.V < 2,5	P.V < 1
<b>A</b>	Líquidos Inflamáveis, Acetileno, Tóxico $\leq 20$ ppm ou Hidrogênio	I	I	II	III	III
<b>B</b>	Combustível ou Tóxico $>20$ ppm	I	II	III	IV	IV
<b>C</b>	Vapor de água, Gases asfixiantes ou Ar comprimido	I	II	III	IV	V
<b>D</b>	Água ou demais Flúidos não Discriminados	II	III	IV	V	V

Fonte: Norma Brasileira NR13 (1995)

**Notas:**

- a. Considerar volume em  $m^3$  e pressão em MPa;
- b. Considerar 1 MPa correspondente a  $10,197 \text{ kgf/cm}^2$ .

Para o dimensionamento dos vasos de pressão componentes de um submersível é necessário definir:

1. A profundidade de trabalho do submersível;
2. As dimensões e projeto de cada vaso de pressão, incluindo reforços internos e externos;
3. O material de fabricação de cada vaso de pressão.

A análise dimensional e a verificação aplicada devem seguir as normas de cálculo e dimensionamento de vasos de pressão e garantir a estanqueidade dos mesmos à pressão de solicitação.

### 2.3.2.2 Subsistema de Vetorização de Empuxo e Propulsão

Segundo ISE (2000), quando um veículo submersível se movimenta com velocidade constante, a propulsão gerada pelos propulsores se iguala à força de arrasto produzida pelo veículo, EQ.(2.1).

$$F_p = F_a = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Sendo:

$F_p$  – Força de propulsão (N)

$F_a$  – Força de arrasto (N)

$V$  – velocidade (m/s)

$C_D$  – coeficiente de arrasto

$A$  – área de referência (área frontal) (m<sup>2</sup>)

$\rho$  - massa específica do fluido (kg/m<sup>3</sup>)

A potência requerida para o propulsor pode ser fornecida pela EQ. (2.2 ).

$$P_{propulsor} = F_p V = \frac{1}{2} \rho V^3 A C_D \quad (\text{Eq. 2.2})$$

As unidades das variáveis de entrada são fornecidas em (N) para força e (m/s) para velocidade, as quais resultarão em um valor da potência em (W).

Para o subsistema de vetorização de empuxo é comum a utilização de dois tipos principais (FOSSEN, 2002):

- Vetorização por superfícies direcionais;
- Vetorização por posicionamento dos propulsores.

Segundo Jimenez (2004), a utilização do subsistema de manobrabilidade por posicionamento dos propulsores ocorre principalmente nos ROV, FIG.(2.7) e a utilização de superfícies direcionais nos AUV.

Analisando os veículos submersíveis existentes constata-se que, diferentemente dos ROV, os AUV são projetados com um perfil hidrodinâmico aproximado ao de um torpedo, ou de um submersível tripulado, onde os propulsores localizam-se na popa, sendo necessária a utilização de superfícies direcionais para sua manobrabilidade (KOPTIW, 1998), FIG.(2.8).

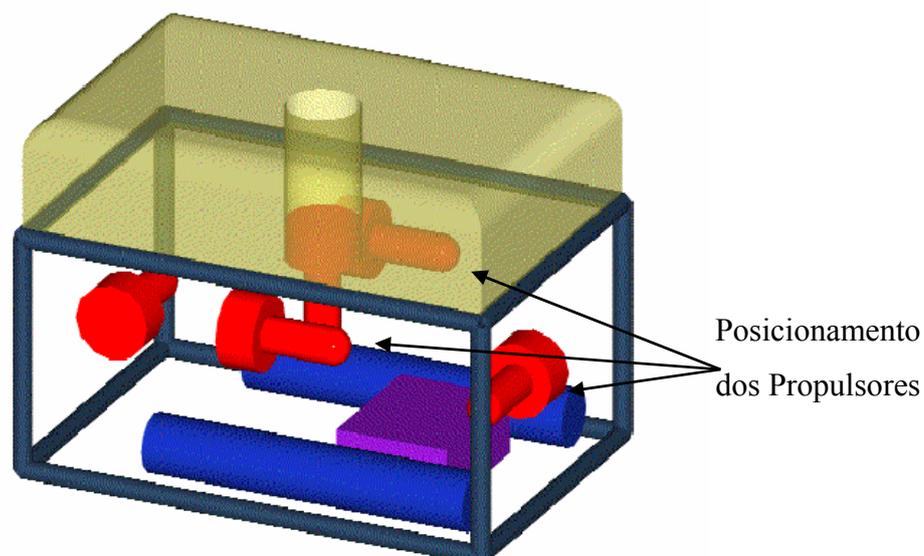


FIGURA 2.7 - Vetorização de empuxo por posicionamento dos motores propulsores.  
FONTE – SMALLWOOD et al, 1999.

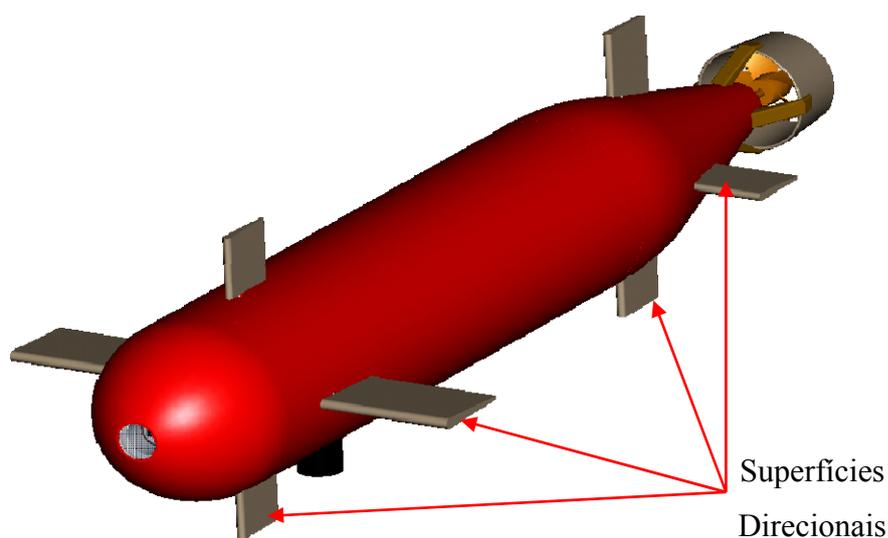


FIGURA 2.8 - Vetorização de empuxo por superfícies direcionais.  
FONTE – KOPTIW (1998).

Em engenharia naval, diferentemente da engenharia aeronáutica, o termo que referencia os hélices de um propulsor é tratado no masculino, representando o sistema de empuxo de uma embarcação (LEWIS,1998).

Sendo os hélices um dos principais componentes dos sistemas de propulsão utilizados em ROV, faz-se importante entender, através de uma breve revisão, seu funcionamento e suas principais características.

Os hélices são constituídos por um núcleo, o **cubo**, ao redor do qual estão dispostos e regularmente distribuídos um determinado número de **aletas** ou **pás** (palas), FIG. (2.9). A pá do hélice compreende uma superfície ativa, o **cara** (superfície externa), que geralmente é um helicóide simples. Esta superfície está disposta na parte de trás, em relação ao movimento do hélice. A superfície oposta, o **dorso** (superfície interna), é geralmente arqueada. A seção transversal da pá se aproxima à dos perfis de mínima resistência à penetração em fluidos. A pá está limitada por um contorno cuja borda dianteira é denominada de **bordo de ataque** e a borda posterior de **bordo de fuga**. A seção longitudinal da pá é constituída por uma espessura decrescente do centro para a periferia. A união das pás com o cubo acontece através das superfícies de adesão, que constituem um ponto de alta resistência dos hélices (NICOLET e BRODBECK, 1955).

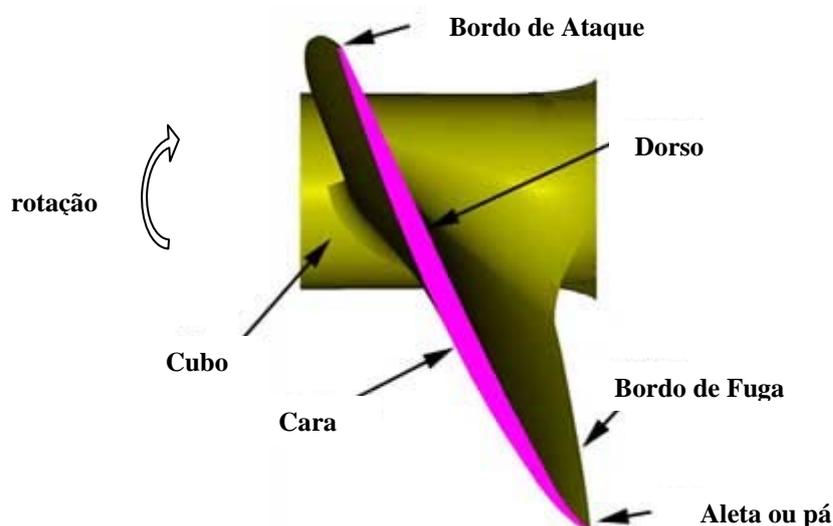


FIGURA 2.9 – Descrição das partes de um hélice.

FONTE – Adaptado de <http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/helice.html>, acessado em 08/06/2007.

Ainda segundo Nicolet e Brodbeck (1955), para definição do hélice é necessário caracterizar: número de pás, diâmetro, passo e sua variação (se houver), diretriz, natureza da geratriz, espessura sobre o eixo, espessura periférica, distância da linha de espessuras máximas ao bordo de ataque, além de vistas frontal e superior que detalhem a forma do cubo e o contorno da pá, conforme FIG. (2.10).

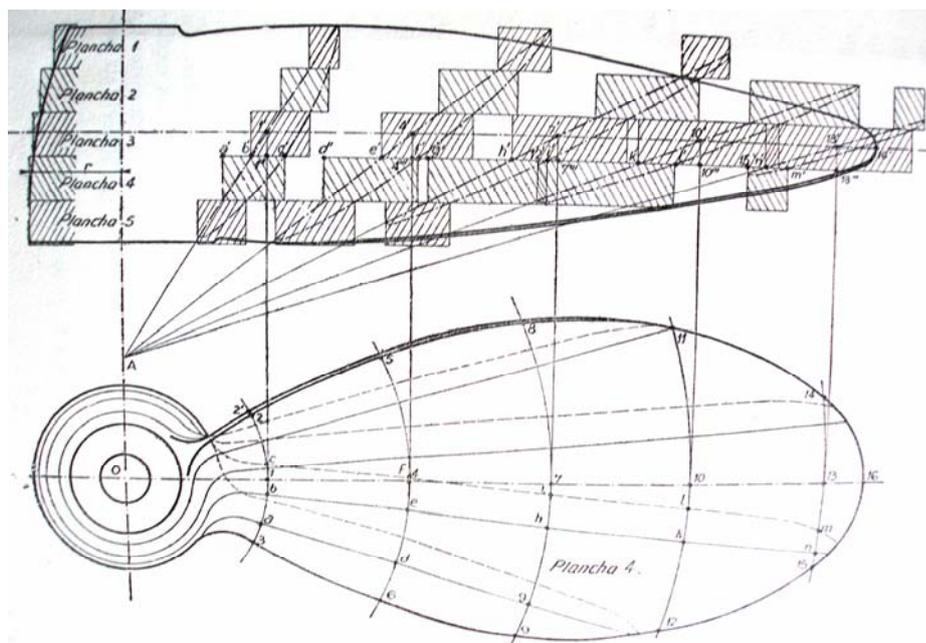


FIGURA 2.10 – Representação gráfica de um hélice, vista frontal e superior.

FONTE – NICOLET e BRODBECK, (1955).

Conforme o sentido de construção do hélice o comportamento do fluido de propulsão é modificado. A determinação dos parâmetros do hélice permite a construção de hélices capazes de gerar a mesma eficiência de propulsão nos dois sentidos de rotação.

Segundo o *National Research Council* (1996), os subsistemas de propulsão definidos pelos diversos submersíveis ROV e AUV já construídos apresentam as seguintes formas:

- Propulsão Elétrica do Hélice;
- Propulsão Hidráulica do Hélice (eletro-hidráulicos);

A configuração do sistema de propulsores deriva das tecnologias desenvolvidas para embarcações. Os propulsores elétricos são normalmente utilizados em ROV de baixo custo, enquanto os propulsores hidráulicos e eletro-hidráulicos são utilizados em ROV das classes média, grande e ultra-profundos (JIMENEZ,2004).

Os propulsores elétricos funcionam através da aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre seus pólos de ligação, FIG. (2.11), enquanto o propulsor hidráulico utiliza um diferencial de potencial hidráulico para o acionamento do hélice, sendo necessária a utilização de todo um sistema capaz de suprir a demanda dos propulsores e outros atuadores hidráulicos disponíveis no ROV, FIG. (2.12).

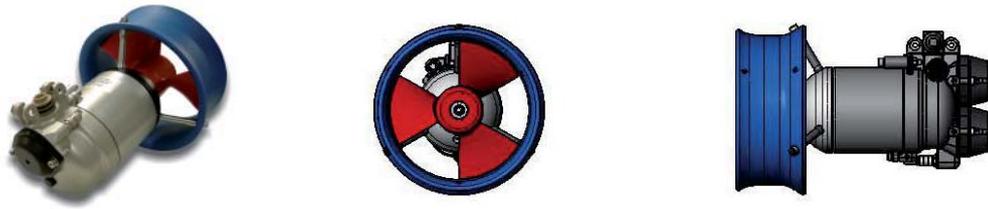


FIGURA 2.11 – Representação de um propulsor elétrico. Vistas: isométrica, frontal e lateral.

FONTE – [www.sub-atlantic.uk](http://www.sub-atlantic.uk) acessado em julho de 2007

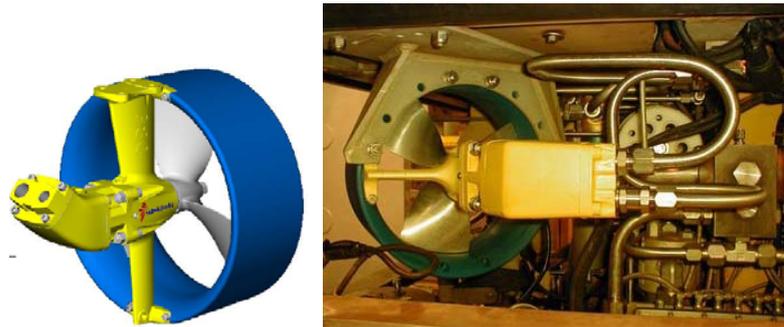


FIGURA 2.12 – Representação de um propulsor hidráulico do hélice

FONTE – Sub-Atlantic (2003)

Os propulsores elétricos são muito difundidos pela facilidade de utilização, pelo baixo custo e pelo baixo consumo de potência, o que permite uma maior autonomia do veículo (SCHUBAK et. al., 1995). Estes equipamentos geralmente fornecem uma propulsão mais eficiente comparada com a fornecida pelos propulsores hidráulicos (SMALLWOOD, 1999).

Em síntese, para o desenvolvimento de um sistema de propulsão eficiente para ROV, deve-se buscar a melhor relação entre o peso do submersível e sua capacidade de carga extra, e o sistema de vetorização de empuxo, que refletirá em uma menor demanda do sistema de potência.

### 2.3.2.3 Subsistema de Emerção e Submersão

Os subsistemas de emergção e submersão correspondem a uma parte crítica do projeto de veículos submersíveis (ZANOLI e CONTI, 2003).

São usualmente utilizados pelos ROV, permitindo o controle e o posicionamento em determinadas profundidades, FIG. (2.13 e 2.14). Podem ocorrer três configurações diferentes de flutuabilidade em um veículo submersível:

- Flutuabilidade positiva – ocorre quando a força de empuxo atuante sobre o ROV é superior ao peso do ROV, fazendo com que o ROV entre em processo de emersão;
- Flutuabilidade neutra – ocorre quando a força de empuxo atuante sobre o ROV é igual ao peso do ROV, é denominado ponto de equilíbrio do ROV. É o ponto de estabilidade do ROV e pode ser alcançado em qualquer profundidade;
- Flutuabilidade negativa – ocorre quando a força de empuxo atuante sobre o ROV é menor que o peso do ROV, fazendo com que o ROV entre em processo de submersão.

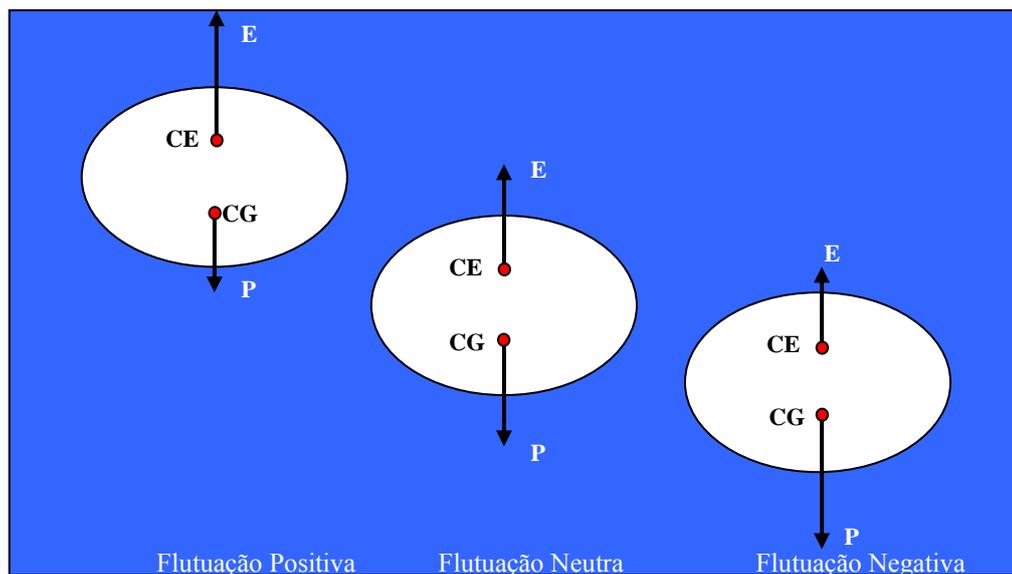


FIGURA 2.13 – Equilíbrio Hidrostático.

FONTE – Fox e McDonald (1998).

A força de campo decorrente da gravidade atua no centro de gravidade (CG) do objeto e a força devido ao empuxo atua no centro de empuxo (CE). Os veículos submersíveis devem ser projetados de forma a garantir que o CG esteja sempre abaixo do CE. Isto permite a formação de um conjugado de forças que tende a endireitar (estabilizar) o veículo. A inversão das posições do CE e do CG provoca um conjugado de forças que tende a emborcar (girar) o veículo. Normalmente o uso de lastros é necessário para se obter a estabilidade de rolamento do veículo (FOX e McDONALD, 1998).



FIGURA 2.14 – Flutuadores utilizados em ROV.

FONTE – [www.flotec.com](http://www.flotec.com) acessado em 08/06/2007.

Segundo Bashour et. al.(2001), os veículos submersíveis adotam normalmente duas opções para o controle de flutuabilidade: flutuação neutra com sistema dinâmico composto por válvulas, tanques de lastro e ar comprimido ou flutuação positiva com sistema de emersão e submersão por acionamento de propulsores. O controle dos propulsores responsáveis pela emersão, submersão e posicionamento do ROV em determinada profundidade, geralmente utiliza controle em malha fechada de forma a garantir a estabilização do sistema.

O sistema de flutuação por câmaras de pressão pode ser acionado por dispositivos mecânicos, hidráulicos, elétricos ou mistos que atuam na regulação do índice de flutuabilidade do ROV, deslocando seu centro de massa (CM) entre o centro de empuxo (CE) e o centro de gravidade (CG) do equipamento. O conjunto destes dispositivos é também associado a um sistema de controle em malha fechada, que garante a estabilização do sistema e maior precisão de posicionamento do ROV na profundidade desejada. Este tipo de sistema permite variar da flutuabilidade positiva à flutuabilidade negativa passando pela flutuabilidade neutra.

#### 2.3.2.4 Subsistema de Controle

Segundo Bessa (2004), a automação aplicada ao posicionamento e orientação de veículos submersíveis, utilizando sistema de controle, facilita o processo de tele-operação destes veículos. Este autor também afirma que com o crescente número de trabalhos dedicados ao problema de posicionamento dinâmico de veículos robóticos submarinos, faz-se necessário o desenvolvimento de um sistema confiável, capaz de lidar com as não linearidades da dinâmica do veículo e com as incertezas resultantes dos efeitos hidrodinâmicos.

Segundo Dorf e Bishop (1998) o sistema de controle é uma interconexão de componentes que formam um sistema capaz de produzir uma resposta desejada. Podem ser em malha aberta, isto é, sem realimentação (retroação), ou em malha fechada, o qual utiliza uma medida

adicional da saída real para comparar a saída real com a resposta desejada. A introdução da retroação permite controlar uma saída desejada e aprimorar a exatidão.

O subsistema de controle representa uma interface importante no desenvolvimento de um ROV (CAVALLO et. al., 2004, HEALEY e MARCO, 2001). Apesar de sua complexidade, a definição de um sistema capaz de agregar todas as variáveis presentes na dinâmica de um veículo submersível possibilitará a obtenção de melhor eficiência e precisão na execução das tarefas destes equipamentos.

### 2.3.2.5 Subsistema de Transdutores ou Sensores

Segundo Amat et. al. (1999), nos últimos anos o principal foco de desenvolvimento de veículos submersíveis foi sobre os sistemas de sensoriamento e percepção destes equipamentos (COTE e LAVALLEE, 1995).

Os transdutores utilizados nos ROV variam conforme sua aplicabilidade. Os transdutores internos realizam o monitoramento dos sistemas embarcados e os transdutores externos referenciam o ambiente que envolve o ROV.

Segundo Werneck (1996) a verificação do desempenho dos transdutores a serem utilizados em um veículo submersível pode ser realizada levantando algumas características como: faixa de atuação, resolução, sensibilidade, linearidade, histerese, erro e precisão.

A faixa de um transdutor representa os níveis de operação da amplitude do sinal de entrada deste transdutor, enquanto a resolução corresponde ao menor incremento do sinal de entrada que é sensível ou que pode ser medido pelo instrumento. A sensibilidade é a função de transferência do transdutor, isto é, a relação entre o estímulo de entrada e o sinal de saída gerado por ele. A não-linearidade corresponde à maior distância observada entre uma medida realizada pelo instrumento e o valor padrão, dividida pela faixa de operação e multiplicada por 100%. A histerese representa a diferença de medição obtida quando comparadas duas medições em um mesmo ponto, sendo que uma foi obtida de forma crescente e a outra de forma decrescente. A exatidão ou erro de um transdutor é a diferença absoluta entre o valor real do padrão e o valor medido pelo instrumento. A precisão ou repetibilidade é a capacidade de se obter o mesmo valor em diversas medidas.

Grande parte dos ROV utiliza sensores de pressão, inerciais, temperatura, umidade e potência como transdutores internos e transdutores ópticos, posicionamento e acústicos como transdutores externos, (FULTON e CASSIDY, 2001).

Os sensores acústicos, como os de tecnologia sonar utilizados em ROV, normalmente trabalham com uma limitação do alcance de aproximadamente 100 metros (BRUTZMAN et. al., 1997).

Entre os sensores ópticos, as câmeras de vídeo são as mais comumente utilizadas, enquanto as imagens produzidas via *scanner laser* ainda são pouco difundidas.

#### 2.3.2.6 Sistema de Visão Subaquática

O subsistema de visão é normalmente composto por câmeras CCD coloridas ou em preto e branco, hermeticamente lacradas, interligadas via cabo a um microcomputador encarregado de enviar à central de controle as imagens coletadas ao longo da jornada de trabalho do ROV.

O sistema de visão do ROV MAX, FIG. (2.15) é composto por câmeras de vídeo coloridas com *zoom*, 480 linhas de resolução, processamento digital do sinal, formato de saída RS 170 NTSC ou PAL, sensibilidade de 1 lux , com capacidade de trabalho de até 3000 m de profundidade. Cada câmera trabalha com uma tensão de 12 a 24 VDC e consumo de 1A.



FIGURA 2.15 – Câmera utilizada no ROV MAX.

FONTE – <http://www.deepseasystems.com/maxrovd.htm> acessado em julho de 2007.

#### 2.3.2.7 Subsistema do Cabo Umbilical

O sistema de comunicação entre o ROV e os operadores é normalmente realizado através de um cabo composto por fibra-ótica e cabo de potência (NATIONAL RESEARCH COUNCIL,

1996 e LYGOURAS et. al., 1995). Este cabo, também denominado cabo umbilical, transmite aos operadores as informações dos sensores presentes no ROV, as imagens das câmeras de vídeo, informações de potência aplicada aos atuadores e outras informações que facilitam a operação destes equipamentos e retornam ao ROV os comandos enviados pelos operadores e a alimentação de energia.

A utilização da fibra-óptica permitiu que um maior fluxo de informações trafegasse no cabo umbilical, agregando a possibilidade de utilização de diversos tipos de sensores e gerenciamento em tempo real. Segundo Benthos (2003), os cabos umbilicais utilizam um revestimento capaz de suportar uma tensão de trabalho, definida pelo dimensionamento do ROV, e que imprime ao cabo uma flutuação neutra ou negativa. A FIGURA (2.16) apresenta um exemplo de um cabo umbilical (*tether*) acoplado ao ROV *Stingray* da *Benthos* e a FIG.(2.17) apresenta um tipo de conector utilizado nos cabos umbilicais.



FIGURA 2.16 – Conexão do Cabo Umbilical ao veículo submersível.  
FONTE – Manual de Operação do ROV Stingray.- (Benthos, 2003).



FIGURA 2.17 – Conexão para Cabo Umbilical (*tether*).

FONTE – <http://www.rovservices.it/connector.htm> acessado em 08/06/2007.

### 2.3.2.8 Subsistema de Iluminação

Os subsistemas de iluminação utilizados nos ROV são normalmente compostos por pares de lâmpadas de potência variável e compatível com o sistema de potência. Estas lâmpadas são hermeticamente fechadas em receptáculos resistentes capazes de suportar as pressões de trabalho do submersível. O acionamento deste sistema normalmente é isolado do sistema de controle do ROV, permitindo uma redução de ruídos e aumentando sua autonomia.

### 2.3.2.9 Subsistema de Carga Extra

A determinação da carga extra suportada por um veículo submersível influencia no projeto básico da plataforma do submersível, na capacidade do sistema de potência e na eficiência do sistema de propulsores. Segundo o National Research Council (1996), o subsistema de carga extra inclui:

- Sistemas de trabalho (manipuladores, ferramentas, etc)
- Sistema de sensores (acústico, ópticos, gravidade, profundidade, magnético, temperatura, etc)
- Sistemas de potência

As dimensões e o peso de cada carga extra incorporada ao veículo submersível modificará o tamanho, a massa e a potência necessária para a propulsão do mesmo.

### 2.3.2.10 Subsistema de Energia ou Potência

Os ROV utilizam normalmente sistema de potência externo provido por uma fonte de alta-tensão. A energia é transmitida pelo cabo umbilical e convertida para os diversos níveis de tensão utilizados pelos subsistemas embarcados no ROV (OMERDIC e ROBERTS, 2003). Apesar desta prática ser bastante comum, a utilização desta concepção tem dois problemas: o alto custo do cabo e o alto risco associado ao uso de alta-tensão.

Poucos ROV utilizam sistema de potência embarcado, por ser este um limitador da carga extra suportada pelo veículo, e do tempo de autonomia do mesmo. Entretanto, existem algumas vantagens na utilização deste tipo de sistema: redução do diâmetro do cabo

umbilical, com conseqüente redução na interferência do mesmo no controle do ROV e no custo final e redução dos riscos inerentes à utilização da alta-tensão.

Segundo *National Research Council* (1996) a definição do sistema de potência a ser adotado no veículo submersível afetará sua autonomia e sua capacidade de carga extra. Frequentemente a fonte de energia é avaliada em termos de potência, mas poder-se-á referenciá-la também em termos de energia específica (Watt-hora por quilograma) ou em termos de densidade de energia (Watt-hora por litro).

Baterias são normalmente utilizadas em veículos submersíveis, seja como fonte secundária de energia ou como fonte primária. As características e desempenho de várias fontes de energia são apresentados no QUADRO (2.4). Este quadro é dividido em três tipos de sistema de potência: baterias recarregáveis, baterias não recarregáveis e células combustíveis. As células combustíveis são dispositivos que funcionam por reações eletroquímicas entre um reagente e um oxidante produzindo eletricidade.

Fatores importantes na seleção da bateria incluem: a capacidade de fornecer a quantidade de energia na medida necessária, confiabilidade, facilidade e velocidade de recarga e possibilidade de operar em condições adversas, tais como sob grandes variações de temperatura e de pressão.

As considerações da segurança aplicadas a sistemas de potência embarcados em veículo submersíveis são críticas e limitam o uso de algumas baterias, tais como a de lítio, que apesar de sua elevada capacidade de fornecimento de energia podem gerar gases explosivos durante a operação ou podem pegar fogo se falharem.

QUADRO 2.4 – Desempenho e Características de fontes de energia

Tecnologia	Energia Específica Wh/kg	Densidade de Energia Wh/Litro	Ciclos de Vida	Custo R\$/kWh	Utilização em veículos submersíveis	Resíduo da Bateria
<b>BATERIAS RECARREGÁVEIS</b>						
Lead Acid (Pb/PbO)	35	90	800	100	Sim	Geração H
Níquel Cadmium (NiCd)	55	130	1.000	3.000	Sim	Cd toxicity
Níquel Hidreto (NiH <sub>2</sub> )	60	150	10.000	4.000	Sim	Alta Pressão H
Níquel Metal Hidreto (NiMH)	70	175	300	100	Sim	Alívio de Alta Pressão
Zinco Prata (Ag-Zn)	140	380	20	2.000	Sim	Geração H
Ferro Prata (Ag-Fe)	150	200	200	1.000–1.600	Demonstração	Geração H
Li-Sólido Polímero Eletrolítico (Li-SPE)	150	360	200	200–2.000	Experimental	Fogo de Lítio
Lítio Ion Estado Sólido (Li-Ion-SPE)	150	360	1.000	200–2.000	Experimental	Nenhum
Lítio Ion (Li-Ion)	200	200	2.000	1.000–2.000	Sim	Alívio
Lítio Dióxido Cobalto (LiCoO <sub>2</sub> )	220	300	50	2.000	Experimental	Alívio de Pressão e Fogo de Lítio
<b>BATERIAS NÃO RECARREGÁVEIS</b>						
Lítio Óxido Sulfúrico (LiSO <sub>2</sub> )	140	500	1	800	Demonstração	Fogo de Lítio
Zinco Prata (Ag-Zn)	220	400	5	6.000	Demonstração	Geração de H
Lítio Dióxido de Manganês (LiMnO <sub>2</sub> )	400	450	1	400	Sim	Fogo de Lítio
Lítio Carbono Monofluorídico (Li(CF) <sub>x</sub> )	800	1.200	1	3.400	Sim	Fogo de Lítio
<b>CÉLULAS COMBUSTÍVEL - FUEL CELLS</b>						
Alcalina	100	90	400	10.000	Demo	Gas H e O fires
membranas de troca de prótons (PEM/GOX/GH)	225	200	50	20.000	Demo	Gas H e fogo de O
membranas de troca de prótons (PEM/LOX/LH)	450	400	50	30.000	Experimental	H e fogo de O
membranas de troca de prótons (PEM/SOX/SH)	1.000	883	50	10.000	Experimental	N/A

FONTE: NATIONAL RESEARCH COUNCIL, (1996).

A integração dos subsistemas e dos projetos de engenharia envolvidos no desenvolvimento de um veículo submersível tem uma particular relevância pelas diversidades de componentes e tecnologias utilizadas.

## 2.4 Inspeção de Barragens

A inspeção em barragens e em suas estruturas componentes são as prioridades eminentes das grandes, médias e pequenas hidroelétricas. A constante movimentação das vazões turbinadas, das comportas e vertedores, das descargas de fundo e os acionamentos dos diversos mecanismos de controle de um barramento elevam a quantidade e a qualidade de seus

monitoramentos. Estas vistorias passam a ser rápidas, constantes e envolvem uma equipe especializada de alto custo (ASME, 1996).

#### 2.4.1 Velocidades e pressões encontradas nos mecanismos que compõem uma Usina Hidrelétrica

Para tomada d'água de baixa pressão, a velocidade máxima na seção transversal entre as grades está fixada entre 0,76 e 1,52 m/s, dependendo conseqüentemente da máquina utilizada e do espaçamento entre as barras da grade. Essa velocidade máxima varia entre 3 e 4,5 m/s em tomadas d'água de alta pressão (de fundo).

Segundo Creager e Justin (1955), a velocidade através das comportas da tomada d'água não deve superar o valor dado pela EQ. (2.3), e mesmo para grandes desníveis, este valor deve ser limitado a 7,6 m/s.

$$v = 0,12\sqrt{2gh} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

sendo:

$v$  = velocidade média na abertura da comporta;

$h$  = desnível da linha de centro da comporta até o nível d'água normal.

A FIGURA (2.18) apresenta um desenho esquemático de uma tomada d'água de uma usina hidrelétrica e os equipamentos componentes, como comporta, guindastes, grades e outros.

É através da tomada d'água que a turbina recebe a carga de trabalho dentro de uma UHE – Usina Hidrelétrica. A possibilidade de obstrução desta abertura por objetos trazidos pelas correntes do rio e pela capacidade de atração provocada pela passagem da água para a turbina, torna este aparato um ponto de constante inspeção e monitoramento.

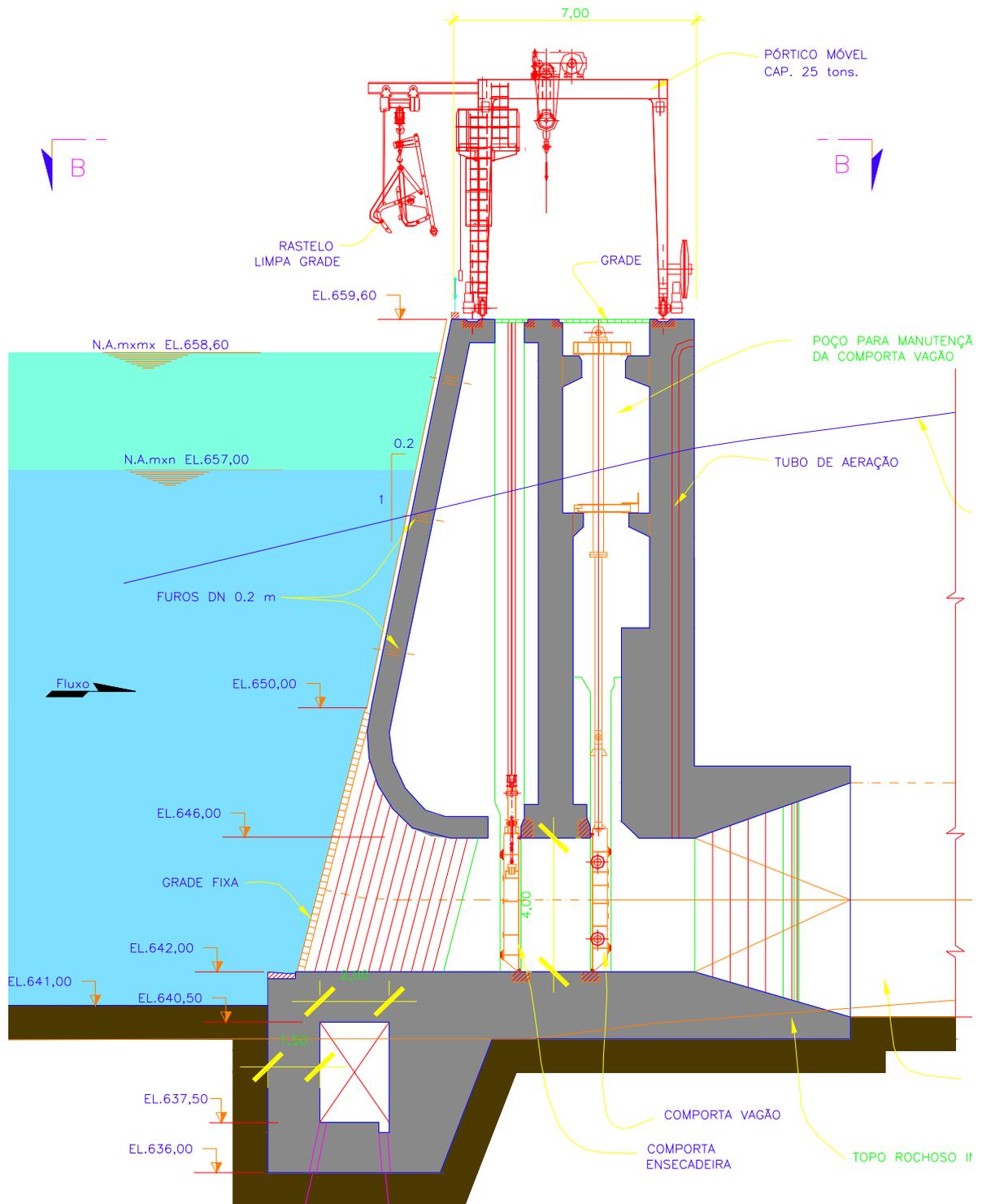


FIGURA 2.18 – Desenho de uma tomada d'água.

FONTE – CPH / Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG

O tubo de sucção, FIG. (2.19 e 2.20) permite a restituição da água, que passa pela turbina, à jusante do reservatório. A necessidade de inspeção no tubo de sucção não se limita somente à avaliação estrutural e/ou mecânica de partes da turbina. Em muitos casos, não se conhece o comportamento de espécies migratórias de peixes que são atraídas por esses mecanismos;

entretanto, sabe-se que eles exercem uma grande atração sobre os peixes. O conhecimento aprofundado do campo de velocidades, de pressões e o levantamento do tipo de escoamento que acontece na partida, funcionamento e parada das máquinas e no tubo de sucção, ajudam a definir parâmetros que possam auxiliar no despacho e controle ambiental de uma Usina Hidrelétrica.

A utilização de um ROV para levantamento do comportamento dos peixes nos tubos de sucção, antes do início de cada atividade da UHE, auxilia na tomada de decisão e minimiza os impactos ecológicos provocados por estes processos.

Conforme Macintyre (1983), ensaios realizados por vários experimentadores aconselham dimensionar a seção, na entrada do tubo de sucção, de modo que a velocidade meridiana, para descarga máxima, não ultrapasse os valores apresentados nas equações (Eq. 2.4 a 2.8), de forma a evitar o fenômeno da cavitação nas pás da turbina.

$$\text{Turbinas Francis Lentas:} \quad v_1 = \sqrt{2g \cdot 0,03H} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$\text{Turbinas Francis Normal:} \quad v_2 = \sqrt{2g \cdot 0,06H} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$$\text{Turbinas Francis Rápidas:} \quad v_3 = \sqrt{2g \cdot 0,10H} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$$\text{Turbinas Francis Extra-Rápidas:} \quad v_4 = \sqrt{2g \cdot 0,25H} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$\text{Turbinas Kaplan:} \quad v_5 = \sqrt{2g \cdot 0,30H} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

nas quais:

H – pode ser aproximado ao desnível topográfico existente entre os níveis a montante e jusante do reservatório.

Para as turbinas Francis lentas e normais pode-se adotar para o tubo de sucção uma forma tronco-cônica, FIG. (2.19) com inclinação de 1:20 a 1:10 relativamente ao eixo e adotar a EQ. (2.9) para a determinação da velocidade na entrada do tubo.

$$v_6 = \frac{v_1}{2} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

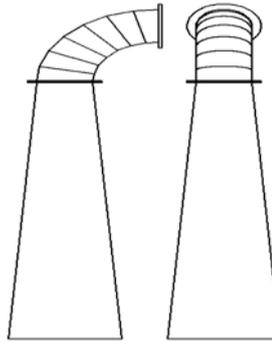


FIGURA 2.19 – Tubo de sucção tronco-cônico.

FONTE – CPH/UFMG.

Nas turbinas rápidas e extra-rápidas com tubo curvo, FIG. (2.20), pode-se chegar à área da seção de saída do tubo de quatro a oito vezes a da entrada. Alguns autores recomendam adotar para a velocidade de saída o valor definido na EQ. (2.10), no caso de turbinas Francis.

$$v_7 = \sqrt{2g \cdot \left( 0,008 + \frac{0,04}{H} \right) H} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

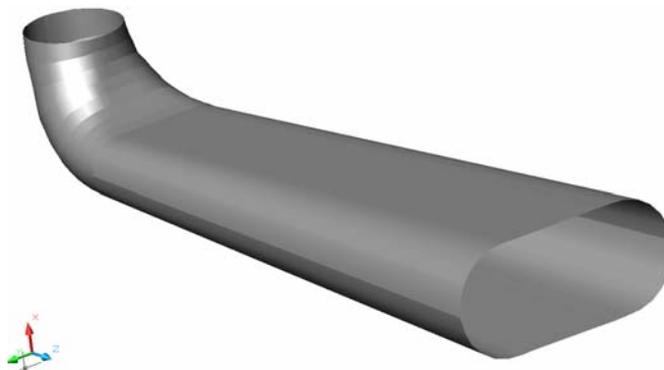


FIGURA 2.20 – Tubo de sucção curvo.

FONTE – CPH/UFMG.

### 2.4.2 Regimes de escoamento

Nas UHE's o regime de escoamento é definido para cada sistema componente e suas respectivas fases de utilização. Em uma inspeção, pode-se passar de regimes laminares à turbulentos em uma mesma estrutura hidráulica; estes regimes são definidos pela operação da barragem em diferentes períodos do ano e pelas próprias estruturas que a compõem. O QUADRO (2.5) apresenta as estruturas hidráulicas passíveis de inspeção em uma Usina Hidrelétrica, as velocidades atuantes nestas estruturas e seus possíveis regimes de escoamento.

QUADRO 2.5

Velocidades médias e regimes de escoamento encontrados em estruturas submersas de uma UHE.

<b>Estrutura Hidráulica</b>	<b>Situação da Estrutura</b>	<b>Velocidades m/s</b>	<b>Regime de Escoamento</b>
<b>Paramento de montante</b>	-	Baixas velocidades	Turbulento
<b>Comporta da Tomada d'água</b>	Fechada	$v < 1,0$	Laminar
	Semi-aberta	$1,0 < v < 2,0$	Crítico
	Aberta	$v < 3,0$	Turbulento
<b>Comporta da Descarga de fundo</b>	Fechada	$v < 1,0$	Laminar
	Aberta	$v < 3,0$	Turbulento
<b>Comporta do vertedouro</b>	Fechada	$v < 1,0$	Laminar
<b>Comporta do Mecanismo de Transposição de Peixes</b>	Fechada	$v < 1,0$	Laminar
	Aberta	$v < 3,0$	Turbulento
<b>Canal de Fuga</b>	-	$v < 3,0$	Turbulento
<b>Tubo de Sucção</b>	-	$v < 3,0$	Turbulento

FONTE – CPH / UFMG.

## 2.5 ROV utilizado para inspeções em Usinas Hidrelétricas

Os ROV são hoje os veículos submersíveis mais utilizados no mundo para realização de inspeção em estruturas submersas marítimas; entretanto, os perfis hidrodinâmicos encontrados em um reservatório e os mecanismos constituintes de uma usina hidrelétrica, exigem que modificações nas estruturas dos ROV sejam implementadas para a viabilização destas inspeções. Os regimes laminares e turbulentos que se alternam ao longo de pontos específicos e cruciais para realização das inspeções exigem que a análise e coleta de informações sejam tarefas precisas e minuciosas, capazes de fornecerem ao avaliador externo uma visão real de cada estrutura, de forma a permitir a realização de pequenas intervenções ao longo do processo de inspeção.

Os ROV desenvolvidos até hoje têm algumas características comuns que determinam seus parâmetros de desenvolvimento e construção.

Dentre estas características, a que mais chama a atenção é o projeto mecânico de sua estrutura, normalmente em gaiola, que serve tanto para suportar como proteger os equipamentos embarcados, minimizar seu volume e conseqüentemente facilitar sua emersão e submersão. Entretanto, tal formato gera grandes coeficientes de arrasto e conseqüentemente aumenta as perdas de desempenho hidrodinâmico do modelo, o que pode interferir nos processos de inspeção e manutenção em estruturas submersas.

O sistema de propulsão elétrico do hélice e o sistema de propulsão eletro-hidráulico são os mais comumente utilizados pelos ROV em operação no mundo e os posicionamentos destes propulsores representam a forma de vetorização de empuxo mais utilizada por eles.

Alguns ROV utilizam sistema de potência externo e alta-tensão para a sua alimentação, o que permite reduzir o diâmetro do cabo umbilical mas eleva o seu custo e risco nas operações. O custo desta autonomia interfere na capacidade de trabalho de cada ROV, na capacidade de carga extra, na necessidade ou não de se manter o sistema de propulsão intermitente, nas suas dimensões e em todos os subsistemas embarcados no ROV. A importância da definição do sistema de potência adequado a cada trabalho ajuda a especificar melhor o dimensionamento do ROV.

Existem hoje no mundo inúmeras iniciativas para desenvolvimento de ROV capazes de se adequarem às situações encontradas nas inspeções de UHE (BATLLE et. al., 2003), mas são poucos os que a realizam com sucesso.

O ROV Stingray, FIG. (2.21 e 2.22), é um veículo submersível utilizado em inspeções de UHE e constitui um dos poucos veículos adaptados e capazes de realizar tais inspeções (BENTHOS, 2002).

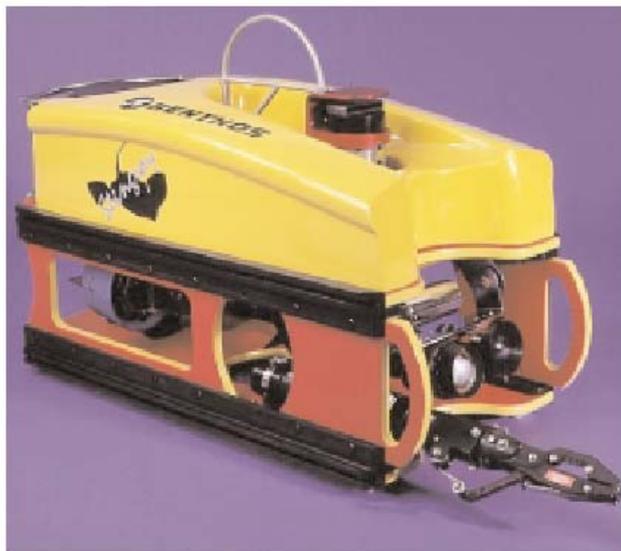


FIGURA 2.21 - ROV Stingray Veículo Operado Remotamente.  
FONTE – [www.benthos.com](http://www.benthos.com) acessado em 08/06/2007.



FIGURA 2.22 – Stingray em ação, sendo utilizado em inspeção de UHE's.  
FONTE – [www.benthos.com](http://www.benthos.com) acessado em 08/06/2007.

O Stingray possui como características principais a utilização de 4 graus de liberdade, tendo a possibilidade de transladar em três eixos coordenados e realizar rotação sobre seu eixo transversal. Possui velocidade avante de até 2,5 m/s dependendo da carga extra embarcada, e velocidades laterais e verticais de até 0,5 m/s. Pode alcançar profundidades de até 304 metros e possui peso próprio de 65,8 kg.

## 2.6 Projeto e desenvolvimento do VSI-01

O estado da arte do CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal de Minas Gerais em desenvolvimento de submersíveis de inspeção é descrito abaixo, apresentando-se algumas das características do veículo anteriormente construído.

Segundo Bastos (1998), o “Veículo Subaquático de Inspeção” (VSI-01) teve por objetivo eliminar riscos e criar condições melhores para inspeções subaquáticas em estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas.

Através do uso de um veículo não tripulado totalmente telecomandado dotado de um sistema de câmeras digitais capazes de captar imagens e enviá-las a um computador localizado junto à unidade de comando, objetivou-se a melhoria nas condições operacionais e facilidade no trato de informações. A FIG. (2.23) apresenta uma vista geral do VSI-01 no tanque de teste do laboratório.

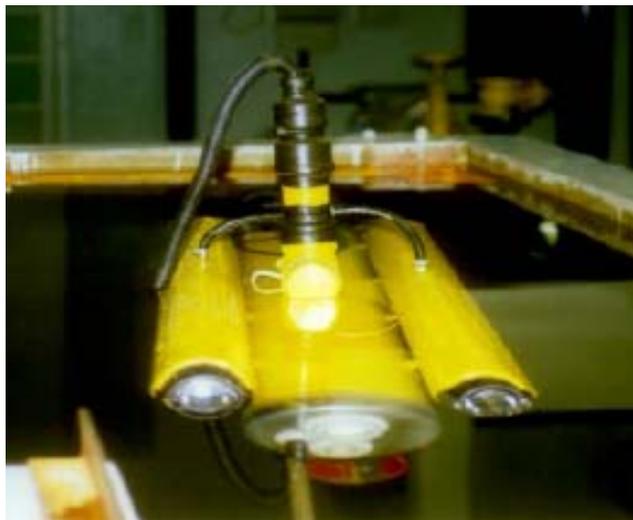
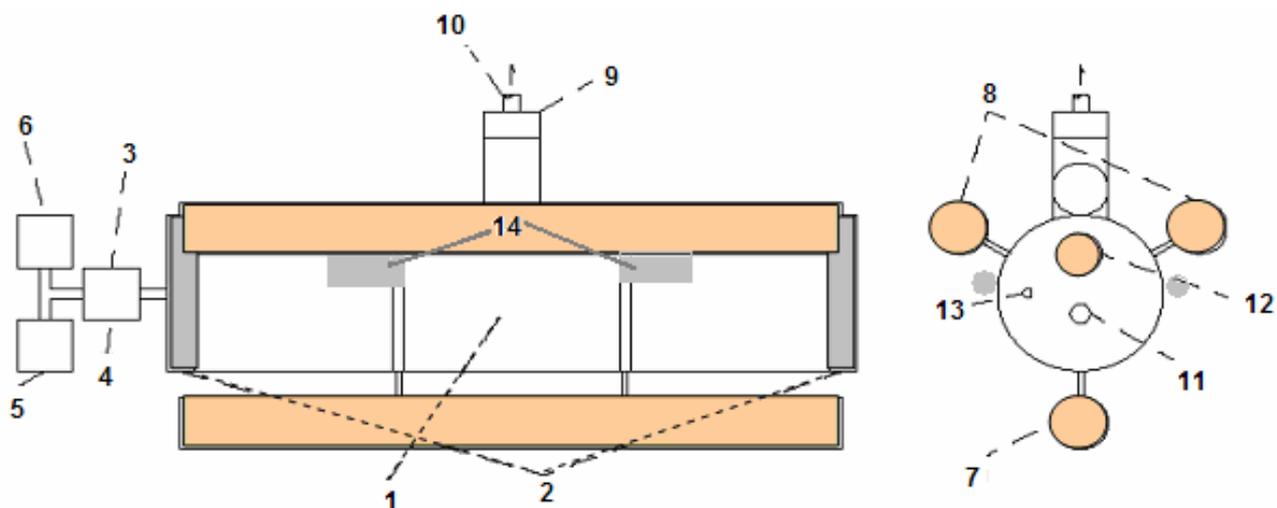


FIGURA 2.23 – Visão do geral do VSI-01 no tanque de teste do laboratório.

FONTE – CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG.

O VSI-01 foi construído a partir de um cilindro principal no qual está inserido um esqueleto estrutural que tem como objetivo enrijecer o corpo do equipamento onde se localizam os sistemas de propulsão e o de vídeo-monitoração.

A figura (2.24) apresenta um esquema geral do equipamento desenvolvido com as suas principais características.



01 Corpo do Submersível	08 Tubos laterais do sistema de flutuação / submersão
02 Tampas dianteira e traseira do submarino	09 Torre de conexão dos controles e alimentação remotos
03 Válvula solenóide vetorização à direita	10 Cabo de conexão ao controle e sistemas de alimentação
04 Válvula solenóide vetorização à esquerda	11 Tomada de sistema de propulsão e vetorização
05 Válvula solenóide vetorização à frente	12 Lente de vigia da câmera de vídeo
06 Válvula solenóide vetorização à ré	13 Cabo de vídeo da câmera de vídeo
07 Tubo de lastro	14 Motores auxiliares

FIGURA 2.24 – Vista geral e esquemática do VSI-01.

FONTE – CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 2007.

O sistema construtivo e os testes realizados no VSI-01 encontram-se no anexo B deste trabalho.

### **3. METODOLOGIA PARA O ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM VEÍCULO SUBMERSÍVEL**

#### **3.1 Introdução**

A metodologia apresentada neste trabalho é o resultado do processo de aprimoramento da proposta metodológica inicialmente disposta no princípio deste projeto. Um conjunto de experimentos e análises levantados ao longo do desenvolvimento dos Veículos Subaquáticos de Inspeção VSI-01 e posteriormente com o VSI-02 subsidiaram a definição da metodologia apresentada neste capítulo.

#### **3.2 Concepção e projeto de um veículo submersível**

A concepção e o projeto de um veículo submersível iniciam-se com a elaboração e o planejamento das ações básicas necessárias para o arranjo mecânico, a definição da eletrônica embarcada e a determinação da capacidade sensorial a ser utilizada pelo submersível.

A sistematização do projeto e a especificação dos subsistemas embarcados devem ser realizadas de forma consciente e visando a integração das partes, levando em consideração o objetivo ou atividade principal a ser desenvolvida pelo veículo submersível.

Com este propósito, este capítulo apresenta uma matriz de objetivos, aplicações práticas e conhecimento que se inter-relacionam em uma rede de informações e ações, tendo em vista permear todo o projeto de desenvolvimento de um veículo submersível e que poderá auxiliar como plano metodológico do trabalho em suas diversas aplicações práticas, QUADRO (3.1.) segundo Salgado et al. ( 2002).

Esta matriz foi construída levando em consideração o desenvolvimento do conhecimento através de eixos integradores e interdisciplinares capazes de fornecerem objetos essenciais e complementares importantes para o desenvolvimento de *know-how* na área.

QUADRO 3.1

Matriz Metodológica para o Desenvolvimento de um Submersível de Inspeção.

Matriz Metodológica para o desenvolvimento de um Submersível de Inspeção									
Etapas	Etapa Preliminar			Etapa Experimental e Prática			Etapa de Integração		
	Estruturas	Dinâmica de Corpos Rígidos	Automação e Controle	Estruturas	Dinâmica de Corpos Rígidos	Automação e Controle	Estruturas	Dinâmica de Corpos Rígidos	Automação e Controle
1	Projeto do Submersível	Mecânica dos Fluidos	Eletrônica Básica	Construção do Protótipo	Desenvolvimento de uma Bancada para Testes de Força dos Propulsores	Desenvolvimento do Sistema Preliminar de Controle	Integração dos Sistemas Estruturais e de Vasos de Pressão		Integração dos Sistemas de Potência com o Sistema Preliminar de Controle
2	Resistência dos Materiais	Definição do Número de Reynolds	Sistemas de Controle Automático	Teste de Pressão dos Vasos de Pressão	Desenvolvimento da Bancada de Teste Hidrodinâmico	Desenvolvimento da Bancada de Teste do Sistema de Propulsores Instrumentados	Projeto e Construção dos Suportes dos Propulsores	Acoplamento dos Propulsores no Submersível	Conexão dos Propulsores com o Sistema Preliminar de Controle
3	Dimensionamento de Placas e Cascas	Classificação Fluido-Dinâmica	Princípio de Funcionamento dos Sensores	Teste de Estanqueabilidade dos Vasos de Pressão	Teste de Arrasto do Submersível	Teste do Sistema Preliminar de Controle	Integração das mangueiras aos Propulsores e aos Vasos de Pressão	Integração dos Sistemas Embarcados com o Cabo Umbilical e a base de Operação	
4	Dimensionamento de Ligações Parafusadas e Soldadas	Determinação dos Coeficientes de Arrasto Teóricos	Sistemas de Potência	Teste das Mangueiras de Interligação dos Sistemas		Desenvolvimento do Sistema de Controle Final e Testes de funcionamento	Integração do Sistema de Flutuação com o Submersível		
5	Determinação do Centro de Gravidade (C.G.)	Determinação do Centro de Empuxo (C.E.)	Sistemas de Tempo Real (Programação)	Teste de Força dos Propulsores Verticais		Teste do Sistema de Potência	Integração e testes dos Sistemas de Iluminação, Visão, Sensoriamento, Propulsão, Flutuação, Estrutural e de Controle		
6	Dimensionamento do Sistema de Emerção e Submersão	Cinemática	Robótica Móvel	Teste de Força dos Propulsores Horizontais		Teste do Sistema de Iluminação	Testes dos Sistemas Integrados (em Laboratório)		
7	Dimensionamento da Carga de Transporte e da Sobre-Carga	Análise Metrológica	Robótica Industrial	Teste de Força dos Flutuadores		Teste do Sistema de Visão	Testes dos Sistemas Integrados (em campo)		
8	Dimensionamento do Sistema de Vaso de Pressão	Determinação dos Propulsores	Sistema de Iluminação			Teste do Sistema de Sensores	Análise dos Resultados e Replanejamento de Ações		
9	Dimensionamento dos Sistemas de Conduites		Sistema de Visão	Teste de performance entre os protótipos desenvolvidos		Desenvolvimento do Cabo Umbilical e Tetes de Comunicação	Integração ou Redefinição dos Sistemas Embarcados		
10	Ciclo de Planejamento								

FONTE: Adaptado de Salgado et al. ( 2002).

Analisando o objetivo principal e a atividade fim do veículo a ser desenvolvido e aplicando a matriz metodológica proposta, pode-se subdividir o objetivo principal em cinco objetivos específicos:

1. Projetar e desenvolver um veículo submersível com características hidrodinâmicas capazes de agregar maior agilidade e manobrabilidade;
2. Pesquisar e definir os tipos de sistemas de propulsão e vetorização de empuxo existentes, que poderão ser construídos ou adaptados, testados e comparados através de análises experimentais e/ou simulações numéricas;
3. Conceber e projetar as bancadas de teste, definir os procedimentos experimentais a serem realizados, a análise experimental e estatística dos dados coletados;
4. Implementar e acoplar os sistemas desenvolvidos ao veículo submersível (projetado e construído no objetivo 1) e definir os experimentos necessários para a coleta de dados, análise e comparação dos resultados obtidos em cada sistema;
5. Analisar e comparar os resultados obtidos entre o protótipo desenvolvido no presente trabalho e outros resultados pesquisados.

O detalhamento de cada objetivo específico descrito acima e sua respectiva metodologia é apresentado a seguir de forma conceitual e exemplificado por desenhos esquemáticos, fotos dos protótipos dos submersíveis desenvolvidos e das bancadas de ensaio projetadas.

O desenvolvimento de projetos de submersíveis capazes de suprir as exigências de uma missão e ainda de permitir readequações futuras, por modificações de baixo custo, e que permita sua utilização em aplicações diferentes, deve ser foco do desenvolvimento destes equipamentos, de forma a garantir um projeto modular e de fácil integração, com ênfase na eficiência, na confiabilidade e na segurança.

No início do projeto do submersível foi necessário responder a quatro perguntas chaves que determinaram as características do submersível e delimitaram o projeto dos sistemas embarcados:

1. Quais as atividades o submersível irá realizar e que tipo de sensores ou outros equipamentos deve o submersível carregar como carga extra para realizar estas atividades?
2. Em que profundidade o submersível irá operar?
3. Com qual velocidade o submersível irá operar?
4. Por quanto tempo o submersível irá operar?

Os esclarecimentos destes questionamentos definiram alguns parâmetros de projeto importantes:

- o volume a ser alocado dentro dos compartimentos de pressão do submersível, as suas dimensões mínimas, a relação prévia entre peso e volume, os equipamentos que deverão ser embarcados para a execução das atividades do submersível;
- a potência consumida pela carga extra, que deve ser levada em consideração para avaliar as exigências de consumo de energia do submersível;
- a avaliação da profundidade de trabalho do veículo, que determinará a espessura e a forma geométrica da construção dos compartimentos de pressão do submersível;
- a energia mínima requerida internamente (*on-board*), a qual será obtida através do produto da potência média consumida pelo o tempo necessário para a missão;
- a velocidade de trabalho, que definirá a necessidade ou não de um projeto com coeficientes hidrodinâmicos altos ou baixos;
- o volume dos compartimentos do ROV, o qual definirá a capacidade de carga extra, que por sua vez implicará em outros parâmetros do submersível;
- com a definição da carga útil (*payload*), da profundidade, da escala e da velocidade, há bastante informação para produzir uma configuração e uma disposição geral dos sistemas embarcados no veículo;

A FIG. (3.1.) apresenta um ciclo de planejamento através do qual a definição destes parâmetros de projeto deve passar.

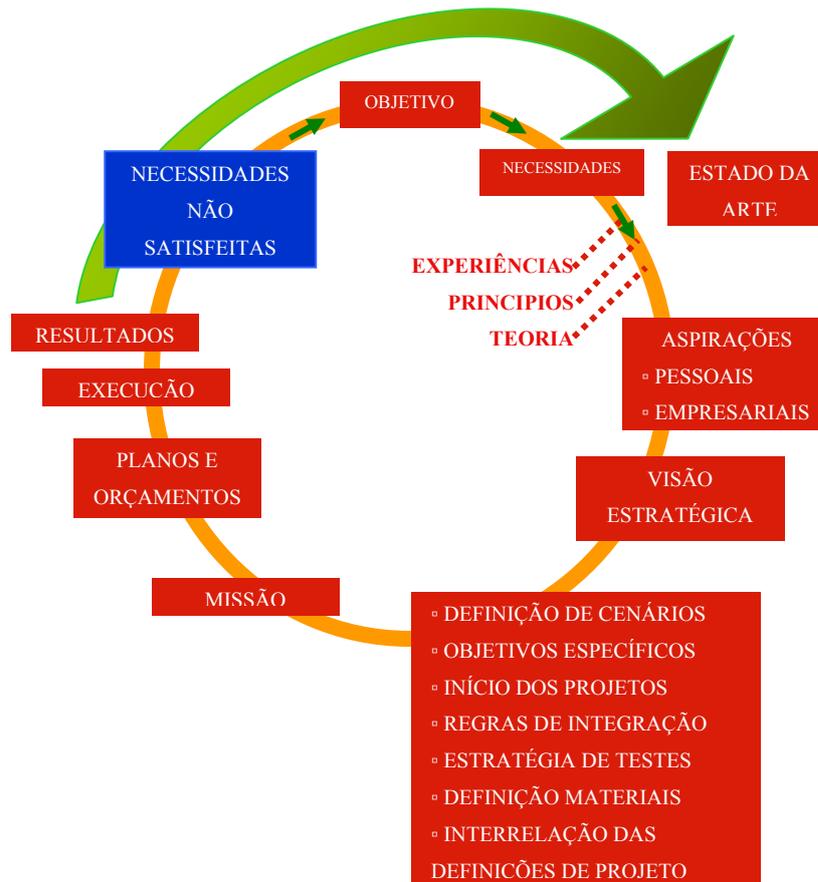


FIGURA 3.1. – Ciclo de Planejamento.

FONTE – Própria

### 3.2.1 Projeto mecânico

O desenvolvimento do projeto mecânico de um veículo submersível é importante para a determinação das suas características hidrodinâmicas e poderá seguir o procedimento apresentado no Anexo C.

A concepção mecânica do submersível foi realizada ao longo de todo o desenvolvimento do protótipo, sofrendo as devidas intervenções e melhorias advindas dos inúmeros testes realizados em cada subsistema componente do submersível, isoladamente ou integrado.

Inicialmente optou-se pelo desenvolvimento de um submersível capaz de receber em um único vaso de pressão todos os subsistemas a serem embarcados, minimizando os pontos de maior sensibilidade e de possíveis vazamentos. Entretanto, o custo deste sistema ficaria acima do previsto. Partiu-se, portanto, para uma solução alternativa utilizando-se de três vasos de pressão menores interligados por condutos de alta pressão.

Para facilitar a montagem e agregar flexibilidade de posicionamento dos propulsores foi construída uma gaiola em aço inox, onde todos os subsistemas externos aos vasos de pressão foram conectados.

A análise de dimensionamento de cada parte componente do projeto estrutural do VSI-02 foi realizada a partir de uma análise unifilar de cada elemento. O projeto mecânico e as análises de dimensionamento do VSI-02 são apresentadas com maiores detalhes no capítulo 5.

No desenvolvimento do VSI-02 foi adotada flutuação positiva, isto é, quando o sistema de flutuação está desativado o submersível deve ser positivamente flutuante e quando o sistema de flutuação está funcionando o submersível deve variar sua flutuação de positivo passando pelo ponto neutro a negativamente flutuante.

- Flutuação Positiva: Força de Flutuação (empuxo) > Peso
- Flutuação Negativa: Força de Flutuação (empuxo) < Peso
- Flutuação Neutra: Força de Flutuação (empuxo) = Peso

A EQ.(3.1) apresenta a força de empuxo exercida sobre um corpo submerso (princípio de Arquimedes), Fig. (3.2).

$$\text{Força de Flutuação} = \rho g V_1 \quad (3.1)$$

sendo:

$\rho$  - a massa específica do fluido;

$g$  - a força da gravidade;

$V_1$  - o volume de fluido deslocado (submerso).

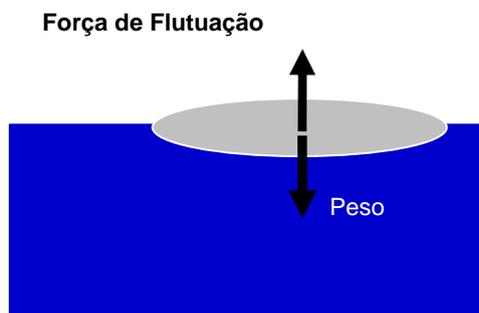


FIGURA 3.1 – Forças de flutuação e emersão exercidas sob o submersível.

FONTE: Própria

O teste de comissionamento do sistema de vetorização de empuxo realizado pode ser aplicado tanto a veículos subaquáticos que possuem lemes verticais e horizontais para o controle de rumo e profundidade (PESTERO, 2000), como para os veículos vetorizados pelos propulsores. O teste consiste em realizar um conjunto de manobras, conforme apresentado no QUADRO (3.2.), e coletar informações sobre o tempo de resposta do submersível para cada manobra, junto com os dados de tensão e corrente gerados pelos propulsores.

Dentre as manobras a serem testadas encontram-se os movimentos, FIG. (3.3):

- de guinada (que correspondem a um giro em torno do eixo Z do submersível à direita ou à esquerda);
- de vante e de ré (que correspondem a movimentos contrapostos no eixo X do submersível);
- de emersão e submersão (que correspondem a movimentos de translação ao longo do eixo Z).

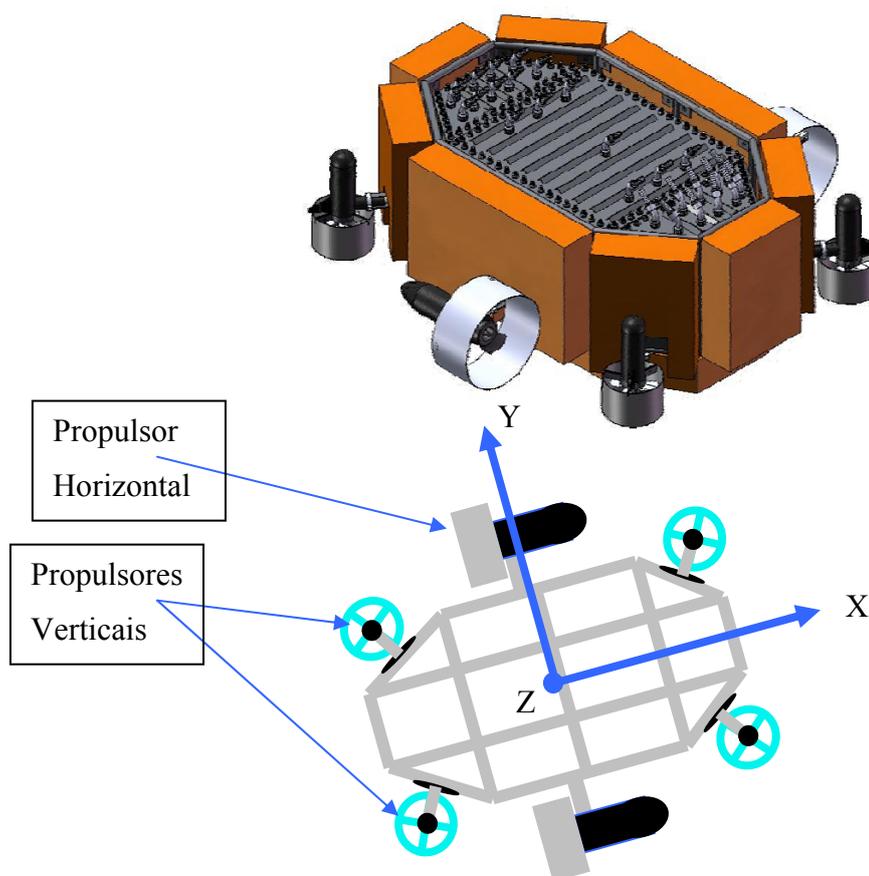


FIGURA 3.3 – Desenho esquemático do VSI-02 com seus eixos coordenados.

FONTE – Própria

QUADRO 3.2

Manobras experimentais para o teste de vetorização de empuxo do submersível.

Manobras / Propulsores	Propulsor Direito (Horizontal)	Propulsor Esquerdo (Horizontal)	Propulsores Verticais
Guinada lenta à esquerda	Alta Velocidade	Baixa Velocidade	Desligados
Guinada rápida à esquerda	Alta Velocidade	Desligado	Desligados
Guinada lenta à direita	Baixa Velocidade	Alta Velocidade	Desligados
Guinada rápida à direita	Desligado	Alta Velocidade	Desligados
Movimento avante lento	Baixa Velocidade	Baixa Velocidade	Desligados
Movimento avante rápido	Alta Velocidade	Alta Velocidade	Desligados
Movimento a ré lento	Revert. Baixa veloc.	Revert. Baixa Veloc.	Desligados
Movimento a ré rápido	Revertido Alta Veloc.	Revertido Alta Veloc.	Desligados
Submersão / Emerção	Desligado	Desligado	Lig. / Deslig.

FONTE – Própria.

A fim de facilitar a análise do sistema de vetorização de empuxo do VSI-02 optou-se também pela realização de uma análise de esforços através de um diagrama unifilar do ROV capaz de representá-lo em simulações oriundas deste sistema.

A análise estrutural unifilar consiste em representar o VSI-02 por barras rígidas e esbeltas interligadas a pontos de conexão e apoio, conforme apresentado nas FIGs. (3.4 e 3.5).

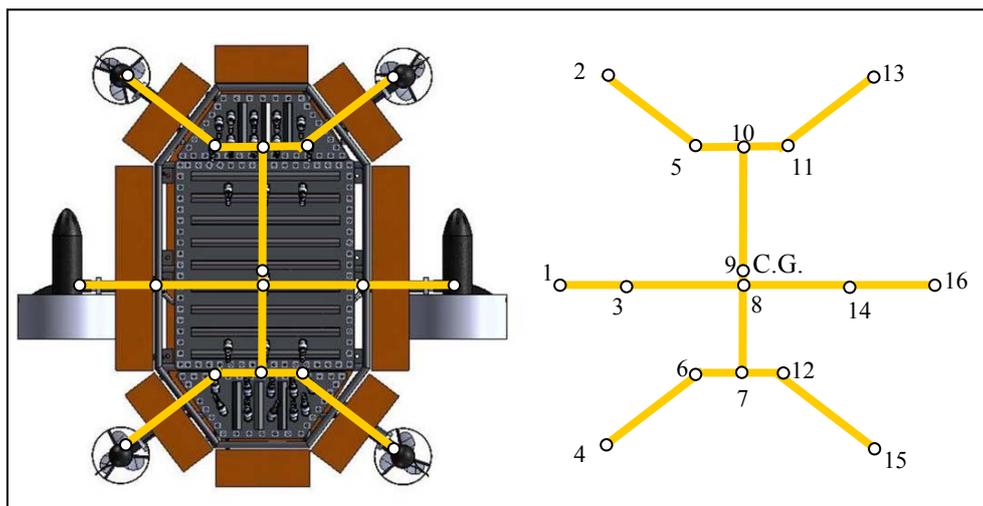


FIGURA 3.4 – Diagrama unifilar do VSI-02 com numeração dos nós (início e término das barras)

FONTE – Própria

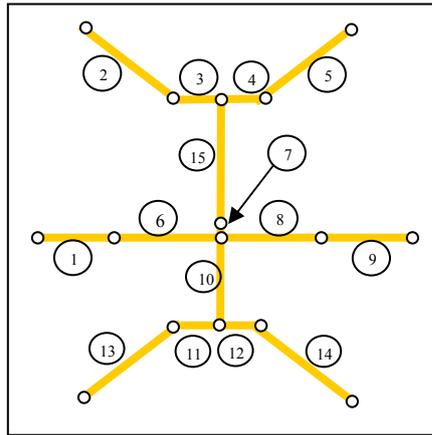


FIGURA 3.5– Diagrama unifilar do VSI-02 com numeração das barras

FONTE – Própria

Procurando retratar a realidade, foi considerado como ponto de apoio um único nó, que corresponde ao C.G. do ROV (nó 9). Este apoio teve seus graus de liberdade restringidos o que corresponde na análise estrutural a um engaste.

Os pontos de carga correspondem às extremidades que recebem os propulsores ou cargas correspondentes às geradas por eles, FIG. (3.6) e neste diagrama são representados pelos nós 1, 2, 4, 13, 15 e 16.

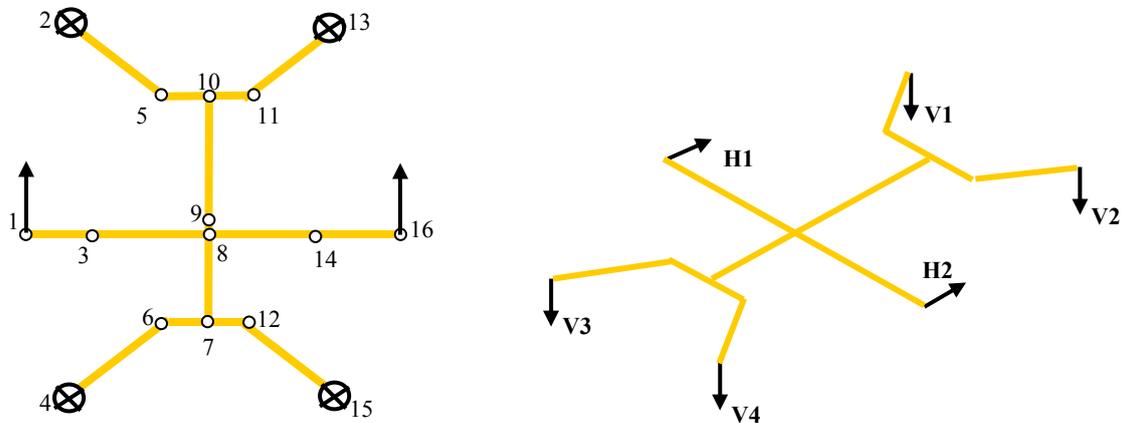


FIGURA 3.6 – Diagrama unifilar do VSI-02 com a combinação de carregamento 01

FONTE – Própria

Este diagrama unifilar pode ser utilizado para simular qualquer configuração de esforços, bastando criar uma nova alternativa de carregamento para os nós ou barras do diagrama, FIG. (3.7 e 3.8).

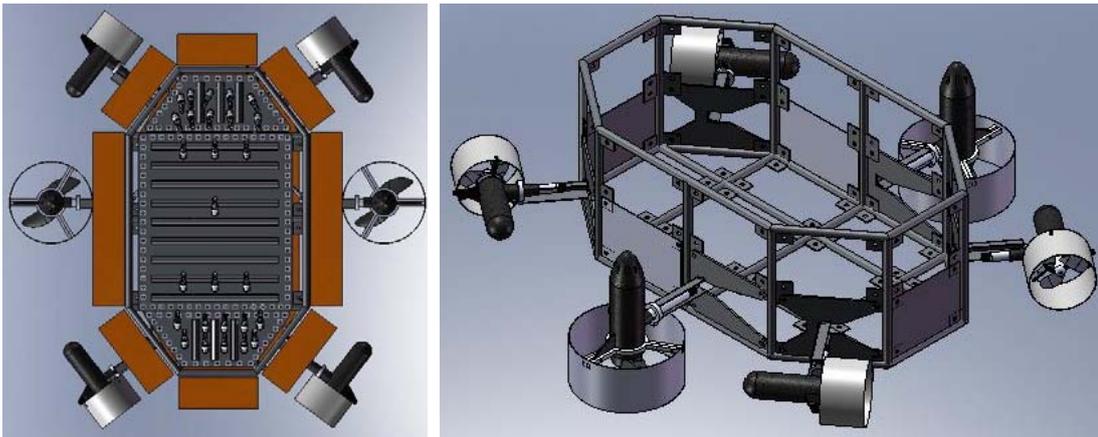


FIGURA 3.7 – Segunda alternativa de posicionamento dos propulsores para o VSI-02

FONTE – Própria

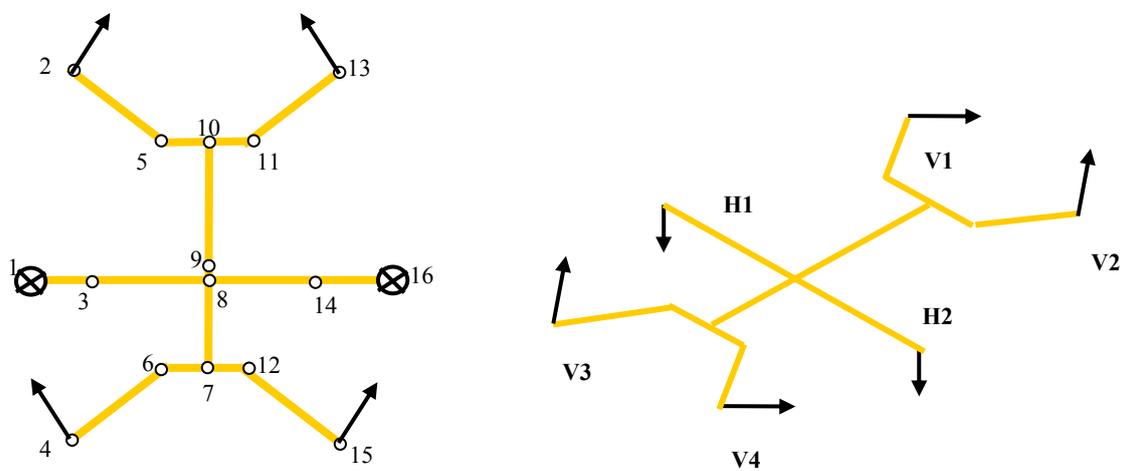


FIGURA 3.8 – Diagrama unifilar do VSI-02 com a combinação de carregamento 02

FONTE – Própria

Os dados gerados pela análise via diagrama unifilar apresentam as relações das resultantes dos diversos esforços a que o VSI-02 pode vir a estar submetido. A partir destas resultantes pode-se verificar o que ocorrerá em termos de movimentação do ROV.

### 3.2.2 Cinemática de um ROV

A cinemática é conhecida como a parte da Física que estuda os movimentos, relacionando posições, velocidades e acelerações, desprezadas as forças de ação ou reação envolvidas (MCKERROW, 1991).

Está presente no campo da robótica, sendo imprescindível na determinação de trajetórias e posições de braços mecânicos ou manipuladores em uma célula de trabalho. O grande número

de graus de liberdade envolvidos requer a utilização de duas formas diferentes de solução para estes problemas: a cinemática direta e a reversa (ANDEEN, 1988).

Todavia, como se verifica neste trabalho, esses mesmos conceitos têm grande aplicação em robôs móveis quando da necessidade de seu estudo cinemático, com o objetivo de se determinar matematicamente o seu funcionamento. Em termos cinemáticos, a definição da posição do ROV é dada através de um vetor  $\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z]^T$ , conforme apresentado por Bessa (2004). Este vetor representa a posição da origem do sistema de coordenadas  $\mathbf{C}$ , localizado no corpo do veículo, em relação ao sistema de coordenadas inerciais  $\mathbf{I}$  (NAKAMURA, 1992), FIG. (3.9).

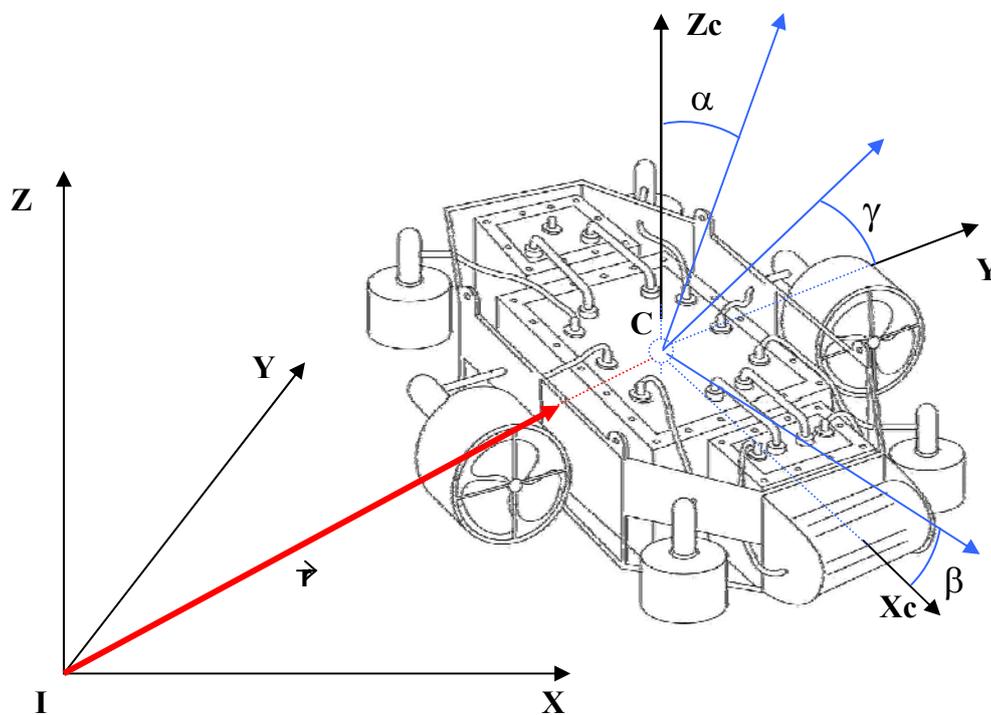


FIGURA 3.9 – Sistema de coordenadas aplicados ao VSI-02 para definição da cinemática

FONTE – Própria

A orientação do ROV pode ser descrita pelos ângulos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , que representam respectivamente o ângulo de rolamento (**roll**), de arfagem (**pitch**) e de guinada (**yaw**), (CRAIG, 1988). Estes ângulos fornecem a orientação do veículo em relação ao sistema de coordenadas inerciais  $\mathbf{I}$ .

Desta forma, a transformação de um dado vetor livre  $\vec{v} \in \mathcal{R}^3$ , representado no sistema de coordenadas  $\mathbf{C}$  por  $\vec{v}_c$ , para o sistema de coordenadas  $\mathbf{I}$ , dá-se pela EQ. (3.2), (CRAIG, 1988).

$$\vec{v}_i = T_\alpha \cdot T_\beta \cdot T_\gamma \cdot \vec{v}_c = T \cdot \vec{v}_c \quad (3.2)$$

sendo  $\mathbf{T}_\alpha$ ,  $\mathbf{T}_\beta$  e  $\mathbf{T}_\gamma$  as matrizes de rotação elementar,

$$\mathbf{T}_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}; \quad \mathbf{T}_\beta = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}; \quad \mathbf{T}_\gamma = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

e  $\mathbf{T}$ , a matriz de rotação ou matriz de transformação,

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

As matrizes  $\mathbf{T}_\alpha$ ,  $\mathbf{T}_\beta$ ,  $\mathbf{T}_\gamma$  e  $\mathbf{T}$  são as matrizes ortogonais. A equação cinemática das velocidades lineares expressa no sistema de coordenadas inerciais é apresentada nas EQ. (3.3), (BESSA,2004).

$$\dot{r} = T \cdot v \quad (3.3)$$

Sendo:

$\dot{r}$  : cinemática das velocidades lineares

$v$  : vetor de velocidades de translação do ROV representado no sistema de coordenadas  $\mathbf{C}$ ;

A análise da dinâmica do ROV levará em consideração a dinâmica de corpo rígido com seis graus de liberdade, tomando um sistema de referência cartesiano  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  e  $\mathbf{z}$  com centro em um ponto arbitrário  $\mathbf{O}$ . Os eixos coordenados  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  e  $\mathbf{z}$  representam as coordenadas de deslocamento do objeto em relação a  $\mathbf{O}$ , enquanto a rotação deste objeto em relação aos eixos cartesianos é fornecida pelos ângulos  $\alpha$  (roll),  $\beta$  (pitch) e  $\gamma$  (yaw). Estes representam um vetor que parte do ponto  $\mathbf{O}$  dado por  $r = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T$ . Normalmente  $z$  coincide com uma linha de simetria do corpo.

Os efeitos hidrostáticos podem ser expressos pela relação entre o peso e a flutuação do ROV. A EQ. (3.4) apresenta a modelagem matemática destes efeitos (BESSA,2004).

$$f_h = \begin{bmatrix} T^T [0 \quad 0 \quad (\rho g \nabla - mg)]^T \\ r_f \times T^T [0 \quad 0 \quad \rho g \nabla]^T - r_g \times T^T [0 \quad 0 \quad mg]^T \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Sendo:

$f_h$  – vetor de forças hidrostáticos;

$r_f$  e  $r_g$  – vetores de coordenadas do centro de empuxo e de gravidade do ROV, em relação ao sistema de coordenadas fixo no ROV;

$m$  – massa do veículo;

$\rho$  – massa específica da água;

$g$  – aceleração da gravidade;

$\nabla$  – volume de água deslocado pelo veículo.

Os efeitos hidrodinâmicos aparecem devido à interação do veículo com o meio no qual ele encontra-se submerso e decorrem do movimento relativo do ROV em relação à água.

Segundo Bessa (2004), os efeitos hidrodinâmicos podem ser representados de forma aproximada pela equação de MORISON, EQ. (3.5), que leva em consideração as baixas velocidades dos ROVs (< 2 m/s).

$$F_{hd} = C_d \frac{1}{2} \rho A u |u| + C_m \rho \nabla \dot{u} + \rho \nabla \dot{v}_w \quad (3.5)$$

Sendo:

$F_{hd}$  – Forças hidrodinâmicas

$C_d$  e  $C_m$  – Coeficientes de arrasto a serem levantados experimentalmente

$u$  – velocidade relativa entre o veículo e a água

$\dot{u}$  – aceleração relativa entre o veículo e a água

$\dot{v}_w$  – aceleração da corrente de água

$A$  – Superfície de referência

O último termo da EQ. (3.5) é conhecido como força de Froude-Kryloff e não será levado em consideração neste trabalho, visto que nas profundidades de trabalho do ROV a aceleração da correnteza pode ser desprezada.

O levantamento das características hidrodinâmicas de um submersível passa pela determinação do número de Reynolds que caracteriza o escoamento ao qual o submersível estará submetido, (WHITE, 2002). Estas características deverão ser especificadas como parte integrante de sua concepção, que poderá auxiliar no dimensionamento e na definição da dinâmica de corpo rígido submerso. Em corpos com geometrias semelhantes, com rugosidade relativa idêntica, o número de Reynolds é definido pela EQ. (3.6).

$$Re = (V \cdot L)/\nu \quad (3.6)$$

sendo:

Re – Número de Reynolds

V – Velocidade da Corrente Livre

L – Comprimento Característico do Corpo (na direção do deslocamento no fluido)

$\nu$  – coeficiente de viscosidade

Segundo White (2002), as forças e os momentos que atuam sobre um corpo em movimento, e imerso em um fluido, podem ser classificadas como: arrasto e momento de rolamento (quando ocorrem sobre o corpo de forma paralela à corrente livre e em torno deste eixo imaginário), sustentação e momento de guinada (quando ocorrem sobre o corpo na direção vertical e de forma perpendicular à força de arrasto) e lateral e momento de arfagem (quando ocorrem lateralmente ao corpo e de forma perpendicular à força de arrasto).

Em corpos simétricos em relação ao plano de arrasto-sustentação, como os do submersível estudados e propostos neste trabalho, a força lateral, a guinada e o rolamento, provocados pelo movimento em um fluido, podem desaparecer, reduzindo o problema a um caso bidimensional: duas forças, o arrasto e a sustentação, e um momento, o de arfagem.

Quando o corpo tem dois planos de simetria e o escoamento ocorrer ao longo da corda formada pela interseção destes dois planos, o corpo sofrerá apenas a força de arrasto. O arrasto em um corpo submerso pode ser composto pelo arrasto de atrito, que representa o efeito da tensão de cisalhamento, e o arrasto de pressão, referente à diferença de pressão entre a região

frontal e traseira do corpo, oriunda do deslocamento do corpo submerso. Para a determinação da força de arrasto presente no corpo do submersível utiliza-se a realização de um ensaio em canal de água. O ensaio prevê a medição sucessiva das várias forças de arrastos submetidas ao submersível através da variação da velocidade de deslocamento do fluido em relação ao corpo submerso, conforme procedimentos apresentados no Anexo C, FIG.(3.10).

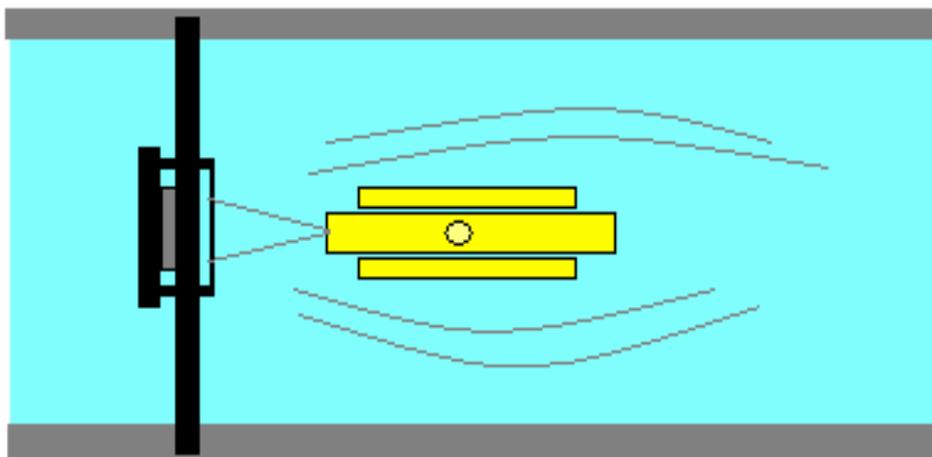


FIGURA 3.10 – Desenho da bancada de ensaios experimentais para determinação do arrasto.

FONTE – Própria.

### 3.2.3 Subsistema de propulsores

Para os testes dos propulsores do submersível foram montadas bancadas em reservatórios devidamente construídos para minimizar as interferências de parede nos testes realizados. Para isto foi utilizada uma bancada cujo esquema de construção é apresentado na FIG. (3.11), onde se podem realizar os testes experimentais com qualquer tipo de propulsor, bastando para isto acoplá-los à haste de sustentação da bancada.

A bancada FIG (3.11) representa uma das alternativas utilizadas para o teste dos propulsores do submersível e o cálculo da força de propulsão será dado pela EQ. (3.7).

$$F_p = (250/350) * F_d \quad (3.7)$$

Sendo:

$F_p$  – Força do Propulsor (kgf)

$F_d$  – Força no Dinamômetro (kgf)

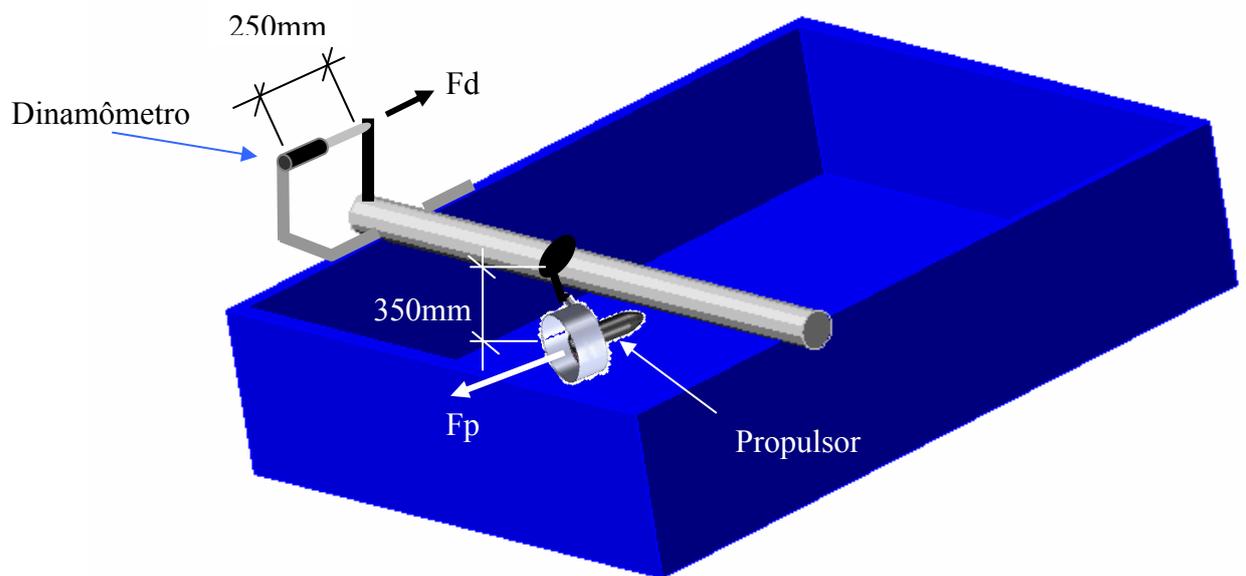


FIGURA 3.11 – Desenho da primeira bancada de ensaios experimentais dos propulsores.

FONTE – Própria.

Uma outra bancada foi construída e utilizada para verificação da força de propulsão de cada propulsor utilizado no desenvolvimento do submersível e pode ser ajustada para realização de testes instrumentados, capazes de fornecerem os parâmetros necessários para o desenvolvimento de um controle mais fino dos propulsores, FIG. (3.12).

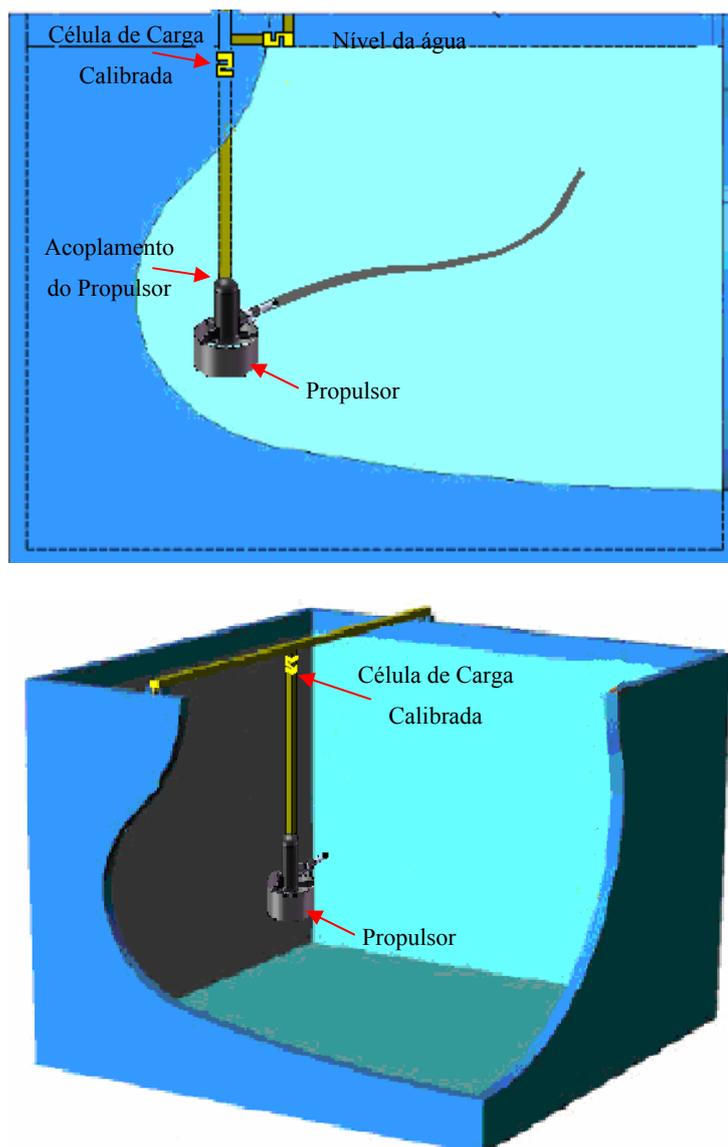


FIGURA 3.12 – Desenho esquemático da segunda bancada de ensaios experimentais dos propulsores.

FONTE – Própria..

Para esta bancada a força exercida pelo propulsor será fornecida pela EQ. (3.8), que corresponde à equação de calibração da célula de carga. A força no propulsor é calculada em (kgf).

$$\text{Força no Propulsor} = 4,9582 * \text{Tensão na Célula de Carga} - 0,1543 \quad (3.8)$$

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho e os apresentados pela literatura pesquisada (PENNEL et al., 2003), servirão como informações adicionais de análise e comparação dos resultados.

A relação entre a força de propulsão e a potência de um propulsor pode ser definida por uma relação polinomial, conforme apresentado pelas indústrias de propulsores utilizados em ROV.

### 3.2.4 Projeto dos vasos de pressão

A verificação experimental (ou teste de comissionamento) dos vasos de pressão construídos para o submersível seguiu um procedimento padrão, que consiste em fechar de forma hermética os vasos de pressão, acoplar as mangueiras, preparar a bomba de pressão manual e interligá-la ao sistema, retirar todo o ar do sistema, acoplar o manômetro para acompanhar o experimento e realizar as medições necessárias; pressurizar o vaso, de cinco em cinco m.c.a (metros de coluna de água), aguardando um intervalo de cinco a dez minutos para estabilizar o sistema e realizar as medições e observações, conforme exemplificado na FIG. (3.13). Para cada pressão aplicada, verificar a estanqueidade do vaso de pressão e a deformação sofrida, e repetir os procedimentos acima até atingir a pressão desejada (igual à pressão de trabalho multiplicada por um coeficiente de segurança definido). Caso ocorra algum vazamento, retirar a pressão do vaso, corrigir o vazamento e refazer o ensaio.

A fim de facilitar o procedimento de ensaio, a pressão foi aplicada de dentro para fora, situação em que o vaso de pressão se encontrará menos solicitado. Para resolver este problema aplicou-se uma pressão três vezes maior que a provável pressão a qual o submersível será submetido.

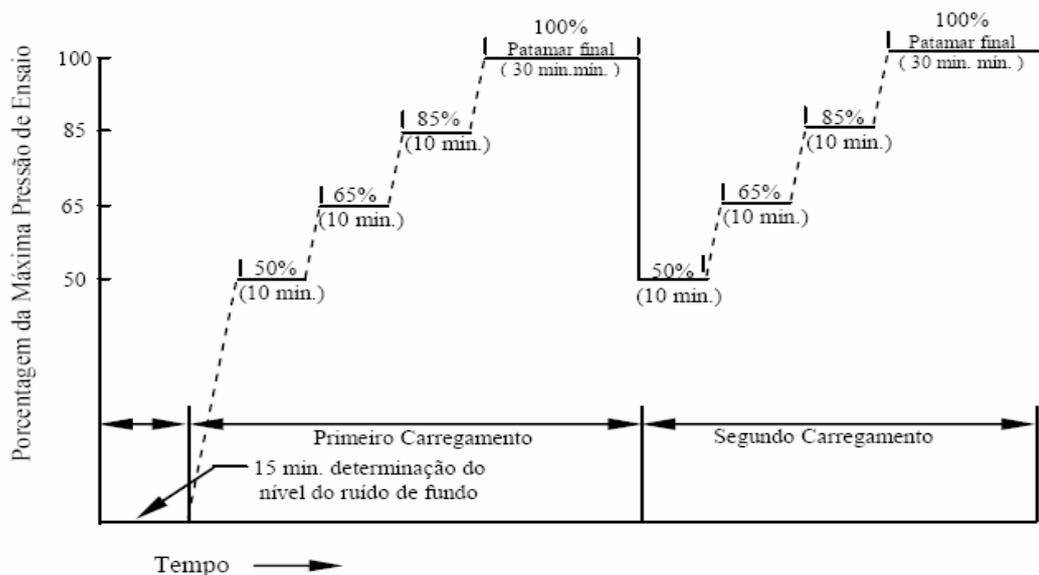


FIGURA 3.13 – Representação gráfica exemplificativa do desenvolvimento do ensaio

FONTE – Manual S-EA da ABENDE em outubro de 2003

O controle da temperatura interna aos vasos de pressão, em especial no vaso de pressão onde se encontra o circuito de controle, é importante para garantir o bom funcionamento dos sistemas. A coleta destas informações pode ocorrer através do procedimento apresentado no Anexo C deste trabalho.

A análise dimensional dos vasos de pressão seguiu a Norma Brasileira NBR-8800 e a teoria de placas de cascas (TIMOSHENKO et. al., 1959) e é apresentada no capítulo cinco deste trabalho.

### 3.2.5 Subsistema de controle dos propulsores e de potência

O controle preliminar dos propulsores foi testado antes da integração dos sistemas, a fim de garantir seu funcionamento e reduzir os ruídos que venham a afetar seu funcionamento. O procedimento para o teste do controle preliminar dos propulsores seguiu as etapas apresentadas no Anexo C.

O subsistema de potência do submersível foi analisado em termos da autonomia fornecida, da capacidade de carga suportada e do volume ocupado (caso seja embarcado no submersível).

### 3.2.6 Subsistema de visão

O subsistema de visão do submersível foi testado utilizando uma câmera CMSO analógica e não causou nenhuma interferência adicional ao sistema de controle e nem sofreu interferências capazes de distorcerem os sinais de imagem enviados à estação de terra.

O teste a seco do subsistema de visão permitiu uma análise e observação da qualidade da imagem transmitida e dos níveis de ruídos aos quais estão submetidas. Para isto, a câmera de visão foi acoplada a um cabo de transmissão longo (aproximadamente 50 metros), quando então se verificou a capacidade de transmissão de imagem com qualidade, a qualidade da transmissão quando da movimentação da câmera, a qualidade da imagem quando do acionamento de algum equipamento com princípio eletromagnético próximo do subsistema de visão.

No teste submerso verificou-se a estanqueabilidade da caixa de vedação do subsistema de visão, o acoplamento da mangueira do cabo de comunicação, o sistema de acionamento do

subsistema de visão e a capacidade de transmissão de imagem a longa distância, sem perda de qualidade. As interferências eletromagnéticas recebidas provocadas pelos outros subsistemas embarcados também foram analisadas. O tratamento computacional das imagens será realizado em trabalhos futuros.

### 3.2.7 Integração dos Subsistemas

A integração dos sistemas desenvolvidos para o submersível deverá ocorrer de forma conjunta e intercalada ao longo de seu desenvolvimento, para isto adotou-se os seguintes procedimentos:

1. Para o dimensionamento e projeto de qualquer subsistema deverá ser verificado sua integração com os demais subsistemas a serem desenvolvidos, levantando as partes comuns e as partes distintas entre cada subsistema envolvido;
2. Com este levantamento deverá ser estudada a melhor forma de concepção deste subsistema, visando facilitar sua integração futura, sua performance e sua utilização;
3. Nenhum subsistema deverá ser projetado de forma isolada, a não ser que sua integração não afete a nenhum outro subsistema do submersível;
4. Todo subsistema desenvolvido deverá passar por testes de forma isolada e quando estiver integrado ao submersível, garantindo sua funcionalidade.

Os resultados dos experimentos realizados no protótipo estão apresentados através de gráficos, tabelas e figuras exemplificativas, capazes de ilustrar os experimentos realizados e os dados coletados. Os dados deverão passar por uma análise estatística, quando representarem um conjunto de informações substanciais e representativas de uma amostra do experimento. A análise dos dados foi realizada de forma comparativa entre os dados obtidos anteriormente por outras pesquisas, dados obtidos no desenvolvimento e testes do VSI-01 e os dados obtidos no protótipo desenvolvido para o VSI-02.

## 4. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO VSI-02

### 4.1. Introdução

O desenvolvimento do VSI-02 começou com o levantamento bibliográfico e a definição do estado da arte dos submersíveis construídos, no mundo, no Brasil e no CPH, e utilizados em processos de inspeção e manutenção de estruturas submersas, vistos no capítulo 2 deste trabalho.

O projeto do VSI-02 passou por etapas distintas de concepção, avaliação e desenvolvimento, que levaram à construção de um veículo submersível de baixo custo, capaz de executar os seguintes movimentos: guinada a esquerda, guinada a direita, avante, a ré, emersão e submersão, através de um controle em malha aberta e capaz de realizar captura de imagens submersas com qualidade.

A utilização de formas geométricas capazes de agregar ao formato do veículo submersível as características hidrodinâmicas adequadas passou por um processo comparativo com outros submersíveis existentes e iniciou-se por uma concepção do primeiro projeto mecânico a ser desenvolvido FIG.(4.1). Neste primeiro projeto foram previstas a redução dos coeficientes hidrodinâmicos do veículo e a construção de uma estrutura capaz de ser adaptada para o sistema de vetorização de empuxo com propulsão por jato d'água.

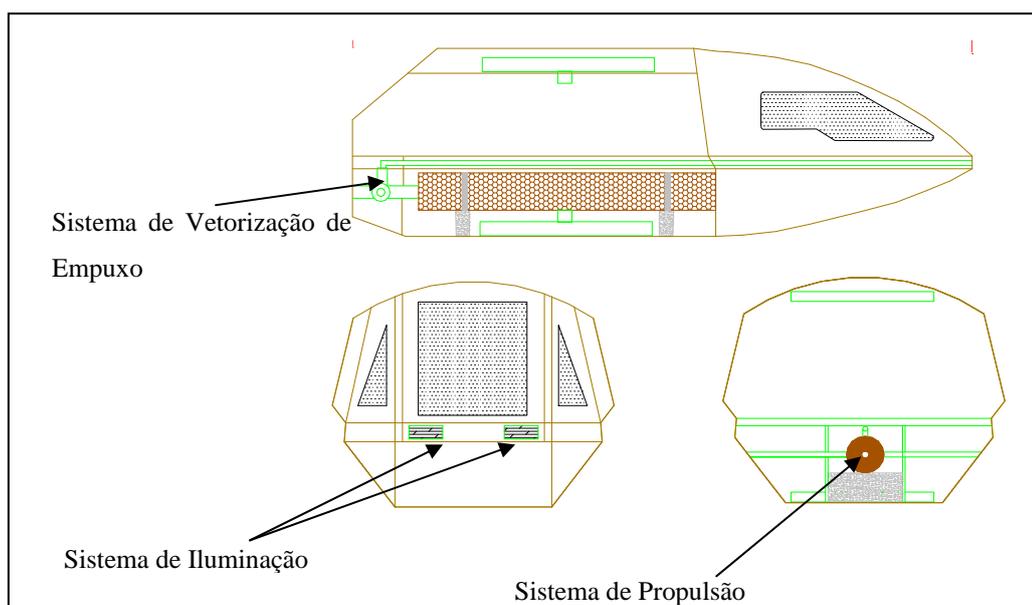


FIGURA 4.1. – Primeiro projeto do veículo submersível VSI-02.

FONTE – Própria

Esta concepção inicial foi simplificada dando origem a uma segunda concepção para o VSI-02, FIG. (4.2). Nesta nova concepção o fator principal de análise foi à facilitação da montagem construtiva do veículo submersível e a redução do seu custo de fabricação.

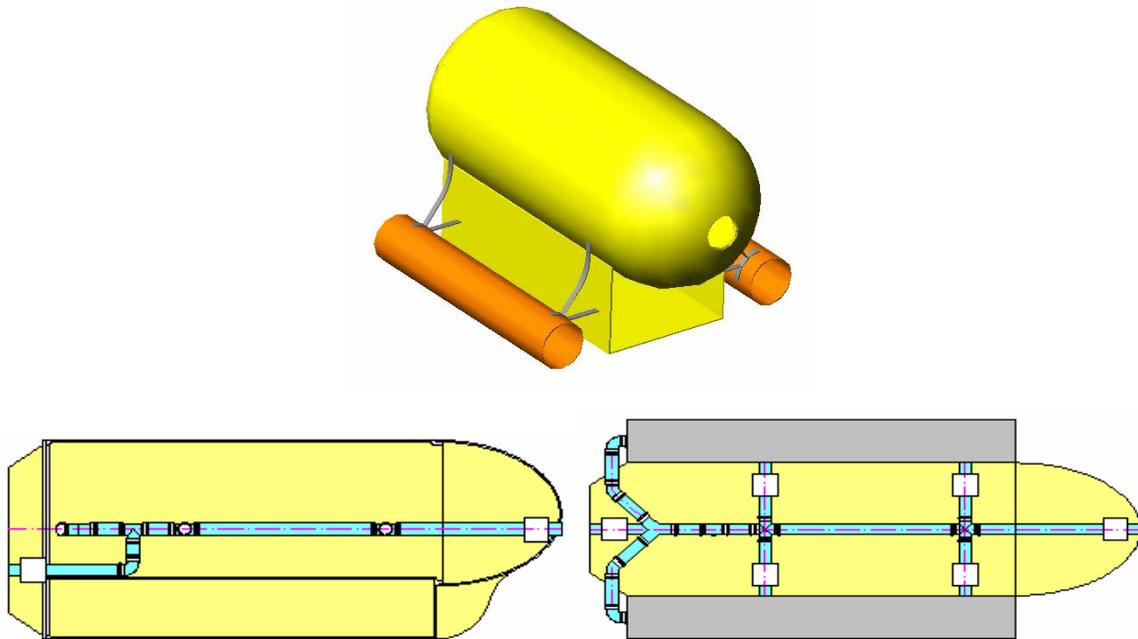


FIGURA 4.2. – Segundo projeto do veículo submersível VSI-02.

FONTE – Própria.

Esta concepção foi logo substituída por um novo projeto, FIG. (4.3), com capacidade de trabalhar com sistemas de vetorização de empuxo e propulsão diferentes, jato d'água e por hélice, mas que ainda não permitia uma quantidade satisfatória de graus de liberdade.

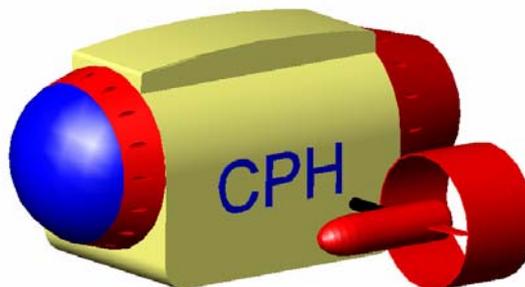


FIGURA 4.3. – Terceiro projeto do veículo Submersível VSI-02.

FONTE – Própria

Este projeto foi aprimorado através do acoplamento de um propulsor vertical, FIG. (4.4) dando origem ao primeiro modelo reduzido do VSI-02.

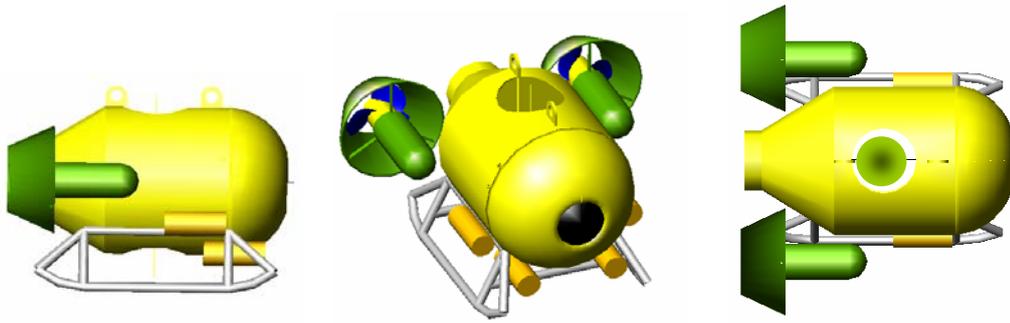


FIGURA 4.4. – Projeto de modelo passivo de um ROV desenvolvido no CPH.

FONTE – Própria

Projetado e construído em vibra de vidro, este modelo, FIG. (4.5) serviu de base para o desenvolvimento do subsistema de flutuação do veículo desenvolvido.



FIGURA 4.5. – Modelo reduzido passivo desenvolvido para teste de flutuação do submersível.

FONTE – Própria

A partir do modelo reduzido passivo desenvolvido e testado, foi elaborado o projeto de um veículo submersível maior e mais robusto, FIG. (4.6.). A definição dos parâmetros de emersão e submersão, sua capacidade de carga extra e o detalhamento do projeto foram executados de forma concomitante ao processo de construção de sua estrutura principal, FIG. (4.7.), sendo interrompida pelo alto custo de desenvolvimento.

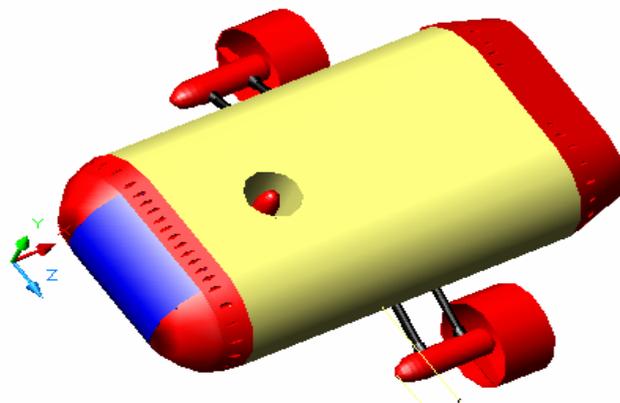


FIGURA 4.6. – Quarto projeto do veículo submersível VSI-02.

FONTE – Própria



FIGURA 4.7. – Construção do corpo principal do quarto projeto do VSI-02.

FONTE – Própria

A decisão de construir um veículo submersível com características hidrodinâmicas similares as dos veículos analisados no capítulo 2 e visando a redução dos custos de desenvolvimento do submersível, levou a um re-projeto do VSI-02, FIG. (4.8), que representa um escopo inicial de uma estrutura capaz de comportar diversas possibilidades de posicionamento dos sistemas embarcados. O projeto difere totalmente das concepções anteriores. Entretanto, reduziu o tempo de fabricação, de montagem e garantiu a concepção de uma estrutura modular final, FIG. (4.9), capaz de suportar o acoplamento, de forma simples, destes vários subsistemas.

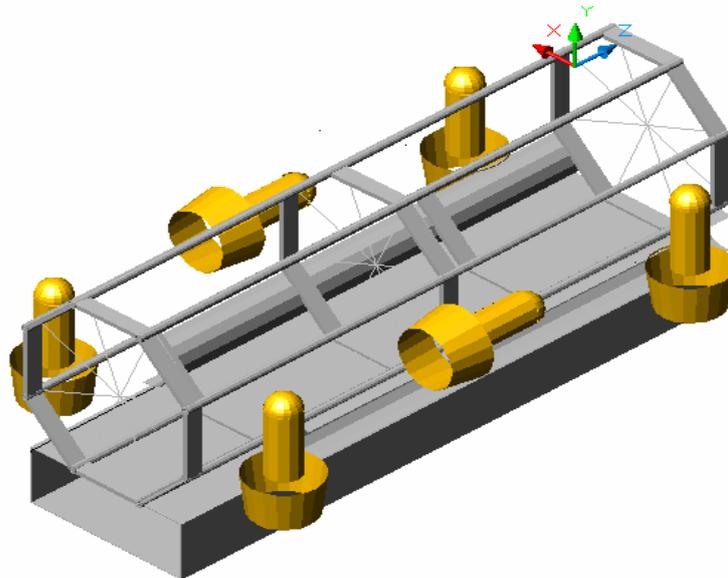


FIGURA 4.8 – Reprojeto do VSI-02 que influenciou na concepção final do submersível.

FONTE – Própria

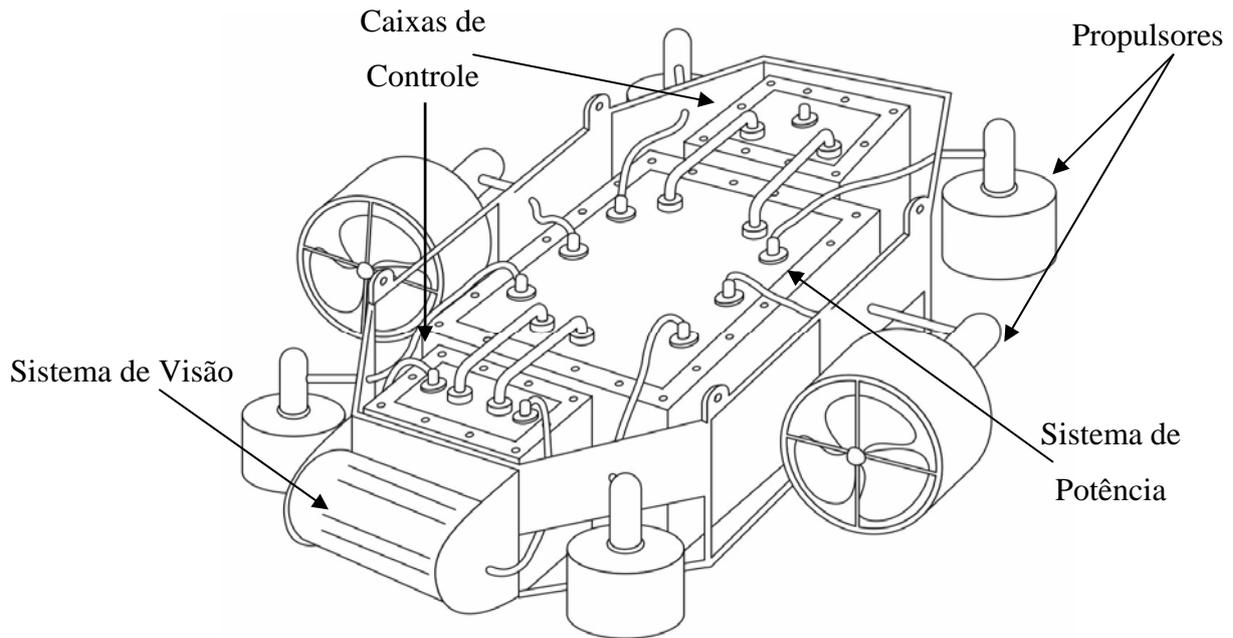


FIGURA 4.9 – Concepção do VSI-02 sem os flutuadores.

FONTE – Própria

#### 4.2. Subsistemas embarcados no submersível VSI-02

O VSI-02 foi então projetado e construído levando em consideração os subsistemas mínimos embarcados para a realização dos ensaios de caracterização, QUADRO (4.1).

QUADRO 4.1

SubSistemas Embarcados no Veículo Submersível.

Subsistemas Embarcados	Localização	Dimensões (mm)
Subsistema Estrutural	Externo	1100 x 550 x 360
Subsistema de Emersão e Submersão	Interno	150 x 150 x 300
Subsistema de Propulsão	Externo	350 x 350 x 300
Subsistema de Vetorização de Empuxo	Externo	Junto com o sistema de Propulsão
Subsistema de Potência	Interno	450 x 700 x 280
Subsistema de Controle	Interno	200 x 200 x 100
Subsistema de Iluminação	Externo	100 x 100 x 150
Subsistema de Visão	Externo	100 x 100 x 150

FONTE – Própria.

#### 4.2.1. Subsistema Estrutural

O subsistema estrutural do VSI-02 é formado por uma gaiola estrutural construída em aço inox, que suporta todos os demais subsistemas e os vasos de pressão.

Este subsistema foi construído e projetado conforme as Normas Brasileiras NBR-8800, NBR ISO-14623 e NBR-15417 de dimensionamento de estruturas metálicas e análise de vasos de pressão da ABNT e pela teoria das placas e cascas (TIMOSHENKO et. al., 1959).

A filosofia geral das normas de projeto de vasos de pressão consiste basicamente em limitar as tensões nos componentes do vaso a um valor admissível. Considera-se, em geral, somente a falha decorrente de uma deformação excessiva da caixa devido à pressão. O efeito de fadiga (perda das propriedades mecânicas do material por estresse), só é considerado em estudos rigorosos e detalhados pela mecânica da fratura.

O projeto de vasos de pressão consiste na definição cautelosa e detalhada dos dados gerais do equipamento, onde se estabelece a norma adotada, tempo de vida, tipo de vaso, exigências quanto aos materiais, condições climáticas, limitações de área disponível, dimensões e peso máximo, etc. Depois é necessário obter a definição dos dados de operação do vaso, em que se estabelecem cálculos relativos ao desempenho operacional e realiza-se o projeto do vaso, no qual são realizados os dimensionamentos do equipamento, seu tipo de tampo, dimensões gerais, etc.

Na fase de projeto mecânico do equipamento obtém-se a definição completa de todos os materiais, dimensões finais do vaso (baseadas nas dimensões estabelecidas na etapa do projeto), definição das normas de projeto, construção e inspeção, definição da eficiência de solda, cálculo mecânico estrutural completo, desenho mecânico do vaso e de seus acessórios.

O Teste Hidrostático (TH) é fundamental para assegurar a integridade de um vaso de pressão e tem o objetivo de verificar se, quando submetido às condições mais severas de uso, o mesmo resistirá sem qualquer avaria. Esta condição extrema ocorre quando há a combinação da mais alta pressão de trabalho admissível com a maior temperatura que o vaso poderá atingir durante o uso. A tensão admissível do material do vaso diminui com o aumento da temperatura, considerando que grande parte dos vasos trabalhará em temperaturas maiores do que a ambiente. Se o teste hidrostático for normalmente realizado à temperatura ambiente, pode-se concluir que a pressão de teste deve ser, na maior parte dos casos, superior à pressão

máxima de trabalho admissível para que sejam induzidas as mesmas tensões no material do vaso, simulando assim as condições citadas anteriormente.

A análise dimensional e a verificação aplicada aos vasos de pressão devem seguir as normas de cálculo e dimensionamento destas estruturas e garantir a estanqueidade dos mesmos à pressão de solicitação.

O dimensionamento do ROV VSI-02, desenvolvido em 2006 pela Universidade de Federal de Minas Gerais, CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas é apresentado abaixo.

Algumas restrições básicas para o projeto surgiram imediatamente, a saber:

- a. Desenvolvimento de um veículo submersível de baixo custo.
- b. Opção por um veículo não autônomo e operado vinculado à embarcação de apoio através de um cabo umbilical .
- c. O sistema deverá comportar futuras alterações visando torná-lo um submersível autônomo (AUV).
- d. O sistema deve ser operável a partir de embarcações de pequeno porte (20m, 30 t), o que pode ser assegurado através de uma limitação no peso máximo do submersível o qual foi fixado da forma seguinte:

$$P_{\max} \leq 400 \text{ kg}$$

- a. Profundidade de trabalho em torno de 80 m, permitindo operações em, praticamente, todas as usinas hidrelétricas brasileiras.

Considerando essas premissas, a forma tubular em gaiola com vasos de pressão isolados, FIGs. (4.10 e 4.11), foi escolhida em detrimento à cilíndrica ou esférica a qual, embora sendo mais eficiente do ponto de vista estrutural, acarretaria maiores custos de fabricação devido às dimensões necessárias para embarcar todos os subsistemas.

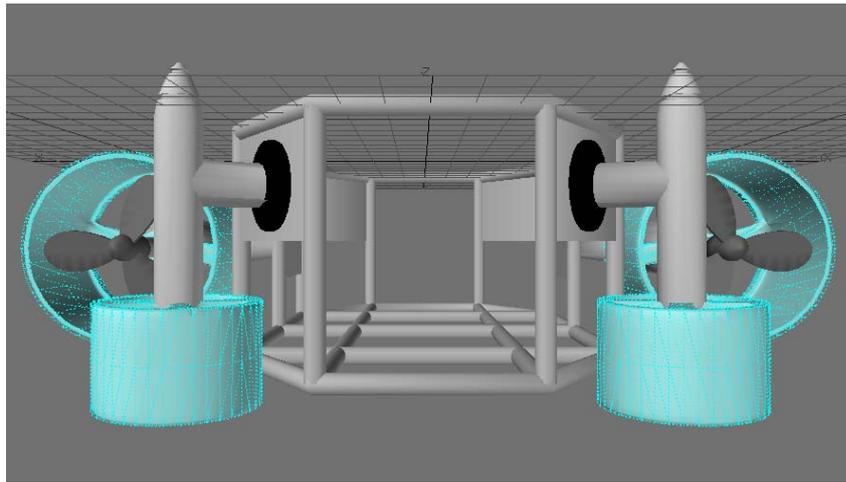


FIGURA 4.10 – Desenho esquemático da gaiola tubular.

FONTE – Própria

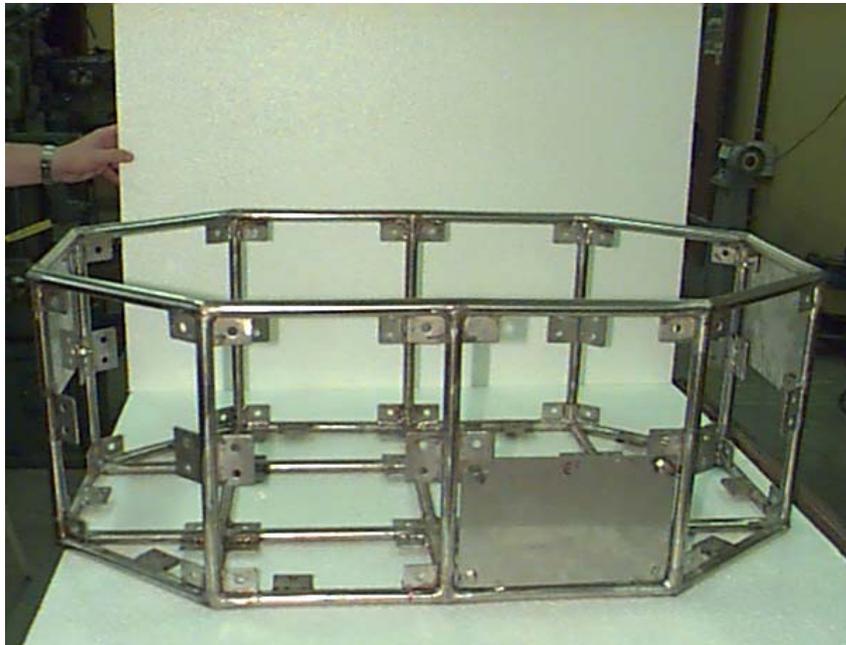


FIGURA 4.11 – Foto da estrutura tubular em gaiola construída em aço inox.

FONTE – Própria

Os vasos de pressão foram construídos em aço inoxidável tipo AISI304 segundo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da American Society for Mechanical Engineering (ASME - Divisão 1, Seção VIII, 1977).

A configuração final dos vasos pode ser vista na FIG. (4.12).

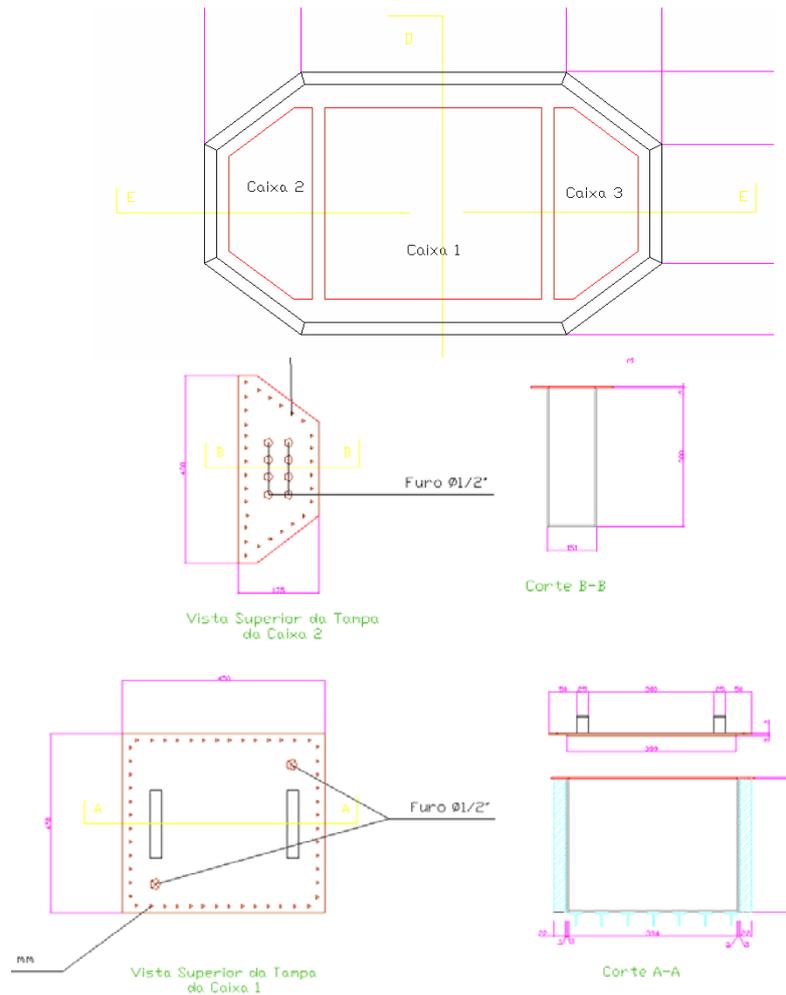


FIGURA 4.12 – Detalhe dos vasos de pressão em planta e elevação.

FONTE – Própria

Para evitar paredes extremamente grossas, que acarretariam maior peso da estrutura, optou-se pelo uso de cantoneiras de reforço na construção do vaso de pressão. O aço AISI 304 foi escolhido em função principalmente da sua resistência mecânica, resistência à corrosão por água, soldabilidade e custo. Suas características mecânicas e físicas são apresentadas no QUADRO (4.2) (Stainless Steel Handbook, WILEY & SONS, 1978):

QUADRO 4.2.

Características mecânicas e físicas do aço AISI 304.

Tensão de ruptura	$\sigma_r$	6.000 kg/cm <sup>2</sup>
Limite de escoamento	$\sigma_e$	2.500 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade	E	1,8 x 10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup>
Densidade	p	7,86 g/cm <sup>3</sup>

FONTE: Wiley & Sons (1978).

A tensão admissível  $T_a$ , adotada para tração e compressão, é de 1.270 kg/cm<sup>2</sup>. Para cisalhamento ( $\sigma_{cz}$ ) foi assumido o valor de 900 kg/cm<sup>2</sup> (ASME Code For Pressure Vessels, Section IX – Materials - 1979).

Os vasos foram dobrados a frio e soldados a partir de duas chapas de 1/8" (3,12mm) de espessura, possuindo, portanto, duas soldas transversais. Todas as soldagens foram realizadas com métodos TIG (*Tungsten Inert Gas*) utilizando o gás argônio e MIG (*Metal Inert Gas*). As cantoneiras de reforço foram dobradas a partir de uma chapa de aço AISI 304 de 20 mm x 20 mm, e se encontram posicionadas em torno das caixas, reduzindo seu comprimento efetivo de flambagem para 80 mm. As cantoneiras são soldadas espaçadamente com solda de filete e pontual. A FIG.(4.13) apresenta os vasos de pressão construídos para o primeiro protótipo do VSI-02.

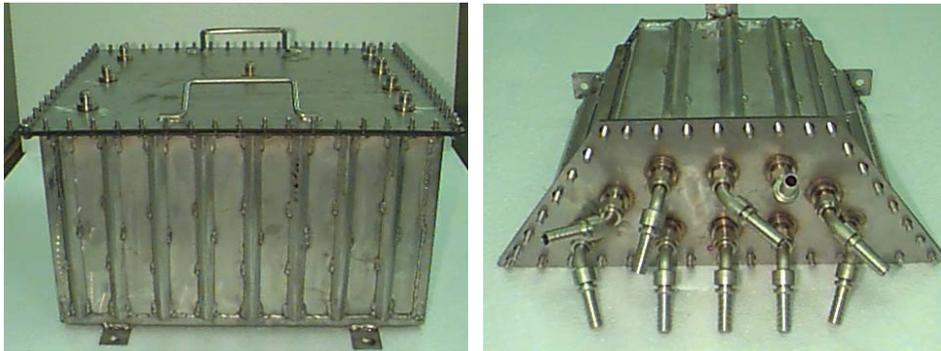


FIGURA 4.13 – Vasos de pressão e reforços de cantoneira construídos em aço inox.

FONTE – Própria.

O vaso possui uma abertura de maior dimensão, flangeada, em chapa AISI 304 de 1/8" (3,12mm), sendo os flanges recortados a laser e soldados pelo processo TIG, sob especificações da ASME e ABNT. A FIG. (4.14) apresenta as aberturas dos vasos de pressão do VSI-02.

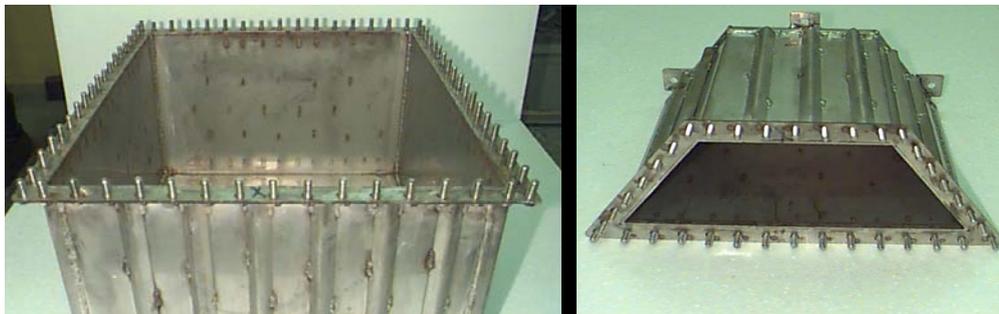


FIGURA 4.14 – Aberturas dos vasos de pressão construídos em aço inox.

FONTE – Própria

O dimensionamento foi realizado considerando as faces do vaso de pressão como chapas finas com bordas engastadas (capazes de transmitirem os esforços continuamente às outras faces), FIG. (4.15)

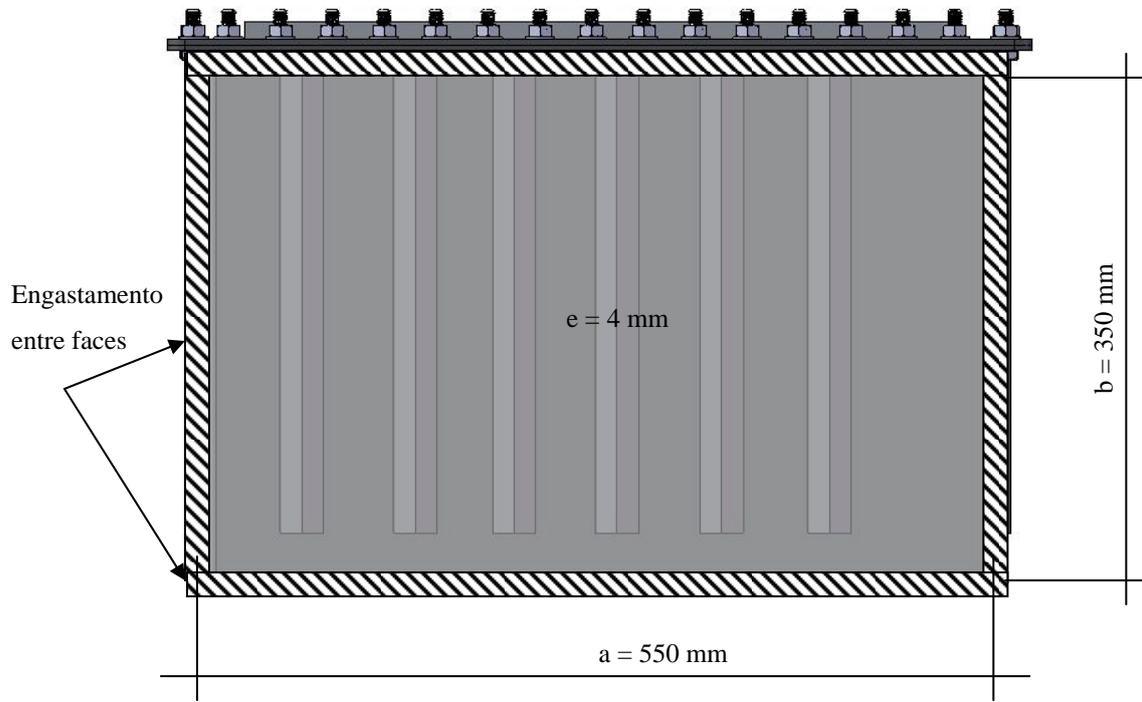


FIGURA 4.15 – Representação da face do vaso de pressão como chapa engastada em todas as extremidades  
FONTE – Própria

Segundo Timoshenko et. al. (1959) para uma relação  $b/a = 0,63$  da placa, pode-se calcular os esforços nas extremidades engastadas e no centro da chapa utilizando as EQUAÇÕES (4.1 e 4.2).

$$M_x \cong M_y \cong -0,0513qa^2 \quad (4.1)$$

$$M_1 \cong M_2 \cong 0,0231qa^2 \quad (4.2)$$

Sendo:

$M_x$  – Momento de engastamento na extremidade x da placa

$M_y$  – Momento de engastamento na extremidade y da placa

$M_1$  e  $M_2$  – Momentos no centro da placa e nas direções x e y respectivamente

$q$  – carga uniformemente distribuída sobre a placa

$a$  – maior dimensão da placa

A verificação quanto à resistência dos vasos de pressão foi realizada tomando como referência dois perfis retirados do vaso de pressão e que representam os pontos de maiores esforços destas estruturas. Os perfis escolhidos são formados: o primeiro pela metade do vão livre, que se encontra entre os reforços em cantoneira, incluído a própria cantoneira e representado pelo corte A-A da FIG. (4.16) e o segundo foi obtido em um dos cantos do vaso e é representado pelo corte B-B da FIG. (4.16).

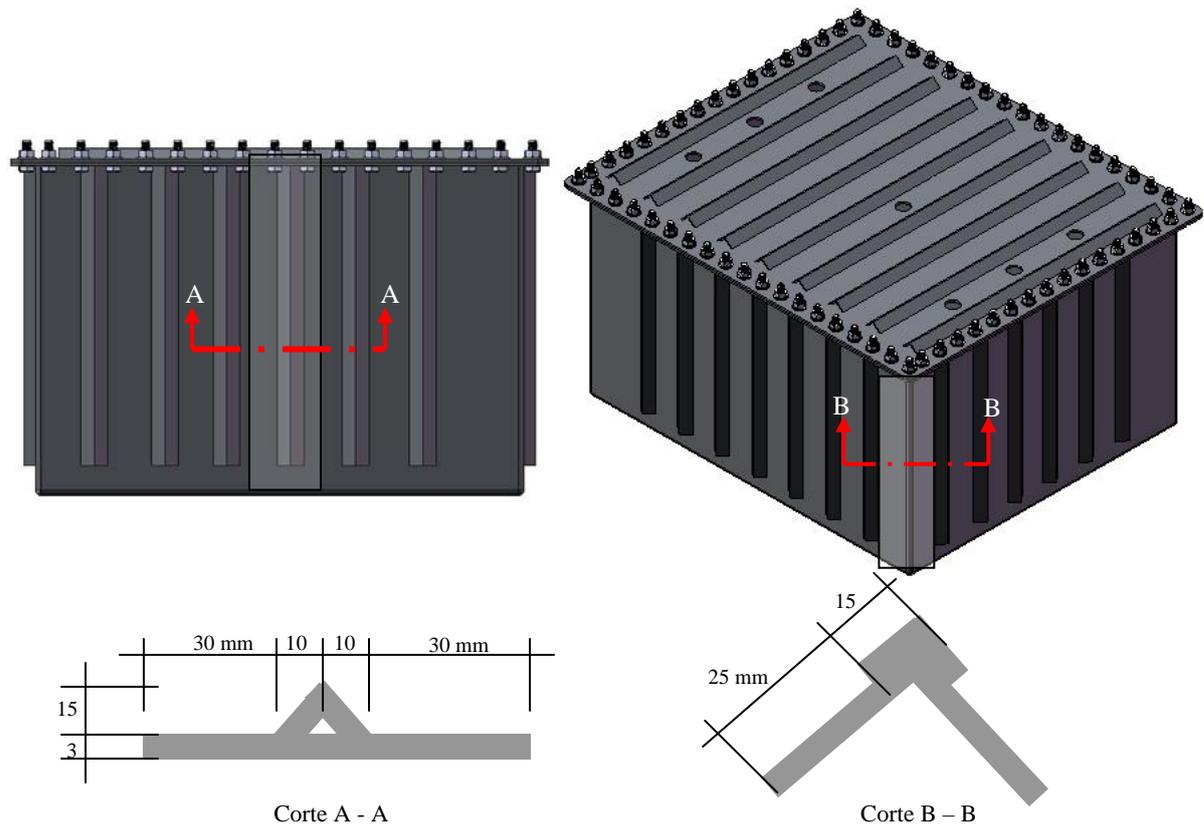


FIGURA 4.16 – Representação dos perfis submetidos à verificação dos esforços.

FONTE – Própria

Para estes perfis foram realizadas análises de resistência à flexão em três estados limites: Flambagem Local da Alma (FLA), Flambagem Local da Mesa (FLM) e Flambagem Lateral por Torção (FLT), nos quais a sollicitação de cálculo deve ser menor ou igual à resistência calculada, (ANDRADE et. al., 2006).

O vaso de pressão da câmera de visão do VSI-02 é constituído por um tubo cilíndrico, construído em aço inoxidável, flangeado, com diâmetro de 101 mm e um visor acrílico constituído de um cilindro de Metil-Metacrilato, torneado de um tarugo, com raio interno de 95 mm e raio externo de 155 mm, sendo 20 mm de espessura. Este visor é fixado nos flanges

por 6 parafusos em inox AISI 304 de 4" x 1/2", com cabeça sextavada, FIG.(4.17). As propriedades mecânicas e físicas do Methil-Metacrilato são apresentados no QUADRO (4.3).

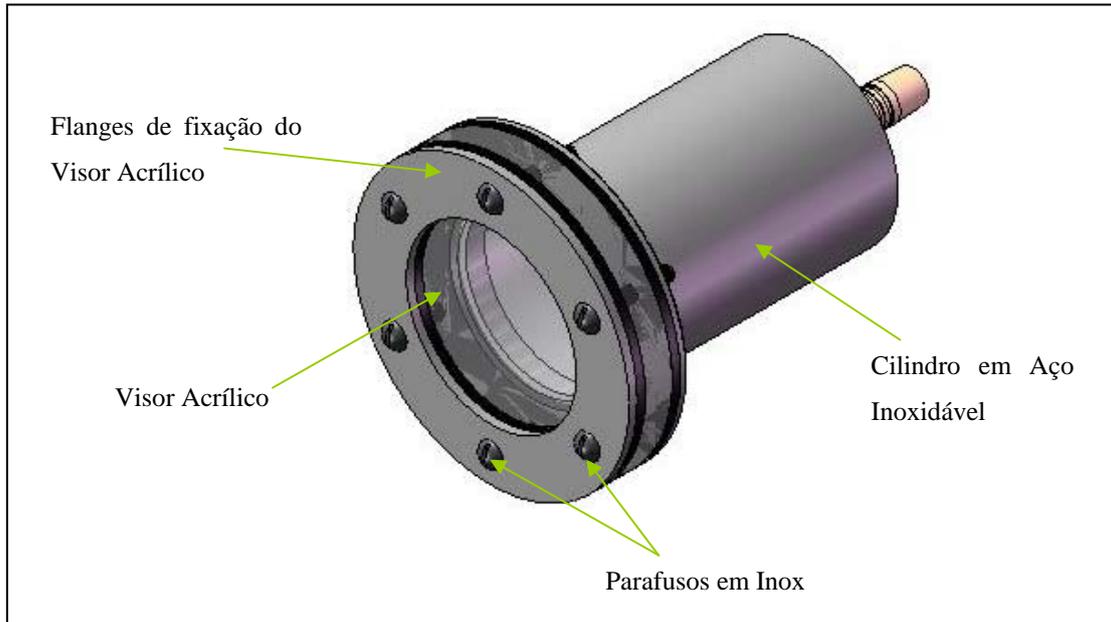


FIGURA 4.17. – Vaso de pressão da câmera de visão e visor acrílico do VSI-02

FONTE – Própria.

QUADRO 4.3

Propriedades mecânicas e físicas do Methil-Metacrilato.

Tensão de ruptura	$\sigma_r$	709 kgf/cm <sup>2</sup> (a 20° C)
Módulo de elasticidade	E	0,028 . 10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> (a 20° C)
Elongamento a Tr	Er	5%
Densidade	p	1,19 g/cm <sup>3</sup>

FONTE: Plastic Materials Handbook, WILEY & SONS, 1978.

As tensões admissíveis adotadas são:

- $\sigma_{af} = \sigma_r / 3 = 236 \text{ kgf/cm}^2$  para tração compressão na flexão;
- $\sigma_{acz} = 100 \text{ kgf/cm}^2$  para cisalhamento.

Os conectores que interligam as caixas de controle, de potência, de processamento, de visão e os motores são de alta pressão e utilizados em projetos de equipamentos hidráulicos e servem como condutores dos cabos elétricos utilizados nas conexões dos subsistemas. As mangueiras de conexão suportam uma pressão de 21 kgf/cm<sup>2</sup>. As FIGURAS (4.18 a 4.20) apresentam os conectores de alta pressão instalados nos vasos de pressão do VSI-02.

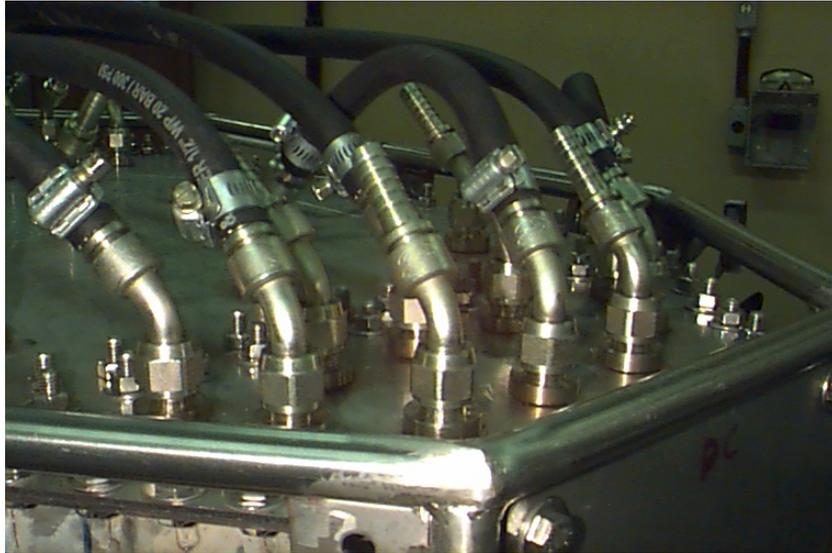


FIGURA 4.18 – Foto dos conectores de alta pressão acoplados às mangueiras dos vasos  
FONTE – Própria

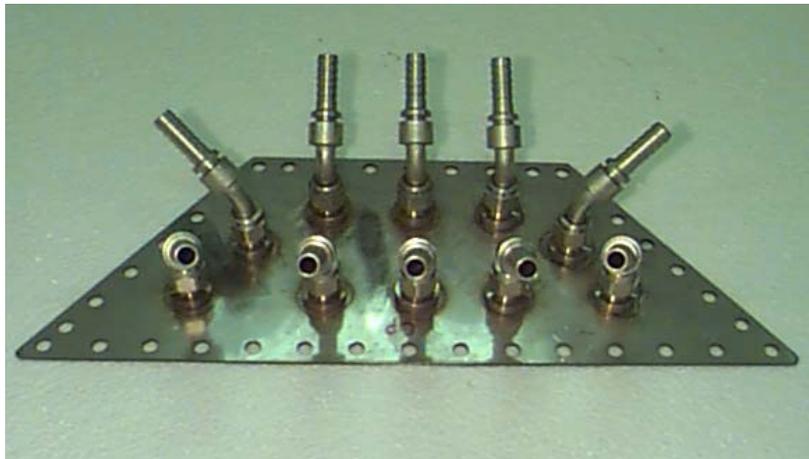


FIGURA 4.19 – Conector de alta pressão conectado aos vasos de pressão  
FONTE – Própria

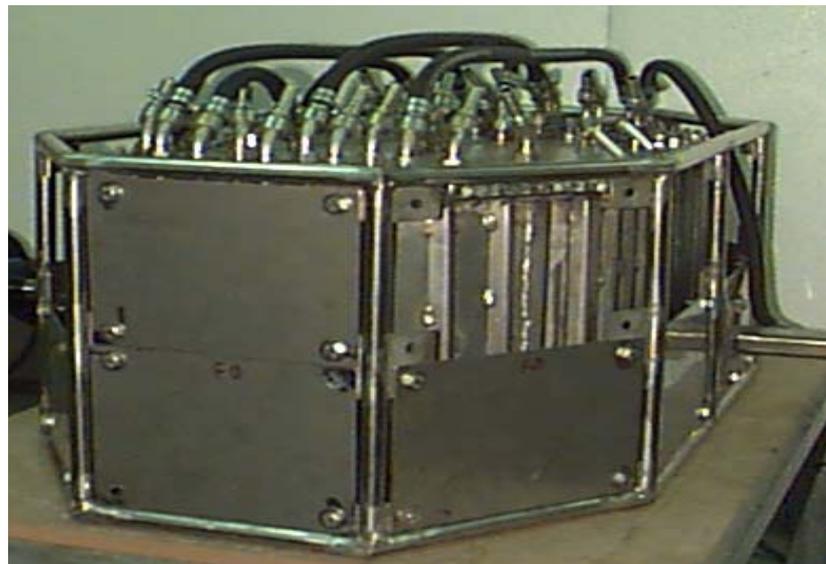


FIGURA 4.20 – Vista geral dos conectores de alta pressão conectado ao VSI-02  
FONTE – Própria

Os propulsores do VSI-02 são acoplados através de seis suportes projetados, FIG. (4.21) e construídos em aço inox, FIG. (4.22 e 4.23) e estão localizados em pontos diametralmente opostos garantindo a simetria do submersível e seus suportes recebem a seguinte nomenclatura: FE – Frente esquerda, FD – Frente Direita, PE – Popa Esquerda, PD – Popa Direita, E2 – Esquerda dois e D2 – Direita dois.

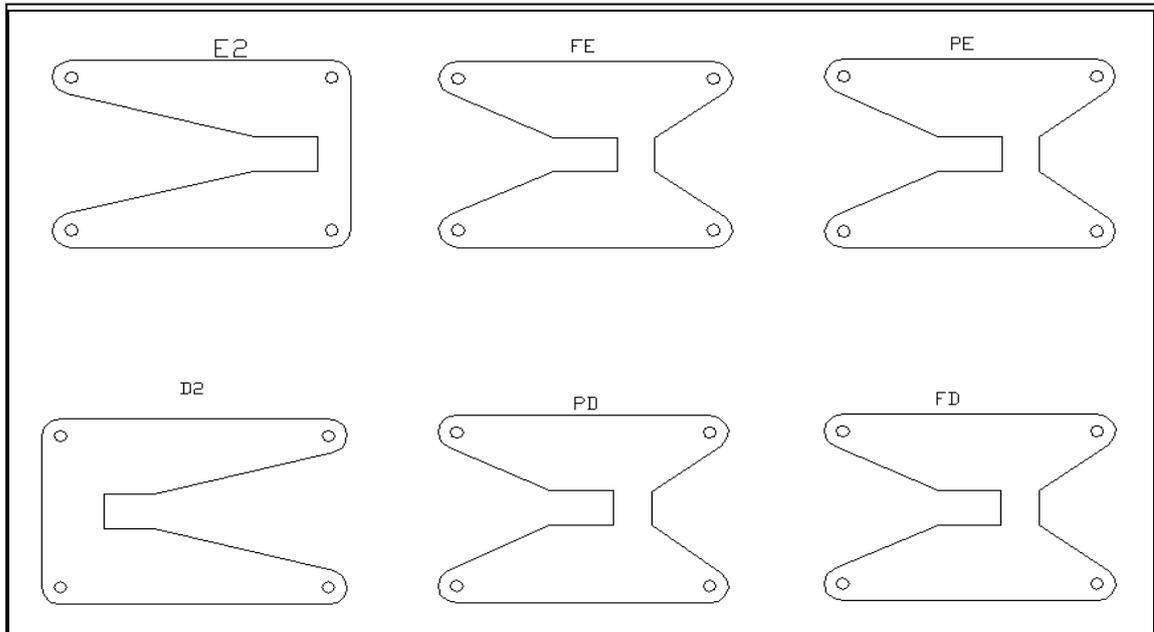


FIGURA 4.21 – Projeto das placas de base dos suportes dos propulsores

FONTE – Própria



FIGURA 4.22 – Suporte dos propulsores do VSI-02.

FONTE – Própria.



FIGURA 4.23 – Suporte dos propulsores verticais do VSI-02

FONTE – Própria

O dimensionamento dos suportes dos propulsores partiu de sua definição unifilar, FIG. (4.24) utilizada para encontrar os esforços oriundos de projeto.

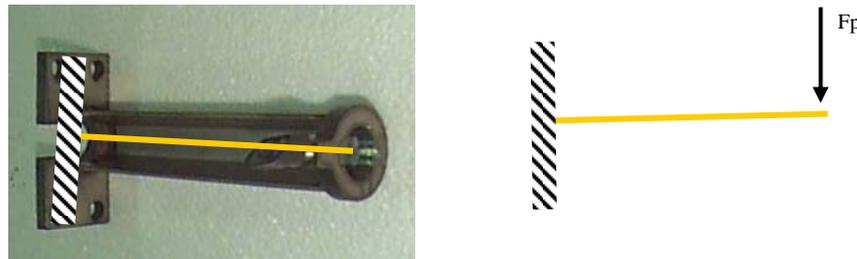


FIGURA 4.24 – Diagrama unifilar do suporte dos propulsores do VSI-02.

FONTE – Própria.

Considerando que pode ocorrer alguma necessidade especial de levantar o VSI-02 pelos suportes dos propulsores, a força  $F_p$  exercida seria de aproximadamente a metade do peso do ROV e igual a 115 kgf. Aplicada a uma distância de 0,30 m de sua fixação ao ROV, isto corresponde a um momento, no engastamento, de aproximadamente 35 kgf.m.

Os suportes foram verificados quanto aos esforços de momento fletor aplicados ao perfil apresentado na FIG. (4.25) para os três estados limites exigidos pela NBR-8800 (FLA, FLM e FLT).

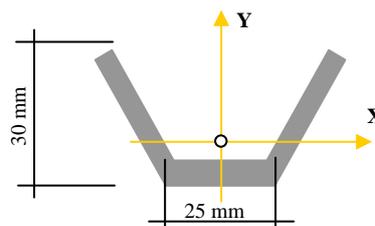


FIGURA 4.25 – Perfil do suporte dos propulsores do VSI-02.

FONTE – Própria.

A proteção dos hélices dos propulsores foi projetada e construída em aço inox, FIG. (4.26), visando uma maior proteção do sistema e melhor aproveitamento dos propulsores, uma vez que permitem direcionar o fluxo do escoamento.

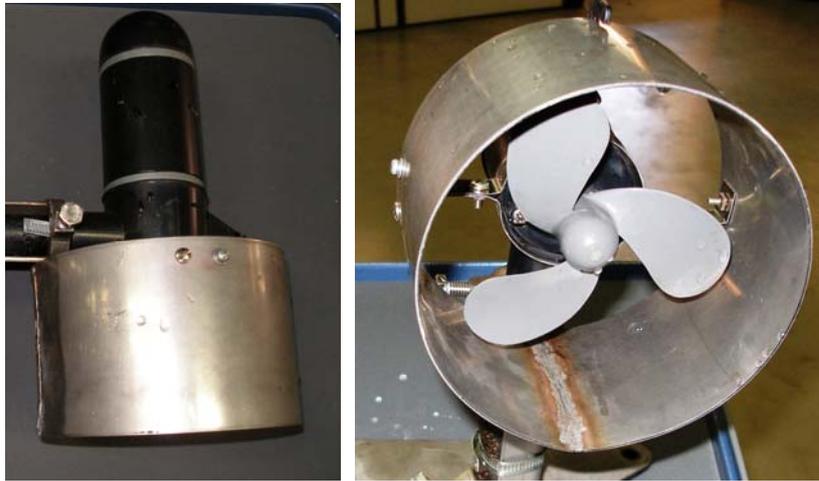


FIGURA 4.26 – Proteção do hélice do propulsor em aço inox

FONTE – Própria

#### 4.2.2. Subsistema de Emerção e Submersão (*Buoyancy*)

Na concepção do veículo submersível de inspeção, VSI-02, adotou-se como princípio de projeto um subsistema de flutuação positiva, para que em qualquer situação de emergência o submersível retornasse à superfície.

Os cálculos do centro de gravidade e do centro de empuxo e os valores das forças atuantes sobre o veículo submersível foram realizados para duas situações extremas:

- Motores verticais parados;
- Motores verticais funcionando.

O QUADRO (4.4) apresenta os cálculos do centro de gravidade (C.G. (x,y,z)) do VSI-02.

A fim de garantir o não tombamento (giro do submersível em torno do eixo longitudinal) procurou-se ao longo do projeto manter o centro de empuxo C.E. sempre a uma distância considerável e superior a do centro de gravidade C.G..

Os flutuadores do VSI-02 foram construídos em poliestireno estendido de alta densidade, revestido por um tecido permeável e reforçados por fitas de *nylon* de alta resistência, que servem como sistema de fixação dos flutuadores. É composto por um conjunto de nove flutuadores simetricamente distribuídos ao redor da gaiola de sustentação do ROV.

A FIG. (4.27) apresenta o projeto do sistema de flutuação do VSI-02 e os posicionamentos dos C.E. e C.G..

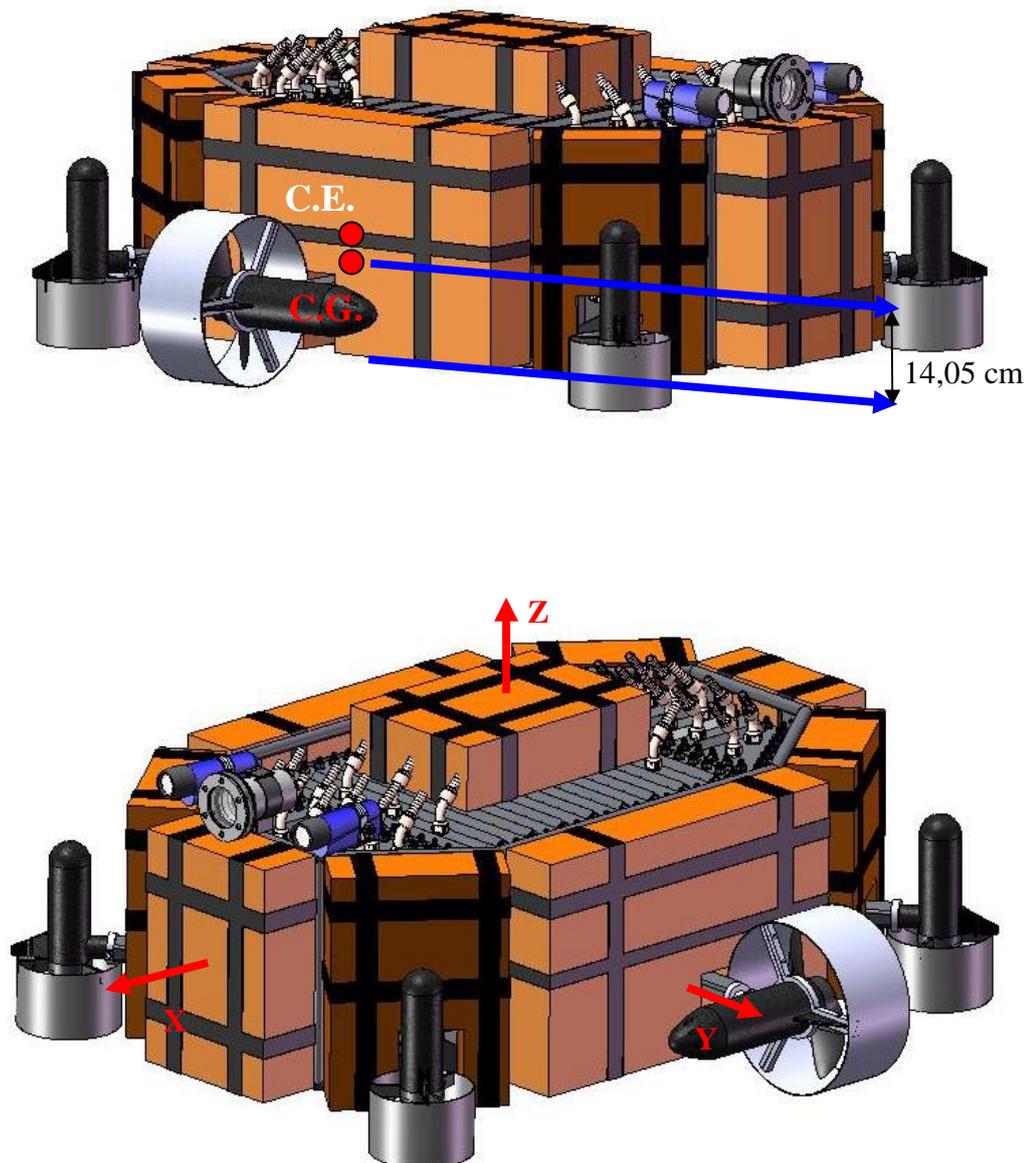


FIGURA 4.27 – Posição do centro de gravidade e do centro de empuxo no VSI-02 e eixos do sistema O.  
FONTE – Própria.

A definição de se utilizar flutuação positiva eleva o consumo de potência da bateria, pois é necessário manter os motores verticais funcionando durante todo tempo de operação de submersão do VSI-02. A adoção desta estratégia se fundamenta na possibilidade de retorno do VSI-02 à superfície a qualquer momento, sem a necessidade de mobilizar uma equipe de resgate em caso de pane da parte elétrica.

QUADRO 4.4

Parâmetros considerados no cálculo do Centro de Gravidade do VSI-02.

Cálculo do Centro de Gravidade do VSI-02 (Em Relação a um Eixo de Referência O(x,y,z))										
Componentes		Massa	Densidade	Volume	Distâncias ao Sistema (O)			C*J	C*K	C*L
		(kg)	(kg/m³)	m³	Ox(cm)	Oy(cm)	Oz(cm)			
<b>Gaiola</b>		<b>39,33</b>	<b>7540,00</b>	<b>0,005216</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>11,41</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>448,94</b>
	Barras Horizontais Superiores	8,80	7540	0,001167	0,00	0,00	32,50	0,00	0,00	285,94
	Barras Verticais	10,03	7540	0,001330	0,00	0,00	16,25	0,00	0,00	163,00
	Barras Horizontais Inferiores	20,50	7540	0,002719	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Caixa Bateria</b>		<b>41,34</b>	<b>7540,00</b>	<b>0,005482</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>18,33</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>757,55</b>
	Parafusos de Fixação da Tampa	1,06	7540	0,000141	0,00	0,00	24,50	0,00	0,00	26,03
	Parafusos de Fixação da Caixa	0,05	7540	0,000007	0,00	0,00	1,25	0,00	0,00	0,07
	Tampa	6,07	7540	0,000805	0,00	0,00	31,25	0,00	0,00	189,71
	Suporte da Tampa (Alças)	0,22	7540	0,000029	0,00	0,00	33,50	0,00	0,00	7,31
	Cantoneiras de Reforço	3,80	7540	0,000504	0,00	0,00	15,75	0,00	0,00	59,85
	Chapas de Fixação	3,39	7540	0,000450	0,00	0,00	1,25	0,00	0,00	4,24
	Caixa de Aço	18,76	7540	0,002489	0,00	0,00	11,25	0,00	0,00	211,09
	Engate das Mangueiras	7,98	7540	0,001058	0,00	0,00	32,50	0,00	0,00	259,26
<b>Caixa da CPU</b>		<b>20,86</b>	<b>7540</b>	<b>0,002766</b>	<b>-25,71</b>	<b>0,00</b>	<b>20,00</b>	<b>536,22</b>	<b>0,00</b>	<b>417,25</b>
	Parafusos de Fixação da Tampa	0,27	7540	0,000035	-40,00	0,00	24,50	-10,62	0,00	6,51
	Parafusos de Fixação da Caixa	0,04	7540	0,000005	-40,00	0,00	1,25	-1,59	0,00	0,05
	Tampa	1,06	7540	0,000141	-40,00	0,00	31,25	-42,41	0,00	33,13
	Cantoneiras de Reforço	2,03	7540	0,000269	-40,00	0,00	15,75	-81,07	0,00	31,92
	Chapas de Fixação	2,04	7540	0,000270	-40,00	0,00	1,25	-81,43	0,00	2,54
	Caixa de Aço	7,45	7540	0,000988	0,00	0,00	11,25	0,00	0,00	83,83
	Engate das Mangueiras	7,98	7540	0,001058	-40,00	0,00	32,50	319,09	0,00	259,26
<b>Caixa de Controle</b>		<b>20,86</b>	<b>7540</b>	<b>0,002766</b>	<b>25,71</b>	<b>0,00</b>	<b>20,00</b>	<b>536,22</b>	<b>0,00</b>	<b>417,25</b>

QUADRO 4.4

Parâmetros considerados no cálculo do Centro de Gravidade do VSI-02 (Continuação).

Componentes		Massa (kg)	Densidade (kg/m³)	Volume (m³)	Ox (cm)	Oy (cm)	Oz (cm)	C*J	C*K	C*L
	Parafusos de Fixação da Tampa	0,27	7540	0,000035	40,00	0,00	24,50	10,62	0,00	6,51
	Parafusos de Fixação da Caixa	0,04	7540	0,000005	40,00	0,00	1,25	1,59	0,00	0,05
	Tampa	1,06	7540	0,000141	40,00	0,00	31,25	42,41	0,00	33,13

	Cantoneiras de Reforço	2,03	7540	0,000269	40,00	0,00	15,75	81,07	0,00	31,92
	Chapas de Fixação	2,04	7540	0,000270	40,00	0,00	1,25	81,43	0,00	2,54
	Caixa de Aço	7,45	7540	0,000988	0,00	0,00	11,25	0,00	0,00	83,83
	Engate das Mangueiras	7,98	7540	0,001058	40,00	0,00	32,50	319,09	0,00	259,26
<b>Caixa de Visão</b>								<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
	Parafusos de Fixação da Tampa	0,27	7540	0,000035				0,00	0,00	0,00
	Parafusos de Fixação da Caixa	0,05	7540	0,000007			1,25	0,00	0,00	0,07
<b>Trenó</b>		<b>10</b>	<b>7540</b>	<b>0,0013263</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-16,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-160,00</b>
<b>Baterias</b>		<b>48,00</b>	<b>1784</b>	<b>0,0269025</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>14,35</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>688,80</b>
<b>Flutuador</b>		<b>3,00</b>	<b>30</b>	<b>0,1</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>43,75</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>131,25</b>
<b>Suporte do motor 1</b>		<b>9,71</b>	<b>7540</b>	<b>0,0012882</b>	<b>-5,00</b>	<b>37,50</b>	<b>10,00</b>	<b>-48,57</b>	<b>364,24</b>	<b>97,13</b>
<b>Suporte do motor 2</b>		<b>9,71</b>	<b>7540</b>	<b>0,0012882</b>	<b>-5,00</b>	<b>-37,50</b>	<b>10,00</b>	<b>-48,57</b>	<b>364,24</b>	<b>97,13</b>
<b>Suporte do motor 3</b>		<b>9,71</b>	<b>7540</b>	<b>0,0012882</b>	<b>43,00</b>	<b>35,00</b>	<b>10,00</b>	<b>417,66</b>	<b>339,96</b>	<b>97,13</b>
<b>Suporte do motor 4</b>		<b>9,71</b>	<b>7540</b>	<b>0,0012882</b>	<b>43,00</b>	<b>-35,00</b>	<b>10,00</b>	<b>417,66</b>	<b>339,96</b>	<b>97,13</b>
<b>Suporte do motor 5</b>		<b>9,71</b>	<b>7540</b>	<b>0,0012882</b>	<b>-43,00</b>	<b>35,00</b>	<b>10,00</b>	<b>417,66</b>	<b>339,96</b>	<b>97,13</b>
<b>Suporte do motor 6</b>		<b>9,71</b>	<b>7540</b>	<b>0,0012882</b>	<b>-43,00</b>	<b>-35,00</b>	<b>10,00</b>	<b>417,66</b>	<b>339,96</b>	<b>97,13</b>
<b>Motor 1</b>		<b>5,00</b>		<b>0,0018115</b>	<b>-5,00</b>	<b>44,00</b>	<b>10,00</b>	<b>-25,00</b>	<b>220,00</b>	<b>50,00</b>
<b>Motor 2</b>		<b>5,00</b>		<b>0,0018115</b>	<b>-5,00</b>	<b>-44,00</b>	<b>10,00</b>	<b>-25,00</b>	<b>220,00</b>	<b>50,00</b>
<b>Motor 3</b>		<b>3,00</b>		<b>0,0005661</b>	<b>43,00</b>	<b>40,00</b>	<b>15,00</b>	<b>129,00</b>	<b>120,00</b>	<b>45,00</b>
<b>Motor 4</b>		<b>3,00</b>		<b>0,0005661</b>	<b>43,00</b>	<b>-40,00</b>	<b>15,00</b>	<b>129,00</b>	<b>120,00</b>	<b>45,00</b>
<b>Motor 5</b>		<b>3,00</b>		<b>0,0005661</b>	<b>-43,00</b>	<b>40,00</b>	<b>15,00</b>	<b>129,00</b>	<b>120,00</b>	<b>45,00</b>
<b>Motor 6</b>		<b>3,00</b>		<b>0,0005661</b>	<b>-43,00</b>	<b>-40,00</b>	<b>15,00</b>	<b>129,00</b>	<b>120,00</b>	<b>45,00</b>
		<b>X<sub>c.e.</sub> =</b>	<b>-0,58</b>	cm	<b>Y<sub>c.e.</sub> =</b>	<b>0,00</b>	cm	<b>Z<sub>c.e.</sub> =</b>	<b>14,05</b>	cm

FONTES – Própria.

#### 4.2.3. Subsistema de Visão

O subsistema de visão é composto, inicialmente, por uma câmera colorida CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*), hermeticamente lacrada, interligada via cabo a um terminal de LCD (*Liquid Crystal Display*) localizado na central de controle onde as imagens coletadas ao longo da jornada de trabalho do ROV são coletadas e armazenadas. Na central de controle as imagens passarão por análise e processamento via software, que permitirá a geração de imagens mais nítidas e com maior resolução. A FIGURA (4.28) apresenta um desenho esquemático do subsistema de visão e a FIG. (4.29) apresenta três imagens: a primeira representa os alvos em visão real, a segunda a imagem recebida sem tratamento e processamento via software e a terceira com o processamento executado e restaurado (PINHEIRO, 2005).

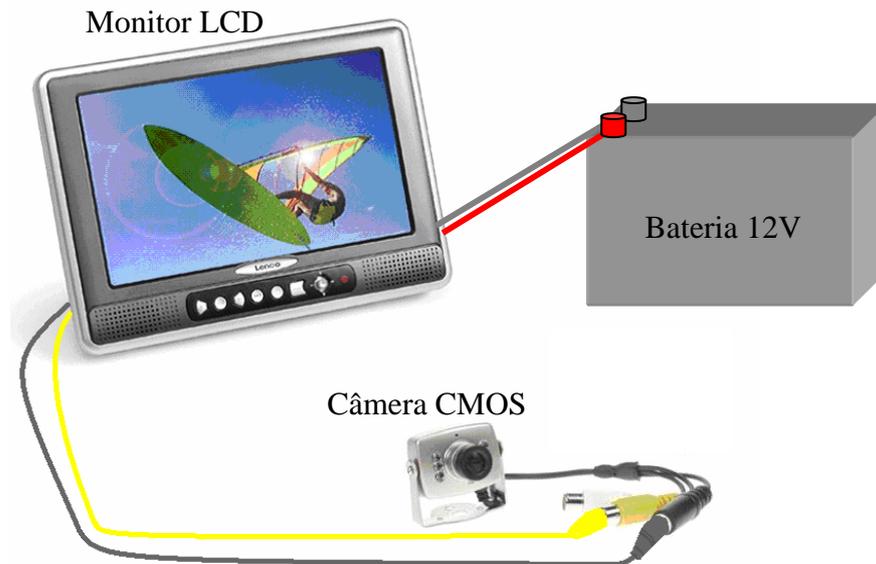


FIGURA 4.28 – Esquema do subsistema de visão do VSI-02

FONTE – Própria.

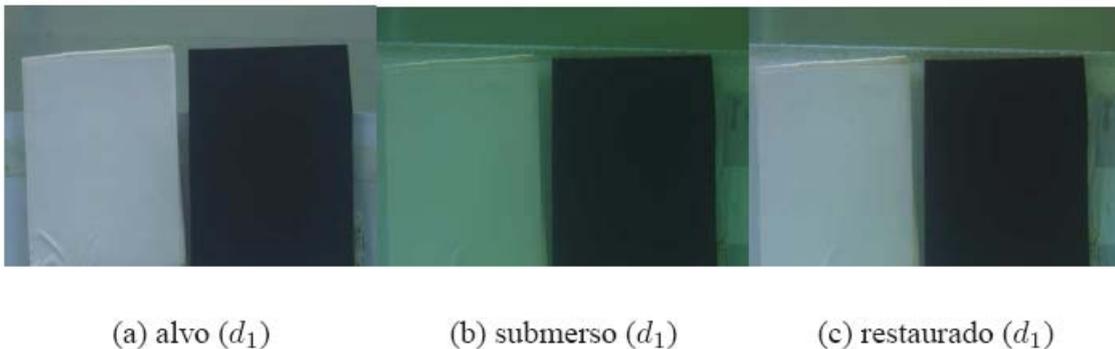


FIGURA 4.29 – Imagem (a) alvo fora da água, (b) alvo submerso e (c) imagem restaurada

FONTE – PINHEIRO, 2005

#### 4.2.4. Subsistema de Propulsão e Vetorização de Empuxo

A FIG. (4.30) apresenta o projeto final do VSI-02, que utiliza em sua concepção quatro motores verticais e dois motores horizontais, responsáveis por toda a sua vetorização de empuxo.



FIGURA 4.30 – Submersível VSI-02 em fase de montagem dos propulsores  
FONTE – Própria

O acionamento em conjunto destes motores com variação de suas potências gera diversas possibilidades de manobrabilidade, como pode ser visualizado no esquema das FIGURAS (4.31) e (4.32). A definição de equações que representam os deslocamentos e seus respectivos ângulos de arfagem, guinada e rolamento, isto é, sua cinemática e dinâmica, é apresentada no capítulo 3.

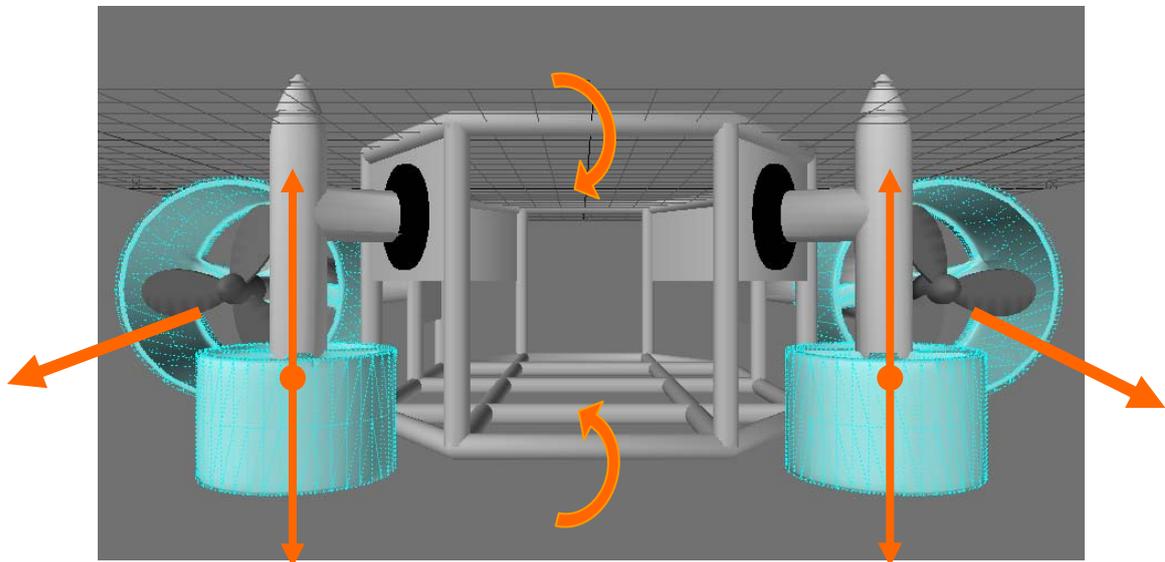


FIGURA 4.31 – Sistema de Vetorização de empuxo do VSI-02 (vista frontal)

FONTE – Própria

**M3**

**M4**

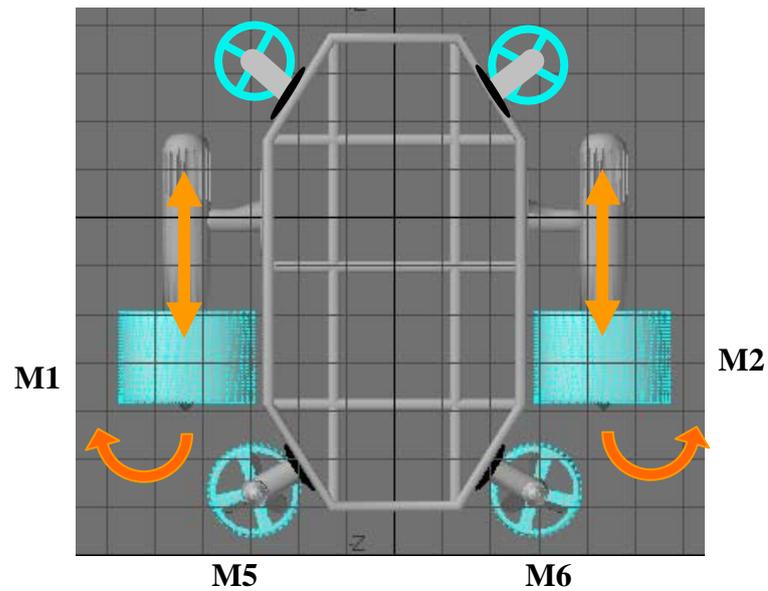


FIGURA 4.32 – Sistema de Vetorização de empuxo do VSI-02 (planta)

FONTE – Própria

O projeto do VSI-02 permite a reorganização do sistema de propulsão e vetorização de empuxo, possibilitando o aumento ou redução dos graus de liberdade do submersível. As FIGURAS (4.33) e (4.34) apresentam outra possibilidade e configuração para este subsistema.

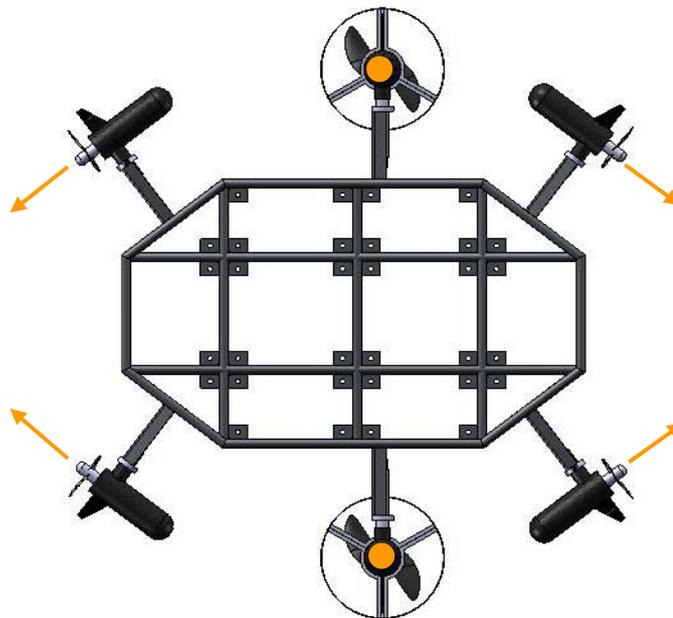


FIGURA 4.33 – Utilização de quatro propulsores horizontais e dois verticais

FONTE: Própria

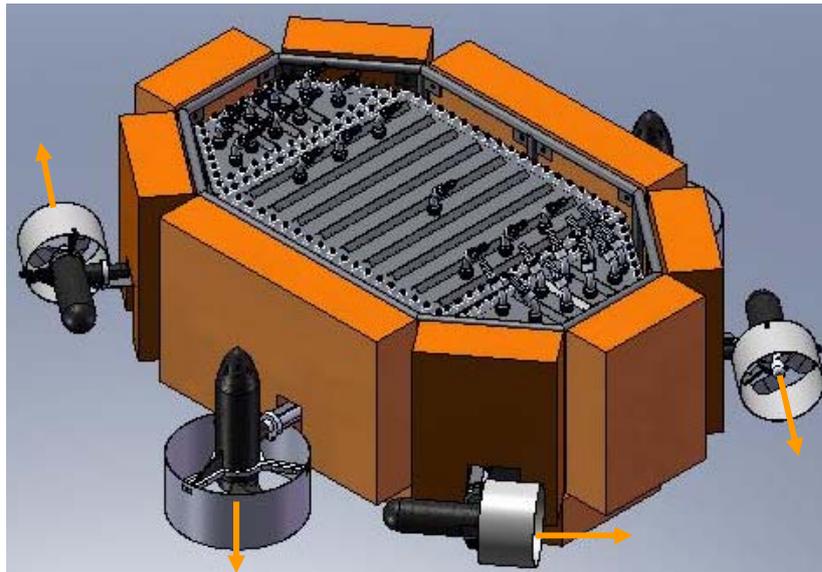


FIGURA 4.34 – VSI-02 utilizando quatro propulsores horizontais e dois verticais

FONTE: Própria

A inversão no posicionamento dos propulsores aplicada ao VSI-02 permite o acréscimo de um grau de liberdade em sua cinemática e isto garante a possibilidade de deslocamento lateral ao submersível, movimento não presente na configuração atual do VSI-02, visto que os propulsores verticais são acionados em um mesmo instante.

Na definição dos propulsores, inicialmente optou-se pelo desenvolvimento de um propulsor capaz de trabalhar submerso, levando em consideração: a potência do propulsor a ser projetado, a temperatura de trabalho deste propulsor e a força oferecida pelo sistema propulsor, FIG. (4.35). Foram realizados testes de força de propulsão e de temperatura destes propulsores desenvolvidos. O projeto dos propulsores foi descontinuado por motivo de necessidade de estudos mais elaborados e específicos sobre o assunto e pelo custo deste desenvolvimento.

Para o submersível VSI-02, portanto, foi adotado propulsores elétricos da Sevylor e da Phanthom, de baixo custo e com capacidades de cargas de 10,8 e 16,3 kgf respectivamente (conforme os fabricantes)

Os propulsores do VSI-02 foram adaptados e passaram por testes de verificação de potência consumida, velocidade e força de propulsão.



FIGURA 4.35 – Fotos dos componentes e do propulsor a Hélice durante a fase inicial de desenvolvimento.  
FONTE – Própria.

O QUADRO (4.5.) apresenta a relação de potência e força de cada propulsor do VSI-02. A FIGURA (4.36) apresenta os propulsores já adaptados e instalados na plataforma mecânica do ROV.

QUADRO 4.5

Relação de potência e força de cada propulsor do VSI-02 conforme dados dos fabricantes.

<b>Motores</b>	<b>Potência<sub>máx</sub> (W)</b>	<b>Força (kgf) (Conforme Fabricante)</b>
Motor Principal (M1)	≈ 230	≈ 16,3
Motor Principal (M2)	≈ 230	≈ 16,3
Motor vertical (M3)	≈ 120	≈ 10,8
Motor vertical (M4)	≈ 120	≈ 10,8
Motor vertical (M5)	≈ 120	≈ 10,8
Motor vertical (M6)	≈ 120	≈ 10,8

FONTE – Própria.

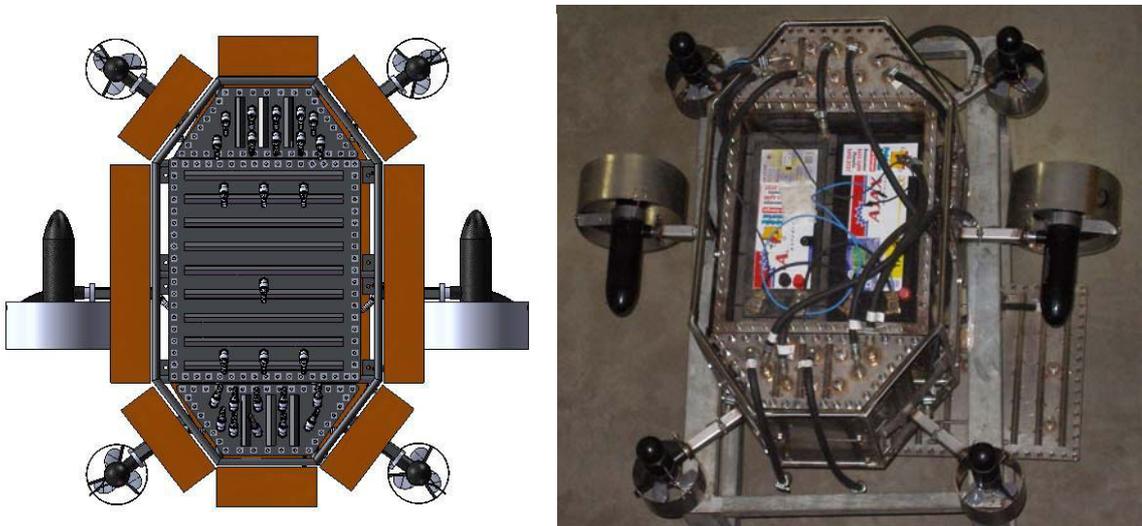


FIGURA 4.36 – Vista superior do sistema de propulsores instalados e foto do VSI-02.

FONTE – Própria.

#### 4.2.5. Subsistema do Cabo Umbilical

O subsistema do cabo umbilical é constituído por um cabo manga de dezoito vias (condutores / fios), que é responsável pela emissão e recepção de dados e imagens entre o ROV e a estação de controle.

Neste cabo, duas vias são utilizadas pelos sistemas de controle dos propulsores verticais, dez vias são utilizadas pelos sistemas de controle dos propulsores horizontais, duas vias são utilizadas pelo sistema de visão e quatro vias foram deixadas para futuras expansões.

A utilização de baterias locais no ROV prevê uma redução no diâmetro do cabo umbilical e uma conseqüente redução na interferência do mesmo com o sistema de vetorização de empuxo.

O cabo umbilical normalmente interfere na dinâmica e no controle do ROV, entretanto, no VSI-02 esta análise foi inicialmente simplificada e estas interferências foram tratadas como uma perturbação no sistema de controle do ROV.

A FIG. (4.37) apresenta o sistema de ligação do cabo umbilical ao VSI-02, enquanto a FIG. (4.38) apresenta a configuração do cabo e dos sistemas de transmissão e recepção utilizados nesta primeira etapa.



FIGURA 4.37 – Sistema de acoplamento do cabo umbilical no VSI-02: primeira figura com seis vias e segunda figura com dezoito vias.

FONTE – Própria.



(a) Cabo Manga de 6 vias

(b) Cabo Manga de 18 vias

FIGURA 4.38 – Cabo umbilical construído com: a) cabo manga de seis vias e b) cabo manga dezoito vias.

FONTE – Própria.

#### 4.2.6. Subsistema de Controle

O subsistema de controle do VSI-02 foi elaborado, inicialmente para os testes preliminares de emersão e submersão do ROV e proporciona um controle robusto capaz de permitir sua manobrabilidade. A construção do subsistema de controle preliminar do VSI-02 utilizou um controle de liga/desliga para os propulsores verticais, garantindo sua capacidade de emersão e submersão vetorizada. O controle dos propulsores horizontais utilizou um controle PWM - (Modulação da Largura de Pulso) modelo MAS-240 da APEX (NOVICK,1998), que utiliza uma tensão de alimentação de +3V, possui capacidade de suportar correntes de até 30 A em uma faixa de tensão de -12,0 V a +12,0V, FIG. (4.39), no qual o sinal de saída controla a velocidade e o sentido de rotação dos propulsores, definindo um conjunto de vetorização capaz de fornecer movimentos de vante, ré e de guinada ao ROV. As partes componentes do sistema de controle do ROV são apresentadas nas FIG. (4.40).

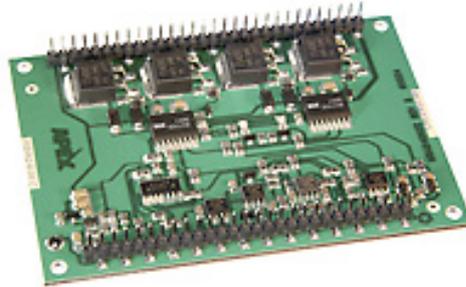


FIGURA 4.39 – Foto do controle PWM da APEX modelo MSA240.

FONTE – Própria.

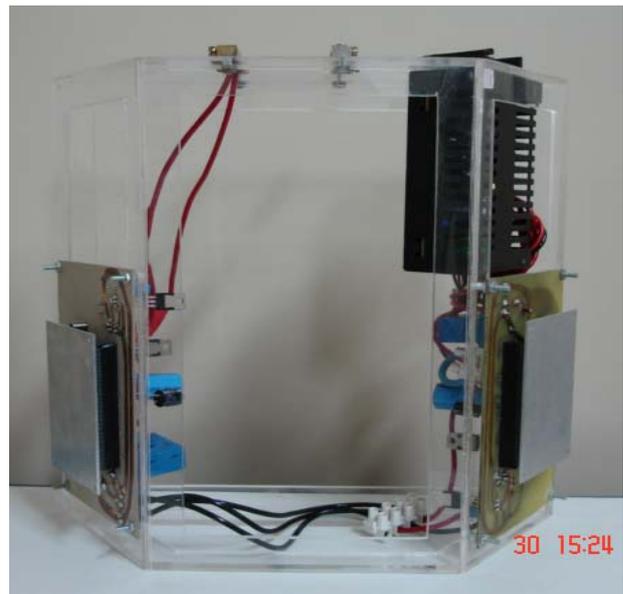
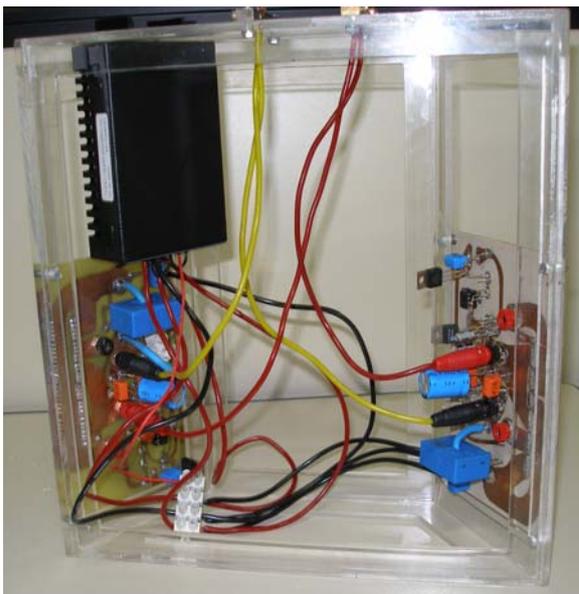


FIGURA 4.40 – Caixa de montagem do subsistema de controle composta por: conversor DC / DC, circuitos de controle PWM e terminais de conexão com a bateria.

FONTE – Própria.

Para evitar curto circuito no interior dos vasos de pressão, onde se encontram localizados os sistemas de controle do VSI-02, foi projetado um suporte acrílico capaz de acomodar todas as placas de controle de cada propulsor, FIG. (4.41).

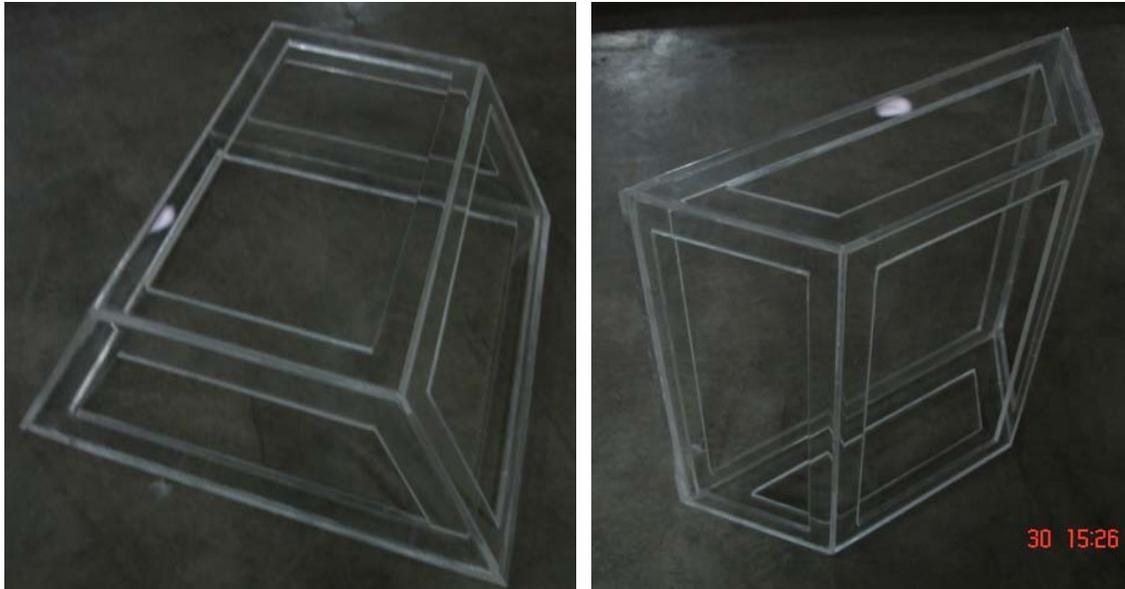


FIGURA 4.41 – Suporte em acrílico utilizado no acoplamento das placas de controle do VSI-02.

FONTE – Própria.

O console de controle do VSI-02, FIG. (4.42), foi projetado de forma a garantir uma maior praticidade na monobrabilidade do ROV. Para isto utilizou-se nesta primeira etapa um *joystick* analógico capaz de controlar, através da variação de potenciômetros diretamente ligados ao circuito PWM, a velocidade e o sentido de rotação dos propulsores.



FIGURA 4.42 – Caixa de controle externo, interligada ao VSI-02 através do cabo umbilical.

FONTE – Própria.

O controle de acionamento dos motores verticais, foi projetado de modo a permitir seu acionamento em uma única direção e velocidade. Na construção foram utilizados quatro relés de 12V e 16 A, FIG. (4.43).

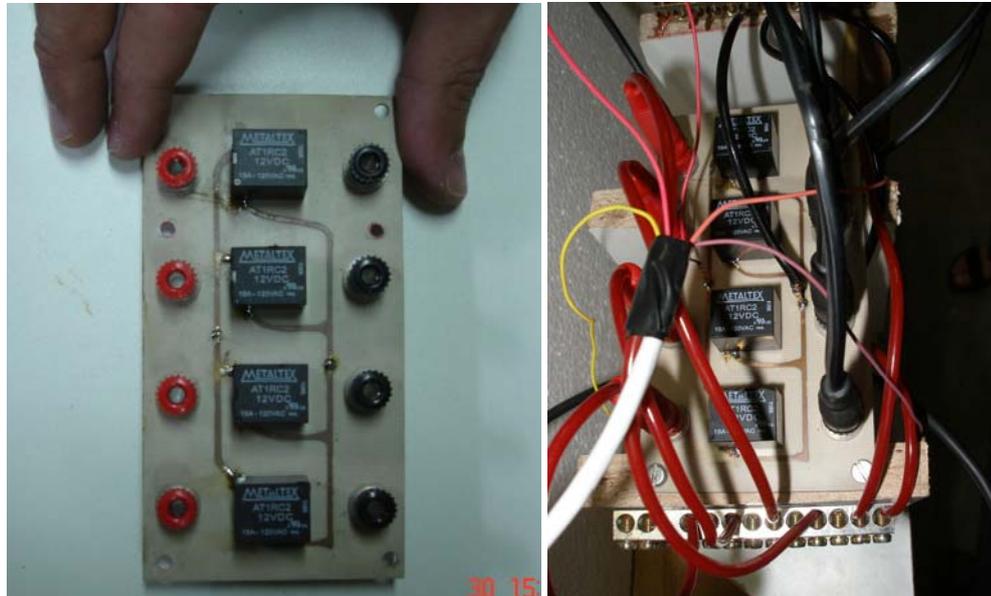


FIGURA 4.43 – Controle de acionamento dos propulsores verticais.  
 FONTE – Própria.

4.2.7. Subsistema de Iluminação

O subsistema de iluminação do submersível VSI-02 utiliza fonte de energia própria e externa às baterias embarcadas. Esta fonte de energia tem capacidade de carga para doze horas de trabalho ininterrupto.

A potência do sistema de iluminação do ROV e a sua estimativa de consumo são apresentados no QUADRO. (4.6) e a FIG. (4.44) apresenta os sistemas de iluminação e visão utilizados e montados na plataforma inercial do VSI-02.

QUADRO 4.6

Caracterização do sistema de iluminação do VSI-02.

Características	Valores
Autonomia	12 horas
Tensão de Alimentação DC	12 V
Potência	5,5W
Profundidade de trabalho	100 m

FONTE: Própria.

O acionamento do sistema de iluminação é apresentado no esquema da FIG. (4.45) e permite o controle pela estação de terra.



FIGURA 4.44 – Sistema de iluminação e visão montado no VSI-02.

FONTE – Própria.

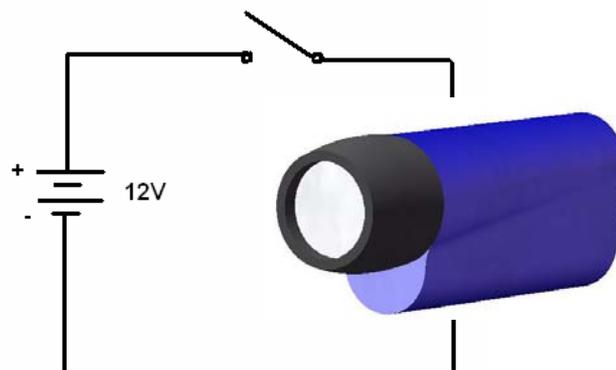


FIGURA 4.45 – Circuito de acionamento do sistema de iluminação.

FONTE – Própria

#### 4.2.8. Subsistema de Potência

Considerando que os subsistemas componentes do submersível e seus respectivos consumos são os apresentados abaixo:

1. Subsistema de controle composto por um microcomputador, seis amplificadores PWM e sensores do submersível compondo um gasto de 100W(12V);
2. Subsistema de propulsão composto por dois motores com potência de 230W(12V) e quatro motores de 120W(12V) cada, gerando um consumo total de 940W, quando os seis motores estiverem em funcionamento;
3. Subsistema de visão composto por uma câmera CMSO com potência total de 1,5W(12V).

O dimensionamento do subsistema de potência seguiu os quatro passos apresentados a seguir:

1º passo - como cada subsistema trabalha em 12V, a corrente total dos subsistemas em conjunto será de 86,8 A  $((230*2+120*4+1,5+100)W / 12V)$ .

2º passo - a energia necessária por jornada de trabalho de duas horas para acionar o submersível será de 173,6 Ah  $(86,8 A \times 2h)$ .

3º passo - incluindo um fator de 10% de segurança na recarga de bateria, o total será 190,9 Ah  $(173,6 Ah \times 1,1)$ . Para sistemas com várias cargas deve-se somar a energia de todas.

4º passo - se o consumo do submersível é de 190,9 Ah, para definição da bateria deve-se observar a máxima profundidade de descarga que ela consegue ter, assumindo a utilização de uma bateria na faixa de 60%  $(190,9/0,6 = 318,3 Ah)$ . Necessita-se de duas baterias de aproximadamente 160 Ah ligadas em paralelo, FIG. (4.46).

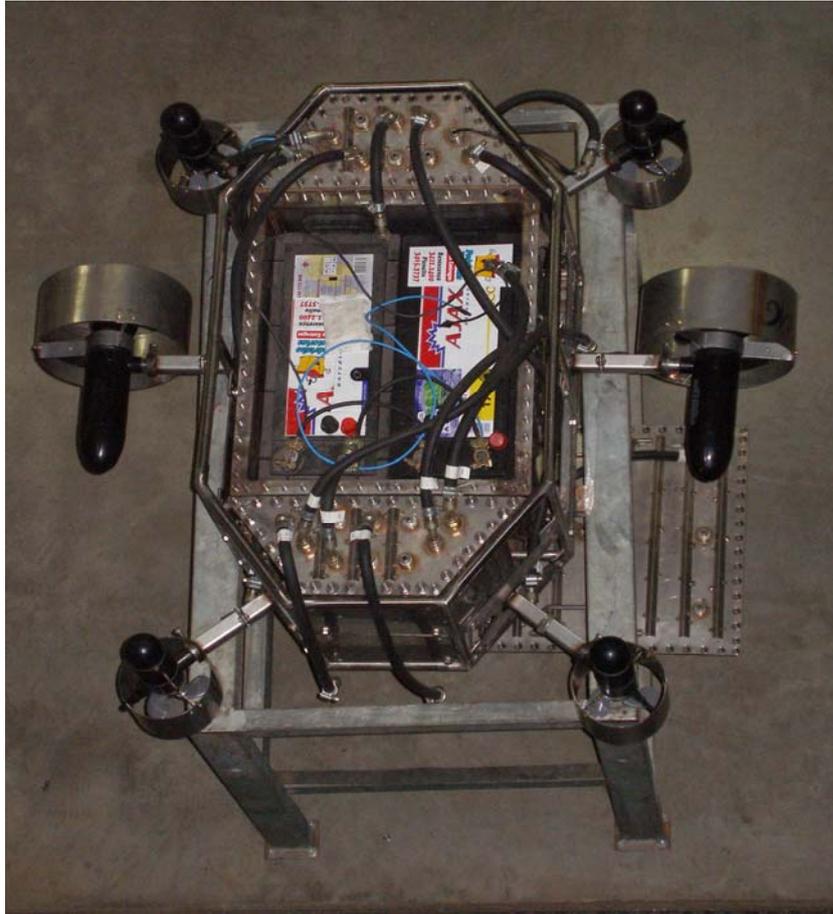


FIGURA 4.46 - Submersível VSI-02 com as duas baterias embarcadas.

FONTE – Própria.

No VSI-02, para testes iniciais foram utilizadas duas baterias de chumbo-ácido, lacradas e de 175 Ah.

## 5. COMISSIONAMENTO E TESTES DO VSI-02

O comissionamento e os testes realizados com os subsistemas componentes do VSI-02, desenvolvido no laboratório do CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG são apresentados neste capítulo através de gráficos, tabelas e figuras. Os ensaios seguiram as metodologias apresentadas no capítulo três. As análises destes resultados serão apresentadas no capítulo seis deste trabalho.

### 5.1. Comissionamento e testes do VSI-02

#### 5.1.1. Comissionamento e testes dos vasos de pressão

Os vasos de pressão que constituem o corpo principal do VSI-02 foram submetidos a ensaios hidrostáticos repetitivos, que tinham como finalidade a verificação de sua estanqueidade, resistência e capacidade de retenção de carga após longo período de submissão a uma determinada pressão, FIG. (5.1).



FIGURA 5.1 – Teste hidrostático realizado nos vasos de pressão do VSI-02

FONTE: Própria

O ensaio utilizou uma bomba manual responsável pela aplicação da pressão aos vasos testados, um manômetro capaz de apresentar a medição da pressão aplicada e um cronômetro utilizado para a verificação do tempo de ensaio, FIG. (5.2).

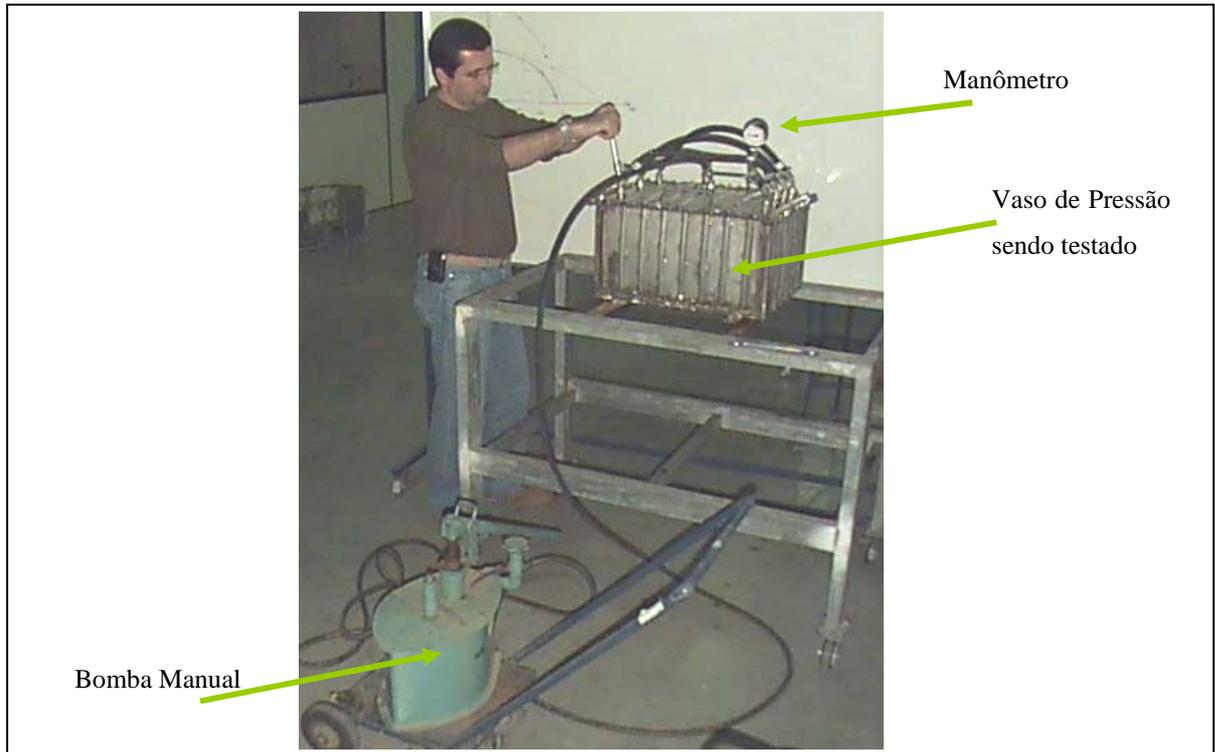


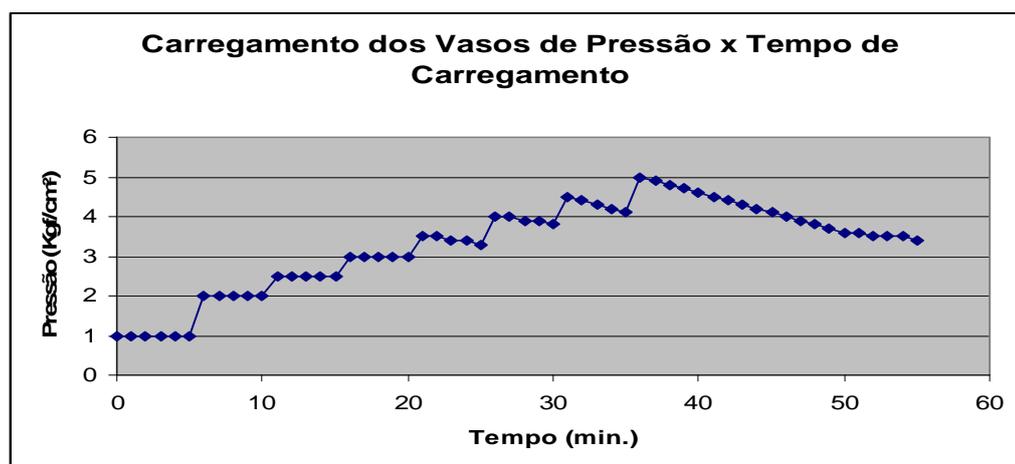
FIGURA 5.2 – Sistema utilizado no teste hidrostático dos vasos de pressão.

FONTE: Própria

Os GRÁFICOS (5.1 a 5.3) apresentam os dados coletados da primeira à última série de ensaios realizados para a verificação dos vasos de pressão do VSI-02.

GRÁFICO 5.1

Curva do ensaio dos vasos de pressão submetidos a diversos carregamentos em intervalos de tempo variado (primeira série de ensaios).

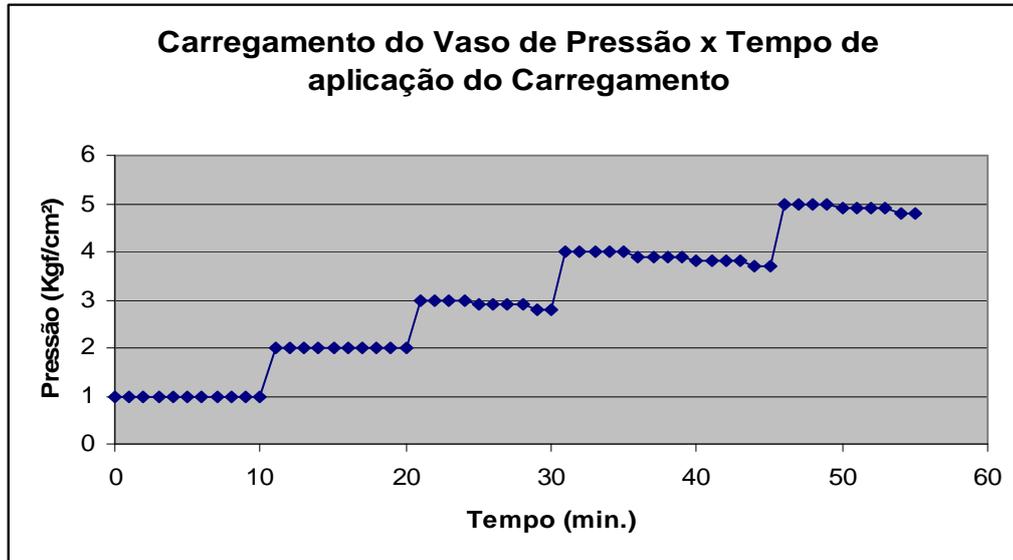


FONTE – Própria.

Após cada ensaio foram realizados ajustes nos vasos de pressão prevendo a correção dos vazamentos encontrados.

GRÁFICO 5.2

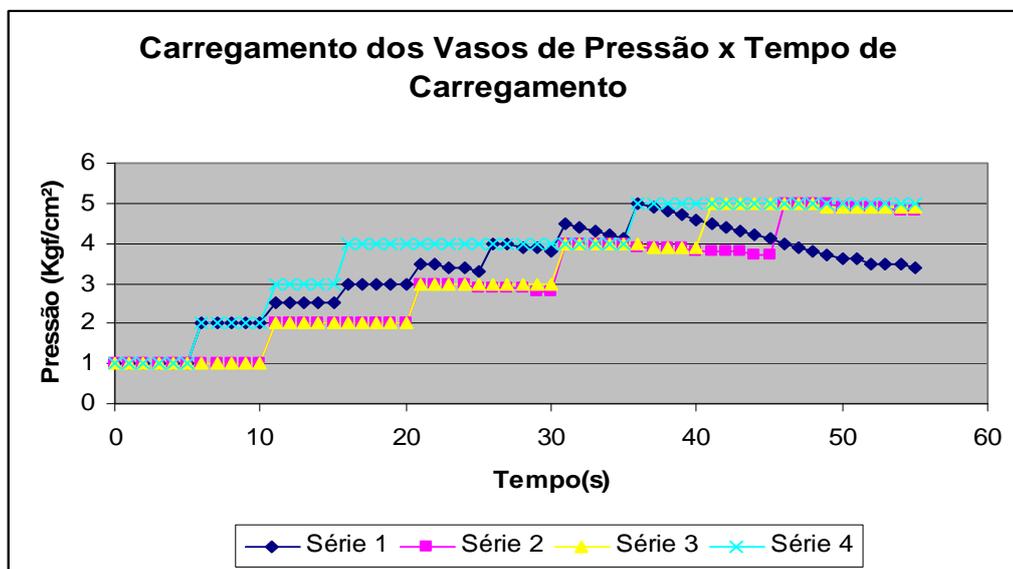
Curva do ensaio dos vasos de pressão submetidos a diversos carregamentos em intervalos de tempo variado (segunda série de ensaios).



FONTE: Própria

GRÁFICO 5.3

Curva do ensaio dos vasos de pressão submetidos a diversos carregamentos em intervalos de tempo variado (todas as séries de ensaios).



FONTE: Própria

5.1.2. Testes do subsistema de emersão e submersão (Buoyancy)

Na concepção do veículo submersível de inspeção, VSI-02, adotou-se como princípio deste subsistema uma flutuação positiva, para que em qualquer situação de emergência o submersível retorne à superfície.

Os ensaios realizados no VSI-02 e apresentados no GRÁFICO (5.4) apresentam o tempo médio de emersão e submersão para uma profundidade limitada a dois metros, limitação dada por razões de infra-estrutura do laboratório, FIG. (5.3).



FIGURA 5.3 – Foto do tanque construído para testes do VSI-02

FONTE: Própria

Para os ensaios de emersão, submersão e vetorização de empuxo foi elaborada uma lista de itens a serem verificados. Esta verificação se faz necessária para realização de um ensaio com segurança: visto o risco de vazamento proveniente de mau condicionamento e fechamento dos subsistemas. A TAB. (5.1) apresenta estes itens a serem verificados e os dados mínimos necessários para liberação do ensaio.

TABELA 5.1

Lista de verificação pré-ensaio do VSI-02

Item	Análise	Procedimento de Verificação	Resultado para Ensaio Liberado	Resultado para Ensaio Não Liberado	Procedimento de Correção
<b>Junta Hidráulica dos Vasos de Pressão</b>	Desgaste e rasgamento	Visual e injeção de ar comprimido	Sem desgaste, inteiriça e sem vazamento	Com desgaste e/ou rasgada em alguma extremidade	Troca da Junta Hidráulica
<b>Parafusos</b>	Perda de Resistência por Fadiga (estresse) e folga	Visual, torquímetro, injeção de ar comprimido	Resistência Normal, sem folga e sem vazamento	Parafuso com folga ou fadigado	Aperto do Parafuso ou troca do Parafuso
<b>Mangueiras de Alta Pressão</b>	Rachadura, perda de resistência e má conexão	Visual e injeção de ar comprimido	Sem rachadura, resistência normal, conexão normal e sem vazamento	Com rachadura, sem resistência ou má conexão	Troca da mangueira ou aperto das braçadeiras de conexão
<b>Conexão dos Propulsores</b>	Rachadura, folga e má conexão	Visual, mecânica e injeção de ar comprimido	Sem rachaduras e folgas e sem vazamento	Com rachaduras e folgas e com vazamento	Ajuste das conexões e/ou aperto
<b>Junta dos Propulsores</b>	Desgastada, rasgada ou deslocada	Visual e injeção de ar comprimido	Sem desgaste ou rasgo, sem deslocamento e sem vazamento	Com desgaste ou rasgo, com deslocamento e vazamento	Troca da junta ou aperto
<b>Fixação dos Flutuadores</b>	Feche Quebrado, Fita rompida ou desgastada e folga	Visual e mecânica	Feche e fita normais e sem folga	Feche e fita danificados e/ou com folga	Troca do feche, da fita ou aperto
<b>Vedação dos Vasos de Pressão</b>	Vedação dos flanges	Visual e injeção de ar comprimido	Sem vazamento	Com vazamento	Aperto dos parafusos do flange e análise dos pontos vazamento
<b>Câmera de Vídeo</b>	Vedação dos Flanges e Mangueira	Visual, mecânica e injeção de ar comprimido	Sem vazamento	Com vazamento	Aperto dos parafusos do flange e análise dos pontos vazamento
<b>Conexão do Cabo Umbilical</b>	Vedação e Comunicação	Visual, elétrica e injeção de ar comprimido	Sem vazamento e com transmissão normal	Com vazamento e sem transmissão	Troca do conector do cabo ou toca do cabo
<b>Conectores de Alta Pressão</b>	Folga ou Vazamento	Visual, mecânica e injeção de ar comprimido	Sem folga e sem vazamento	Com folga e/ou com vazamento	Troca do conector e/ou aperto do conector

FONTE: Própria

Os testes de emersão e submersão do VSI-02 foram realizados com várias configurações de posicionamento dos flutuadores até atingir a de maior estabilidade, garantindo submersão, emersão e momento de rolamento nulo. Nos ensaios realizados, o tempo médio de submersão e emersão foi de 5 s (cinco segundos) para uma profundidade de 1,6 m (um metro de sessenta centímetros), FIG.(5.4).

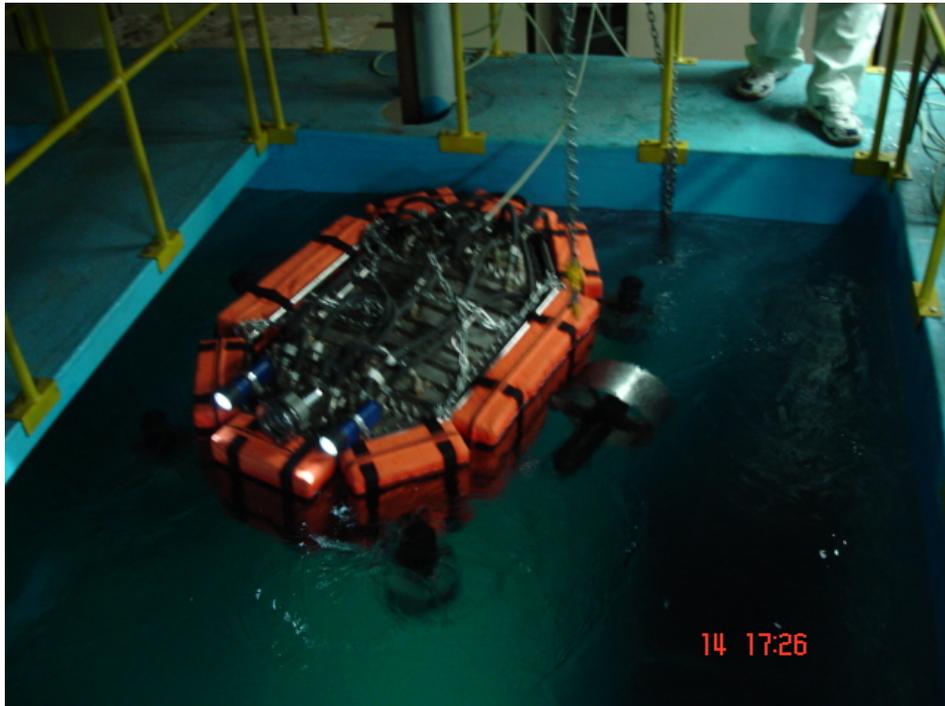


FIGURA 5.4 – Foto dos testes de emersão e submersão do VSI-02

FONTE: Própria

### 5.1.3. Testes do Subsistema de Visão

O subsistema de visão é composto por uma câmera CMOS colorida e hermeticamente lacrada interligada via cabo a um monitor de LCD localizado junto à central de controle. O envio das imagens capturadas pela câmera ocorre de forma analógica, visando aumentar a capacidade de transmissão, a longa distâncias, com perda mínima do sinal. O sistema foi testado isoladamente e integrado. Os testes realizados foram qualitativos, nos quais se procurou verificar a qualidade da imagem transmitida e recebida em duas situações: motores desligados e motores ligados. A FIG.(5.5) apresenta a qualidade da imagem recebida no monitor LCD com os motores desligados e a FIG. (5.6) apresenta a imagem obtida com os motores ligados. As imagens foram geradas após uma transmissão de 25 metros do ponto de captura.

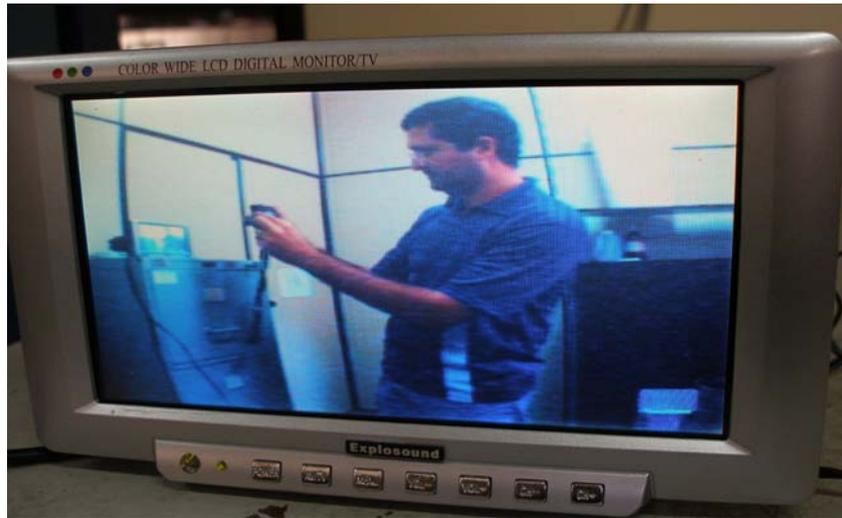


FIGURA 5.5 – Imagem recebida no monitor LCD com os motores desligados.

FONTE – Própria



FIGURA 5.6 – Imagem recebida no monitor LCD com os motores ligados.

FONTE – Própria

A impressão de que a imagem gerada com os motores desligados está com qualidade inferior à gerada com os motores ligados ocorre devido ao fato das mesmas terem sido capturadas por um outro equipamento fotográfico e não diretamente das imagens da câmera do ROV. Na primeira foto provavelmente as frequências de captura e apresentação do monitor LCD e da câmera fotográfica eram diferentes o que provoca uma distorção da imagem no ato da captura e na segunda foto estas frequências podem ter se igualado devido o acionamento dos motores gerando uma fotografia mais limpa e aparentemente de melhor qualidade.

#### 5.1.4. Subsistema de Propulsão e Vetorização de Empuxo

O VSI-02 utiliza propulsores elétricos da Sevylor e da Phantom adaptados para a utilização na plataforma mecânica do ROV. Os testes realizados foram de verificação da potência consumida e da força de propulsão.

O primeiro ensaio dos propulsores foi realizado em uma bancada instrumentada contendo um dinamômetro, um voltímetro e um amperímetro, FIG. (5.7), e seguiu o seguinte procedimento: com o propulsor ligado diretamente na bateria, foram realizadas cinco medições de força para cinco tensões aplicadas, TAB. (5.2). O GRÁFICO (5.4) apresenta a curva de ensaio dos propulsores.

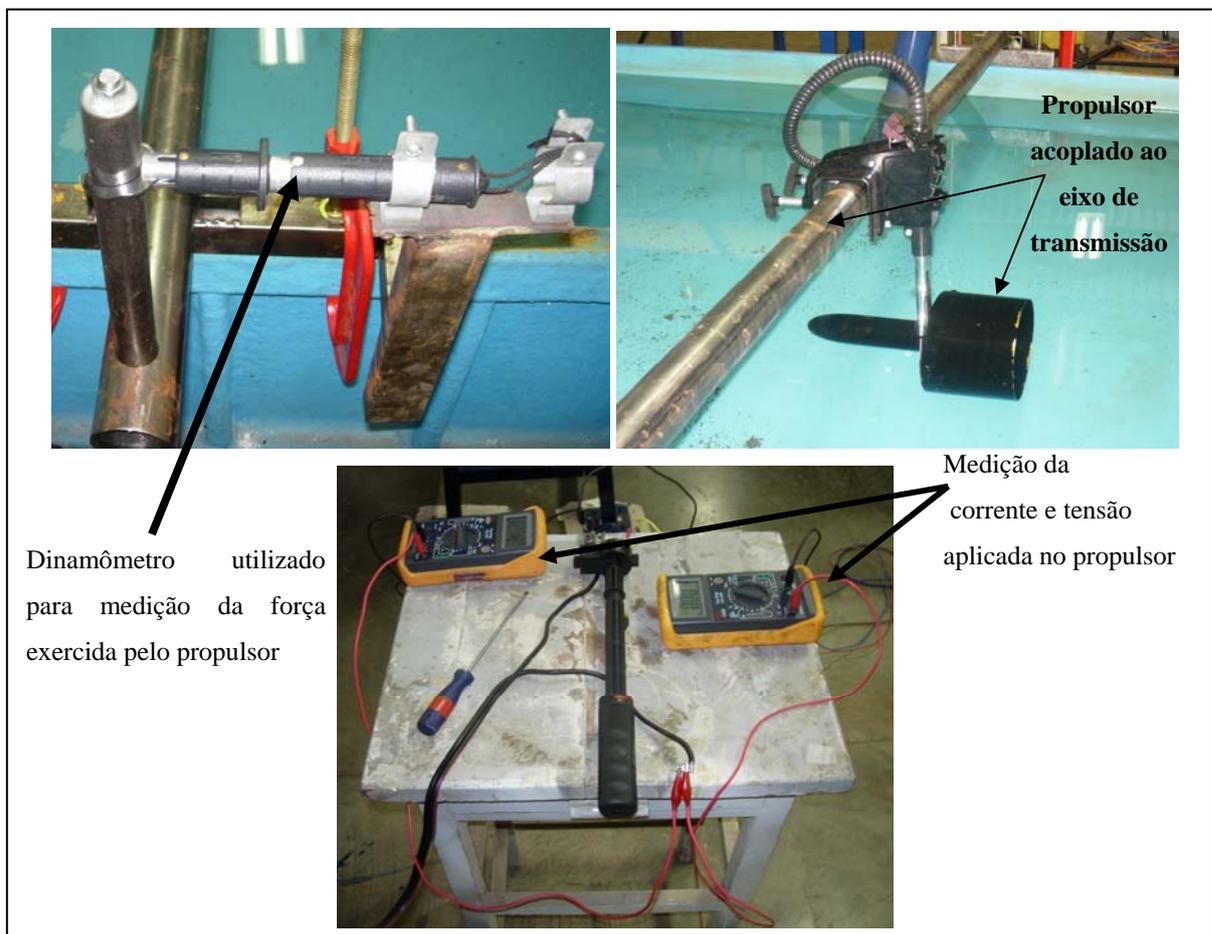


FIGURA 5.7 – Fotos da bancada de ensaio dos propulsores do VSI-02.

FONTE – Própria.

Utilizando um dispositivo mecânico para variar as velocidades do propulsor e cinco níveis diferentes, o ensaio foi realizado a partir da medição das tensões e correntes aplicadas ao propulsor e suas respectivas medidas de força aplicadas ao dinamômetro. O ensaio

contemplou medições crescentes e decrescentes destes valores. O cálculo da força no propulsor é fornecido pela EQUAÇÃO (3.15) apresentada no capítulo 03.

TABELA 5.2

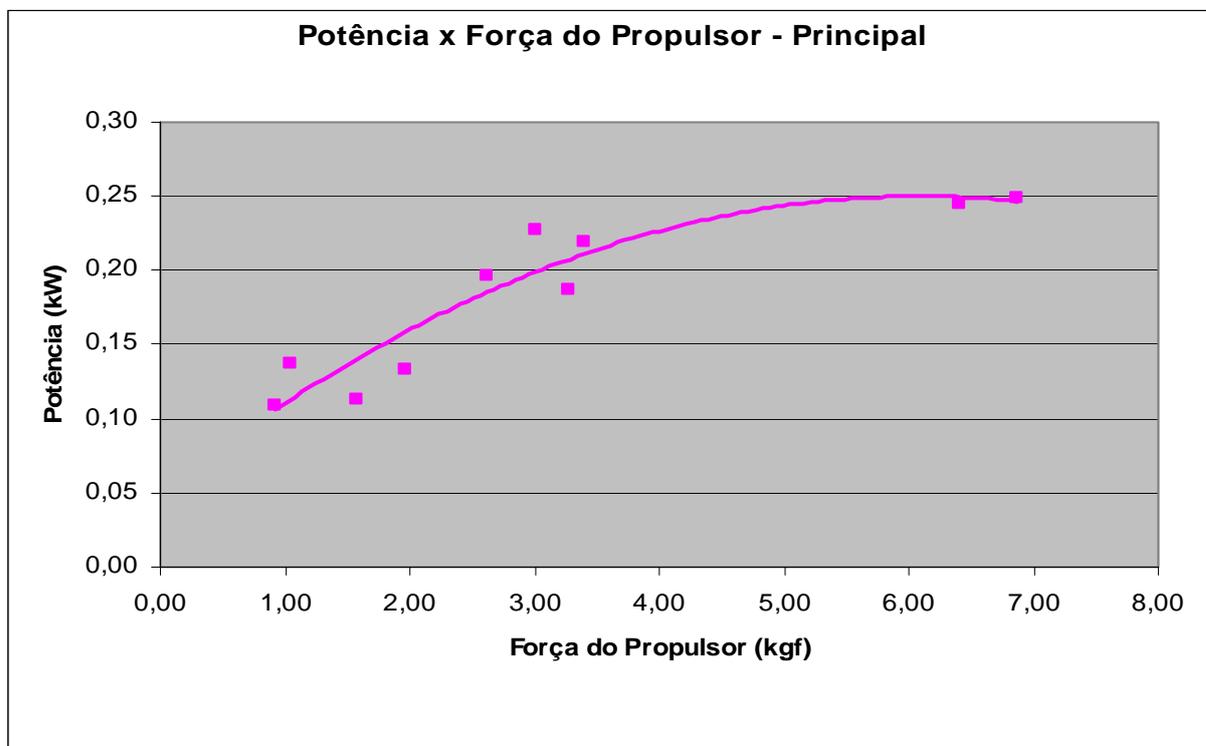
Dados do primeiro ensaio dos propulsores

Velocidade	Medida	Tensão (V)	Força Fd (kgf)	Corrente (A)	Força Fp (kgf)	Potência kW
	<b>Subindo</b>					
1	1	12,27	0,7	8,9	0,92	0,11
2	2	12,35	0,8	11,1	1,05	0,14
3	3	12,11	2	16,2	2,62	0,20
4	4	12	2,3	19	3,01	0,23
5	5	11,8	4,9	20,8	6,41	0,25
	<b>Descendo</b>					
5	1	11,67	5,3	21,3	6,87	0,25
4	2	11,94	2,6	18,4	3,40	0,22
3	3	12,03	2,5	15,6	3,27	0,19
2	4	12,16	1,5	11,0	1,96	0,13
1	5	12,24	1,2	9,2	1,57	0,11

FONTE – Própria.

GRÁFICO 5.4

Curva do primeiro ensaio dos propulsores



FONTE – Própria.

Com o objetivo de validar os dados deste primeiro ensaio realizado, foi montada uma segunda bancada de testes instrumentada, utilizando: um suporte para célula de carga, uma célula de carga de 50 kgf, um osciloscópio digital e dois multímetros digitais para medição dos níveis

de força, tensão e corrente, FIG.(5.8). A segunda bancada de teste foi montada no reservatório de teste do submersível. A calibração da célula de carga foi realizada, utilizando como referência uma balança digital com erro da ordem de 0,5 gramas. Esta calibração é apresentada no anexo C.

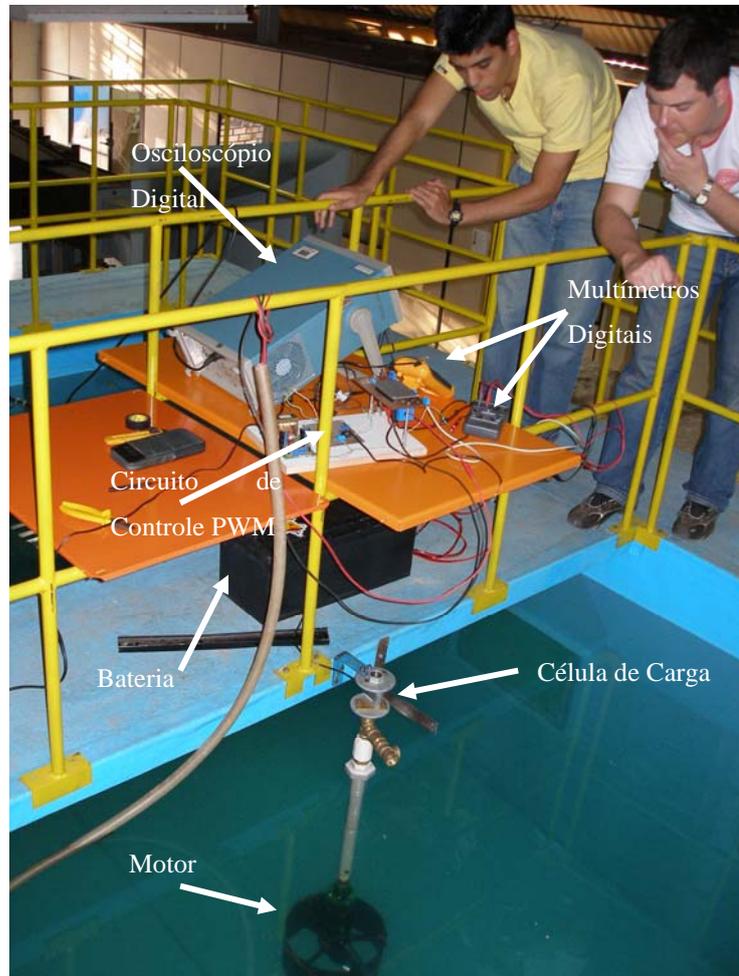


FIGURA 5.8 – Foto da segunda bancada de ensaio dos propulsores do VSI-02

FONTE – Própria

O ensaio realizado nesta nova bancada consistiu no aumento gradativo da tensão aplicada ao propulsor (de 0,5 V em 0,5 V) e registro dos respectivos valores de força informados pela célula de carga através da tensão em seus terminais e corrente do motor. Os dados coletados neste segundo ensaio realizado com os propulsores são apresentados na TAB.(5.3).

O GRÁFICO (5.5) apresenta a relação da tensão de armadura do motor versus a força exercida pela propulsão e o GRÁFICO (5.6) representa a relação existente entre a tensão e a corrente do propulsor. O valor na tabela se limita a no máximo 8V devido á montagem realizada, sendo que o PWM consome aproximadamente 3V dos 12V oferecidos pelo sistema de potência.

TABELA 5.3

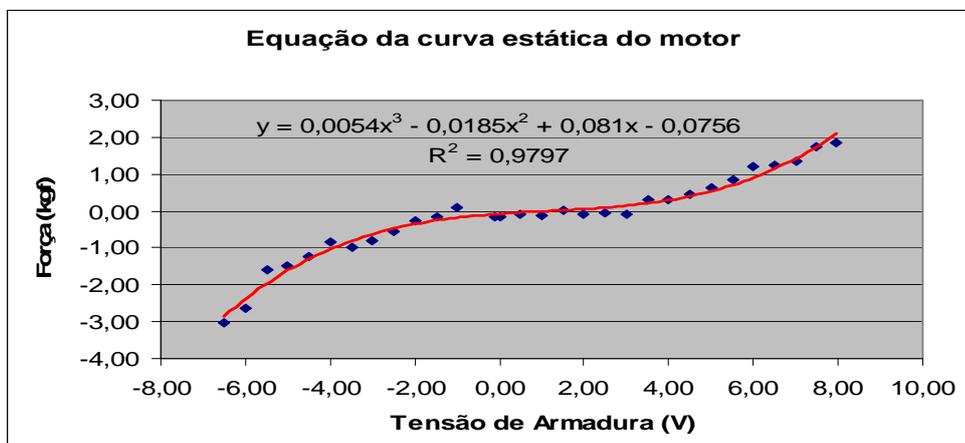
Dados do segundo ensaio dos propulsores

Equação da curva estática Tensão de Armadura X Força				
Tensão Célula (V)	Tensão Armadura (V)	Força Célula (kgf)	Corrente(A)	Potência (W)
1,4	-0,12	-0,15	-0,88	0,11
1,45	-1,00	0,09	-2,42	2,42
1,4	-1,49	-0,15	-2,73	4,06
1,38	-2,00	-0,25	-3,33	6,67
1,32	-2,50	-0,55	-3,94	9,85
1,27	-3,00	-0,80	-4,67	14,00
1,23	-3,50	-1,00	-5,45	19,09
1,26	-4,00	-0,85	-6,42	25,70
1,18	-4,50	-1,25	-7,55	33,95
1,13	-5,00	-1,49	-8,76	43,79
1,11	-5,50	-1,59	-9,61	52,83
0,9	-6,00	-2,63	-10,67	64,00
0,82	-6,50	-3,03	-11,91	77,41
1,4	0,00	-0,15	0,06	0,00
1,414	0,50	-0,08	2,33	1,17
1,406	1,00	-0,12	2,07	2,07
1,434	1,50	0,01	2,54	3,81
1,416	2,00	-0,07	3,17	6,35
1,422	2,50	-0,05	3,70	9,26
1,416	3,00	-0,07	4,33	12,99
1,49	3,50	0,29	5,04	17,65
1,49	4,00	0,29	5,84	23,37
1,52	4,50	0,44	6,62	29,80
1,559	5,00	0,63	7,55	37,73
1,6	5,50	0,84	8,48	46,65
1,675	6,00	1,21	9,58	57,51
1,678	6,50	1,22	10,66	69,31
1,706	7,00	1,36	11,63	81,41
1,78	7,50	1,73	12,77	95,80
1,808	7,96	1,87	14,02	111,61

FONTE: Própria

GRÁFICO 5.5

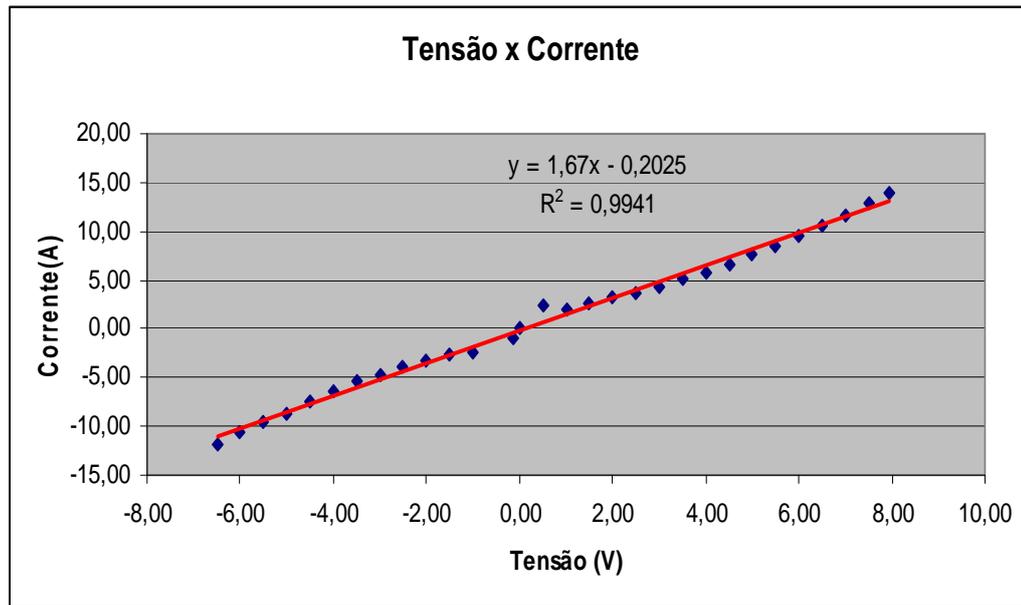
Curva do segundo ensaio dos propulsores



FONTE – Própria

GRÁFICO 5.6

Relação entre a tensão e a corrente do propulsor



FONTE – Própria

Como o sistema de propulsão do VSI-02 representa também o sistema de vetorização de empuxo do ROV, FIG. (5.9) a TAB.(5.4) apresenta as relações de força e tempo para as manobras de vante, guinada a direita e guinada a esquerda obtidas no ensaio deste subsistema.

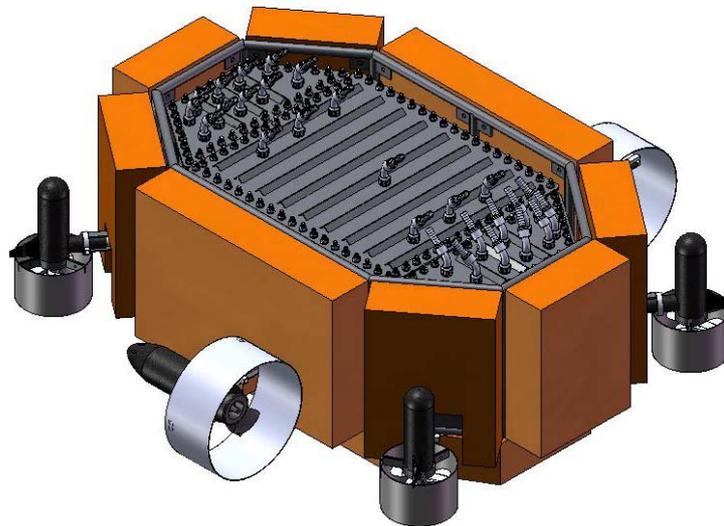


FIGURA 5.9 – Configuração utilizada para o sistema de propulsão e vetorização de empuxo do VSI-02

FONTE – Própria

Os ensaios de vante e guinada à esquerda foram realizado com o VSI-02 submerso a uma profundidade de 1,5 metros e o de guinada a direita com o VSI-02 na superfície.

TABELA 5.4

Dados obtidos no ensaio de vetorização de empuxo dos propulsores

Direção	Distância Percorrida (m)	Tempo(s)	Velocidade (m/s)	Tensão (V)	Força em cada propulsor (kgf)
Vante	1,10	10	0,11	6,5 (Dir. e Esq.)	1,2 (Dir e Esq)
Guinada à Direita	0,80 (giro)	14	0,06	-6,5 (Dir.) e +6,5 (Esq.)	-2,9 (Dir) e +1,2 (Esq)
Guinada à Esquerda	0,60 (giro)	5	0,12	+1,0 (Dir.) e -9,0(Esq.)	+0,2 (Dir) e -3,1 (Esq)

FONTE – Própria

Para os ensaios de vetorização de empuxo adotou-se como ponto de referência o ponto frontal do VSI-02 e na sua linha de simetria longitudinal. As distâncias percorridas foram medidas pelo deslocamento deste ponto ao longo do ensaio. As FIGURAS (5.10 a 5.12) mostram os pontos: inicial e final em cada ensaio e a trajetória realizada pelo VSI-02.

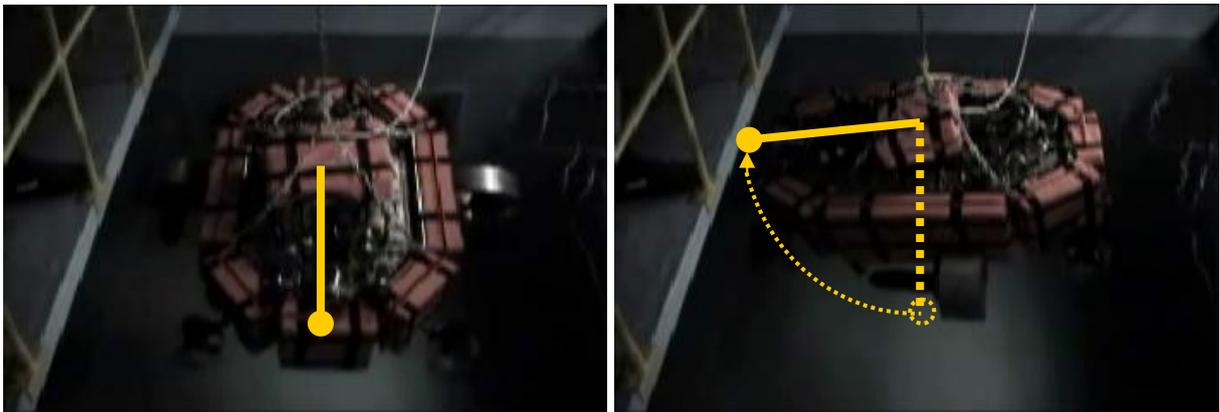


FIGURA 5.10 – Verificação da distância percorrida em função do tempo de um giro à direita do VSI-02.

FONTE – Própria

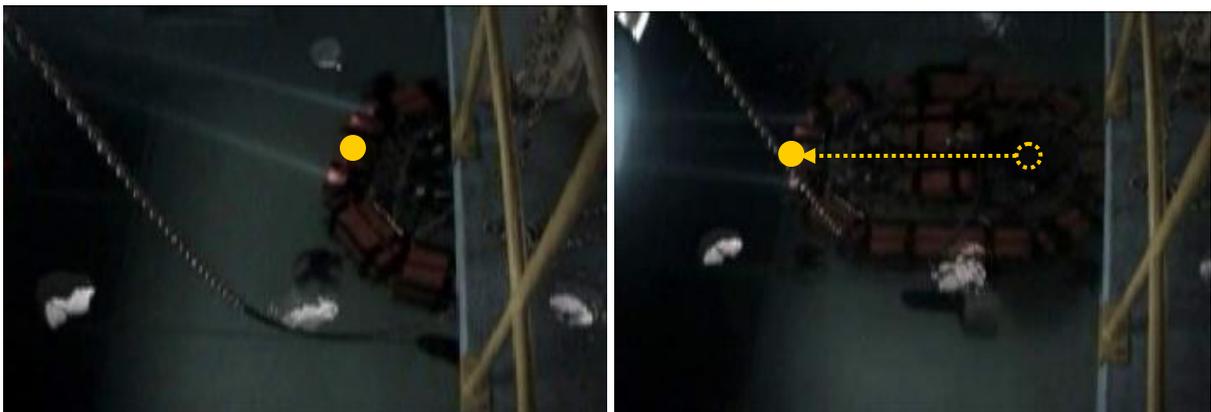


FIGURA 5.11 – Verificação da distância percorrida em função do tempo de movimento avante do VSI-02.

FONTE – Própria



FIGURA 5.12 – Verificação da distância percorrida em função do tempo de um giro à esquerda do VSI-02.

FONTE – Própria

As TABELAS (5.5) e (5.6) apresentam os dados obtidos na análise estrutural unifilar (usualmente utilizada em dimensionamento estrutural e proposta no capítulo de metodologia) para a verificação do comportamento do ROV submetido às diversas possibilidades de combinação de empuxo geradas pelos seus propulsores.

TABELA 5.5

Dados obtidos na simulação do sistema de vetorização de empuxo via diagrama unifilar do VSI-02 para o caso de Carregamento 01

<b>Força dos Propulsores No Carregamento 01</b>	<b>Combinação 1 Força (kgf)</b>	<b>Combinação 2 Força (kgf)</b>	<b>Combinação 3 Força (kgf)</b>	<b>Combinação 4 Força (kgf)</b>
<b>H1</b>	10	10	-5	-10
<b>H2</b>	10	-5	10	-10
<b>V1</b>	-5	-5	-5	-5
<b>V2</b>	-5	-5	-5	-5
<b>V3</b>	-5	-5	-5	-5
<b>V4</b>	-5	-5	-5	-5
<b>Flutuação do ROV</b>	11	11	11	11
<b>Resultante de Forças Verticais (kgf)</b>	-9	-9	-9	-9
<b>Resultante de Forças Horizontais (kgf)</b>	20	5	5	-20
<b>Resultante de Momento no C.G. (kgf . m)</b>	0	802,5	-802,5	0

FONTE – Própria

TABELA 5.6

Dados obtidos na simulação do sistema de vetorização de empuxo via diagrama unifilar do VSI-02 para o caso de Carregamento 02

<b>Força dos Propulsores No Carregamento 02</b>	<b>Combinação 1 Força (kgf)</b>	<b>Combinação 2 Força (kgf)</b>	<b>Combinação 3 Força (kgf)</b>	<b>Combinação 4 Força (kgf)</b>
<b>H1</b>	-10	-10	-10	-10
<b>H2</b>	-10	-10	-10	-10
<b>V1</b>	5	10	5	5
<b>V2</b>	5	-5	-10	5
<b>V3</b>	5	10	5	-10
<b>V4</b>	5	-5	-10	-10
<b>Flutuadores do ROV</b>	11	11	11	11
<b>Resultante de Forças Verticais (kgf)</b>	-9	-9	-9	-9
<b>Resultante de Forças Horizontais (kgf)</b>	17,3	8,6	-8,6	-8,6
<b>Resultante de Momento no C.G. (kgf . m)</b>	0	-535	+535	-845

FONTE – Própria

Os carregamentos simulados neste capítulo representam combinações de cargas aplicadas a cada propulsor do VSI-02 e as respectivas resultantes de esforços provocados no centro de gravidade do ROV. Estes casos de carregamentos forma apresentados no capítulo 03.

As resultantes encontradas nestas simulações representam as reações do ROV à aplicação dos esforços de cada propulsor e auxiliam na análise deslocamento do mesmo. Para encontrar os valores acima foi utilizado um programa de análise estrutural, que permite a entrada de vários casos de carregamento e condições de contorno do diagrama unifilar proposto para o VSI-02.

#### 5.1.5. Subsistema do Cabo Umbilical

O sistema do cabo umbilical é constituído por um cabo manga que é responsável pela emissão e recepção de dados de controle e imagens entre o ROV e a estação de controle.

A TABELA (5.7) apresenta a configuração do cabo de transmissão e controle do VSI-02.

Os resultados dos testes de comunicação, realizados no sistema de ligação do cabo umbilical ao VSI-02, é apresentado na TAB. (5.8).

TABELA 5.7

Configuração do cabo e dos sistemas de transmissão e controle do VSI-02

<b>Características do Cabo Umbilical</b>	<b>Valores</b>
Diâmetro	5 mm
Número de Canais	18 (dezoito)
Tipo	Manga – trançado com malha
Peso	150 gramas / metro

FONTE: Própria.

TABELA 5.8

Teste de Comunicação do cabo e dos sistemas de transmissão e controle do VSI-02

<b>Características Testadas no Cabo Umbilical</b>	<b>Resultados</b>
Continuidade das Vias	Sem interrupções
Tempo de Resposta do Controle	Rápida
Captura e envio do sinal de vídeo	Sem interrupções
Conectividade dos conectores / Interferências	Ótima / Baixa

FONTE: Própria.

#### 5.1.6. Subsistema de Controle

O subsistema de controle foi testado em diversas situações: isoladamente durante a sua construção, integrado a um propulsor, integrado aos dois propulsores principais e integrado aos propulsores principais e secundários. Os testes foram realizados utilizando o monitoramento dos valores gerados pelo subsistema através de um osciloscópio e uma fonte estabilizada. As FIG. (5.13 a 5.15) apresentam os dados gerados pelo osciloscópio nos momentos de geração dos pulsos do PWM acoplado ao subsistema.

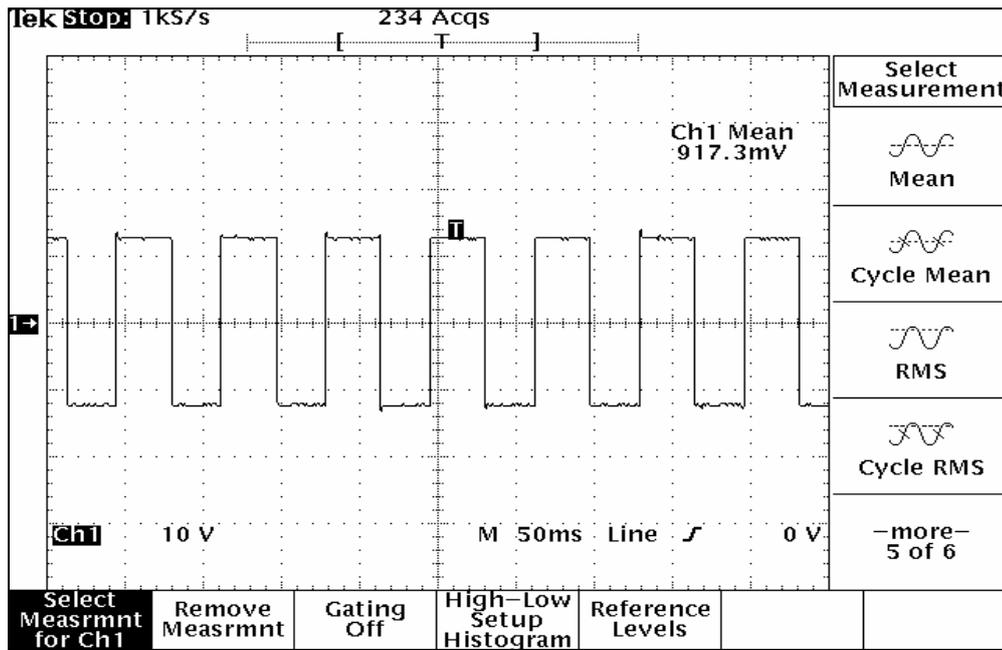


FIGURA 5.13 – Sinal gerado pelo PWM para rotação nula dos propulsores.

FONTE – CPH/UFMG

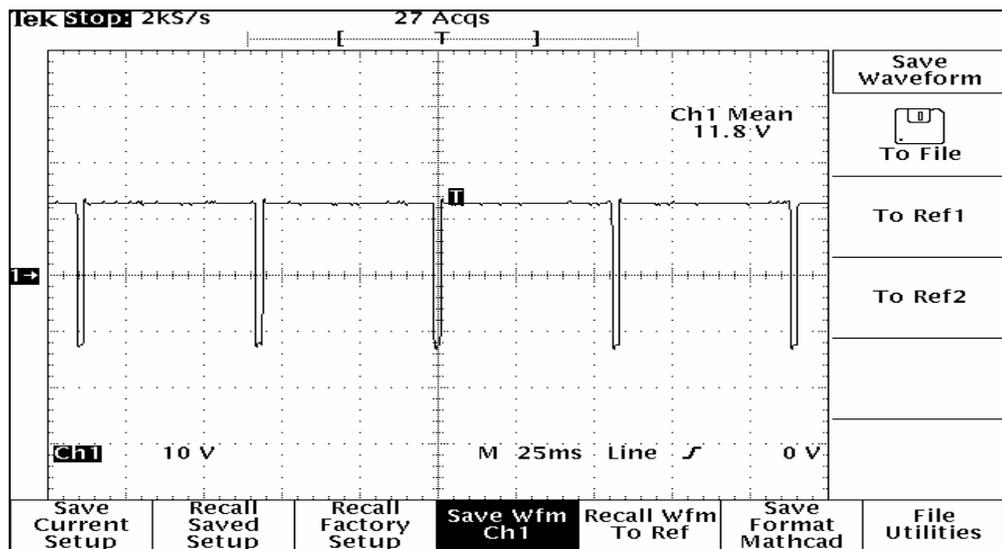


FIGURA 5.14 – Sinal gerado pelo PWM para a rotação do propulsor em velocidade máxima em sentido horário

FONTE – CPH/UFMG

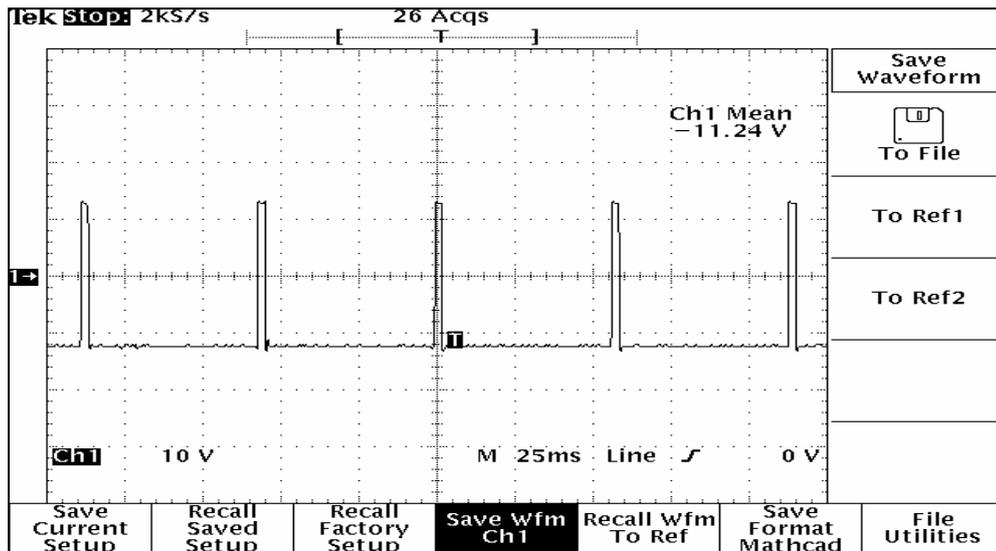


FIGURA 5.15 – Sinal gerado pelo PWM para a rotação do propulsor em velocidade máxima em sentido anti- horário

FONTE – CPH/UFMG

5.1.7. Subsistema de Potência

O ensaio realizado no subsistema de potência é apresentado no TAB. (5.9) onde são listados: o consumo de cada subsistema e a capacidade máxima de potência despendida pelo ROV, na situação de carga máxima despendida.

TABELA 5.9

Potência consumida por cada Subsistema do VSI-02

Potência Consumida pelos Subsistemas do VSI-02	
Subsistemas	Potência (W)
Propulsão Horizontal	460
Propulsão Vertical	480
PWM	18
Circuitos Complementares	2
Fonte DC/DC	1
Câmera CMSO	1,5
Cabo Umbilical	4
Caixa de Controle	75
<b>Total</b>	<b>1041,5</b>

FONTE – Própria

5.2. **Relação de custos de desenvolvimento do VSI-01 e VSI-02**

As TABELAS (5.10) e (5.11) apresentam um consolidado dos custos de desenvolvimento do VSI-01 e do VSI-02. Estes dados foram levantados ao longo do desenvolvimento dos protótipos e representam valores aproximados dos custos reais.

TABELA 5.10  
Composição de custos do VSI-01

<b>Custo de Desenvolvimento do VSI-01</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Custo</b>	<b>Total</b>
<b>Mecânicos</b>	<b>R\$ 450,00</b>	<b>R\$ 2.120,00</b>
Tubulação Principal	R\$ 50,00	
Tubulação de Lastro	R\$ 120,00	
Tubos do Sistema de Propulsão	R\$ 100,00	
Peças avulsas	R\$ 100,00	
Flutuador	R\$ 30,00	
Suporte do motor	R\$ 50,00	
<b>Elétricos</b>	<b>R\$ 1.670,00</b>	
Bomba principal	R\$ 80,00	
Bombas auxiliares	R\$ 40,00	
Circuitos Complementares	R\$ 200,00	
Fonte DC/DC	R\$ 400,00	
Web Câmera	R\$ 300,00	
Cabo Umbilical	R\$ 300,00	
Caixa de Controle	R\$ 200,00	
Válvulas Solenóides	R\$ 150,00	

FONTE – CPH / UFMG

TABELA 5.11  
Composição de custos do VSI-02

<b>Custo de Desenvolvimento do VSI-02</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Custo</b>	<b>Total</b>
<b>Mecânicos</b>	<b>R\$ 11.050,00</b>	<b>R\$ 16.358,00</b>
Gaiola	R\$ 800,00	
Caixa Bateria	R\$ 2.000,00	
Caixa da CPU	R\$ 800,00	
Caixa de Controle	R\$ 800,00	
Caixa de Visão	R\$ 200,00	
Trenó	R\$ 1.000,00	
Baterias	R\$ 400,00	
Flutuador	R\$ 1.500,00	
Conectores de Alta Pressão	R\$ 350,00	
Carenagem dos motores	R\$ 2.000,00	
Suporte do motor	R\$ 1.200,00	
<b>Elétricos</b>	<b>R\$ 5.308,00</b>	
Motor Horizontal	R\$ 1.200,00	
Motor Vertical	R\$ 968,00	
PWM	R\$ 1.980,00	
Circuitos Complementares	R\$ 140,00	
Fonte DC/DC	R\$ 600,00	
Câmera CMSO	R\$ 110,00	
Cabo Umbilical	R\$ 160,00	
Caixa de Controle	R\$ 150,00	

FONTE – Própria

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados compreende uma explicação mais detalhada e crítica dos resultados de ensaio obtidos e apresentados no capítulo anterior. Para acompanhamento da análise destes resultados é importante o retorno ao capítulo cinco onde se encontra a tabulação dos resultados em gráficos, tabelas e figuras. As análises se detiveram aos ensaios realizados.

### 6.1 Análise dos ensaios realizados no VSI-02

#### 6.1.1 Vasos de Pressão

O GRÁFICO (5.3) apresenta uma relação dos diversos ensaios realizados sobre os vasos de pressão do VSI-02. Percebe-se claramente que os vasos de pressão foram submetidos a ensaios repetitivos após diversos ajustes estruturais e que estes ajustes agregaram maior estanqueidade e resistência.

A configuração dos vasos de pressão, construídos para este primeiro protótipo do VSI-02, deverá sofrer modificação em sua geometria com o objetivo de permitir sua utilização em maiores profundidades. O sistema de fechamento dos vasos de pressão, hoje realizado por flanges parafusados, deverá ser melhorado a fim de facilitar o acesso aos sistemas embarcados e não acumular desgastes nos processos de abertura e fechamento destes vasos.

#### 6.1.2 Subsistema de Emersão e Submersão do VSI-02

Os ensaios de emersão e submersão realizados no VSI-02 demonstraram que a proposta de flutuação positiva é viável e passível de utilização, pois os tempos de emersão e submersão foram adequados ao modelo proposto. No ensaio realizado, percebe-se que o tempo de emersão se aproximou muito do tempo de submersão e é da ordem de quatro segundos por metro ou em termos de velocidade 0,25 m/s, o que representa uma boa taxa para este subsistema se comparado à taxa encontrada para o VSI-01 (primeiro protótipo desenvolvido no CPH) que foi de 80 s por metro ou 0,0125m/s.

### 6.1.3 Subsistema de Visão

As imagens geradas pelo subsistema de visão são de baixa resolução e portanto, não aplicável ao processo de vistoria que se pretende alcançar. É necessário que seja realizado um aprimoramento deste subsistema visando à melhoria da captura destas imagens.

### 6.1.4 Subsistema de Propulsão e Vetorização de Empuxo

O protótipo construído conta com três graus de liberdade, o que limita seu raio de atuação. A utilização de uma configuração mais adequada do posicionamento dos propulsores, bem como a incorporação de um controle individual de cada propulsor elevaria o número de graus de liberdade do submersível, permitindo e expandindo suas possibilidades de manobra.

Realizando uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelo M.I.T. (obtidos através *Hydraulic Propulsion Selection / Manual for Engineers - 2003*) e os dados obtidos no projeto do VSI-02 e apresentados nos GRÁFICOS (5.5) e (5.6), percebem-se algumas similaridades entre o funcionamento destes propulsores. Os dados apresentam uma relação polinomial quadrática entre a potência e a força exercida pelo propulsor, o que indica que a partir de um determinado valor de potência a variação na força do propulsor poderá não ser tão significativa se considerado o desgaste que podem vir a ocorrer. Nos dados tabulados nas TABELAS (5.2) e (5.3) o valor da corrente, que passa pelo propulsor elétrico, sobe drasticamente com o aumento da força dissipada por este propulsor, o que pode vir a ocasionar problemas de vida útil do sistema propulsor caso não monitorada corretamente.

O resultado das forças de propulsão encontrados nos ensaios equivalem a 45% dos valores informados pelos fabricantes ou em termos de força a aproximadamente 7 kgf contra 16kgf (fabricante). Apesar desta discrepância entre os valores da força real e informada, o sistema de propulsão obteve sucesso em sua função. Conforme TABELA (5.4), este sistema proporcionou uma velocidade média de 0,11 m/s ao ROV quando submetido à uma força equivalente de 2,4 kgf em seu conjunto propulsor.

### 6.1.5 Subsistema de Cabo Umbilical

A utilização de um cabo umbilical com diâmetro pequeno torna seu arrasto desprezível quando comparado com as forças geradas pelo sistema de propulsão.

A substituição do cabo tipo manga por uma tecnologia mais nova, como a fibra ótica ou sem fio, pode agregar melhores resultados no sistema de comunicação entre o operador e o ROV, além de reduzir ou eliminar o diâmetro do cabo umbilical e conseqüentemente sua interferência com o deslocamento do ROV.

#### 6.1.6 Subsistema de Controle

Inicialmente o subsistema de controle se mostrou muito sensível às ligações conjuntas dos propulsores, apresentando interferências razoavelmente significativas. Após análise destes problemas e implementação do circuito de segurança sugerido pelo fabricante do controle PWM, o sistema ficou mais estável e funcional. Foram utilizados também amplificadores operacionais e filtros capacitivos com a finalidade de reduzir o ruído do circuito de controle e agregar maior segurança ao sistema.

Para o acionamento dos propulsores horizontais foi utilizado um *joystick* convencional que após algum tempo apresentou problemas em seus potenciômetros. Para solucionar este problema foi proposta a utilização de um controlador mais robusto e capaz de suportar os inúmeros testes e utilização do ROV.

#### 6.1.7 Subsistema de Potência

Os acumuladores elétricos utilizados no VSI-02, constituído por duas baterias de chumbo-ácido lacradas de 175 Ah, pode apresentar um pequeno risco de explosão na operação do ROV. Este risco foi dimensionado e optou-se pela utilização deste sistema, que emite uma quantidade menor de gases explosivos que as demais com a mesma tecnologia. Sugere-se uma avaliação de outros acumuladores elétricos, que não aumentam o custo do veículo, mas que agreguem maior confiabilidade e autonomia ao ROV.

Analisando o consumo dos subsistemas componentes do VSI-02 em comparação com a carga fornecida pelo sistema de potência chega-se a uma autonomia de 2 a 4 horas respectivamente para operações que consomem carga máxima e operações com carga variável.

## 6.2 Análise comparativa entre os custos de desenvolvimento dos submersíveis VSI-01 e VSI-02

As TABELAS (5.10) e (5.11) apresentadas no capítulo 05 são uma consolidação dos custos iniciais de desenvolvimento do VSI-01 e do VSI-02, respectivamente com suas mão-de-obra incorporada. Analisando estes valores de composição dos veículos submersíveis desenvolvidos, percebe-se que o custo de desenvolvimento do VSI-02 foi de sete a oito vezes superior ao custo de desenvolvimento do VSI-01, isto se deve à alteração da geometria do ROV e aos materiais empregados. Entretanto, se tais custos forem comparados com os custos básicos de mercado encontra-se uma diferença considerável, como pode ser observado no GRA. (6.1.), que apresenta uma relação de equipamentos e seus custos médios em comparação com os desenvolvidos no CPH. É importante ressaltar que o projeto do VSI-02 não utiliza, ainda nenhum sensor específico e que o gráfico apresenta uma perspectiva de comparação entre sistemas equivalentes, FIG.(6.1. e 6.2.).



FIGURA 6.1. – ROV Peewee 300 da IBERCO.

FONTE - <http://www.iberco.es/archivos/14/Robot%20submarino%20PeeWee300.pdf>

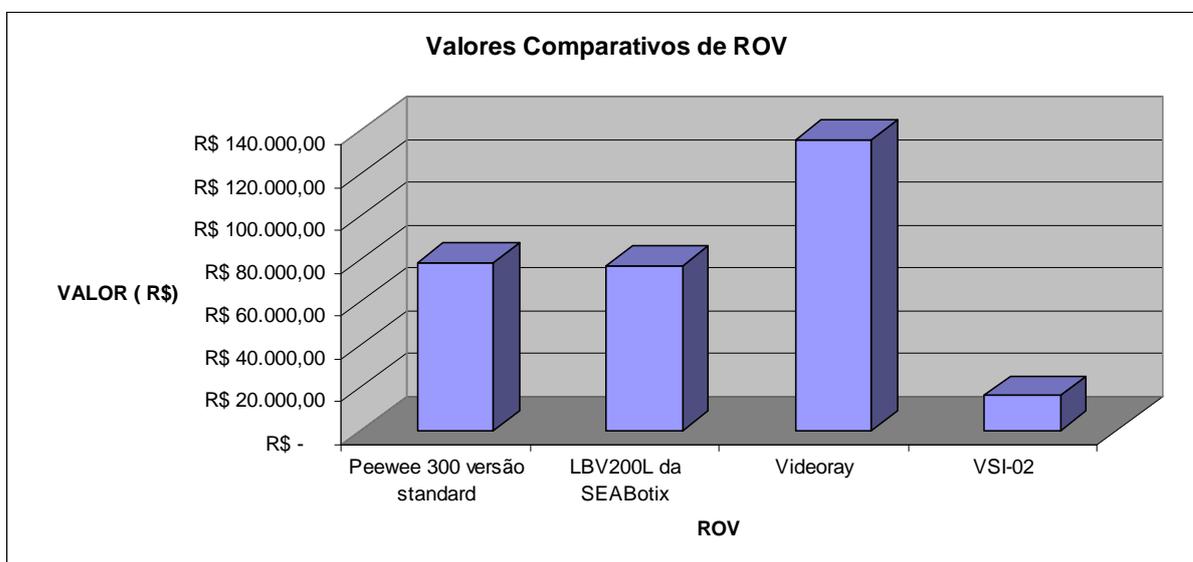


FIGURA 6.2 – ROV VideoRay

FONTE – [http://www.outdoorgb.com/p/videoray\\_deep\\_blue\\_underwater\\_video\\_camera/](http://www.outdoorgb.com/p/videoray_deep_blue_underwater_video_camera/)

GRÁFICO 6.1

Valores comparativos entre os submersíveis comerciais e os desenvolvidos neste projeto.



FONTE – Própria

Analisando o gráfico acima é possível verificar que o VSI-02 pode vir a alcançar um custo abaixo do custo dos veículos oferecidos no mercado (que se encontram na mesma classificação do VSI-02), o que poderá permitir e/ou facilitar sua utilização como equipamento de vistoria e inspeção em usinas hidroelétricas.

### 6.3 Análise comparativa entre os custos de inspeção usuais de uma hidroelétrica e os custos de inspeção por um ROV

Normalmente as UHE's – Usinas Hidroelétricas realizam periodicamente inspeções nas estruturas que se encontram submersas. Atualmente o gasto com estas operações alcança a

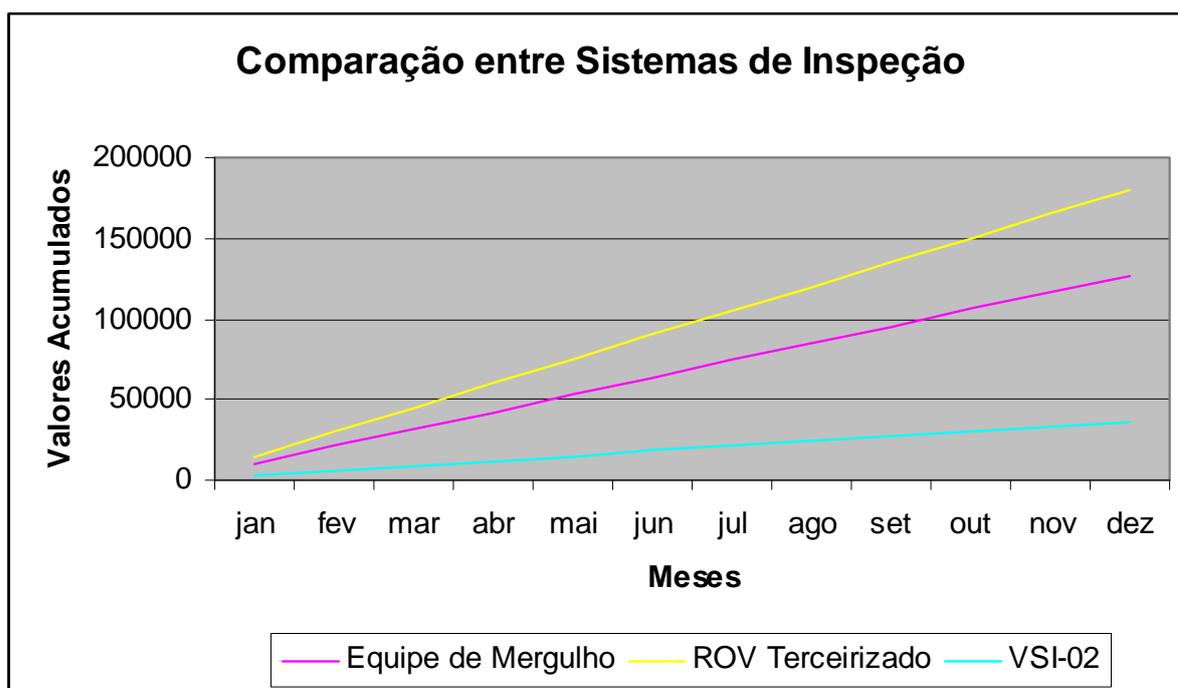
ordem de alguns milhares de reais, são operações complexas e realizadas por mergulhadores treinados, que arriscam suas vidas neste processo de vistoria.

A possibilidade de utilização de um equipamento que permita reduzir os riscos inerentes a esta operação, aliado a um baixo custo de aquisição e manutenção destes equipamentos pode tornar o processo menos oneroso e menos arriscado.

O GRA (6.2.) apresenta uma relação entre o custo anual das operações de vistoria destas estruturas realizadas por equipes de mergulhadores e o custo anual desta operação realizadas por ROV terceirizados e pelo ROV desenvolvido neste trabalho.

GRÁFICO 6.2

Comparação entre três possibilidades de inspeção em UHE's.



FONTE – FURNAS, mercado e própria.

Analisando o GRA (6.2.) verifica-se que a utilização de ROV terceirizado é totalmente inviável para a realidade das UHE's brasileiras e que com o desenvolvimento de um veículo submersível de baixo custo a possibilidade de economia neste processo de vistoria é real. Uma análise mais próxima do cenário das UHE's, percebe-se que a expectativa de utilização de um sistema de vistoria mais rápido, mais seguro e a um menor custo, propiciará um crescimento da economia destas operações e uma redução real nas perdas financeiras ocasionadas por estas vistorias.

## 7. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1. Preâmbulo

O desenvolvimento do Veículo Submersível de Inspeção VSI-02 utilizando peças de baixo custo, a caracterização deste veículo e a análise dos resultados obtidos, bem como as sugestões para a continuidade da aquisição de *know-how* sobre estes equipamentos, são tratados neste capítulo a título de conclusões e considerações finais sobre os projetos.

### 7.2. Conclusão

O desenvolvimento do VSI-02 permitiu a aquisição de experiência no desenvolvimento de cada subsistema embarcado. O desafio de desenvolvimento de uma plataforma mecânica capaz de suportar modificações ao longo do projeto tornou o VSI-02 modular e flexível em termos de inserção ou supressão de algum subsistema. Os vasos de pressão desenvolvidos para o VSI-02, apesar de não serem estruturalmente adequados para grandes pressões, suportaram as necessidades exigidas, entretanto necessitam de uma reconfiguração capaz de agregar melhorias em sua utilização, como: desenvolvimento de um projeto no qual os pontos de maiores tensões (pressões) sejam menos susceptíveis a ruptura, evitando aplicação de emendas nestes pontos; desenvolvimento de um sistema de fechamento diferenciado e capaz de facilitar a abertura e manutenção dos sistemas embarcados e utilização de um único vaso de pressão minimizando os pontos de interligação externa existentes.

As conexões, realizadas por dutos de alta pressão, se mostraram eficientes no quesito de estanqueidade. A utilização de um sistema de potência embarcado no VSI-02 propiciou uma redução considerável no diâmetro do cabo umbilical, o qual se restringiu a transmitir informações de controle. A utilização de baterias chumbo-ácido lacradas no subsistema de potência do VSI-02, apesar de provocar um risco iminente de explosão pela emissão de gases no interior dos vasos de pressão, funcionou adequadamente para os testes iniciais e se mostrou eficiente no quesito de autonomia. A realização de novos testes do sistema de potência e sua capacidade de autonomia, ainda deverá ser realizado para consolidar os resultados já encontrados. A possibilidade de utilização de baterias com outros princípios de funcionamento deve ser avaliada em projetos futuros, visando elevar a autonomia do ROV, agregar maior segurança em sua operação e ainda permitir a redução do peso do submersível.

No subsistema de iluminação utilizou-se equipamentos próprios para sistemas submersos com fonte própria de energia e baixa potência de iluminação. Entretanto se faz necessário o desenvolvimento de um subsistema específico, com maior potência e capaz de ser integrado aos demais subsistemas do ROV: alimentação de energia e controle.

O subsistema de visão necessitará de uma nova especificação, visto que o sistema atual apesar de funcionar, dentro das suas limitações, não atenderá às necessidades de vistoria de estruturas submersas. A utilização de câmeras infravermelha e / ou com maior resolução e qualidade de imagem são de extrema importância para o processo de tratamento computacional das imagens. Um sistema de câmeras mais adequado deverá ser testado com muito cuidado, visando a realização de um experimento capaz de cobrir todas as situações adversas, as quais pode-se encontrar em operações de inspeção.

Segundo Leonildo et al. (1998), uma metodologia de inspeção visual eficiente, consiste em:

*“...a partir de imagens da estrutura a avaliar, suprimir objetos que não são de interesse, e realizar um pré-processamento na imagem de forma a dar maior confiabilidade aos parâmetros a serem extraídos; em seguida, através de técnicas de fotogrametria analítica, conseguir o dimensionamento do objeto de interesse...”*

Baseado nesta metodologia pretende-se desenvolver um sistema modular integrado (software e hardware) de visão tridimensional para aquisição e processamento de imagens, a ser aplicado na inspeção visual submarina.

O sistema de visão tridimensional a ser adotado pode ser dividido em três estágios distintos, (LEONILDO et al, 1998):

- O sistema de visão, que consiste de um par de câmeras de vídeo conectadas a placas digitalizadoras, que adquirem imagens submarinas em tempo real para serem mostradas em três dimensões. Imagens de interesse são digitalizadas e gravadas em arquivo sob a forma de pares estéreos (duas imagens, cada qual de uma câmera, da mesma cena, obtidas no mesmo instante).
- As imagens digitalizadas, antes de serem efetivamente utilizadas, são submetidas a um pré-processamento, de forma a adequá-las ao processo de dimensionamento, o que inclui técnicas de processamento de imagens, tais como a equalização de histograma e

a detecção de envoltórias, com o objetivo de melhorar a precisão dos parâmetros a serem extraídos das imagens.

- Finalmente, as imagens processadas são submetidas ao dimensionamento, com o uso de um algoritmo que utiliza métodos fotogramétricos para a obtenção de coordenadas tridimensionais, a partir de pontos correspondentes nos planos bidimensionais das duas imagens do par estéreo. As dimensões de objetos tridimensionais podem, então, ser obtidas a partir dessas coordenadas.

A vetorização de empuxo do VSI-02 não utilizou planos direcionais, mas sim a composição de empuxos gerados pelos propulsores. É importante a realização dos testes de vetorização levando em consideração as diversas configurações de posicionamento dos propulsores, as quais podem vir a agregar uma maior manobrabilidade ao VSI-02. Para cada novo projeto do ROV seria importante definir um gráfico para determinar a resistência de arrasto do ROV em função das velocidades exercidas e com isto levantar seu desempenho.

O controle PWM utilizado nos propulsores horizontais deverá ser estendido aos propulsores verticais e / ou inclinados de forma a permitir um controle isolado e em conjunto de cada propulsor, o que irá tornar o controle do ROV mais completo mas mais complexo. A modelagem do ROV e de cada propulsor em separado pode ser considerado um trabalho complexo que envolve a determinação de variáveis de difícil mensuração. A relação entre a precisão do modelo matemático desenvolvido e a instrumentação necessária para se obter os parâmetros do modelo é direta e proporcional, o que provoca um aumento considerável nos custos do projeto. Portanto, para o projeto do controlador de força propulsiva do VSI-02, será desenvolvido um algoritmo capaz de estimar a força de propulsão, através da observação e medição da corrente de armadura e tensão aplicadas aos propulsores. Este algoritmo será apresentado futuramente e está sendo desenvolvido em uma dissertação de mestrado ligada ao projeto do VSI-02, que pretende investigar o desempenho e a robustez dos sistemas: observador e controlador de força propulsiva, através de dados simulados comparados com dados experimentais.

A utilização de flutuação positiva no ROV garante o seu retorno à superfície da água em caso de problema em seus sistemas de controle e potência, sugere-se a implementação de um sistema de controle, capaz de garantir uma estabilização do submersível em qualquer profundidade, para isto se faz necessário a utilização de um sistema realimentado.

O desenvolvimento completo de um submersível utilizando peças convencionais não é um trabalho trivial. O processo de definição, desenvolvimento, construção e testes de cada subsistema componente de um submersível é demorado e exaustivo, mas extremamente compensador quando finalizado com êxito.

O desenvolvimento de um ROV de baixo custo deverá agregar ao processo de vistoria das UHE's uma nova visão destes procedimentos. Seria interessante realizar uma avaliação que envolva todas as UHE's com o objetivo de verificar o ganho de escala que estes equipamentos podem gerar no âmbito econômico, qualitativo e de logística destas operações.

### **7.3. Veículo Submersível de Inspeção (VSI-02) – Contribuições**

Este trabalho contribuiu para o desenvolvimento de *know-how* na construção de veículos submersíveis no CPH, tendo como ineditismos a concepção de um projeto estrutural modular, o desenvolvimento e adaptação de um sistema de propulsão convencional, a utilização de um sistema de potência embarcado em um ROV, a concepção de um sistema de flutuação acoplado lateralmente e de baixo custo e a concepção de um sistema de análise de esforços por diagramas unifilares, até então utilizado somente para análise estrutural de edifícios, mas que se mostrou apropriado para a definição das resultantes de esforços no ROV. Contribuiu também na definição de procedimentos de ensaio de cada subsistema e na criação de uma matriz metodológica de conhecimentos necessários para o desenvolvimento de um veículo submersível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABENDE (2003). *Manual S-EA – Procedimento para Testes de Emissão Acústica em Vasos/Tanques de Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro*, ABENDE, pg 1-18, outubro de 2003.
2. ABNT . *Dimensionamento de estruturas metálicas e análise de vasos de pressão*, Normas Brasileiras NBR-8800, NBR ISO-14623 e NBR-15417.
3. ABNT (1977) - *Associação Brasileira de Normas Técnicas e da American Society for Mechanical Engineering*, ASME - Divisão 1, Seção VIII, 1977.
4. ALTSHULER, R.C., APGAR,J.F., EDELSON,J.S. and GREENSPAN,D.L. et al (2003). *ORCA-VII: An Autonomous Underwater Vehicle*, Massachusetts Institute of Technology, Project ORCA, Cambridge, MA 02139. <<http://web.mit.edu/orca>>
5. AMAT, J. et. al. (1999) *GARBI: a low-cost underwater vehicle*, Microprocessors and Microsystems 23 (1999) 61–67, IRI (Institute of Robotics), Ed. Nexus, C/GranCapità No. 2, 08028 Barcelona, Espanha.
6. ANDRADE, P.B., SILVA, A.C.V. e FILHO, O.T.B. (2006) *Construções Metálicas*, Universidade FUMEC, ineti, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
7. ANDEEN, G.B. (1988). *Robot Design Handbook*. New York, McGraw-Hill, 1988.
8. ASME (1979). *Code For Pressure Vessels*, Section IX – Materials.
9. ASME, (1996). *The Guide to Hydropower mechanical design*, H. P. Books, ISBN-10: 0965176509, July 1996.
10. SUB-ATLANTIC (2003). *Performance. Hydraulic Propulsion Selection*. Manual for Engineers, terceira revisão. Disponível em [www.sub-atlantic.co.uk](http://www.sub-atlantic.co.uk)

11. BARROS, E. A., SOARES, F. J. A. (2002) *Desenvolvimento de um Robô Submarino de Baixo Custo*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, XIV, 2002, Natal-RN. p. 2121-2126.
12. BASHOUR, R. et. al. (2001) *Prowler II*, 4<sup>TH</sup> International Autonomous Underwater Vehicle Competition, Julho 2001, U.S. Naval Academy, Annapolis.
13. BASTOS, A.A.M.M. (1998) *Projeto de um Veículo Submersível*, trabalho apresentado ao DEE, UFMG, Belo Horizonte.
14. BATLLE, J., NICOSEVICI, T., GARCIA, R., e CARRERAS, M. (2003). *Rov-aided dam inspection: Practical results*. 6th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC), Girona, Spain, páginas 309–312.
15. BENTHOS, Inc. U.S.A. STINGRAY MK II (2002) - *Remotely Operated Vehicle System - Operation and Maintenance Manual*, P/N M251-0030, Rev. A, Benthos, Inc., 49 Edgerton Drive, North Falmouth, MA 02556
16. BESSA, W.M. (2004) *Controle de Posição e Orientação de um Veículo Robótico Submarino*, Dissertação submetida como requisito parcial para o exame de qualificação para o doutorado. Programa de Engenharia Mecânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro
17. BRASIL (1978) Ministério do Trabalho. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978- Norma Regulamentadora NR 13 – *Caldeiras e Vasos de Pressão* , Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília.
18. BRUTZMAN, D. et.al.(1997). *The Phoenix Autonomous Underwater Vehicle*, AI-Based Mobile Robots, MIT/AAAI Press, Cambridge Massachusetts, 1997.
19. BRUTZMAN, D. A (1994) *Virtual World for an Autonomous Underwater Vehicle*. Monterey, USA, 1994. 170 p. Tese, Naval Postgraduate School.

20. CAVALLO, E., MICHELINI, R.C. and FILARETOV, V. F.(2004). *Conceptual design of an AUV equipped with a three degrees of freedom vectored thruster*. Journal of Intelligent & Robotic Systems 39 (4):365-391, 2004.
21. COTE, J. e LAVALLEE, J. (1995). *Augmented reality graphic interface for upstream dam inspection*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2590:33–39.
22. CRAIG, J.J. (1988) Introduction to Robotics Mechanics and Control, 2nd Edição, Addison-Wesley Publishing Company, 1988.
23. CREAGER, W.P., JUSTIN, J.D. (2002) *Hydro-Electric Handbook*, Segunda edição, New York, John Wiley & Sons, Inc.
24. CUNHA, J. P. V. S. (1992). *Projeto e Estudo de Simulação de um Sistema de Controle a Estrutura Variável de um Veículo Submarino de Operação Remota*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
25. DOMINGUEZ, R. B. (1989) *Simulação e Controle de um Veículo Submarino de Operação Remota*. Rio de Janeiro, 1989. 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
26. DORF, R.C. e BISHOP, R.H. (1998) *Sistemas de Controle Modernos*, Traduzido por FILHO, B.S.S. em 2001, 8ª edição, Ed.LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
27. FOSSEN, T. I. (2002). *Marine Control Systems: Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Trondheim, Noruega, Marine Cybernetics AS.
28. FOX, R.W. e McDONALD, A.T. (1998). *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Traduzido por KOURY, R.N.N. e FRANÇA, G.A.C. em 2001, ed 5, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, Brasil
29. FULTON, T. F. e CASSIDY, C. J. (2001). *Navigation sensor data fusion for the AUV Remus*. Marine Technology and Sname News 38 (1):65-69, 2001.

30. HARRY, B. (1932) *The Navy times book of submarines: a political, social, and military history*, reeditado por Army Time Publishing Company em 1997.
31. HEALEY, A. J. e MARCO, D. B. (2001). *Command, Control and Navigation: Experimental Results with the NPS ARIES AUV*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Special Issue on Autonomous Ocean Sampling Networks, vol.26, n.4, Oct.2001, pp.466-477
32. HOVER, F. (2002) *Autonomous underwater vehicles (auv's)*. Draft of Maneuvering Committe, 23rd. Int. Towing Tank Conference, Venice, Italy.
33. HSU, L., CUNHA, J. P. V. S., LIZARRALDE, F., COSTA, R. R. (2000) *Avaliação Experimental e Simulação da Dinâmica de um Veículo Submarino de Operação Remota*. **Revista Controle & Automação**, vol.11, nº 2, p.82-93, Maio, Junho, Julho, Agosto 2000.
34. ISE - International Submarine Engineering web based auv designinfo. [online], 2000. Avaliado em:<http://www.ise.bc.ca/WADEsysdesign.html/>.
35. JIMENEZ, T. S. (2004). *Contribution na la commande d'un robot sous-marin autonome de type torpille*, 21/12/2004, UNIVERSITE MONTPELLIER II, T HESE
36. KAWAGUCHI, K., TAMAKI, U., TOMODA, Y e KOBAYASHI, H. (2001) *ALBAC*, School of Marine Science and Technology, Department of Marine Mineral Resources, Tokai University 3-20-1 Orido, Shimizu, Shizuoka 424 no Japão.
37. KIM, S., JUNG, S. H., e KIM, C. H. (1999). *Preventive maintenance and remote inspection of nuclear power plants using tele-robotics*. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1:603–608.
38. KOPTIW, M. (1998) *Design of an Autonomous Underwater Vehicle*, School of Engineering Stevens Institute of Technology Hoboken, NJ.

39. LAVAL, B., BIRD, J. S. and HELLAND, P. D. (2000). *An autonomous underwater vehicle for the study of small lakes*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 17 (1):69-76, 2000.
40. LEE, P.M., HONG, S.W., LIM, Y.K., LEE, C.M., JEON, B.H. and PARK, J.W. (1999) *(VORAM) Discrete-Time Quasi-Sliding Mode Control of an Autonomous Underwater Vehicle*, IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL. 24, NO. 3, JULY 1999.
41. LENILDO, C.S., PETRAGLIA, A. e PETRAGLIA, M.R.(1998). *Sistema de Visão Estéreo para Inspeção Submarina de Tubulações e Equipamentos de Petróleo em Águas Profundas*, Seminário de Instrumentação e Automação held no Rio de Janeiro, Brazil, 5-8 October, 1998.
42. LIDDLE, D.(1986) *TROJAN: Remotely Operated Vehicle*, IEEE Journal Of Oceanic Engineewng, VOL. OE-11, NO. 3, JULY 1986
43. LEWIS, E.V. (1998). *Principles of naval architecture*, Volume I, Stability and Strength. The Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME),1988.
44. LYGOURAS J.N., TSAGAS N.F., BAKOS G.C., TARCHANIDIS K. and TSALIDES P.G. (1995) *Remotely Operated Vehicle (ROV) Position Control by Implementation of Modem Control*, Theory Techniques, Modelling, Measurement & Control, B, ASME Press, Vol. 59, No. 3, 1995, pp. 5-14.
45. MACINTYRE, A. J.(1983) *Maquinas motrizes hidráulicas*. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1983.
46. MARCO, D. B. and HEALEY, A. J. (2001). *Command, control, and navigation experimental results with the NPS ARIES AUV*. Ieee Journal of Oceanic Engineering 26 (4):466-476, 2001.
47. MCKERROW, P. J. (1991). *Introduction to robotics*. Sydney: Addison-Wesley, 811 p.

48. MARINE TECHNOLOGY SOCIETY, (1984) *Operational Guidelines for ROVs*, Comitê de Veículos Remotamente Operados, EUA.
49. MOONEY, J.B., et. al. (1996). World Technology Evaluation Center Program (WTEC). World Technology Evaluation Center Panel Report on Submersibles and Marine Technologies in Russia's Far East and Siberia. International Technology Research Institute , in press. Baltimore, Maryland: Loyola College of Maryland.
50. NAKAMURA, Y e SAVANT,S. (1992) *Nonlinear Tracking Control of Autonomous Underwater Vehicles*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, May 1992.
51. NATIONAL RESEARCH COUNCIL, (1996). *Undersea Vehicles and National Needs*, National Academy Press, Washington, D.C.
52. NETO, J.P.Q. (2005) *Modelagem Automática de Cenas com Iluminação não Local a Partir de Imagens*, Universidade Federal De Minas Gerais, Instituto De Ciências Exatas Icx, Departamento De Ciência Da Computação, Belo Horizonte.
53. NICOLET, A., NICOLET, R. e BRODBECK, J. (1955) *Manual Del Modelista – Trazado y realización de modelos para la fundición*, ed. Gustavo Gili S.A., Barcelona, 1955 – Pág. 339-361,
54. NG, R. K. H., YOUSEFPOUR, A., UYEMA, M. and NEJHAD, M. N. G. (2002). *Design, analysis, manufacture, and test of shallow water pressure vessels using E-glass/Epoxy woven composite material for a semi-autonomous underwater vehicle*. Journal of Composite Materials 36 (21):2443-2478, 2002.
55. NIKOLAEV, V. P., YAKUBENKO, V. G., ZHILTSOV, A. A., PROKOPOV, O. I. and BULYGA, V. V. (1981). *Hydrophysical Studies with the Use of the Argus Self-Contained Underwater Vehicle*. Okeanologiya 21 (6):1109-1112, 1981.
56. NOVICK D.K. et. al. (1998). *The Development of a Highly Maneuverable Underwater Vehicle*, Robotics 98: The 3rd International Conference and

57. OMERDIC, E e ROBERTS, G. (2004). *Thruster Fault Diagnosis and Accommodation for Open-frame Underwater Vehicles*, Control Engineering Practice, N. 12, pp. 1575-1598, 2004.
58. PENNELL, V., VEITCH, B., HAWBOLDT, k., HUSAIN, T., BOSE, N. (2003) *Use Of An Autonomous Underwater Vehicle For Environmental Effects Monitoring*, presented at the 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, 24 to 27 August 2003, Faculty of Engineering, Memorial University of Newfoundland.
59. PEREIRA, A.E.L., (2004). *Modelagem Dinâmica E Controle De Veículos Subaquáticos Não Tripulados*, UNICAMP, São Paulo.
60. PINFARI, J.C., JUNIOR, E.C., GOUVEIA, F.A.A.(2000).*Inspeção Subaquática com Televisamento nas Pás dos Rotores das Turbinas*, CESP / 2º.SEPOCH, Paraná.
61. POUPART, M., BENEFIGE, P., e PLUTARQUE, M. (2000). *Subaquatic inspections of edf (electricite de france) dams*. Oceans Conference Record (IEEE), 2:939–942.
62. PRESTERO, T. (2001) *Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the Remus Autonomous Underwater Vehicle*. Davis, USA, 2001. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), MIT - Massachusetts Institute of Technology.
63. ROMAN, H. T. (1991). *Robots cut risks and costs in nuclear power plants*. IEEE Computer Applications in Power, 4(3):11–15.
64. SALGADO, M.U.C. e MIRANDA, G.V. (2002). *Veredas- Formação Superior de Professores*, módulo 1, volume 1, SEE-MG, Minas Gerais.
65. SCHUBAK, G. E. e SCOTT, D. S. (1995). *A Technoeconomic Comparison of Power-Systems for Autonomous Underwater Vehicles*. Ieee Journal of Oceanic Engineering 20 (1):94-100, 1995.

66. SEYMOUR, R.J et. al. (1994). World Technology Evaluation Center Program. Pp. 150–262 in World Technology Evaluation Center Panel Report on Research Submersibles and Undersea Technologies. NTIS Report No. PB94-184843. Baltimore, Maryland: Loyola College of Maryland.
67. SILVESTRE, C. e PASCOAL, A. (1997). *Control of an AUV in the vertical and horizontal planes: system design and tests at sea*. Transactions of the Institute of Measurement and Control 19 (3):126-138, 1997.
68. SMALLWOOD, D., BACHMAYER, R. and WHITCOMB, L. (1999) *New Remotely Operated Underwater Vehicle for Dynamics and Control Research*, Department of Mechanical Engineering, Johns Hopkins University, In Proceedings of the 11th International Symposium on Unmanned Untethered, Submersible Technology, Durham, NH, September 19-22.
69. SOUZA, E., MARUYAMA, N. (2002) *An Investigation of Dynamic Positioning Strategies for Unmanned Underwater Vehicles*. CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, XIV, 2002, Natal-RN. p.1273-1278.
70. STACHIW, J.D., e FRAME, B. (1988). *Graphite-Fiber-Reinforced Plastic Pressure Hull Mod 2 for the Advanced Unmanned Search System Vehicle*. Technical Report NOSC No. 1245. San Diego, California: Naval Ocean Systems Center (now the Naval Command, Control, and Ocean Surveillance Center).
71. STACHIW, J.D. (1993). *Quoted in Voyage to the Bottom of the Sea*. Mechanical Engineering 115(12):56.
72. TAVARES, A. M. (2003) *Um estudo sobre modelos matemáticos de robôs subaquáticos*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Oceânica, FURG, Dezembro, 2003.
73. TIMOSHENKO, S.P. e WOINOWSKY-KRIEGER, S. (1959) *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, second edition, London.

74. TSUSAKA, Y., ISHIDERA, H., e ITOH, Y. (1986). *Murs-300 mk ii: A remote inspection system for underwater facilities of hydraulic power plants*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, E-11(3):359–363.
75. TUPINAMBÁ, P.M., SOUZA, J.M.C., MESQUITA, A.R. (1979) *BATIUSP – O Desenvolvimento do primeiro veículo submarino tripulado brasileiro*, set/1979, USP, SP, Brasil.
76. WASSERMAN, K.S. et. al. (2003). *Dynamic Buoyancy Control of an ROV using a Variable Ballast Tank*, OCEANS 2003. Proceedings, Vol. 5, 22-26 Sept. 2003 pp-SP2888 - SP2893.
77. WERNECK, M.M. (1996). *Transdutores e Interfaces*, ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
78. WHITE, F. M.(2002). *Mecânica dos Fluidos*, ed. McGraw-Hill Interamericana do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, 570 pgs.
79. YUH, J. (1995) *Underwater robotic vehicles, design and control*. Editor Junku Yuh, Albuquerque New Mexico USA.
80. YUH, J. (2000) *Design and Control of Autonomous Underwater Robots*. Autonomous Robots 8, 7–24, Kluwer Academic Publishers. Printed in The Netherlands
81. ZANOLI, S. M., CONTE, G. (2003) *Remotely Operated Vehicle Depth Control*, Control engineering practice [0967-0661] any:2003 vol.:11 núm:4
82. APEX, *BRUSH DC Motor Driver MSA240 PWM, 20A, 100V* – Disponível em: [http://eportal.apexmicrotech.com/mainsite/applications/motor\\_control.asp](http://eportal.apexmicrotech.com/mainsite/applications/motor_control.asp)>Acessado em janeiro/2007.
83. AQUA. *UNDEWATER SYSTEM AND ROV – Lista de diversos ROV do mundo*. Disponível em [http://aqua.sm.bmstu.ru/fun/wordgalery/wordgalery\\_e.htm](http://aqua.sm.bmstu.ru/fun/wordgalery/wordgalery_e.htm)>. Acessado em janeiro/2007.

84. BENTHOS, *ROV Stingray Veículo Operado Remotamente*. Disponível em <[www.benthos.com](http://www.benthos.com)>. Acessado em junho/2007.
85. BT, *FOTO de um ROV utilizado para trabalhos offshore* – [on line]. Disponível em <<http://www.btinternet.com/~derek.mackay/offshore/images/rov/stealth17.jpg>>. Acessado em junho/2007.
86. DEEP, *Câmera utilizada no ROV MAX*. Disponível em <<http://www.deepseasystems.com/maxrovd.htm>>. Acessado em julho/2007.
87. DEEPSEA, *Biographical ROV Project History*. Disponível em <<http://www.deepseasystems.com/bio.htm>>. Acessado em janeiro/2007.
88. FLOTEC, *Flutuadores utilizados em ROV*. Disponível em <[www.flotec.com](http://www.flotec.com)>. Acessado em junho/2007.
89. HÉLICE, *Descrição das partes de um hélice*. Disponível em <<http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/helice.html>>. Acessado em junho/2007.
90. IBERCO, *ROV Peewee 300 da IBERCO*. Disponível em <<http://www.iberco.es/archivos/14/Robot%20submarino%20PeeWee300.pdf>>. Acessado em julho/2007.
91. OUTDOOR, *ROV VideoRay*. Disponível em <[http://www.outdoorgb.com/p/videoray\\_deep\\_blue\\_underwater\\_video\\_camera/](http://www.outdoorgb.com/p/videoray_deep_blue_underwater_video_camera/)>. Acessado em julho/2007.
92. ROV, *Conexão para Cabo Umbilical (theter)*. Disponível em <<http://www.rovservices.it/connector.htm>>. Acessado em junho/2007.
93. ROV REVIEW – Detalhes do ROV LBV 300s – Disponível em: [http://www.rovexchange.com/rov\\_review\\_seabotix\\_lbv\\_300s.php](http://www.rovexchange.com/rov_review_seabotix_lbv_300s.php), acessado em 10/01/2007.

94. SMALL. *VEIHICLES – Exemplo de pequenos veículos submersíveis* – [on line]. Disponível em <<http://www.rov.org/educational/pages/Small%20Vehicles.html>>. Acessado em junho/2007.
95. SOEST, MBARI, *ROV Tiburon do Monterey Bay Aquarium Research Institute* [on line], Disponível <[www.soest.hawaii.edu/hannides/galleries/Calbasins/Tiburon.html](http://www.soest.hawaii.edu/hannides/galleries/Calbasins/Tiburon.html)>. Acessado em junho/2007.
96. SUB1, *Representação de um propulsor elétrico. Vistas: isométrica, frontal e lateral.* Disponível em <[www.sub-atlantic.uk](http://www.sub-atlantic.uk)>. Acessado em julho/2007.
97. SUB2, *Representação de um propulsor hidráulico do hélic*, Disponível em <[www.sub-atlantic.uk](http://www.sub-atlantic.uk)>. Acessado em março/2003.
98. WHOI, *ROV KAIKO desenvolvido no Japão* [on line]. Disponível em <<http://www.whoi.edu/science/GG/people/adeschamps/cruises/cruisee.html>> Acessado em junho/2007.
99. WILEY & SONS (1978) *Stainless Steel Handbook*.

## ANEXO A

### Procedimentos:

O projeto mecânico do submersível deverá levar em conta os seguintes sistemas:

1. Sistema de Flutuação:
  - a. Mecanismos utilizados;
  - b. Posicionamento;
  - c. Funcionamento e Acionamento.
2. Sistema de Controle:
  - a. Tipo de Controle;
  - b. Arquitetura utilizada (Autônomo, Semi-Autônomo, Remotamente Controlado, etc.);
  - c. Posicionamento e Alimentação;
  - d. Componentes.
3. Sistema de Comunicação:
  - a. Tipo de Comunicação (Rádio, Som, Cabo, etc.);
  - b. Posicionamento e Alimentação;
  - c. Componentes.
4. Sistema de Vetorização de Empuxo:
  - a. Tipo de Vetorização (Superfícies Direcionais, etc.);
  - b. Posicionamento e Acionamento;
  - c. Componentes.
5. Sistema de Propulsão:
  - a. Tipo de Propulsão (Hélices simples, Múltiplas, Jato d'água, etc.);
  - b. Posicionamento e Acionamento;
  - c. Alimentação de Energia;
  - d. Controle.
6. Sistema Sensorial:
  - a. Tipo de Sensores (Profundidade, Giroscópio, etc.)
  - b. Alimentação;
  - c. Posicionamento e Controle.
7. Sistema de Energia:
  - a. Tipos de Alimentação;
  - b. Potência Máxima Instalada;
  - c. Sistemas de Conversão e Inversão.

### Questões:

1. Qual o melhor perfil hidrodinâmico para o submersível?
2. Qual a temperatura máxima suportada pelos equipamentos embarcados?
3. Como será realizado o escape de gases gerados pelo uso de energia (caso se utilize reações químicas)?
4. Qual o nível de interferência gerado pelo conjunto embarcado?
5. Qual a velocidade de cruzeiro e de trabalho do submersível?
6. Quanto tempo de autonomia o Sistema de Energia é capaz de fornecer ao veículo submersível?

7. Quais os dispositivos de segurança necessários?
8. Qual a profundidade de trabalho do veículo submersível?
9. Quantos graus de liberdade o veículo necessita para realizar suas tarefas?
10. Qual a carga extra máxima, suportada pelo veículo?

Dentre as questões levantadas, algumas respostas surgiram ao longo deste trabalho:

1. O perfil hidrodinâmico adotado pelo VSI-02 não afetará muito seu desempenho, visto as baixas velocidades desenvolvidas. A adoção de uma carenagem poderá melhorar seu desempenho em alguns aspectos.
2. Os equipamentos utilizados no desenvolvimento do VSI-02 suportam temperaturas de até 80° C sem prejuízo em seu funcionamento.
3. A utilização de um sistema de potência lacrado e de baixa emissão de gases garantiu uma segurança adequada ao VSI-02.
4. A adoção de algumas técnicas de montagem, como filtros, pares trançados reduziu consideravelmente os ruídos sobre os sistemas embarcados.
5. O VSI-02 foi projetado para alcançar velocidades de até 2 m/s o que dependerá principalmente da carenagem e dos propulsores utilizados.
6. O sistema de potência do VSI-02 oferece uma autonomia de aproximadamente quatro horas de trabalho.
7. No VSI-02 foram adotados sistemas de segurança via fusíveis os quais limitam as correntes máximas que trafegam nos diversos subsistemas embarcados, chave geral capaz de cortar a energia dos sistemas embarcados em caso de detecção de falha e isolamento dos sistemas com polipropileno expandido.
8. O VSI-02 foi projetado para trabalhar a uma profundidade de até 20 metros com segurança, podendo ir a maiores profundidades com risco.
9. Como o VSI-02 é ainda um protótipo, este foi construído com três graus de liberdade, mas poderá suportar até cinco graus de liberdade.
10. O VSI-02 pode suportar uma carga extra de até 5 kg. A alteração para maior necessita de um re-projeto dos flutuadores.

## ANEXO B

### Projeto e desenvolvimento do VSI-01

Segundo BASTOS (1998), o “Veículo Subaquático de Inspeção” (VSI-01) teve por objetivo eliminar riscos e criar condições melhores para inspeções subaquáticas em estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas. Através do uso de um veículo não tripulado totalmente telecomandado dotado de um sistema de câmeras digitais capazes de captar imagens e enviá-las a um computador localizado junto à unidade de comando, objetivou-se a melhoria nas condições operacionais e facilidade no trato de informações. A FIG. (B.1) apresenta uma vista geral do VSI-01 no tanque de teste do laboratório.

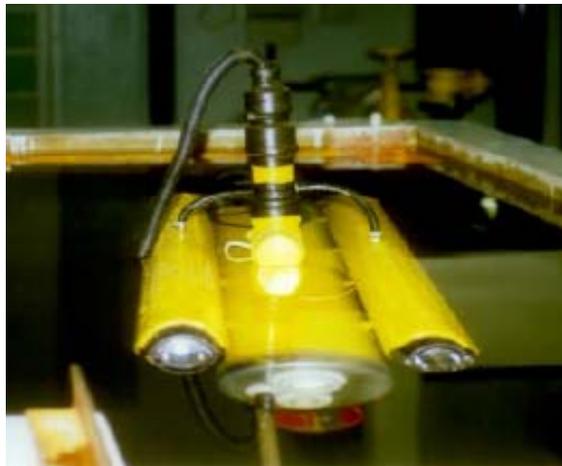


FIGURA B.1 – Visão do geral do VSI-01 no tanque de teste do laboratório.

FONTE – CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG.

### Sistema Construtivo

O VSI-01 foi construído a partir de um cilindro principal no qual está inserido um esqueleto estrutural que tem como objetivo enrijecer o corpo do equipamento onde se localizam os sistemas de propulsão e o de vídeo-monitoração. A estrutura interna é encaixada dentro de um tubo de PVC com diâmetro de 200 mm e comprimento de 1400 mm. Vários anéis foram dispostos longitudinalmente ao tubo com o objetivo de permitir a fixação dos tubos auxiliares superiores (de flutuação) e inferior (de lastro). Para tal, em cada um desses anéis foram feitos três orifícios dispostos em 120° nos quais foram encaixados parafusos ( $\phi = 4\text{mm}$  e  $L = 50\text{mm}$ ) aos quais são fixados os tubos citados. Projetou-se o esqueleto baseando-se em informações referentes às pressões externas que devem ser suportadas. No caso, por se tratar do primeiro

protótipo de um veículo experimental, trabalhou-se com pressões máximas de projeto de 5 kgf/cm<sup>2</sup>.

Assim a estrutura é formada por vários anéis de madeira (cavernames), de 20 mm de espessura e de raios interno médio de 62 mm e externo de 98 mm, fixados por hastes parafusadas.

As hastes parafuso foram dispostas em 120° de modo a propiciar o encaixe dos cavernames que possuem furos de diâmetro igual a 9,5 mm. Em cada ponto de passagem da haste roscada pelo cavername é colocado um conjunto de porcas e arruelas de forma a manter o cavername imobilizado aumentando a sua rigidez.

A distância que separa os cavernames é de 45 mm entre eixos. A FIG. (B.2) apresenta uma vista em detalhe do esquema construtivo dos cavernames. Na região onde o motor está instalado, FIG. (B.3), foram colocados cavernames móveis para facilitar a manutenção do equipamento. Neste caso têm-se quatro cavernames que são ligados por braçadeiras auto-travantes e imobilizados mediante colagem. O QUADRO (B.1) apresenta as principais dimensões do VSI-01. Em todos os cavernames existem quatro orifícios para a passagem dos cabos de alimentação e controle. Duas tampas de alumínio fecham a estrutura principal e fazem a comunicação dos sistemas internos com o exterior.

Na tampa dianteira encontram-se: a tomada de água do sistema de propulsão, a lente de acrílico da câmera e a saída do cabo do sistema de vídeo. Na tampa traseira localizam-se: a saída de água pressurizada do sistema de propulsão e a conexão elétrica do motor juntamente com o duto de pressurização do corpo principal.



FIGURA B.2 – Detalhe do esquema construtivo dos cavernames do VSI-01.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.



FIGURA B.3 – Sistema do esqueleto estrutural do VSI-01 montado.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

## QUADRO B.1

Principais dimensões do VSI-01

DIMENSÃO	VALOR
Comprimento máximo	$L_{max} = 2.100 \text{ mm}$
Comprimento do tubo (Principal + tampas)	$L_{tubo} = 1.450 \text{ mm}$
Largura máxima	$W_{max} = 450 \text{ mm}$
Altura máxima	$H_{max} = 800 \text{ mm}$
Comprimento do conjunto de vetorização	$L_{vetor} = 400 \text{ mm}$

FONTE: Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

À saída de água do sistema de propulsão conecta-se o sistema de vetorização do empuxo formado por quatro válvulas solenóides que controlam a movimentação do veículo. Duas delas se destinam ao sistema de empuxo para movimentação longitudinal (a frente e a ré), e as outras duas válvulas direcionam o fluxo para permitir deslocamento lateral (direita e esquerda - estibordo e bombordo) do veículo. No caso do deslocamento lateral trabalha-se com um sistema de fluxo aplicado diagonalmente ao longo do corpo do VSI-01. Este esquema de direcionamento se mostrou mais eficiente e permite manobras laterais mais rápidas. Entretanto este sistema somente funciona com o motor principal ligado e, portanto, aduzindo água frontalmente.

Desta forma optou-se por instalar quatro motores direcionais trabalhando de forma complementar ao sistema de vetorização de empuxo principal. A vantagem destes motores reside no fato destes serem acionados com o VSI-01 parado. Estes motores auxiliares permitem que sejam feitos ajustes finos de posição possibilitando o alinhamento da câmara de filmagem.

As FIG. (B.4) e (B.5) apresentam um esquema dos motores auxiliares utilizados no VSI-01. Estes quatro motores auxiliares de direção são alimentados em 12 volts em corrente contínua, encapsulados em conjuntos de PVC de  $\varnothing = 40\text{mm}$  e  $L = 130\text{mm}$ , fechados cada um por dois tampões de  $\varnothing = 40\text{mm}$  e uma luva  $\varnothing = 40\text{mm}$ . O conjunto de vetorização auxiliar foi fixado ao tubo central de modo a permitir uma base de manobra mais rígida. Conforme se pode observar na FIG. (B.6), ao corpo principal do submarino conectam-se três tubos de menor diâmetro ( $\varnothing = 100\text{mm}$  e  $L = 130\text{cm}$ ), sendo dois deles dispostos nos quadrantes superiores simetricamente opostos e o outro disposto na linha de lastro do veículo. Nos dois tubos superiores encontra-se o subsistema de emersão e submersão do VSI-01, composto por câmaras pneumáticas e válvulas de controle, que permitem a submersão e emersão do veículo.



FIGURA B.4 – Detalhe de um motor auxiliar do VSI-01.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.



FIGURA B.5 – Detalhe da tomada d'água do motor auxiliar do VSI-01.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

À frente desses dois tubos e do tubo de lastro encaixam-se os sistemas de iluminação compostos de três lanternas seladas, capazes de suportar aproximadamente 5 kgf/cm<sup>2</sup> de profundidade, e três refletores em alumínio, para permitir o direcionamento do feixe de luz.



FIGURA B.6 – Detalhe dos três tubos acoplados ao corpo principal do VSI-01.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

Ainda sobre o corpo principal dispõe-se a torre de controle do VSI-01 que será descrito a seguir.

### 2.7.1 Torre de Controle

Ao corpo principal do VSI-01 está acoplado a uma pequena torre de controle em PVC dentro da qual conectam-se os principais elementos de ligação entre o controle remoto e o submersível: cabo principal de controle, cabo de vídeo e os conduítes de ar comprimido para os pneumáticos e para pressurização do corpo principal. A torre foi idealizada para permitir flexibilidade aos sistemas e isolá-los de forma a evitar problemas diversos envolvendo vedação. A torre é uma estrutura de fácil vedação, permitindo o acesso aos conectores dos cabos de forma simples e rápida. As FIG (B.7) e (B.8) mostram detalhes da torre onde se pode identificar o cabo de comando entrando pela sua parte superior, a base da torre, onde ficam as conexões e a distribuição dos cabos, os quais são direcionados para cada parte do veículo. A FIG. (B.9) apresenta um detalhe do sistema de acoplamento dos cabos elétricos de alimentação e controle do submersível.

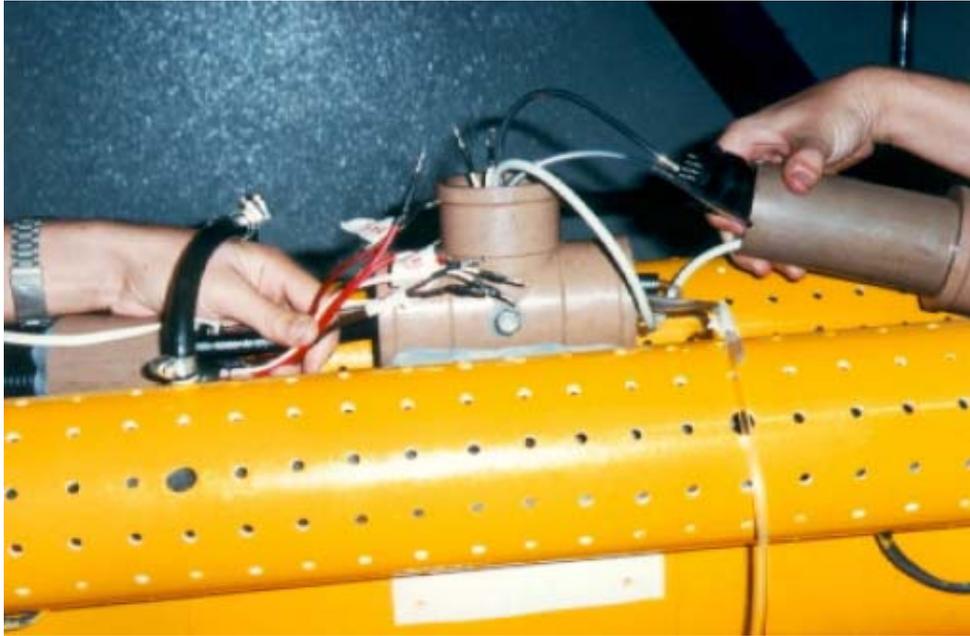


FIGURA B.7 – Detalhe da montagem da torre de controle do VSI-01.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

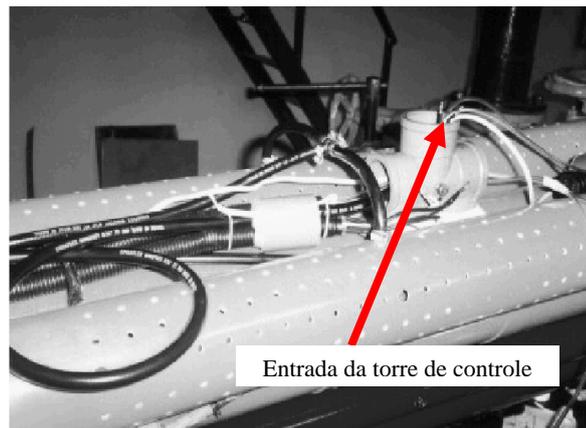


FIGURA B.8 – Detalhe da entrada da torre de controle do VSI-01.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

Devido aos problemas de vedação da torre de controle, optou-se por uma solução baseada no preenchimento de toda câmara com óleo. A utilização deste tipo de óleo se baseou no fato de existir uma grande diversidade de conexões e sistemas elétricos. Entretanto a escolha do óleo teve que ser acompanhada de um estudo de compatibilidade química do mesmo com os diversos componentes das conexões de modo a evitar um desgaste por corrosão das conexões e do isolamento.



FIGURA B.9 – Detalhe da torre de controle já montada.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

### 2.7.2 Característica de vedação do vaso de pressão

Devido ao fato do equipamento trabalhar em profundidades variadas, com uma grande diversidade de pressões e, portanto de deformações na sua estrutura, um dos problemas enfrentados foi o de garantir a vedação dos sistemas. Assim as tampas dianteira e traseira foram feitas de forma que encaixem perfeitamente ao tubo principal.

A vedação complementar foi realizada utilizando-se cola e fita adesiva de borracha. Apesar do sistema ser bastante simples, se mostrou eficiente desde o primeiro teste tendo sido mantido até o final do desenvolvimento deste protótipo.

As conexões de tomada e saída de água do sistema de propulsão com as tampas são feitas através de flanges em PVC com anéis de borracha e cola. As passagens dos cabos do sistema elétrico também são feitas através de flanges preenchidos com cola de silicone. A vigia para a

câmara, em acrílico, foi adaptada de forma a não permitir vazamentos. Um sistema de pressurização foi criado para manter a pressão interna sempre maior do que a externa, evitando assim problemas de entrada de água. Desta forma foi necessário garantir um esquema que permitisse a despressurização do equipamento de forma rápida quando de uma manobra de subida acelerada. Isto foi obtido a partir de um sistema de retirada forçada de ar que passa pelo cabo de controle. Apesar do sistema cabos de pressurização/despressurização ter um volume elevado, esta foi a melhor solução alcançada neste primeiro protótipo.

A FIG. (B.10) apresenta um detalhe do sistema de lente adaptado à tampa frontal do VSI-01, onde se pode observar um orifício utilizado para permitir a passagem da tomada d'água para acionamento do motor de propulsão principal.



FIGURA B.10 – Detalhe do tampão frontal do VSI-01 e da tomada d'água do sistema de propulsão.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

## 2.8 Subsistemas Embarcados

O projeto do VSI-01 teve como objetivo estudar e caracterizar uma plataforma para inspeção visual de estruturas hidráulicas submersas. Desta forma procurou-se embarcar uma série de equipamentos que permitissem ao veículo cumprir a sua proposta de trabalho inicial. A seguir descrevem-se os equipamentos instalados no mesmo.

### 2.8.1 Subsistema de emersão e submersão por câmaras de flutuação

Os tubos auxiliares superiores comportam o sistema de submersão / emersão do VSI-01, composto de dois pneumáticos de borracha e duas válvulas solenóides de controle de admissão e escape de ar comprimido. Os tubos são fabricados em PVC e foram perfurados de forma a não prejudicar sua rigidez e permitir a entrada e saída da água de seu interior.

A FIG. (B.11) apresenta uma vista dos tubos de emersão / submersão e do tubo de lastro. Em cada um dos tubos superiores se encontra uma câmara de borracha com diâmetro de 52 mm, dois tampões na forma de placas em PVC e um sistema de iluminação. Distanciando-se 200 mm das extremidades do tubo, foram feitos 360 orifícios distanciados de 30 mm longitudinalmente entre si e dispostos a 30° com relação a linha de centro do mesmo. Às câmaras pneumáticas foram acopladas as válvulas de admissão e expulsão de gás.

A partir de um console de comando pode-se ativar o controle de emersão, através de um compressor e de um conjunto de válvulas solenóides.

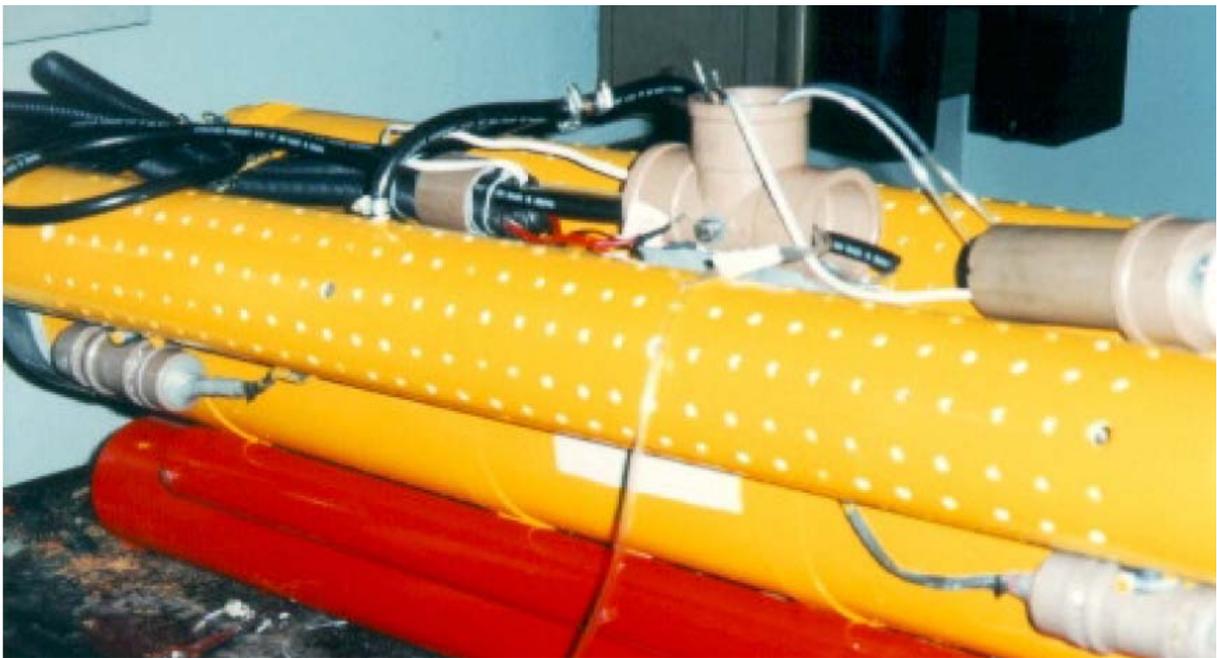


FIGURA B.11 – Vista lateral do VSI-01 com detalhe para os orifícios de saída d'água da câmara de flutuação.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

Ao se energizar as válvulas o ar comprimido é injetado nos pneumáticos, que inflam e expulsam a água do interior dos tubos. No caso do comando de submersão, uma válvula de escape é energizada e permite o escape do ar comprimido contido nos pneumáticos para o ambiente. Esta operação é facilitada pela pressão exercida pela água sobre os pneumáticos.

A massa do VSI-01 foi determinada por meio de pesagem direta e assim projetou-se o sistema de lastro. O sistema de lastro é composto por um tubo de aço carbono localizado na parte inferior do corpo principal do veículo. Devido ao grande volume interno livre, foi necessário acrescentar uma massa complementar de ferro e chumbo.

O processo de abertura das válvulas solenóides permite o escape de ar para um ambiente externo ao VSI-01, desta forma será formada uma cortina de bolhas. Nos testes efetuados no laboratório esta cortina de bolhas não causou instabilidade no equipamento apesar de indicar com clareza a posição do mesmo.

Devido ao fato da cortina de bolhas ser formada na parte lateral do equipamento e de não ser necessário manter o VSI-01 incógnito durante manobras submersas, considerou-se que o sistema pode ser utilizado para este fim.

O veículo submersível VSI-01 foi projetado para atingir profundidades de até 50 metros e foram efetuados ensaios de pressão no sistema de pneumáticos visando identificar possíveis problemas ligados à variação dos níveis de pressão interna sob condições de operação rápida. Isto se deve ao fato do controle ser feito mediante um sistema de válvulas de alívio que se comunica com o lado externo do equipamento. O resultado dos ensaios mostrou que o tubo de proteção das câmaras pneumáticas resiste a pressões acima de 8 kgf/cm<sup>2</sup>.

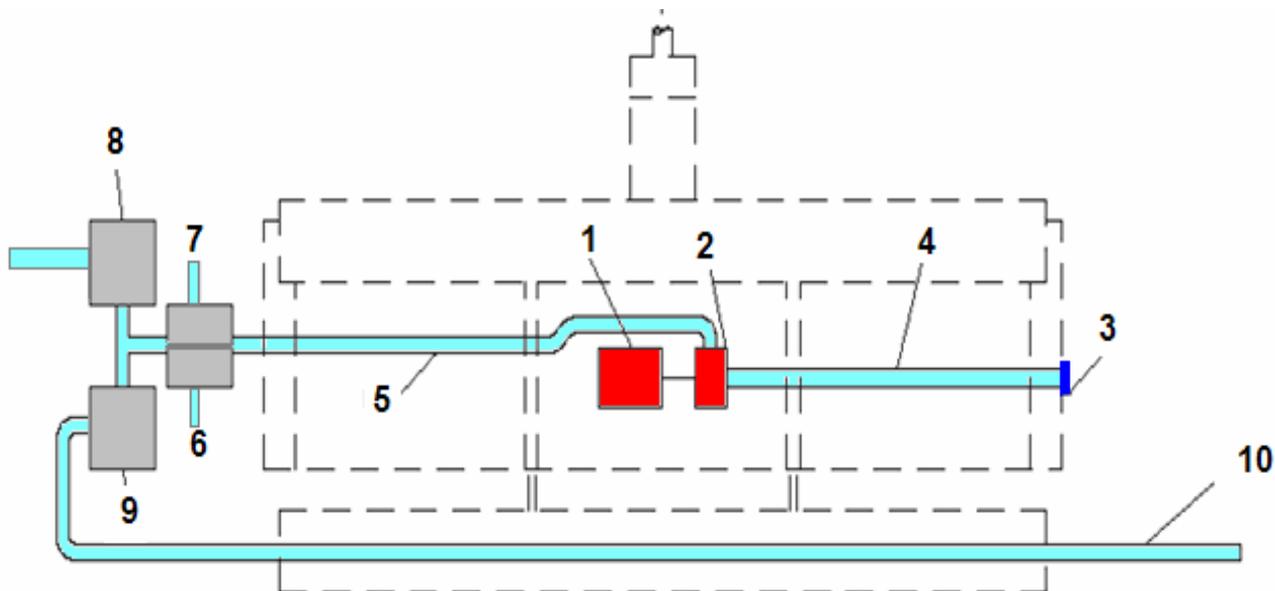
No caso em questão o ensaio realizado não foi do tipo destrutivo, tendo sido efetuado mediante a elevação da pressão interna nos pneumáticos até o limite de pressão indicado e mantido durante 24 horas. Também foram efetuados ensaios de enchimento/ esvaziamento das câmaras, correspondentes a duzentas operações de submergência / emergências consecutivas.

### 2.8.2 Subsistemas de Vetorização de Empuxo e Posicionamento do VSI-01

Por se tratar de um primeiro protótipo dentre uma série a ser projetado e implementado, o circuito de controle foi concebido de modo a garantir uma elevada robustez ao equipamento, a um custo de instalação pequeno. Assim os sistemas podem ser considerados simples em relação às disponibilidades tecnológicas atuais inseridas.

Para o controle de posição, foi utilizado um sistema constituído de conjuntos moto-bomba que fornecem o empuxo necessário para a movimentação. Assim, utilizando-se de um conjunto de quatro válvulas solenóide pode-se controlar o posicionamento do VSI-01. As válvulas solenóide são alimentadas por uma tensão CA de 127V, fornecidas pela estação de controle via cabo umbilical. Duas delas são utilizadas para controle de vazão que permitem o movimento avante / ré e duas para controle esquerda / direita, sempre movimentos

complementares. A FIG. (B.12) apresenta um desenho esquemático dos equipamentos embarcados no VSI-01.



01 - Motor-Bomba de 1/8 CV	06 - Válvula solenóide de vetorização à direita
02 - Bomba Centrífuga de 1/8 CV	07 - Válvula solenóide de vetorização à esquerda
03 - Tomada de água do sistema de propulsão	08 - Válvula solenóide de vetorização à frente
04 - Tubo de admissão de água	09 - Válvula solenóide de vetorização à ré
05 - Tubo de recalque	10 - Tubo de saída à ré

FIGURA B.12 – Desenho esquemático dos equipamentos embarcados no VSI-01.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 2007.

A FIGURA (B.13) apresenta a torre de válvulas localizada à ré do VSI-01. O sistema de direcionamento possui ainda quatro motores-bomba de 12V CC, trabalhando diagonalmente.

O circuito elétrico foi projetado de forma a se obter o menor número de cabos mantendo-se um referencial de segurança. Por ter de se utilizar mais de um tipo de alimentador de energia, os sistemas de proteção tiveram de ser projetados independentemente, permitindo maior flexibilidade ao sistema. Todos os sistemas embarcados são conectados a um console de controle remoto através de um cabo blindado e protegido, que ao mesmo tempo, provê as ligações elétricas e pneumáticas.



FIGURA B.13 – Torre de Válvulas solenóides à ré do VSI-01.

FONTE – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

### 2.8.3 Os subsistemas de Propulsão do Veículo

O sistema de propulsão foi implementado a partir da instalação de um sistema de geração de empuxo, formado por um tubo de admissão à frente, uma bomba centrífuga elétrica alimentada por uma tensão de 127V CA e um tubo de recalque à ré.

Devido ao fato do conjunto moto-bomba principal se localizar no corpo do VSI-01, o seu funcionamento provoca o aumento de temperatura no seu interior, esse aumento de temperatura, após uma hora de funcionamento contínuo, pode atingir valores de até 60°C.

Assim optou-se por instalar o conjunto moto-bomba acoplada a uma tubulação de cobre, que promovem a circulação da água em torno do motor e tem a função de refrigerar o interior do VSI-01.

O resultado obtido manteve o interior do corpo principal a uma temperatura próxima de 35°C, que é compatível com a temperatura de trabalho dos demais equipamentos embarcados. A FIGURA (B.14) apresenta uma vista do motor instalado no corpo central do VSI-01 e os dutos de circulação de água em torno do motor de propulsão principal.

Apesar da simplicidade do sistema adotado, este mostrou-se bastante eficiente, mesmo para condições de operação direcional onde a vazão circulada no interior do motor era bastante baixa. Para este caso adotou-se um sistema de sensores de temperatura que limitam o funcionamento do equipamento acima de 40°C. Este sistema, apesar de se constituir em uma

limitação operacional evita que haja danos aos demais sistemas embarcados, especialmente ao sistema de visualização de imagens.

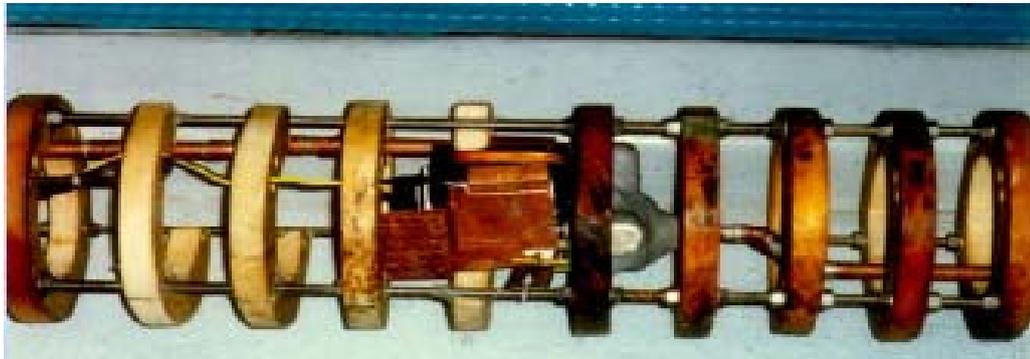


FIGURA B.14 – Vista do motor instalado no corpo central do VSI-01 e dos dutos de circulação.

FONTE – CPH – Centro de pesquisas hidráulicas da UFMG, 1998.

#### 2.8.4 Subsistemas de câmera de vídeo e de iluminação

Para visualização das estruturas submersas optou-se, neste primeiro protótipo, pela utilização de uma câmera de vídeo digital QUICKCAM da marca CONNECTIX, acoplada a um microcomputador, que terá como função reter os dados obtidos, no formato digital, permitindo uma boa capacidade de processamento de imagem.

Essa câmera foi ajustada a um receptáculo preparado para recebê-la. Devido ao fato do seu formato externo ser esférico, foi possível ajustar o ângulo da mesma com facilidade.

Junto ao apoio foi instalado um visor de acrílico, perfeitamente ajustado ao subsistema de visão e permitindo sua vedação.

O sistema é completamente controlado através de softwares que permitem, além das filmagens tradicionais, a obtenção de fotos.

O sistema de iluminação é constituído por um conjunto de três lanternas blindadas com capacidade de submergência de até 40m.

As lanternas utilizam um sistema independente de baterias, desta forma cada lanterna tem um conjunto de baterias que pode mantê-las operando durante quatro horas consecutivas, tempo necessário para uma jornada de trabalho de inspeção. A FIGURA (B.15) mostra o subsistema de iluminação e de visão montados no VSI-01.

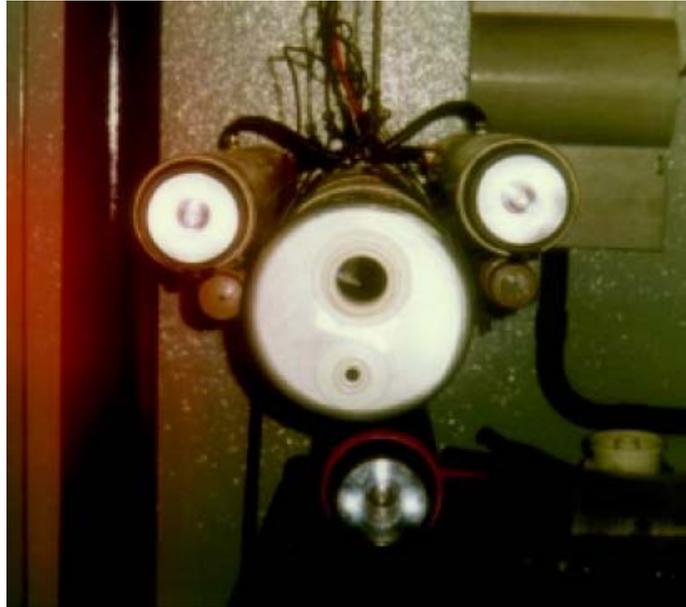


FIGURA B.15 – Detalhe dos subsistemas de iluminação e visão do VSI-01.

FONTE – CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

#### 2.8.5 Subsistemas de alimentação de energia

A alimentação de energia para os subsistemas do VSI-01 é provida externamente, através de tensões alternadas de 127 V e tensões contínuas de 12 V. Tanto o motor principal, quanto as válvulas solenóides e o computador para registro de imagens são alimentados em 127 volts alternado, provido pela rede elétrica ou por um pequeno grupo gerador a gasolina. Já os motores auxiliares de direcionamento e o compressor externo de ar recebem 12 volts em tensão contínua provido por uma bateria ou por um sistema de retificação de energia acoplado ao circuito em tensão alternada de 127 V.

O sistema de vídeo pode ser considerado auto-suficiente visto que sua alimentação é feita diretamente pelo microcomputador. Toda a alimentação elétrica do VSI-01 passa pelo console de controle remoto e pelos sistemas de proteção eletro-eletrônico. Desta forma considera-se que o veículo esteja garantido contra curtos circuitos e demais problemas oriundos de uma sobre carga do sistema.

#### 2.8.6 Subsistema do Cabo umbilical de comando

O cabo umbilical é composto por um conjunto de cabos de força e de controle necessários para a alimentação, controle e comando do VSI-01. Sua conexão com a torre de comando é realizada através de conectores atarraxáveis contendo cada um uma capacidade para 24

conexões robustas. A FIG. (B.16) mostra um detalhe dos conectores acoplados ao cabo de alimentação. Esse cabo liga o console de controle remoto ao conector da torre do submarino.

Pelo cabo de comando chegam dois conduítes de ar comprimido e o cabo do sistema de vídeo. Todos os cabos foram inseridos em um conduíte corrugado flexível e em PVC, (BASTOS, 1998). O comprimento total do cabo é de 25 m, do controle à torre o que permite testar o equipamento até o limite de profundidade proposto.

Entretanto devido ao peso do cabo, quando totalmente desenrolado, notou-se uma redução na agilidade e rapidez de manobra do VSI-01, mostrando a necessidade de se desenvolver um cabo com peso neutro, reduzindo suas dimensões internas.

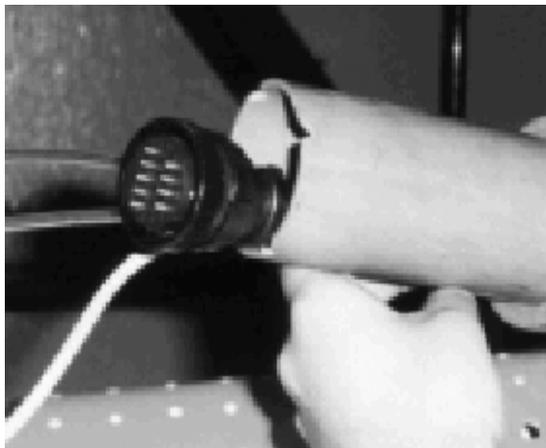


FIGURA B.16 – Detalhe do conector de ligação do cabo de comando do VSI-01.  
FONTE – CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, 1998.

## ANEXO C

### Procedimentos de ensaio experimental para determinação da força de arrasto atuante sobre o ROV

Inserir o submersível em tamanho real ou em escala reduzida no canal de água acoplado a um mecanismo de velocidade. Realizar a calibração do sistema e os ajustes necessários para o funcionamento adequado do experimento. Definir os intervalos de medição da força para cada velocidade especificada em seu ensaio e iniciar o ensaio em baixas velocidades. Realizar a medição da força exercida no corpo submerso. Repetir o ensaio para cada nova velocidade, anotando os valores da velocidade, o tempo de ensaio, a força gerada pela interação fluido-estrutura e outras observações relevantes para o ensaio.

A EQUAÇÃO (C.1.) apresenta a relação da força de arrasto ( $F$ ) com a velocidade do submersível ( $V$ ) (WHITE, 2002).

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D . V^2 . A \quad (C.1.)$$

sendo:

$F$  - força de arrasto

$\rho$  - massa específica do fluido

$C_D$  - coeficiente de arrasto formado pela soma do arrasto de atrito e arrasto de pressão

$V$  - velocidade do veículo

$A$  – adotar (área frontal, área planificada ou área molhada)

A definição da área a ser adotada na EQUAÇÃO (C.1) pode ser esclarecida com as explicações abaixo:

- A área frontal é adotada para corpos espessos e rombudos tais como, esferas, cilindros, carros, mísseis e ROV.
- A área planificada é adequada para corpos largos e achatados como asas e hidrofólios;
- A área molhada é usual para superfícies de navios e barcaças.

### **Procedimento para pesquisa e a definição dos tipos de sistemas de propulsão e vetorização de empuxo.**

1. Realizar uma revisão bibliográfica sobre os veículos submersíveis desenvolvidos levantando suas características geométricas, de propulsão e vetorização de empuxo;
2. Construir uma tabela comparativa entre os principais submersíveis encontrados, conforme apresentado no Capítulo 02;
3. Realizar o pré-dimensionamento do submersível a ser desenvolvido verificando a capacidade de carga suportada pelos propulsores a serem adotados;
4. Definir a utilização ou não de superfícies direcionais como o sistema de vetorização de empuxo do submersível;
5. Realizar os testes de propulsão propostos neste capítulo, para cada possível sistema de propulsão a ser adotado no submersível;
6. Realizar os procedimentos e testes do sistema de vetorização de empuxo definido para o submersível.

### **Procedimento e metodologia para a concepção e projeto de um ROV**

Realizar uma pesquisa e análise dos vários veículos submersíveis desenvolvidos no Brasil e no Mundo. Definir o objetivo e atividade fim do veículo a ser projetado e construído. Definir os sistemas embarcados e capacidade sensorial do submersível. Criar e apresentar, de forma esquemática, a concepção e projeto do submersível. Analisar os sistemas embarcados, suas integrações com o projeto apresentado e realizar um aprimoramento do projeto. Re-projetar o veículo, contemplando os ajustes necessários para a integração dos sistemas e construção de um protótipo em escala reduzida com a capacidade de realização de testes de flutuação. Ajustar e aprimorar o projeto e realizar a construção de um protótipo em escala real. Realizar os ensaios experimentais de cada subsistema e realizar o experimento do protótipo em canal de água, para levantar suas características hidrodinâmicas.

Realizar a análise e testes de compatibilidade de integração dos sistemas embarcados, ajustar e aprimorar o projeto até a consolidação dos testes finais e realização do teste em campo.

### **Procedimento para utilização da bancada de teste dos propulsores:**

1. Acoplar o propulsor à haste pivotante da bancada;
2. Calibrar os instrumentos de medição a serem utilizados no ensaio;

3. Acoplar à haste os instrumentos de medição necessários para a coleta de informações;
4. Definir os intervalos de medição e a escala de aumento de velocidade em função do número de medições e do tempo de cada medição;
5. Iniciar os ensaios realizando as coleta das informações de forma ascendente e descendente a fim de verificar a existência de histerese.

### **Procedimento para os testes de emersão e submersão do ROV**

A realização do teste deverá seguir as seguintes etapas:

1. Inserir o submersível no tanque, como sua flutuação é levemente positiva, isto fará com que o submersível fique flutuando na superfície da água;
2. Através do comando de submersão, realizado pelo acionamento conjunto dos quatro propulsores verticais, realizar a submersão até o limite inferior do reservatório, coletando o tempo gasto para submersão;
3. Permanecer com o submersível neste ponto por cerca de três minutos, tempo suficiente para garantir que o sistema de propulsão vertical esteja funcionando;
4. Desligar os propulsores de submersão e verificar o tempo gasto pelo submersível para chegar à superfície;
5. Realizar o acionamento e o desligamento do sistema de submersão e verificar a capacidade de manter o submersível em uma determinada profundidade, anotar a observação e os comentários.

### **Procedimentos para o teste da temperatura interna dos vasos de pressão**

1. Construir um circuito capaz de realizar as medições de temperatura interna;
2. Acoplar o circuito nos vasos de pressão mais importantes do submersível;
3. Verificar o funcionamento do circuito, através de um balizamento com um termopar calibrado;
4. Coletar as informações ao longo do funcionamento do submersível, inicialmente fora d'água, e depois submerso;
5. Realizar teste de exaustão, onde o submersível ficará um tempo longo, a ser definido pelo pesquisador, trabalhando na velocidade máxima;
6. Em caso de elevação rápida da temperatura a níveis superiores a 80°C, interromper o ensaio e verificar as variáveis de contorno desta situação;

7. Ajustar o submersível e repetir o ensaio novamente.

### **Procedimento para o teste do controle preliminar dos propulsores**

1. Definir o circuito preliminar de controle do submersível;
2. Preparar as placas de controle de forma cuidadosa e precisa;
3. Montar o circuito de controle nas placas;
4. Realizar um teste de funcionamento prévio dos circuitos componentes, antes de realizar a ligação do circuito PWM;
5. Verificar a alimentação da placa utilizando osciloscópio;
6. Desligar o circuito e acoplar a placa PWM;
7. Ligar o circuito e realizar um teste da tensão que percorre os terminais de acionamento do motor, através da placa PWM, visando a não danificação da Placa PWM;
8. Após os testes, realizar a ligação dos motores e realizar o teste de acionamento, verificando sempre as tensões presentes no PWM;
9. Analisar os ruídos presentes no circuito, caso significativos acoplar capacitores junto ao circuito com o intuito de trabalharem como filtros destes ruídos;
10. Testar o circuito novamente e repetir este procedimento até a eliminação de parte considerável do ruído;
11. Em caso de verificação de presença de tensões acima de 6V no PWM, desligar imediatamente o circuito e verificar o ponto de falha do funcionamento.

### **Procedimentos experimentais aplicados ao subsistema de iluminação do submersível**

A análise experimental do subsistema de iluminação deverá seguir o procedimento apresentado abaixo:

1. Montar o sistema de iluminação;
2. Verificar a estanqueabilidade da câmara de suporte do sistema;
3. Verificar a estanqueabilidade da mangueira de ligação com os demais vasos de pressão;
4. Realizar teste de comunicação do sistema de controle de iluminação com o subsistema de iluminação;

5. Interligar o subsistema ao subsistema de potência e controle do submersível;
6. Testar o subsistema interligado;
7. Ajustar o subsistema.

**Procedimento experimental para verificação da Autonomia do Submersível:**

1. Carregar as baterias;
2. Realizar a submersão do submersível;
3. Ligar todos os subsistemas em carga máxima;
4. Verificar o tempo gasto até ocorrer à primeira falha (funcionamento inadequado) de algum subsistema;
5. Anotar as falhas de funcionamento ocorridas em cada instante.

**Procedimento experimental para verificação da Autonomia para consumo médio dos subsistemas:**

1. Carregar as baterias;
2. Realizar a submersão do submersível;
3. Ligar de forma alternada os subsistemas em carga de trabalho;
4. Verificar o tempo gasto até ocorrer à primeira falha de algum subsistema;
5. Anotar as falhas de funcionamento ocorrida em cada instante.

**Procedimentos para verificação da Capacidade de Potência e volume ocupado:**

1. Definir os subsistemas a serem embarcados e suas potências de consumo máximo;
2. Verificar o dimensionamento dos cabos de alimentação de cada subsistema;
3. Realizar a composição da potência máxima de consumo;
4. Realizar a definição das baterias a serem utilizadas;
5. Verificar a capacidade de emissão e absorção de gases explosivos;
6. Dimensionar o volume ocupado de acordo com a definição das baterias.

A metodologia aplicada à concepção, projeto e desenvolvimento das bancadas experimentais utilizadas nos testes de laboratório de cada subsistema componente do submersível deve ser definida de acordo com a necessidade de comissionamento de cada subsistema. Dentre os subsistemas a serem desenvolvidos para o submersível deste trabalho e as necessidades requeridas por cada um destes subsistemas, encontram-se:

- Subsistema Estrutural – Verificar sua capacidade de carga, seu dimensionamento e a possibilidade de ser adaptado com facilidade;
- Subsistema de Vasos de Pressão – Verificar a capacidade de pressão suportada pelo subsistema, sua estanqueabilidade e o acondicionamento dos demais subsistemas embarcados;
- Subsistema de Propulsão – Verificar a força de propulsão e as variáveis de contorno a serem utilizadas para o desenvolvimento do sistema de controle dos propulsores;
- Subsistema de Vetorização de Empuxo – Verificar a capacidade de manobrabilidade e os graus de liberdade oferecidos pela vetorização adotada no submersível;
- Subsistema de Emerção e Flutuação – Verificar o funcionamento do sistema de controle deste subsistema, verificar a forma de acoplamento dos flutuadores no submersível, realizar teste de flutuação positiva e levantar a curva de emergimento e submersão, analisando as temperaturas internas nos vasos de pressão mais representativos;
- Subsistema do Cabo Umbilical (cabo de comunicação) - Realizar os testes de comunicação e testes de interferências do sinal de controle e de vedação;
- Subsistema de Potência – Verificar a capacidade e autonomia do subsistema em situações de utilização normal e extrema do submersível, este subsistema encontra-se embarcado no ROV;
- Subsistema de Iluminação – Verificar a autonomia e a capacidade de iluminação oferecida ao submersível;
- Subsistema de Controle – Levantar as variáveis necessárias para a construção de um sistema de controle preliminar e moderno capaz de agregar ao submersível estabilidade e segurança em suas operações, verificar o funcionamento do sistema isolado e integrado aos demais subsistemas embarcados;
- Subsistema Sensorial – Calibrar e verificar o funcionamento dos diversos sensores a serem acoplados ao submersível, levantando suas curvas características de

funcionamento e definindo a melhor forma de realizar, quando necessário à integração sensorial;

- Subsistema de Visão – Calibrar e verificar o funcionamento do sistema de visão, sua comunicação com a Central de Controle, a qualidade da imagem, a capacidade de envio a longa distância sem perda ou interferências e sua integração com os demais subsistemas.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)