UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCIANO PIRES AOKI

Magnetohidrodinâmica aplicada a um veículo de densidade relativa unitária

São Carlos – SP
2017

LUCIANO PIRES AOKI

Magnetohidrodinâmica aplicada a um veículo de densidade relativa unitária

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Térmica e fluidos

Orientador: Prof. Dr. Harry Edmar Schulz

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA VERSÃO CORRIGIDA. A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE DISPONÍVEL JUNTO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA EESC – USP.

São Carlos – SP

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Aoki, Luciano Pires

A638m Magnetohidrodinâmica aplicada a um veículo de densidade relativa unitária / Luciano Pires Aoki; orientador Harry Edmar Schulz. São Carlos, 2017.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Térmica e Fluídos -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. propulsão eletromagnética. 2. magnetohidrodinâmica. 3. MHD. 4. ROV. 5. forças de Lorentz I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **LUCIANO PIRES AOKI.**

Título da tese: "Magnetohidrodinâmica aplicada a um veículo de densidade relativa unitária".

Data da defesa: 22/02/2017.

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Titular **FernandoMartini Catalano** **(Orientador designado)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Profa. Dra. **Zilda de Castro Silveira** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	Aprovado
Prof. Dr. **Ulysses Rondina Duarte** (Instituto Federal de Minas Gerais/IFMG)	Aprovado
Prof. Dr. **Dawson Tadeu Izola** (Instituto Federal de São Paulo/IFSP-São Carlos)	APROVADO
Prof. Dr. **Osvaldo Missiato** (Academia da Força Aérea/AFA)	Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenheira Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Ao professor e amigo, Dr. Michael George Maunsell (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Harry Edmar Schulz por incentivar, apoiar e orientar essa pesquisa, pelos ensinamentos valiosos passados, pela seriedade com que ele trabalha e respeita as pessoas, pela sua sinceridade, pela amizade e principalmente pela paciência que teve comigo ao longo desse projeto.

Ao professor Dr. Dawson Tadeu Izola pelo apoio, amizade e atenção dispensados durante toda minha carreira acadêmica, desde meu mestrado até o final desse doutorado.

Aos técnicos, Fabio Gallo e José Cláudio (Claudinho) do departamento de aeronáutica e Roberto Bérgamo do departamento de hidráulica e saneamento pela amizade, materiais e mão de obra dispensados nesse tempo.

Ao professor Dr. Osvaldo Missiato, por apoiar meu projeto desde o mestrado, fornecendo conhecimentos e dicas essenciais para o trabalho.

Ao professor Dr. Hernan Ceron Muñoz, pelo apoio e interesse pela magnetohidrodinâmica e pelas dicas importantes dadas no meu mestrado.

Aos demais funcionários do Departamento de hidráulica e mecânica (em especial para a Rose, Ana Paula e Iara).

A todos meus amigos (tanto aqueles que vem me acompanhando desde o começo quanto aos que me conheceram recentemente e já se tornaram “irmãos”), pelo apoio dispensando nos momentos difíceis, pelos festejos organizados e pelas viagens.

A Capes, pelo apoio financeiro concedido em forma de bolsa de estudo.

A meu pai, Sooske Aoki, pelo apoio, compreensão e confiança depositados em mim desde o começo de minha jornada, e pelo seu caráter e valor, que serviu e sempre servirá como um exemplo a ser seguido.

E a todos que me ajudaram ou torceram por mim, direta ou indiretamente, gostaria de registrar meus mais sinceros agradecimentos.

“Acredite na justiça, mas não a que emana dos demais e sim na tua própria”

Bushido - Código Samurai

SUMÁRIO

RESUMO.....17
ABSTRACT.....19
LISTA DE FIGURAS.....21
LISTA DE TABELAS.....31
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES.....35
LISTA DE UNIDADES (S.I).....35
CARACTERES GREGOS.....38
1. MOTIVAÇÃO.....39
1.1. Justificativa para o desenvolvimento de um veículo MHD.....39
1.2. Divisão do trabalho.....43
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA PROPULSÃO MHD.....45
2.1. O que é a magnetohidrodinâmica?.....45
2.2. Breve história da MHD.....46
2.3. Veículo subaquático remotamente controlado.....48
2.4. Propulsão magnetohidrodinâmica.....49
2.4.1. Primeiro estágio (1961 – 1970).....50
2.4.2. Segundo estágio (1970 – 1985).....56
2.4.3. Terceiro estágio (1985 – dias atuais).....61
2.4.4. Quarto estágio (2000 – dias atuais).....77
3. MODELO ANALÍTICO DA MAGNETOHIDRODINÂMICA COM SUAS BASES FÍSICAS.....81
3.1. Introdução.....81
3.2. A Física de Plasmas.....81
3.2.1. Teoria do fluido único: MHD.....86
3.2.2. Equação simplificada MHD.....92
3.3. Aplicação nos propulsores MHD.....94
3.4. Eletrólise.....101
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....108
Propulsores.....109

- **Eletrodos** 111

4.1. Primeira fase 120

4.2. Segunda fase 136

4.3. Terceira fase 141

4.4. Quarta fase 144

4.5. Quinta fase 149

4.6. Sexta fase 152

5. RESULTADOS 161

5.1. Primeira fase 161

5.1.2. Configuração dos propulsores 161

5.2. Segunda fase 175

5.3. Terceira fase 193

5.4. Quarta fase 194

5.5. Quinta fase 196

5.5.1. Eletrodos de 15mm por 40 mm. Condutividade 7,785 S/m 197

5.5.2. Eletrodos 15mm por 40mm. Condutividade 7,91 S/m 223

5.5.3. Eletrodos de 15mm por 40mm condutividade 7,52 S/m 241

5.5.4. Eletrodos 20mm por 20mm. Condutividade 7,91 S/m 248

5.5.5. Teste com eletrodos de grafite 256

5.6. Sexta fase 269

6. CONCLUSÃO 280

6.1.1. Primeira fase 280

6.1.2. Segunda fase 280

6.1.3. Terceira fase 281

6.1.4 Quarta fase 282

6.1.5 Quinta fase 283

6.1.6 Sexta fase 286

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 290

APÊNDICE A 300

A.1 Procedimentos de segurança 300

A.1.2. Procedimentos de segurança para trabalhos com baixa tensão (BT) e extra baixa tensões (EBT) 300

APÊNDICE B 309

B.1. Equação de Bernoulli 309
APÊNDICE C 312
C.1. Medidas e erros 312
APÊNDICE D 314
D.1 Regressão linear, intervalo de confiança e intervalo de predição 314
APÊNDICE E 317
E.1. Pêndulo simples 317
APÊNDICE F 319
F.1. CÁLCULO DA CONSTANTE DA MOLA 319

RESUMO

AOKI, L.P. Magnetohidrodinâmica aplicada a um veículo de densidade relativa unitária. 2016. Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2016.

O projeto destinou-se à pesquisa e produção experimental de um modelo de veículo aquático movido a propulsão eletromagnética, vinculando o projeto, portanto, à magnetohidrodinâmica (MHD). O veículo enquadrou-se na categoria de um ROV (remotely operated vehicle), ou veículo operado remotamente, pois suas instruções de propulsão, fornecidas pela fonte de tensão variável (0 V – 80 V), encontraram-se fora do ambiente de atuação do veículo. Os propulsores foram conectados a eletrodos de cobre com dimensões de 0,15 cm por 0,40 cm, por onde se faz passar uma corrente contínua que interagiu com um campo magnético uniforme de 0,4 T, produzindo forças eletromagnéticas ou forças de Lorentz, que impulsionam o fluido em volta e consequentemente o veículo. O movimento almejado foi o deslocamento vertical, uma vez que tal comportamento não foi encontrado em literatura. Juntamente com seu movimento, dados de velocidade e força propulsiva foram obtidos, chegando-se a valores de 1 m/s e 0,4 N respectivamente. Analisando os propulsores, obteve-se resultados interessantes quanto ao desempenho, tensão de trabalho, potência produzida pela fonte e potência consumida pelos propulsores indicando que os mesmos perdem eficiência para tensões muito altas.

Palavras – chave: propulsão eletromagnética; magnetohidrodinâmica; MHD; ROV; forças de Lorentz.

ABSTRACT

AOKI, L.P. Magnetohydrodynamics applied to a vehicle of unitary relative density. 2016. PhD - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, Brazil, 2016.

The Project was intended for research and experimentation of a watercraft model powered by electromagnetic propulsion, linking the project, therefore, to the magnetohydrodynamics (MHD). The vehicle falls into the category of Remotely operated vehicle (ROV) since the provided voltage source; a variable direct current DC 0V – 80V) is outside the vehicle's operating environment. The thruster was connected to the copper electrodes with dimensions of 0,15 cm and 0,40 cm, where a direct current interacted with the 0,4 T uniform magnetic field, creating electromagnetic forces or Lorentz forces, moving the fluid and the vehicle. The desired movement was vertical, since such behavior was not found in the literature. Within the movement, velocity and propulsion data were collected, 1 m/s and 0,4 N respectively. Analyzing the thrusters, interesting results were obtained with relation to efficiency, working voltage, output voltage source power and thruster´s power comsuption showing loss efficiencies for high voltages.

Keywords: electromagnetic propulsion; magnetohydrodynamic; MHD; ROV; Lorentz forces.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Unidade prática de salinidade ou PSU dos oceanos 40
Figura 2.1 - Princípio de funcionamento do sistema eletromagnético 50
Figura 2.2 - Dois sistemas foram considerados: a) campo magnético livre e b) confinado em um duto 51
Figura 2.3 - Propulsor MHD.....52
Figura 2.4 - Corte axial do sistema eletromagnético 52
Figura 2.5 - Sistema bi-cilíncdrico 53
Figura 2.6 - Modelo EMS-1 com as bobinas condutoras convencionais 53
Figura 2.7 - Sistema bi-cilíndrico com supercondutores.....54
Figura 2.8 - Métodos alternativos propostos 55
Figura 2.9 - Aparato MHD proposto na pate*nte*.....56
Figura 2.10 - Propulsor eletromagnético instalado no modelo SEMD-1.....57
Figura 2.11 - Propulsor do SEMD-1 submerso.....57
Figura 2.12 - Força propulsiva em função da intensidade do campo magnético.....58
Figura 2.13 - Força de propulsão e corrente aplicada em função do tempo de resposta 58
Figura 2.14 - Modelo ST-500.....59
Figura 2.15 - Força propulsiva em função da corrente demandada pela água do mar 59
Figura 2.16 - Yamato navegando na baía de Kobe.....62
Figura 2.17 - Conceito básico de funcionamento de um propulsor MHD 63
Figura 2.18 - Visão do conjunto de propulsores.....63
Figura 2.19 - Corte transversal do navio, mostrando os propulsores.....64
Figura 2.20 - Velocidade do Yamato em função da densidade de fluxo magnético..65
Figura 2.21 - Dois sistemas de propulsão propostos. O primeiro propulsor seria de formato anular e o segundo retangular 66
Figura 2.22 - Formação de bolhas no experimento.....67
Figura 2.23 - Variação da razão de área e sua eficiência 68
Figura 2.24 - Modelos de propulsores analisados.....69
Figura 2.25 - Secção do propulsor 72

Figura 2.26 - Força propulsiva em relação a corrente usada..... 73
Figura 2.27 - Sistema helicoidal de propulsão..... 73
Figura 2.28 - Arranjo experimental 74
Figura 2.29 - Intensidade do campo magnético. Em seu pico o valor atingiu 15 Teslas..... 74
Figura 2.30 - Configuração geral do canal helicoidal..... 75
Figura 2.31 - Principio de operação do propulsor MHD..... 75
Figura 2.32 - Eficiência eletromagnética e propulsiva 76
Figura 2.33 - Cápsula autônoma movida a propulsão MHD os números de interesse são o 19, 20, 30 e 32, uma vez que eles estão relacionados ao movimento MHD... 76
Figura 2.34 – Mini-modelo de veículo aquático de *superfície*..... 79
Figura 2.35 - Esquema de montagem do propulsor AC..... 79
Figura 3.1 - Diagrama do sistema propulsivo 94
Figura 3.2 – Volume de controle aplicado ao propulsor..... 98
Figura 3.3 - Esquema simplificado da eletrólise em cloreto de sódio e a liberação dos gases cloro e hidrogênio..... 103
Figura 3.4 - Eletrodos de cobre depois de um experimento 106
Figura 3.5 - Desgaste do suporte de alumínio..... 106
Figura 3.6 - Resultados da eletrólise do cobre em um mesmo experimento. Na esquerda óxido de cobre, resultante de temperaturas altas e na direita cloreto de cobre resultante de temperaturas mais baixas 107
Figura 4.1 - Área do aquário com 70 cm de lado..... 109
Figura 4.2 - Altura de 80 cm e reforços de alumínio..... 109
Figura 4.3 - Túnel MHD com sua resultante eletromagnética..... 109
Figura 4.4 - Eletrodos utilizados 113
Figura 4.5 - Terminal tipo anel..... 114
Figura 4.6 - Contatos do tipo jacaré..... 114
Figura 4.7 - Contato por conector..... 115
Figura 4.8 - Contato por soldagem 115
Figura 4.9 - Contato para eletrodos de grafite de máquinas elétricas. A) A “escova de carvão” original, com o fio inserido no “carvão” (grafite); B) A execução de dois furos para inserir mais dois fios; C) Os fios já inseridos e enrolados, aumentando a área de contato entre os fios e o grafite; D) A união de todos os fios que alimentam este eletrodo; E) Revestimento plástico de secagem rápida sobre todo o conjunto; F)

Simples corte do plástico expondo apenas a superfície de contato com a solução salina. (Esquema gerado na linha de pesquisa do orientador e cedido para compor o presente texto de tese) 116
Figura 4.10 - Pasta para solda BEST ® 117
Figura 4.11 - Limpeza dos eletrodos. Eletrodo da esquerda sem lixar e eletrodo da direita parcialmente lixado 118
Figura 4.12 - Isolação do eletrodo 118
Figura 4.13 - Isolação com resina epóxi 119
Figura 4.14 - Primeiros esboços da geometria e propulsores 120
Figura 4.15 - Geometria hexagonal proposta 121
Figura 4.16 - Formato esférico 121
Figura 4.17 - Formato charuto 122
Figura 4.18 - Dimensão do propulsor e sua ligação com a fonte de tensão 124
Figura 4.19 - Disposição dos eletrodos e imãs no propulsor em uma segunda configuração 125
Figura 4.20 - Fonte de alimentação de corrente contínua Maxtron®. 13,8 Volts e 100 Ampères 125
Figura 4.21 - Verificação da tensão entre os eletrodos 126
Figura 4.22 - Verificação da tensão entre os eletrodos 127
Figura 4.23 - Esquema do experimento com partículas e movimento aproximado delas na cuba 128
Figura 4.24 - Testes iniciais do propulsor 128
Figura 4.25 - Câmera utilizada para gravação dos experimentos. Sony Cyber-shot DSC - WX 300 129
Figura 4.26 - Primeiro modelo de água viva, executado em madeira 130
Figura 4.27 - Esboço em formato hexagonal com todos os componentes dos propulsores 131
Figura 4.28 - Modelo real do motor da segunda água viva 131
Figura 4.29 - configuração da água viva sem o corpo vazio 132
Figura 4.30 - Distribuição dos fios para os eletrodos 133
Figura 4.31 - Esquema simplificado do circuito 133
Figura 4.32 - Variação da densidade de fluxo magnético com o imã disposto horizontalmente 134

Figura 4.33 – Gaussímetro FW Bell 4048 acima e variação da densidade de fluxo magnético com o imã disposto verticalmente abaixo 135
Figura 4.34 - Campo magnético dos imãs dentro do propulsor 135
Figura 4.35 - Fonte de alimentação Powerbrás 1830 com tensão e correntes ajustáveis 137
Figura 4.36 - Primeiro propulsor utilizado 138
Figura 4.37 - Condutivímetro Digimed DM-32 138
Figura 4.38 - Esquema de montagem do conjunto pitot + manômetro 139
Figura 4.39 - Posicionamento central do Pitot visão frontal e lateral 140
Figura 4.40 - Termômetro infravermelho ADD7830 141
Figura 4.41 - Esquema de montagem da guia e propulsor com a vista lateral e vista de cima, respectivamente 142
Figura 4.42 - Vista de cima do veículo composto de três boias 142
Figura 4.43 - Modelo real dos três propulsores com a base e a guia 143
Figura 4.44 - Esquema de montagem do pendulo e modelo real 144
Figura 4.45 - Esquema de montagem da guia dupla 145
Figura 4.46 – Modelo real de guia dupla 145
Figura 4.47 - Trilho telescópico usado de guia para o propulsor 146
Figura 4.48 – Esquema de montagem da guia dupla 146
Figura 4.49 - Base e guia utilizando trilhos telescópicos. O propulsor é mostrado no círculo vermelho preso a chapa 147
Figura 4.50 - Esquema do pêndulo 148
Figura 4.51 - Técnica utilizada para medição do movimento pendular em um dos experimentos 148
Figura 4.52 - Dois tipos de propulsores utilizados. Um com material PVC e outro acrílico. O primeiro modelo possuía as mesmas dimensões do modelo final utilizado, e o segundo 10 mm de altura 149
Figura 4.53 - Esquema do novo propulsor A 150
Figura 4.54 - Manômetro digital utilizado no experimento 151
Figura 4.55 - Esquema de montagem com manômetro digital 151
Figura 4.56 - Medidas do propulsor sendo tomadas 152
Figura 4.57 – Uma configuração para o uso de rolamentos. Visão de cima e lateral respectivamente 153
Figura 4.58 - Esquema de montagem do propulsor e guia 154

Figura 4.59 - Conjunto de rolamentos para a guia e a guia desenvolvido por Schulz (contexto da orientação do presente estudo). No alto, à esquerda: a visão do sistema deslizante pelo lado de fora. No alto, à direita: a visão do sistema deslizante pelo lado de dentro. Vê-se os quatro conjuntos de quatro rodas, cada qual destinado a uma superfície plana da estrutura guia. Embaixo: A estrutura guia em torno da qual o sistema deslizante se desloca. Nota-se que são quatro superfícies planas cuja qualidade está associada ao controle de qualidade das peças Lego® 155
Figura 4.60 – Propulsor, guia e rolamentos montados com peças de Lego. No alto a esquerda: propulsores. No alto a direita: propulsores ligados a haste. A baixo na esquerda: Vista lateral do sistema de rolamentos com a guia entre eles. A baixo na direita: vista de cima do conjunto de rolamentos 156
Figura 4.61 - Sistema de rolamento e guia em funcionamento 157
Figura 4.62 - Modelo para testes final 159
Figura 4.63 - Modelo com cubas externas para cada polo. O líquido condutor foi água salgada 159
Figura 4.64 - Esquema simplificado do conjunto e do dinamômetro e o conjunto real 160
Figura 5.1 - Configuração dos eletrodos a 6 cm de distância um do outro 162
Figura 5.2 - Configuração dos eletrodos a 3 cm de distância 164
Figura 5.3 - Configuração 3 com d=6cm 165
Figura 5.4 - Eletrodos de cobre dispostos a 3 cm de distância 166
Figura 5.5 - Velocidades das partículas para a configuração 1 168
Figura 5.6 - Velocidades das partículas para a configuração 1b a menos do valor distante da população 169
Figura 5.7 - Velocidades das partículas para a configuração 2 169
Figura 5.8 - Velocidades das partículas para a configuração 3 170
Figura 5.9 - Velocidades das partículas para a configuração 4 171
Figura 5.10 - Os pontos médios de todos os experimentos dispostos de acordo com a distância entre eletrodos e de acordo com o material usado 172
Figura 5.11 - Parâmetros propulsivos em função da velocidade 173
Figura 5.12 - Variação da coluna de água em função da tensão das tabelas 7, 8 e 9 177
Figura 5.13 - Variação da velocidade em função da tensão das tabelas 7, 8 e 9 ... 178

Figura 5.14 - Comparação dos valores médios da corrente versus a tensão imposta para os experimentos de 4 a 10. A reta de regressão apresenta um valor de R2 de 0,84 se a origem é considerada no cálculo da regressão. Sem a origem, o valor de R2 é de 0,43. Note que não foram inseridas barras de erros, pois o valor seria 100 vezes menor que a medida, tornando imperceptível a leitura..... 181
Figura 5.15 - Os mesmos experimentos Figura 5.14, agora relacionando velocidades e tensões. A regressão em linha tracejada foi feita para todos os pontos (com origem) tendo R2=0,84. A regressão em linha cheia vermelha foi feita sem considerar os pontos sobre a origem..... 182
Figura 5.16 - Os mesmos experimentos da figura 5.14, agora relacionando velocidades e tensões e suas barras de erros..... 182
Figura 5.17 - - Comparação da variação da coluna de água e da velocidade para os experimentos de 4 a 9 183
Figura 5.18 - Experimento 11. Variação da leitura da coluna de água inclinada em variando a tensão de 10 a 70 Volts. Ajustou-se um polinômio de segundo grau.... 185
Figura 5.19 - Tendência observada para a evolução da altura média (na vertical) da coluna de água para os experimentos deste item. Observa-se uma tendência coerente para os diferentes experimentos. Mesmo aqueles que estão “fora” da nuvem envoltória mostram crescimento com declividade similar à da nuvem. Os experimentos sobre a linha amarela da figura 5.15 são aqueles indicados em amarela “fora” da nuvem na presente figura..... 186
Figura 5.20 - Tendência observada para a evolução da altura média (na vertical) da coluna de água para os experimentos deste item e seus erros..... 186
Figura 5.21 - Experimento 11, variando de 20 a 70 Volts em função da velocidade. Uma tendência linear pode ser sugerida para essa faixa de tensões..... 187
Figura 5.22 - A velocidade medida em função da tensão aplicada, para os dados dos experimentos discriminados em conjunto com os dados do experimento contínuo. Aqui o ajuste do melhor expoente levou à equação apresentada, com R2=0,96. Os pontos amarelos foram desconsiderados neste ajuste..... 188
Figura 5.23 - A velocidade medida em função da tensão aplicada, para os dados dos experimentos discriminados em conjunto com os dados do experimento contínuo e suas barras de erros..... 188
Figura 5.24 - Comportamento da corrente em função da tensão do experimento 11 189

Figura 5.25 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para o experimento 11 190
Figura 5.26 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para o experimento 11 191
Figura 5.27 - Comparação da potência térmica com a potência da fonte 192
Figura 5.28 - Força propulsiva máxima e estabilizada 196
Figura 5.29 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 1,2 e 3 205
Figura 5.30 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 1 206
Figura 5.31 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimentos 1, 2 e 3 207
Figura 5.32 – Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 1, 2 e 3 208
Figura 5.33 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 4,5 e 6 213
Figura 5.34 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 4 214
Figura 5.35 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimentos 4, 5 e 6 215
Figura 5.36 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 4, 5 e 6 216
Figura 5.37 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 7 219
Figura 5.38 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 7 220
Figura 5.39 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimento 7 221
Figura 5.40 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimento 7 222
Figura 5.41 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 8,9 e 10 229
Figura 5.42 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 8 230
Figura 5.43 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimento 8, 9 e 10 231
Figura 5.44 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 8, 9 e 10 232

Figura 5.45 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 11 e 12 237
Figura 5.46 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 11 238
Figura 5.47 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimento 11 e 12..... 239
Figura 5.48 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 11 e 12..... 240
Figura 5.49 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 13, 14 e 15 245
Figura 5.50 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 13 246
Figura 5.51 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimento 13, 14 e 15..... 247
Figura 5.52 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 13, 14 e 15..... 248
Figura 5.53 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 16, 17 e 18 253
Figura 5.54 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 16 254
Figura 5.55 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimento 16, 17 e 18..... 255
Figura 5.56 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 16, 17 e 18..... 256
Figura 5.57 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para o experimento 19 com grafite 258
Figura 5.58 - - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 19 259
Figura 5.59 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para o experimento 19 260
Figura 5.60 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para o experimento 19 261
Figura 5.61 - Evolução da pressão para com a tensão aplicada ao propulsor compacto de grafite. Nota-se o comportamento basicamente linear até uma tensão

entre 60 e 70 Volts. A primeira figura mostra todos os pontos e seus erros. A segunda figura a média deles para cada variação de tensão 263
Figura 5.62 - Evolução da velocidade para com a tensão aplicada ao propulsor compacto de grafite. Mais uma vez observa-se o comportamento linear até uma tensão entre 60 e 70 Volts. A primeira figura mostra todos os pontos e o erro (que é muito baixo por isso não aparece no gráfico) e a segunda figura mostra a média dos pontos 263
Figura 5.63 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para o experimento 20. 265
Figura 5.64 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para o experimento 20 266
Figura 5.65 - Comparação da força propulsiva e da força de Lorentz para o experimento 1.....268
Figura 5.66 - Comparação da força propulsiva e da força de Lorentz para o experimento 20.....268
Figura 5.67 - Pontos em que o conjunto se estabilizou, baseado no ponto (zero). Movimento descendente e ascendente. 271
Figura 5.68 - Força aplicada à mola devido ao movimento descendente e ascendente respectivamente.....273
Figura 5.69 - Dimensões das peças utilizadas no sistema. 274
Figura 5.70 – Movimento ascendente do conjunto. Cada linha vermelha representa uma distância aproximada de 0,25 cm. 275
Figura 5.71 - Movimento descendente do conjunto. Cada linha vermelha representa uma distância aproximada de 0,25 cm 275
Figura 5.72 - Movimento descendente do conjunto, segunda tomada.. Cada linha vermelha representa uma distância aproximada de 0,25 cm 276
Figura 5.73 - Velocidade e força do propulsor (seta azul escura) e do conjunto inteiro (seta vermelha) dos movimentos ascendente e descendentes.....279
Figura 6.1 - Atrito gerado entra a guia e o veículo 282

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Salinidade da água baseada nos sais dissolvidos 40
Tabela 2.1 - Potencial elétrico, entre água do mar, solução salina e concentrada (DOSS e SIKES, 1992, tradução livre e adaptada) 67
Tabela 2.2 - Contagem de bolhas durante o e no final do experimento (DOSS e SIKES, 1992, tradução livre e adaptada) 68
Tabela 2.3 - Comparação dos 3 modelos de propulsão (AKAGI et al, 1994, tradução livre) 70
Tabela 2.4 - Características do Yamato - 1 (TAKEZAWA et al, 1995, tradução livre e adaptada) 71
Tabela 2.5 - Características do imã supercondutor (TAKEZAWA et al, 1995, tradução livre e adaptada).....72
Tabela 4.1 - Características dos materiais analisados pelo autor 112
Tabela 5.1 - Dados para a configuração 1 do propulsor, destacando a velocidade 163
Tabela 5.2 - Dados para a configuração 2 do propulsor, destacando a velocidade 164
Tabela 5.3 - Dados para a configuração 3 do propulsor com ênfase nas velocidades 165
Tabela 5.4 - Dados para a configuração 4 do propulsor com ênfase nas velocidades 166
Tabela 5.5 – Experimento 1: 40 VOLTS. Condutividade = 6 S/m. Ti = 24˚C Tf=27˚C 176
Tabela 5.6 – Experimento 2: 40 VOLTS. Condutividade 6 S/m. Ti = 25˚C Tf=33,7˚C 177
Tabela 5.7 – Experimento 3: 30 VOLTS. Condutividade 6S/m Ti= 24,3˚C Tf=25,6˚C 177
Tabela 5.8 – Experimento 4: 30 VOLTS. Condutividade 6,5 - 6,9 S/m. Ti = 24,3˚C Tf=35,2˚C 179
Tabela 5.9 – Experimento 5: 45 VOLTS. Condutividade 6,3 S/m. Ti = 24,1˚C Tf=45˚C 179
Tabela 5.10 – Experimento 6: 50 VOLTS. Condutividade 6,1 S/m. Ti = 23,9˚C Tf=32,9˚C 179

Tabela 5.11 – Experimento 7: 50 VOLTS. Condutividade 6,5 S/m. Ti = 24,9˚C Tf=34˚C..... 180
Tabela 5.12 – Experimento 8 60 VOLTS. Condutividade 6,7 S/m. Ti = 24,9˚C Tf=35,5˚C..... 180
Tabela 5.13 – Experimento 9: 60 VOLTS. Condutividade 6,7 S/m. Ti = 24˚C Tf=47,2˚C..... 180
Tabela 5.14 - Experimento 10: 60 VOLTS. Condutividade 6,7 S/m. Ti = 23,9˚C Tf=37,4˚C. Equipamento com inclinação maior. 210 mm ou 8,34 graus 181
Tabela 5.15 - Experimento 11, variando de 10 a 70 Volts. Condutividade 7,3 S/m. Ti = 24,1˚C Tf=43,4˚C. Equipamento com inclinação maior. 210 mm ou 8.34 graus.. 184
Tabela 5.16 - Calor gerado nos 11 experimentos..... 192
Tabela 5.17 - Dados do deslocamento do pêndulo para todos os experimentos ... 195
Tabela 5.18 - Variando tensão de 10 a 80 Volts (Ti = 24,2 ˚C Tf=37,3)˚C. Valor estabilizado após o experimento: 8 Pa. Valor inicial de 5-8 Pa (água limpa sem resíduos da eletrólise). Experimento 1 199
Tabela 5.19 - Variando tensão de 10 a 80 Volts (Ti =35 ˚C Tf=45,3)˚C. Estabilizou em 6 Pa. Valor inicial de 6-8 Pa (água suja). Continuação do experimento 1. Experimento 2..... 201
Tabela 5.20 - Variando tensão de 10 a 80 Volts (Ti = 39,6 ˚C Tf=51,6)˚C. Estabilizou em 15 Pa. Valor inicial de 5 Pa (água suja). Continuação do Experimento 2. Experimento 3. Desgaste total dos eletrodos 203
Tabela 5.21 - Variando tensão de 10 a 70 Volts e novamente10 (Ti = 25,3 ˚C Tf=46,1)˚C. Estabilizou em -6 Pa. Valor inicial de 2 Pa (água limpa). Experimento 4 209
Tabela 5.22 - Variando tensão de 10 a 50 Volts (Ti = 39,6 ˚C Tf=41,8)˚C. Estabilizou em 16 Pa. Valor inicial de -3 Pa (água suja). Continuação do experimento 4. Experimento 5..... 211
Tabela 5.23 - Variando tensão de 10 a 50 Volts (Ti = 39,7 ˚C Tf=41,1)˚C. Estabilizou em 10 Pa. Valor inicial de 1 Pa (água suja). Continuação Experimento 5. Experimento 6. Desgaste total dos eletrodos 212
Tabela 5.24 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10 (Ti = 24,7 ˚C Tf=33,5)˚C. Estabilizou em -6 Pa. Valor inicial de -2 Pa (água limpa). Experimento 7 217

Tabela 5.25 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente10 (Ti = 25,5 ˚C Tf=30,7)˚C. Estabilizou em 1 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água limpa). Experimento 8 223
Tabela 5.26 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 novamente (Ti = 29,6 ˚C Tf=34,4)˚C. Estabilizou em 1 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água suja). Continuação do experimento 8. Experimento 9.....225
Tabela 5.27 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10volts (Ti = 33,1 ˚C Tf=37,7)˚C. Estabilizou em -3 Pa. Valor inicial de 1 Pa (água suja). Continuação do experimento 9. E Experimento 10. Desgaste total dos eletrodos 227
Tabela 5.28 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10 (Ti = 27,9 ˚C Tf=32,3)˚C. Estabilizou em -1 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água limpa). Experimento 11 233
Tabela 5.29 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10 (Ti = 31,5 ˚C Tf=37,5)˚C. Estabilizou em -6 Pa. Valor inicial de -1 Pa (água suja).continuação do experimento11. Experimento 12.....235
Tabela 5.30 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 volts (Ti = 24,1 ˚C Tf=29,4)˚C. Estabilizou em 36 Pa. Valor inicial de -4 Pa (água limpa). Experimento13 241
Tabela 5.31 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 volts (Ti =28,9 ˚C Tf=35,2˚C). Estabilizou em -3 Pa. Valor inicial de -2 Pa (água suja). Continuação do experimento13. Experimento14.....243
Tabela 5.32 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 (Ti = 34,8 ˚C Tf=38,7)˚C. Estabilizou em -1 Pa. Valor inicial de -1 Pa (água suja). Continuação do experimento14. Experimento15. Desgaste total dos eletrodos 244
Tabela 5.33 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 volts (Ti = 25,4 ˚C Tf=31,8)˚C. Estabilizou em 29 Pa. Valor inicial de 5 Pa (água limpa). Experimento16 249
Tabela 5.34 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 volts (Ti =31,4 ˚C Tf=37˚C). Estabilizou em 18 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água suja). Continuação do experimento16. Experimento17.....251
Tabela 5.35 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 (Ti = 36,2 ˚C Tf=40)˚C. Estabilizou em 9 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água suja). Continuação do experimento 17. Experimento18. Desgaste total dos eletrodos 252
Tabela 5.36 - Condutividade da água 7,563 S/m. Área do propulsor aproximadamente 22mm x 15 mm. Utilizando eletrodo de grafite em formato de disco

com diâmetro de 9,95 mm. Ti =24,9 ˚C Tf=25,2˚C. Valor inicial 2 Pa. Estabilizou em 8 Pa. Experimento 19 257
Tabela 5.37 – Propulsor compacto de grafite 262
Tabela 5.38 - Ponto de equilíbrio do conjunto. O valor inicial foi de 4,5 cm..... 270
Tabela 5.39 - Deslocamento do conjunto e a força exercida na mola no movimento descendente 272
Tabela 5.40 - Deslocamento do conjunto e a força exercida na mola no movimento ascendente 272
Tabela 5.41 - Dados dos movimentos ascendentes e descendentes..... 277
Tabela 5.42 - Força resistiva dos fios elétricos para os deslocamentos..... 278

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

LISTA DE UNIDADES (S.I)

[A]	Ampère	[A]
[C]	Coulomb	[s·A]
[°C]	Celsius	[°C]= [K]-273,15
[J]	Joule	$[kg \cdot m^{2} \cdot s^{-2}]$
[kg]	quilograma	[kg]
[m]	metro	[m]
[N]	Newton	$[kg \cdot m \cdot s^{-2}]$
[Pa]	Pascal	$[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}]$
[rad]	radianos	$[m \cdot m^{-1}]$
[s]	segundo	[s]
[S]	Siemens	$[A^{2} \cdot s^{3} \cdot kg^{-1} \cdot m^{-3}]$
[T]	Tesla	$[kg \cdot A^{-1} \cdot s^{-2}]$
[V]	Volt	$[kg \cdot m^{2} \cdot A^{-1} \cdot s^{-3}]$
[W]	Watt	$[kg \cdot m^{2} \cdot s^{-3}]$

LISTA DE SÍMBOLOS

a_v	aceleração do veículo	$[m \cdot s^{-2}]$
A_0	área do propulsor	$[m^{2}]$
A_1	área de um tubo genérico	$[m^{2}]$
A_2	área de um tubo genérico	$[m^{2}]$
A_e	área do eletrodo	$[m^{2}]$
B	densidade de fluxo magnético	[T]
c_a	calor específico sensível da água	$[kcal \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}]$
C_f	coeficiente de fricção	[-]
$\mathbf{E}$	campo elétrico	$[V \cdot m^{-1}]$

$\mathbf{F}$	força das partículas	[N]
$F_{excedente}$	força excedente do veículo	[N]
$F_{impulsiva}$	força impulsiva do veículo	[N]
$F_{resistiva}$	força resistiva dos fios	[N]
F_x	força propulsiva na direção x	[N]
F_t	força propulsiva	[N]
F_{va}	força do veículo devido a aceleração	[N]
F_{vm}	força do veículo aplicado a mola	[N]
g	aceleração da gravidade	[$m \cdot s^{-2}$]
H_e	altura do eletrodo	[m]
H_p	altura do propulsor	[m]
I	corrente	[A]
I_{fonte}	corrente da fonte	[A]
J	densidade de corrente	[$A \cdot m^{-2}$]
k_1	constante elástica da mola	[$N \cdot m^{-1}$]
$k_{2,3}$	constante elástica dos fios	[$N \cdot m^{-1}$]
L_e	comprimento do eletrodo	[m]
L_p	comprimento do propulsor	[m]
m	massa	[kg]
m_a	massa de água na cuba	[kg]
m_e	massa do elétron	[kg]
M_i	massa do íon	[kg]
m_v	massa do veículo	[kg]
n	quantidade de partículas	[-]
P	diferença de pressão	[Pa]
p_1	pressão inicial em um fluido geral	[Pa]

p_2	pressão final em um fluido geral	[Pa]
P_R	pressão do jato que escoa	[Pa]
P_e	potencia elétrica	[W]
$P_{ei,ie}$	momento plasma de íons e elétrons	[$m^2 \cdot s^{-1}$]
P_L	trabalho da força de Lorentz	[W]
P_m	força peso	[$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$]
P_{et}	densidade de potência elétrica	[$W \cdot m^{-3}$]
P_{te}	densidade de potência propulsiva efetiva	[$W \cdot m^{-3}$]
$P_{térmica}$	potência térmica	[W]
q	carga elétrica	[C]
Q	calor sensível	[J]
$\mathbf{r}$	distância das partículas	[m]
S	comprimento	[m]
S_1	altura da coluna de água	[m]
S_v	distância percorrida pelo veículo	[m]
t	tempo	[s]
T_f	temperatura final fluido	[°C]
T_i	temperatura inicial do fluido	[°C]
$\mathbf{u}$	velocidade média do fluido	[$m \cdot s^{-1}$]
$\mathbf{v}$	velocidade das partículas	[$m \cdot s^{-1}$]
V	tensão	[V]
V_0	velocidade de saída do fluido	[$m \cdot s^{-1}$]
V_v	velocidade do veículo	[$m \cdot s^{-1}$]
$\mathbf{w}$	velocidade térmica do fluido	[$m \cdot s^{-1}$]
W	trabalho realizado	[N·m]
W_e	largura do eletrodo	[m]

W_p	largura do propulsor	[m]
X	posição inicial da mola	[m]
X_0	posição final da mola	[m]
Y	posição inicial do veículo	[m]
Y_0	posição final do veículo	[m]

CARACTERES GREGOS

ΔK	energia cinética	[kg·m^2·s^{-2}]
ΔP	erro da pressão	[Pa]
ΔS	erro do comprimento	[m]
ΔS_1	erro da coluna de água	[m]
Δt	erro do tempo	[s]
ΔU	energia potencial	[kg·m^2·s^{-2}]
ε_0	permissividade do espaço livre	[-]
η	eficiência propulsiva	[-]
η_{duto}	eficiência do duto no propulsor	[-]
η_e	eficiência elétrica	[-]
η_{jato}	eficiência do jato no propulsor	[-]
η_v	desempenho veículo	[-]
λ_D	raio de esfera de debye	[m]
λ_H	comprimento de referência do plasma	[m]
μ_0	Permeabilidade do espaço livre	[-]
θ	Arco descrito pelo pendulo	[rad]
ρ_c	Densidade de carga elétrica	[C·m^{-3}]
ρ	massa especifica água	[kg·m^{-3}]
σ	condutividade do fluido	[S·m^{-1}]
τ_H	Escala temporal de interesse	[s]
τ_i	Tempo de colisão dos íons	[s]
ξ	parâmetro de interação MDH	[-]

CAPÍTULO 1

1. MOTIVAÇÃO

Em princípio, os objetivos principais do trabalho visaram a produção de um modelo de veículo e a quantificação das velocidades atingidas pelo fluido impulsor e sua influência sobre este veículo. O estudo teve a característica de gerar material local (EESC/USP) de forma inicial, o que lhe dá o status de altamente desejável no contexto das pesquisas aqui desenvolvidas. Em não tendo sido dado este passo, nenhum outro poderia ser proposto a partir dele. A contribuição deste estudo, portanto, é de ser pioneiro na produção de um modelo de veículo magnetohidrodinâmico ou MHD neste setor de pesquisa que servirá de base para incrementos futuros. Evidentemente houveram perguntas técnicas que se impuseram e foram parcialmente respondidas já nesta primeira fase, como a melhor geometria para o elemento propulsor e a sua melhor localização em relação ao conjunto flutuante. Isto implicou, por exemplo, em decidir entre a geração de um escoamento tipo vórtice em torno de uma gôndola posicionada na parte inferior do veículo ou um escoamento tipo tubo através do mesmo. Nesse sentido, o efeito do tipo de propulsor sobre a velocidade a ser induzida no fluido e sua influência no conjunto que compõe o veículo é um resultado de cunho prático.

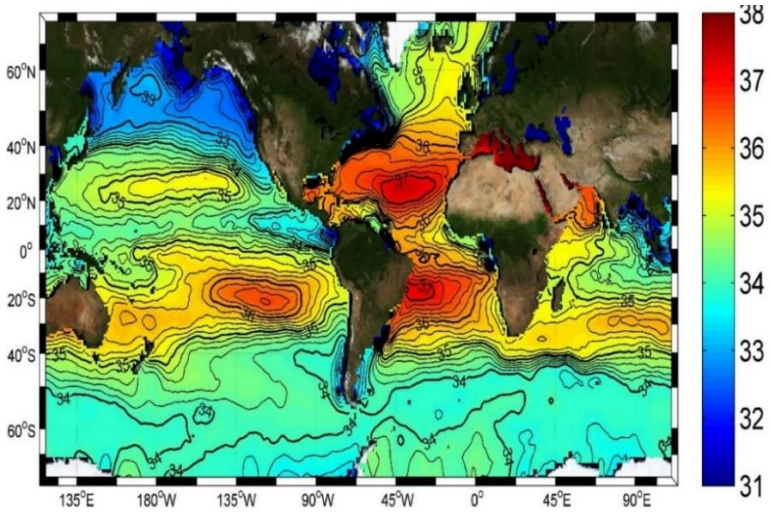
1.1. Justificativa para o desenvolvimento de um veículo MHD

Uma motivação bastante evidente para o desenvolvimento do veículo MHD para ambientes líquidos é a disponibilidade de água salgada no planeta. Mais de 71% de toda a superfície do planeta é composta pela água dos nossos oceanos. É interessante mencionar que nessa água há uma mistura de múltiplos elementos na forma de sais dissolvidos, chegando a compor 3% do total da “água salgada”. Entre os sais mais comuns temos o cloreto de sódio, cloreto de magnésio, sulfeto de sódio entre outros. Para o estudo de MHD em água salgada, os íons de sódio e magnésio são aqueles que de fato são acelerados pelo efeito MHD. Nesse particular, quanto

maior sua concentração na agua, mais rápido as partículas serão aceleradas (Kluijven (2012).

De acordo com o relatório de Kluijven (2012), publicado pela Maritime University of Applied Sciences na Holanda, a concentração de sais na água dos oceanos e lagos varia de região para região de acordo com a distribuição superficial indicada na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Unidade prática de salinidade ou PSU dos oceanos



Fonte: WORLD OCEAN ATLAS (2005).

A unidade utilizada na figura 1.1 é o PSU (*Practical Salinity Unit*), ou “Unidade Prática de Salinidade”. Observa-se sua variação no planeta, o que, em se atingindo a situação ideal de utilizar a propulsão MHD, pode implicar na necessidade de adaptações tecnológicas para otimizar o deslocamento nas diferentes partes do globo. A Tabela 1.1 mostra uma classificação (nomenclatura) prática que considera como principal característica das soluções salinas a concentração de sal nas mesmas. Note-se que a agua fresca não seria uma boa fonte de propulsão, uma vez que a concentração de sais na agua é menor do que 0.05% e isto implicaria em menos íons presentes, produzindo pouca aceleração (conforme já mencionado).

Tabela 1.1 - Salinidade da água baseada nos sais dissolvidos

Água fresca	Agua salobra	Solução salina	Salmoura
Menor que 0.05%	0.05% - 3%	3% - 5%	Maior que 5%

Outra razão para o desenvolvimento de um sistema MHD é o problema de cavitação presente principalmente em hélices de embarcações e sistemas de bombeamento. Esse fenômeno físico ocorre nos sistemas hidráulicos, consistindo na formação de bolhas de vapor dentro do fluido, causando queda de empuxo vibrações, erosão e desgaste dos componentes mecânicos (como metais que compõe o sistema ou pás), e consequentemente a destruição deles. Com o sistema MHD o problema da cavitação é eliminado, uma vez que os propulsores, são isentos de partes mecânicas móveis.

Observa-se que há uma baixa produção de estudos de engenharia nessa área e de sua divulgação no cenário nacional. Enquanto que em países mais consolidados na pesquisa em Mecânica dos Fluidos, a Magnetohidrodinâmica seja um tema de pesquisa amplamente divulgado em engenharia, no Brasil há poucas publicações e estudos a respeito. Entretanto, há um histórico que pode ser resgatado. Por exemplo, trabalhos de pesquisa em engenharia em nível nacional foram realizados numa linha de pesquisa iniciada pelo Prof. Michael George Maunsell na Escola de Engenharia de São Carlos/USP (interrompida com o seu falecimento), tendo produzido estudos de mestrado e doutorado (por exemplo, Missiato, 1998, e Serrano, 2000), assim como estudos dirigidos no departamento de Engenharia Naval da Politécnica de São Paulo ligados ainda ao professor Michael George Maunsell e o professor Toshi-ichi Tachibana (por exemplo, Merege, 2003). Nesses estudos, contudo, não se atingiu a produção de um veículo que se movimentasse no líquido em que estivesse imerso. A presente linha de pesquisa pretende avançar nesse sentido e o presente trabalho representa o seu primeiro passo.

O tema envolve conceitos de movimento de fluidos (equações de Navier Stokes) e de campos eletromagnéticos (equações de Maxwell), podendo, na análise teórica, apresentar dificuldades substanciais. Mas a sua solução, seja numérica, seja teórica, certamente induzirá o avanço do conhecimento e da sensibilidade aos problemas inerentes à MHD, para o presente candidato e eventuais pesquisadores que se envolverem com esta linha de pesquisa.

Nota-se que a MHD não é uma área de aplicação restrita, e, portanto, um estudo em MHD exige naturalmente que se siga uma especialização em um de seus ramos. O estudo no qual se insere o projeto direciona-se à propulsão MHD, mais precisamente à área de controle de fluidos e propulsão naval. Os motivos para o

aprofundamento nesse ramo, assim como as pesquisas associadas, são citados no decorrer deste trabalho.

Durante a revisão bibliográfica, foi encontrada uma série de pesquisas relacionadas a propulsão MHD, principalmente com aplicações militares navais, assim como vídeos e documentários sobre a tecnologia, disponíveis em canais de transmissão e sites abertos ao público. Mas ao analisar trabalhos que envolvessem líquidos fracamente condutores, esse número tornou-se bem menor, como já salientou Missiato (1998). E nessa área de trabalho mais restrita, os estudos estavam relacionados apenas ao movimento horizontal do veículo, com o veículo deslocando-se na superfície da água, envolvendo dispositivos construtivos muito leves. Durante a revisão bibliográfica o autor não encontrou nenhum estudo que se referisse a movimentos verticais, no caso ascendentes e descendentes, envolvendo aspectos construtivos mais robustos. Essa robustez visa a geração de maiores velocidades e, consequentemente, de impulso para os veículos a serem elaborados ao longo dos estudos e, evidentemente, aquele elaborado para o presente trabalho.

Informações sobre eletrodos utilizáveis também são encontrados e divulgados na literatura científica (ver por exemplo, Merege, 2003), como o seu tempo de uso, corrosão e os tipos de materiais utilizados para sua confecção. Entretanto, informações sobre o seu método de fabricação, as respostas à utilização em ambientes marítimos, tipos de isolação que devem ser feitas para melhorar seu desempenho, e como os mesmos devem ser conectados aos fios e aos propulsores não foram encontradas.

Análises sobre a força propulsiva de elementos propulsores magnetohidrodinâmicos também são encontradas na literatura, mas grande parte provém de medidas indiretas, como velocidade e pressão (Iwata, 1984 e Saji. 1988, por exemplo). Nesse trabalho pretendeu-se obter mais diretamente a força propulsiva, utilizando dinamômetros e pêndulos, procurando avaliar assim a real força impulsionadora e comparar os resultados com as avaliações indiretas. A técnica do dinamômetro, utilizada no trabalho para obter a força do movimento ascendente/descendente, corresponde a uma solução proposta no presente trabalho para este tipo de estudo, não tendo sido encontrada similar na literatura. Ela deverá ser utilizada ao longo dos estudos subsequentes desta linha de pesquisa.

1.2. Divisão do trabalho

O presente texto divide-se em 7 capítulos: introdução, revisão bibliográfica, análise teórica, metodologia, resultados, conclusões e trabalhos futuros, e revisão bibliográfica.

- No capítulo 2 uma breve história do MHD é apresentada. Nela comenta-se sobre os veículos remotamente controlados e menciona-se algumas pesquisas mais relevantes no contexto da área. A revisão bibliográfica acerca da propulsão MHD é apresentada em ordem cronológica, desde a concepção dos modelos de propulsão MHD teóricos até as aplicações práticas.
- No capítulo 3 a teoria é apresentada de forma simplificada. Começa-se com a definição geral de plasma, com algumas breves considerações que levam à assim denominada física de plasmas, conhecida também como magnetohidrodinâmica. A partir do modelo simplificado da MHD mostra-se se os passos dedutivos usuais das equações práticas para a aplicação nos propulsores MHD, como o cálculo da velocidade, força propulsiva, força eletromagnética, rendimento propulsivo, etc.
- Na capitulo 4 é apresentada a metodologia utilizada no presente trabalho. Por se tratar de um primeiro estudo sistematizado no ambiente da EESC/USP, ao invés de “enunciar” apenas a metodologia final, resolveu-se enumerar todos os passos e processos utilizados no decorrer da pesquisa, incluindo os erros cometidos, as modificações sofridas pelo projeto durante o trabalho, as falhas em medições e os diferentes dados obtidos com diversos equipamentos. A esses “passos” foram chamados de fases, sendo que cada fase foi importante para que se avançasse na direção do objetivo do estudo. Entende-se que o relato das experiências negativas também auxiliará aqueles que se engajarem nessa linha de pesquisa, no sentido de evitar a repetição das mesmas.
- No capítulo 5 os resultados foram apresentados. Como era de se esperar, ele também foi dividido em fases, pois cada fase da metodologia resultou em dados próprios, que permitiam o avanço para a próxima fase.
- No capítulo 6 são discutidas as conclusões que se obteve em casa fase, e possíveis melhoras e aprimoramentos. Sugestões para trabalhos futuros são

mencionadas, no sentido de buscar melhorar as atividades laboratoriais vinculadas à propulsão MHD na EESC/USP, e indicar possíveis técnicas que podem ser usadas.

O motivo em escrever a metodologia, resultados e a conclusão por fases, é mostrar detalhadamente como o trabalho foi realizado, como os dados foram obtidos, que tipos de erros podem ser encontrados em pesquisas como essa, e como certos equipamentos devem ser construídos e operados (a confecção dos eletrodos e as normas que devem ser respeitadas para se operar máquinas que envolvam correntes altas, por exemplo), garantindo para o pesquisador que queira fazer esses experimentos, reprodutibilidade e repetitividade, e que erros podem ocorrer e estarão na margem citada pelo autor. Algumas técnicas utilizadas nesse trabalho, não foram encontradas em nenhuma bibliografia revisada, podendo servir de instrumento de pesquisa para futuros estudos.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA PROPULSÃO MHD

2.1. O que é a magnetohidrodinâmica?

Desde os primeiros estudos sobre eletricidade e magnetismo, sabe-se que os campos magnéticos interagem com muitos líquidos naturais e artificiais. Com o desenvolvimento da sociedade, amparada na industrialização e no uso da ciência na produção de bens, os princípios do eletromagnetismo passaram a ser utilizados frequentemente na indústria para esquentar, misturar, bombear ou levitar metais líquidos Aoki (2011). No estudo do campo magnético da Terra, menciona-se que o mesmo é mantido devido ao movimento do fluido em seu núcleo. Avançando para além da Terra, a astronomia argumenta que formações galácticas e explosões estelares geram campos magnéticos que interagem com demais corpos no espaço. A distribuição desses corpos e as possíveis interações com os diferentes campos tem sido analisada matematicamente com equações que lembram aquelas para escoamentos de fluidos. Nota-se que há um espectro bastante amplo de situações de interação de campos magnéticos com fluidos, e ao estudo dessa interação dos campos magnéticos com fluidos dá-se o nome de magnetohidrodinâmica, ou, como acrônimo, simplesmente MHD (*MagnetoHydroDynamics*).

Segundo Davidson (2001), a MHD é concebida como a interação mútua entre o fluido em movimento e os campos magnéticos. O fluido dever ser eletricamente condutor e não magnético e r seu uso tem sido limitado apenas a metais líquidos, gases ionizados e eletrólitos. A quantificação da interação mútua entre o campo magnético "**B**" e o campo de velocidade "**u**" fundamenta-se nas Leis de Faraday e Ampère e nas forças de Lorentz para um corpo portador de corrente.

Outra maneira válida de descrever essa interação foi apresentada por Shercliff (1965), que descreve que um condutor (seja ele fluido ou sólido), na presença de um campo magnético variável, por meio do movimento de um imã permanente ou de um solenoide alimentado por uma fonte de corrente externamente aplicada e que varia

com o tempo, cria uma densidade de corrente elétrica induzida neste condutor que interage mutuamente com o campo magnético original. Resultam desse processo forças eletromagnéticas que alteram o gradiente de pressão do fluido ou o estado de movimento do sólido, as quais são fruto do produto vetorial entre o vetor densidade de corrente elétrica e o vetor densidade de campo magnético aplicado.

2.2. Breve história da MHD

A literatura apresenta uma sólida teoria para MHD assim como questões para pesquisas atuais. O primeiro pesquisador que se utilizou do campo magnético para justificar “linhas de força” e “campos de força” foi provavelmente Faraday, que relatou resultados em 1831 que correspondem aos primórdios da MHD (ver, por exemplo, Fells (1986). Posteriormente Ritchie (1832) descreveu o princípio básico de funcionamento de propulsores, nos quais um campo magnético e uma corrente elétrica, perpendiculares entre si, passam por um fluido eletrolítico produzindo a força de Lorentz, que movimenta o fluido. Esse experimento incentivou pesquisas nessa “nova” área. Grandes cientistas da época executaram experimentos pioneiros de certa envergadura. Um dos primeiros relatos de experimentos MHD é desta época, precisamente com Michael Faraday. O cientista tentara medir a tensão entre as margens do Rio Tâmisa, induzida pelo seu próprio movimento, uma vez que este rio que “atravessava” o campo magnético da Terra.

Considerando, para brevidade desta proposta, um salto secular, Williams (1930) realizou um experimento similar, utilizando apenas o campo magnético, e conclui que as forças eletromotivas no fluido em movimento geram diferenças de tensão que podem ser captadas por um instrumento de medição, permitindo obter a velocidade do fluido. Essa analise possibilitou o estudo do freio magnético, no qual o movimento do fluido é controlado.

Hartmann (1937) é considerado o criador do primeiro propulsor, ou bomba eletromagnética, voltada à engenharia. Em seu experimento utilizou mercúrio liquido e parâmetros importantes como a viscosidade do fluido em relação ao campo magnético aplicado, entre outros dados, foram obtidos sistematicamente. Devido às suas pesquisas e definições minuciosas, Hartmann ficou conhecido como o Pai da

magnetohidrodinâmica e o termo “Hartmann flow” ou escoamento Hartmann ainda é utilizado para descrever escoamentos em dutos na presença de campos magnéticos.

Apesar de se conhecerem os efeitos do eletromagnetismo e sua interação com fluidos condutores desde o século XIX, o assunto ganhou importância maior apenas no final dos anos de 1930 e começo dos anos de 1940. Um dos motivos da relativa “falta de interesse” anterior teria sido a ausência de incentivo (financeiro), fato que se podia associar a precariedade tecnológica dessa época, uma realidade que de fato impossibilitaria algum avanço significativo nessa área.

O estudo começou a angariar interesse quando astrofísicos se deram conta da importância dos campos magnéticos e dos plasmas na composição e participação de diversos fenômenos no universo. Em 1942 houve a descoberta das ondas de Alfvén (por Hannes Alfvén) na astrofísica, um fenômeno peculiar relacionado a MHD, o que lhe rendeu um prêmio Nobel na década de 70 do século XX, Davidson (2001).

Praticamente no mesmo período, geofísicos começaram a suspeitar que o campo magnético da Terra era gerado pelo metal liquefeito na composição terrestre através do efeito de dínamo, uma proposta que foi estabelecida em Larmor (1919) com relação aos campos magnéticos do Sol. A partir dessas e demais descobertas, um período de intensas pesquisas se seguiu, tendo reflexos contínuos até os dias de hoje.

Adicionalmente, a física de plasmas começou a se interessar mais especificamente pela MHD na década de 50 do século XX, quando cientistas tentavam controlar e estabilizar plasmas confinados em campos magnéticos para gerar fusões nucleares. Grandes avanços relacionados à estabilidade e ao confinamento de plasmas foram atingidos a partir de então.

Pode-se talvez dizer que na área das engenharias, a MHD caminhou devagar até a década de 60 do século XX. A oportunidade de testar tecnologias alternativas, incluindo a MHD, veio de fato como resultado de algumas outras inovações tecnológicas decorrentes de pesquisas na área nuclear, como: a necessidade de bombear sódio liquido com o intuito de refrigerar os reatores nucleares; a fusão nuclear controlada (onde os plasmas deveriam ser confinados em poderosos campos magnéticos, conforme já mencionado no parágrafo anterior); e a geração de energia, no qual gases ionizados, ao passar por campos magnéticos, gerariam uma corrente de indução que poderia ser captada e utilizada como fonte de energia, Davidson (2001).

Duas décadas depois, a MHD passou a ser aplicada em diversas áreas, principalmente por algumas indústrias metalúrgicas e siderúrgicas para a extrusão e depuração de metais. O ponto-chave dessa aplicação é a força de Lorentz, que proporciona um meio não invasivo de controlar o escoamento de metais.

2.3. Veículo subaquático remotamente controlado

Veículos aquáticos e subaquáticos sempre despertaram interesses, tanto na comunidade científica (universidades e centros de pesquisas), quanto no domínio econômico (indústrias navais e transportadoras).

Quando operados remotamente, esses veículos passaram a ser conhecido pelo seu acrônimo, sendo denominados de ROV (*Remotely Operated Vehicles*). Atualmente tais veículos são usados para inspeção de leitos marítimos e estruturas subaquáticas, na prospecção de petróleo e gás natural, bem como no monitoramento de vida marinha e resgate de pessoas e animais, Fapesp (2007).

Devido às muitas referências sobre ROV´s, no presente estudo foram arroladas apenas aquelas consideradas mais relacionadas ao tema da tese. No contexto internacional, algumas instituições vêm desenvolvendo projetos de veículos submersíveis. Podem ser citados o projeto japonês Urashima da rede JAMSTEC (Japan Agency for Marine – Earth Science and Technology, 2016), o projeto estadunidense (Naval Postgraduate School, 2016) e o projeto norueguês (Norwegian Institute of Technology, 2016). Talvez seja apropriado mencionar que esses países possuem capital suficiente para arcar com os custos de tais projetos, sendo essa uma das causas fortes para estarem liderando o processo de inovação e pesquisa na área.

No contexto nacional, há um entusiasmo crescente em parte das instituições de pesquisa, e bons projetos começam a surgir nessa área, a citar, por exemplo, o projeto LUMA (nome do robô) que será usado na inspeção de tuneis subaquáticos de usinas hidrelétricas. O robô foi elaborado e construído na Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharias (Coppe) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ-2016). Um outro robô (Laurs), desenvolvido na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ver FAPESP (2007), cumpre missões nos oceanos no levantamento de atividades geológicas do fundo do mar e no auxílio a

prospecção de petróleo, atividade que cresce no mundo todo. Cita-se ainda o trabalho de Luque (2012), sobre controle de ROV

No entanto, as embarcações ROV atualmente existentes, sejam elas produto final ou experimental, utilizam propulsão convencional (uso de hélices ou pás) para geração de movimento. Como mencionado anteriormente, o presente projeto destina-se à construção de um modelo de veículo similar em funcionalidade, diferindo apenas no tipo de propulsão utilizada, nesse caso uti8lizando forças eletromagnéticas provenientes da interação do campo elétrico e magnético.

2.4. Propulsão magnetohidrodinâmica

Segundo Iwata (1990), a busca pela propulsão eletromagnética é um tema recente que pode ser dividido em três estágios:

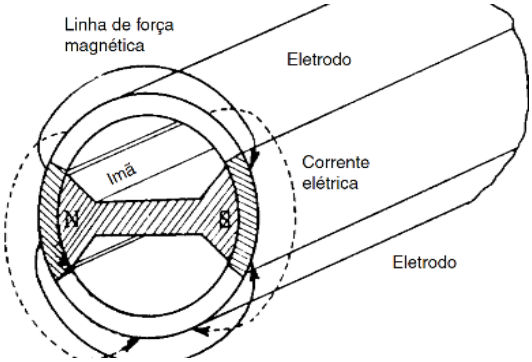
1. Primeiro estágio: período desde a concepção da propulsão eletromagnética até o teste de verificação, usando bobinas condutoras normais.
2. Segundo estágio: uso do fenômeno da supercondutividade na propulsão eletromagnética. Surgimento de bobinas condutoras de alta intensidade magnética.
3. Terceiro estágio: período de pesquisas e desenvolvimento total do sistema eletromagnético, incluindo componentes como eletrônica embarcada e total desenvolvimento dos modelos.
4. Um estágio adicional (ou quarto estágio) pode ser adicionado a esta lista, uma vez que decorre de desenvolvimentos posteriores ao texto de Iwata (1990), que é consolidação dos outros 3 estágios com o surgimento de bobinas normais e de imãs de alta intensidade magnética (neodímio e terra rara), fato que permitiu o acesso ao tema por parte de um público mais abrangente; a evolução da área com estudos da MHD em conjunto com magnetoplasmadinâmica ou MPD e; finalmente, a popularização das simulações computacionais, que permitem que hipóteses de trabalho sejam testadas diretamente a partir das equações e de resultados numéricos, direcionando as pesquisas laboratoriais mais onerosas. A seguir, serão apresentados, em detalhes, os estágios acima mencionados.

2.4.1. Primeiro estágio (1961 – 1970)

Como mencionado, as leis que governam a MHD, são conhecidas desde o século XIX e se tornaram importantes por volta da década de 60, quando se procurou utilizar a característica de a propulsão magnetohidrodinâmica proporcionar meios de locomoção de veículos aquáticos ou subaquáticos sem o uso ou ajuda de hélices ou pás.

A ideia de propulsores eletromagnéticos foi patenteada pela primeira vez nos Estados Unidos por Rice (1961), levando o país a se tornar o pioneiro nessa área de pesquisa, tanto na parte experimental como teórica (nesse caso, teoria aplicada a propulsores). Uma quantidade apreciável de estudos então foi feita, resultando em um documento do Westinghouse Research Laboratory (naquela época, um laboratório voltado a pesquisas de ponta em quase todas as áreas da ciência) em 1966. Esse documento afirmava que para o funcionamento satisfatório do propulsor MHD, seria necessária uma densidade de campo magnética muito grande, tornando impraticável o seu uso na época. Apenas com o surgimento das bobinas supercondutoras na década de 70 é que foi possível continuar os experimentos. O princípio de propulsão eletromagnética de Rice pode ser visto na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Princípio de funcionamento do sistema eletromagnético

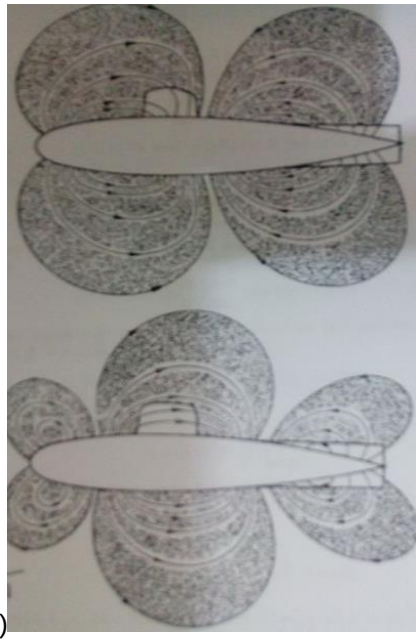
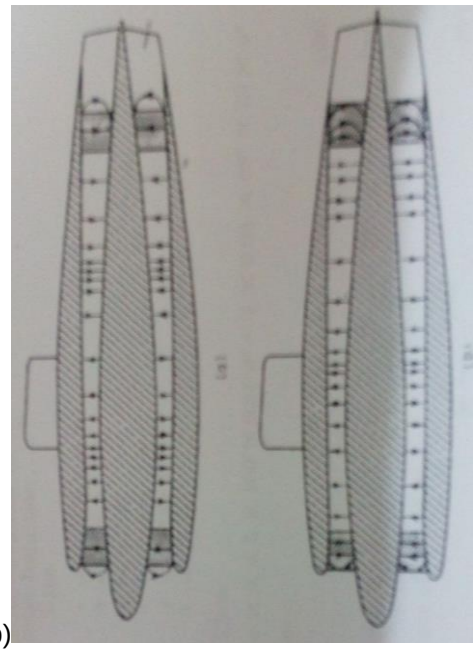


Fonte: RICE (1961), tradução livre

Imediatamente na sequência Friauf (1961) lançou a ideia de se construir um submarino. Em seu trabalho ele propôs seguir as ideias de Rice, utilizando o mesmo princípio do autor mencionado. Também seguindo os passos pioneiros de Rice, Phillips (1962), em seu trabalho intitulado “The prospects for magnetohydrodynamic

ship propulsion”, fez uma análise detalhada da possibilidade de se construir um submarino movido a propulsão MHD. Nesse trabalho ele propõe dois tipos de configuração para os propulsores: um no qual o campo magnético atuaria livremente em volta do submarino e o segundo método no qual os campos magnéticos seriam confinados em um duto, ver Figura 2.2. Forças eletromagnéticas, campo magnético necessário, assim como a eficiência da propulsão e a geometria necessária para tornar o veículo factível foram calculados pelo autor, que conclui que o mesmo necessitaria de um campo magnético intenso.

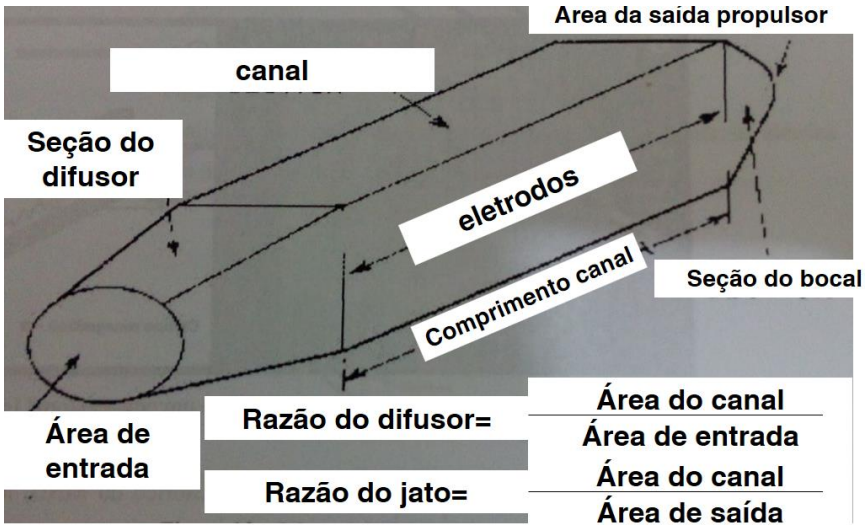
Figura 2.2 - Dois sistemas foram considerados: a) campo magnético livre e b) confinado em um duto

a)  b) 

Fonte: PHILLIPS (1962).

Baseado na segunda configuração de Phillips, Doragh (1963), efetuando estudos para a marinha dos Estados Unidos, desenvolveu um sistema de propulsão que consistiu de um bocal divergente na entrada, o sistema eletromagnético composto pelos campos magnéticos e elétricos no “corpo” do propulsor e, em sua saída, um bocal convergente, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

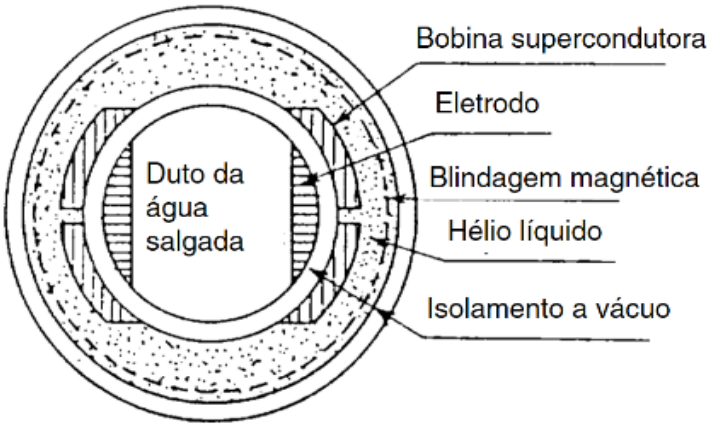
Figura 2.3 - Propulsor MHD



Fonte: DORAGH (1963), tradução livre.

A velocidade do fluido era diminuída em sua entrada e depois acelerada em sua saída A eficiência foi calculada, envolvendo a área do canal de entrada e de saída. Assim como Rice e Phillips, Doragh (1963) conclui que para uma eficiência satisfatória seriam necessários supercondutores. Um sistema mais detalhado foi apresentado por Doragh, Figura 2.4, que ao contrário do proposto por Rice, não permitia que os campos magnéticos escapassem para fora da embarcação. Os eletrodos estariam em contato com a água salgada e o campo magnético estaria sendo gerado por bobinas supercondutoras, estas resfriadas por hélio liquido. Um isolante, juntamente com vácuo, impediria que o campo magnético se formasse fora do submarino, diminuindo sua assinatura magnética.

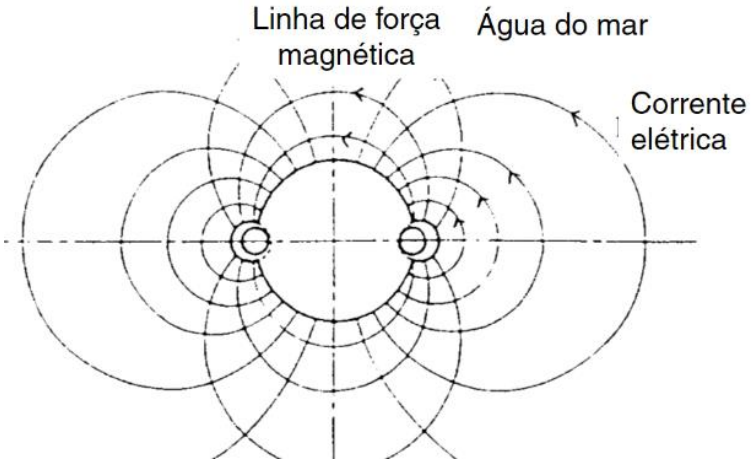
Figura 2.4 - Corte axial do sistema eletromagnético



Fonte: DORAGH (1963), tradução livre.

Anos mais tarde Way e Devlin (1967) apresentaram o EMS-1, um modelo de 3 metros de comprimento que foi desenvolvido e construído na Universidade de Santa Barbara. O sistema bi-cilíndrico (contendo dois domínios eletromagnéticos), mostrado na Figura 2.5, entrou em fase de testes naquele ano.

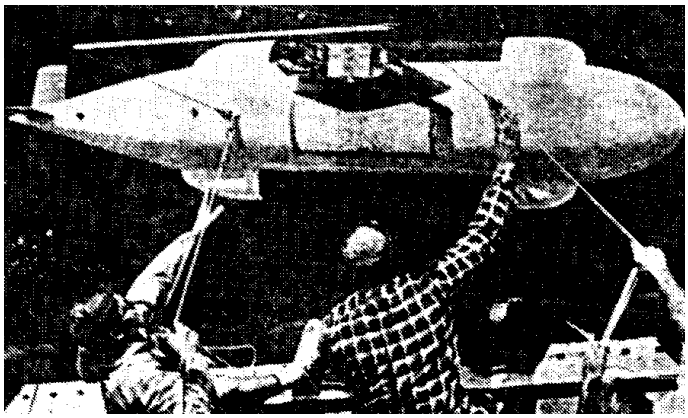
Figura 2.5 - Sistema bi-cilíncdrico



Fonte: WAY e DEVLIN (1967), tradução livre.

Contrariamente às ideias propostas pelos demais pesquisadores, esse sistema usava bobinas condutoras normais. Ao contrário dos projetos anteriores, esse sistema era capaz de manter uma relação de ortogonalidade quase perfeita entre os campos elétricos e magnéticos dentro da agua salgada, aumentando drasticamente a força de Lorentz resultante no propulsor. O modelo construído para os testes pode ser visto na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Modelo EMS-1 com as bobinas condutoras convencionais

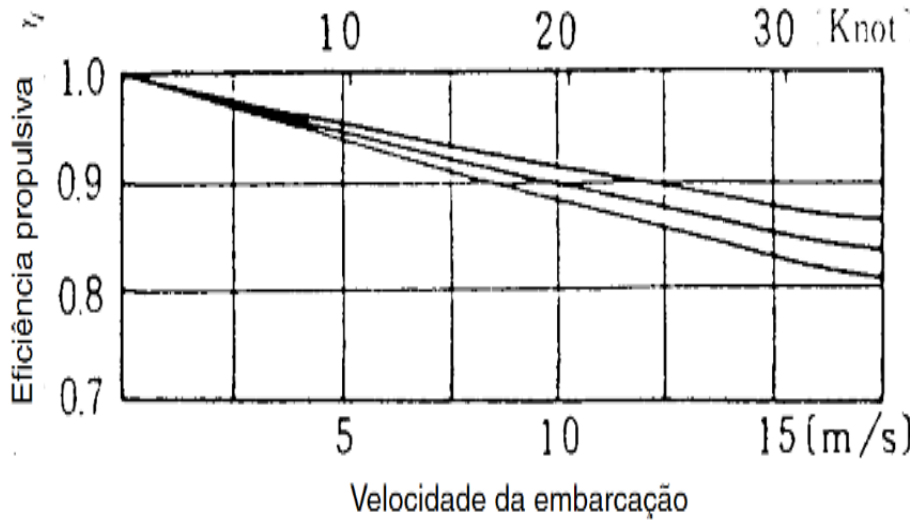


Fonte: WAY e DEVLIN (1967).

Tendo um domínio eletromagnético de 1 m comprimento por 0,225 m de raio, campos magnéticos de 0,015 T e uma tensão média de 30 V, o veículo conseguiu manter uma velocidade de aproximadamente 0,4 m/s durante 20 minutos. O valor da velocidade não impressiona, mas é preciso considerar que este foi o primeiro veículo que efetivamente navegou utilizando materiais convencionais.

Aproveitando o mesmo conceito, Way (1964) elaborou hipóteses de como seria a eficiência do veículo caso um supercondutor fosse instalado ao invés de bobinas convencionais. Em seus estudos teóricos ele chegou à conclusão que a velocidade seria drasticamente aumentada, o que é mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Sistema bi-cilíndrico com supercondutores

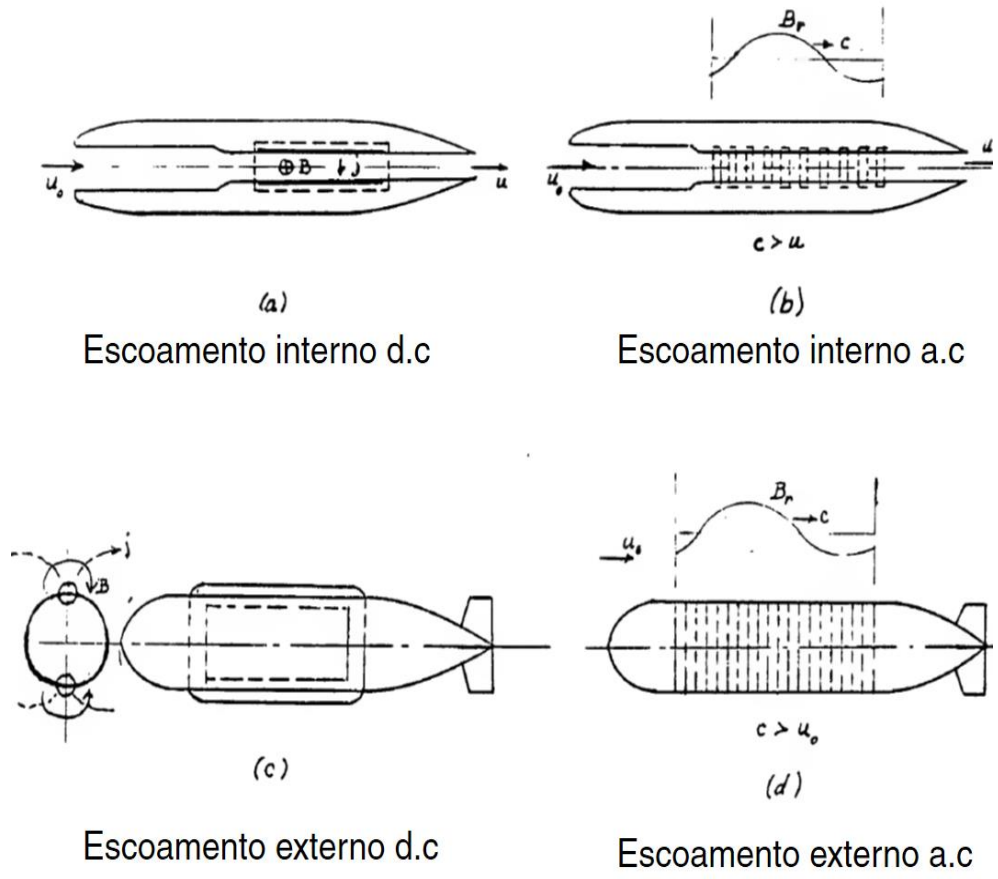


Fonte: WAY e DEVLIN (1967), tradução livre.

É possível notar que a velocidade aumenta quase que em uma grandeza (de aproximadamente 3 m/s a 30 m/s) e sua eficiência se estabelece entre 80% a 90%. No entanto esse alto desempenho foi obtido apenas porque Way desconsiderou os efeitos do arrasto na superfície do casco do submarino. Logo o sistema eletromagnético não seria de fato tão eficiente.

Way (1967) relatou seus experimentos passados, estudos teóricos, e sugeriu o que poderia ser melhorado a partir dessa experiência pioneira. Partindo do modelo EMS-1, ele sugeriu outros tipos de geometria (Figura 2.8), assim como o uso de corrente alternada, algo pouco discutido na época. A posição do propulsor, interno ou externo, também é discutida por Way.

Figura 2.8 - Métodos alternativos propostos

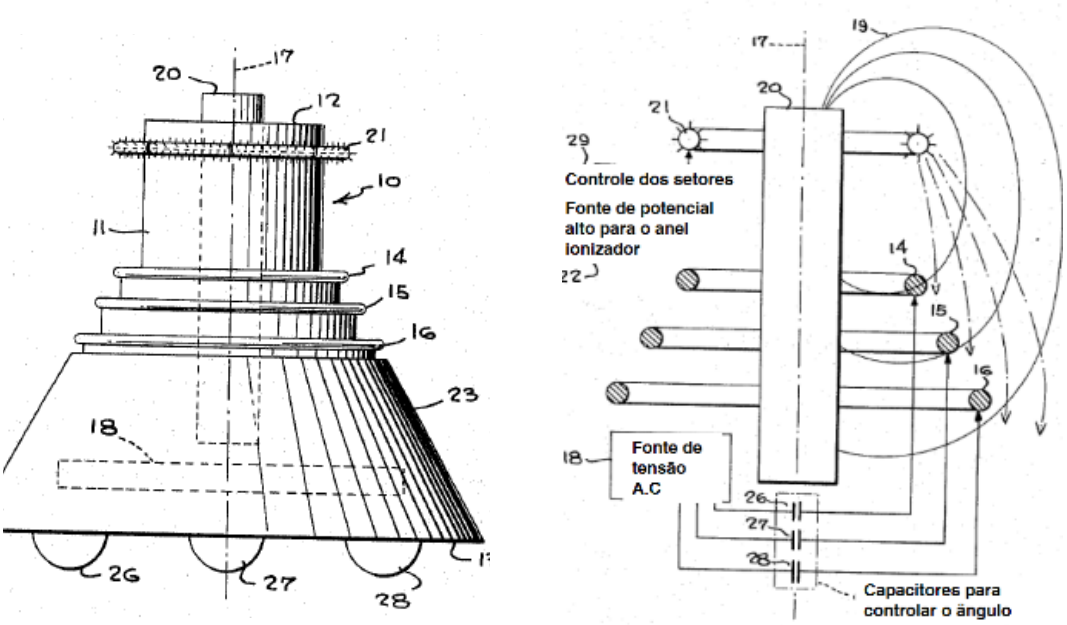


Fonte: WAY (1967), tradução livre.

Na continuação dos seus estudos, Way (1968) analisou a possibilidade de submarinos maiores que os convencionais, denominados submarinos cargueiros ou submarinos tanque.

De uma forma mais exótica, King (1967), em sua patente, propôs um veículo, que chamou de “mais denso que o ar”, que utilizaria o efeito MHD, mais precisamente a magnetoplasmadinâmica ou MPD, no qual o aparato composto de um grande número de bobinas geraria um campo magnético intenso proveniente de uma corrente externa. Ao mesmo tempo anéis posicionados de forma conveniente seriam alimentados por outra corrente, ionizando o ar em volta do veículo, tornando este ar um meio condutor e, consequentemente, movimentando o veículo por forças eletromagnéticas. Graças a esse estudo e outros dele decorrentes, uma nova área a MPD, começou a se tornar realidade e até hoje discute-se a possibilidade de viagens espaciais utilizando esse método de propulsão, Figura 2.9.

Figura 2.9 - Aparato MHD proposto na pate*nte*



Fonte: KING (1967), tradução livre.

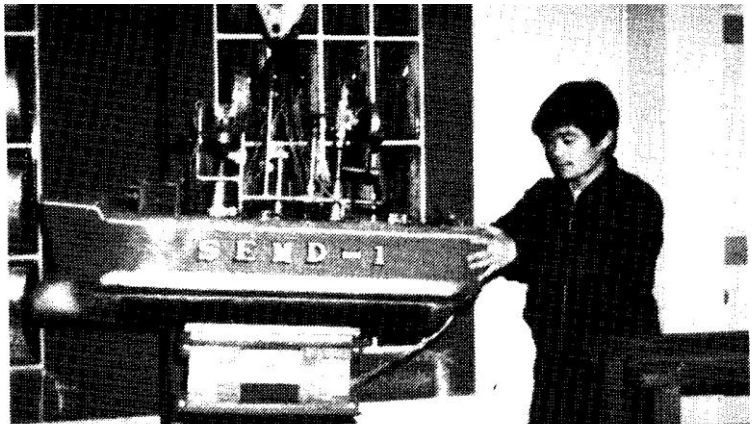
2.4.2. Segundo estágio (1970 – 1985)

Os avanços em criogenia tornaram os supercondutores factíveis e atraentes para os propulsores MHD, abrindo novas possibilidades, que podem ser entendidas como uma das características do segundo estágio. Dimitriadis (1972) apresenta uma série de propostas para a construção de um submarino. Apesar de focar a discussão em um modelo movido a energia nuclear e dotado de sistemas supercondutores, ele menciona a possibilidade de integrar um outro método de propulsão que ele chamou de bomba de indução líquida por magnetohidrodinâmica

Vittucci (1977) descreve os esforços dos países para encontrar ou projetar propulsores inovadores e, consequentemente, permitir a geração de embarcações mais modernas e velozes. Nesse trabalho o autor mencionado ressalta o direcionamento da marinha americana em pesquisar esses tipos novos de tecnologia e cita algumas mudanças que deveriam ser feitas em diversos tipos de tecnologias e embarcações presentes na época.

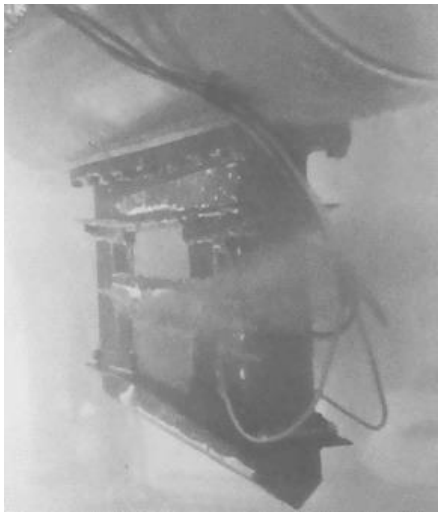
Entre os primeiros pesquisadores a utilizar a então recente tecnologia dos supercondutores estão Saji et al (1978) (o estudo possui 4 co-autores). Esse grupo da Universidade marítima de Kobe construiu, em 1976, um propulsor eletromagnético equipado com uma pequena bobina supercondutora (SEMD-1), Figura 2.10 e Figura 2.11, confirmando as conclusões propostas pelos pesquisadores do passado.

Figura 2.10 - Propulsor eletromagnético instalado no modelo SEMD-1



Fonte: SAJI et al (1976).

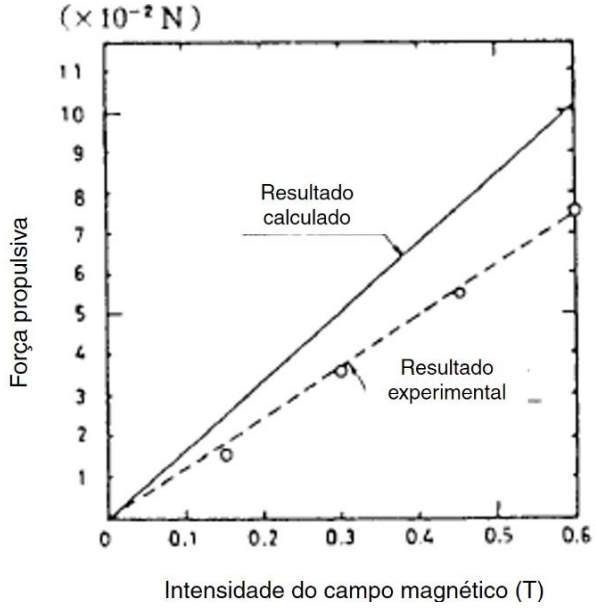
Figura 2.11 - Propulsor do SEMD-1 submerso



Fonte: SAJI et al (1976).

Com uma nova fronteira magnética, Saji e seus colaboradores mediram e compararam a força propulsiva necessária para movimentar o seu modelo de embarcação. A Figura 2.12 mostra os valores de força propulsiva obtidos na época. Nota-se que a intensidade do campo magnético é 10 vezes maior do que qualquer experimento realizado anteriormente, graças a tecnologia dos supercondutores.

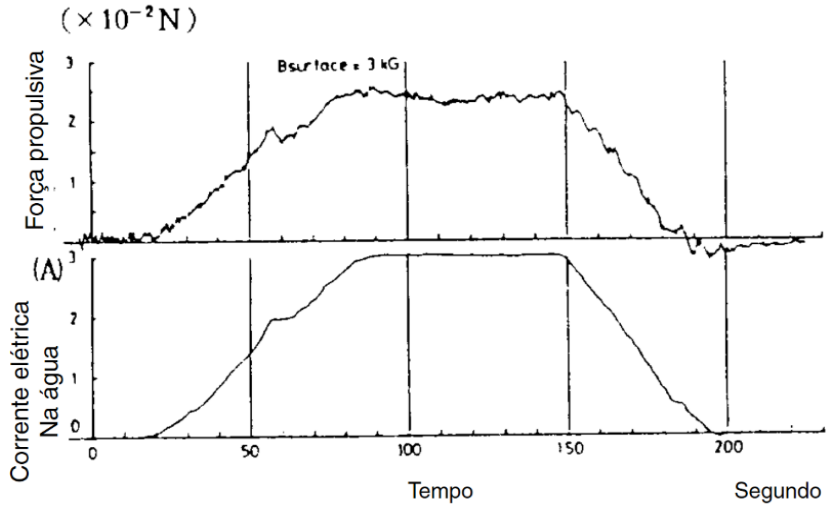
Figura 2.12 - Força propulsiva em função da intensidade do campo magnético



Fonte: SAJI et al (1978), tradução livre.

Duas conclusões foram ressaltadas pelos pesquisadores: a eficiência dos supercondutores (provendo um excelente campo magnético) e a rápida resposta do propulsor ao ser ligado, característica fundamental para a propulsão eletromagnética, Figura 2.13.

Figura 2.13 - Força de propulsão e corrente aplicada em função do tempo de resposta

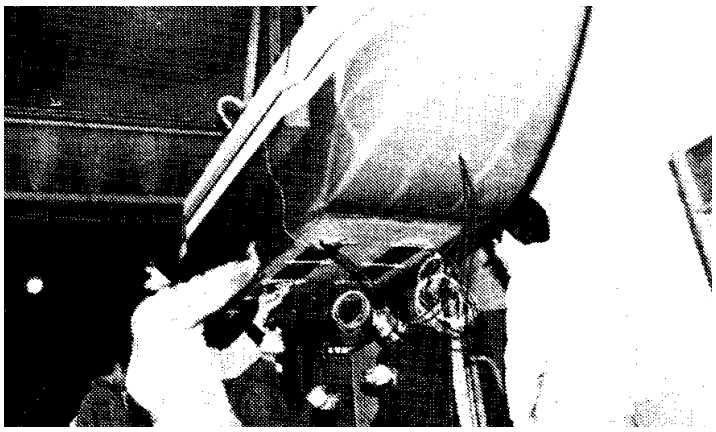


Fonte: SAJI et al (1978), tradução livre.

Seguindo o sucesso obtido com o primeiro protótipo, Iwata e Saji (1979), construíram um modelo de 4 m de comprimento, batizado de ST-500, que era

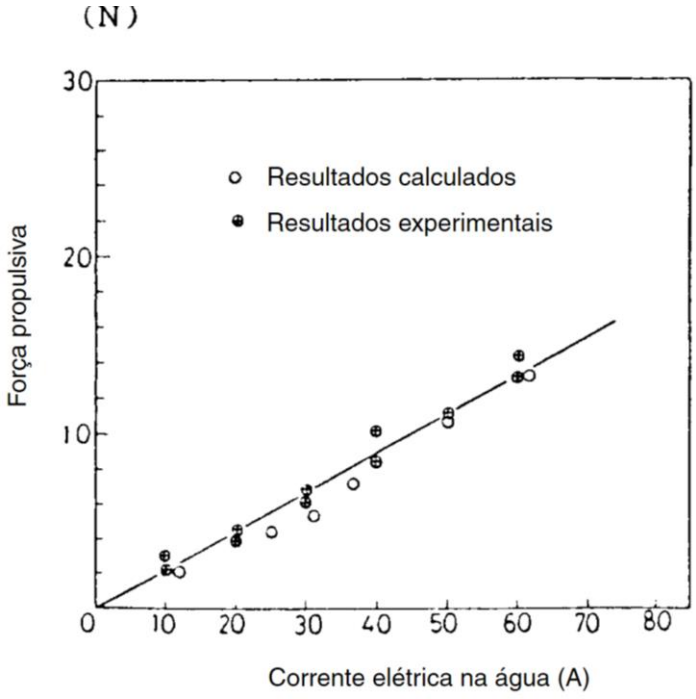
propelido por supercondutores, com campos magnéticos de 2 T. Em paralelo com os experimentos, um estudo teórico também foi feito, e ao contrário de Way (1967), os efeitos do arrasto e da superfície do casco foram considerados, mostrando-se concordância entre valores de força calculados e valores medidos. O modelo, assim como o resultado mencionado podem ser vistos nas Figura 2.14 e Figura 2.15

Figura 2.14 - Modelo ST-500



Fonte: IWATA E SAJI (1979).

Figura 2.15 - Força propulsiva em função da corrente demandada pela água do mar



Fonte: IWATA E SAJI (1979), tradução livre.

Apesar do formato do modelo apresentar uma falha (geração de escoamentos indesejados próximos ao casco, que agiam contra a propulsão aumentando seu

arrasto), o modelo foi considerado um sucesso, tanto em termos de propulsão como em termos dos supercondutores utilizados. Com uma velocidade de aproximadamente 0,6 m/s e uma força de propulsão de 20 N, tal modelo acabou sendo referência para modelos japoneses e estadunidenses elaborados a partir dele.

Nota-se nessa época, um aumento do senso crítico com relação as pesquisas de propulsão MHD. Ao contrário do observado no estágio anterior, em que a propulsão crua era o cerne da pesquisa, e consequentemente do sucesso dela, agora muitos procuravam refinar esses métodos de estudo, abordando principalmente a eficiência do propulsor, considerando aspectos como: melhores materiais para a construção das bobinas supercondutoras, enriquecimento do eletrólito e refinamento na confecção dos eletrodos. Também surgiram críticas à falta de financiamento nessa área. Wu (1979), por exemplo, alerta para a importância da conversão direta de energia para outros dispositivos e sua potencialidade para aplicações navais. O autor cita aplicações da MHD em diversos sistemas navais, desde a própria propulsão até seu uso na refrigeração dos sistemas. Ele critica a falta de investimentos da marinha dos Estados Unidos nesse tipo de pesquisa e a falta de trabalhos mais refinados nessa área.

No mesmo ano Hummert (1979), filiado da Westinghouse Research Labs (instituição que criara um relatório na década de 60 sobre a propulsão MHD), entra novamente na “disputa” que envolve esses propulsores. Nesse trabalho, de cunho teórico, Hummert, descreve o funcionamento dos dutos internos dos propulsores, e as vantagens de usá-los. Baseando-se nas equações de Bernoulli unidimensionais, ele conclui que para atingir uma eficiência propulsiva ideal, seria necessário que os motores possuíssem uma área de secção larga e baixas descargas de velocidade, utilizando eletrodos longos. Isso seria atingido construindo-se múltiplos dutos propulsivos.

Também Saji (1979) ainda nesse ano havia testado a possibilidade de gerar campos magnéticos induzidos, teorizados por Philips em 1962, sem muitos resultados significativos. No entanto estudos teóricos intensivos sobre esse problema foram realizados por Yakovlev (1980) e Khonichev (1980), que acrescentaram informações passíveis de utilização.

Vasil`ev e Kirko (1981) em seus estudos teóricos, apontam falhas nas literaturas sobre propulsão MHD da época, afirmando que as mesmas não deram a importância necessária no quesito eficiência propulsiva, e que se poderia obter muito

mais da MHD se ela fosse analisada com mais cuidado. De certa forma os autores não deixam de estar “enganados”, notando-se uma diferença na metodologia das pesquisas em diferentes centros do globo, principalmente quando se compara trabalhos japoneses com os estadunidenses. Por exemplo, enquanto pesquisadores nos Estados unidos se preocupavam em fazer uma abordagem mais teórica acerca da eficiência dos propulsores (sem construir de fato um modelo ou um protótipo), os pesquisadores japoneses adotavam a postura inversa, ou seja, construíram o modelo, mas não pesquisaram a fundo e teoricamente a sua eficiência.

Saji (1983), continuando no tema, novamente analisou seu protótipo ST-500, agora comparando os resultados experimentais com os modelos teóricos e sua aplicação em catamarãs, o que foi seguido posteriormente com Iwata (1984).

2.4.3. Terceiro estágio (1985 – dias atuais)

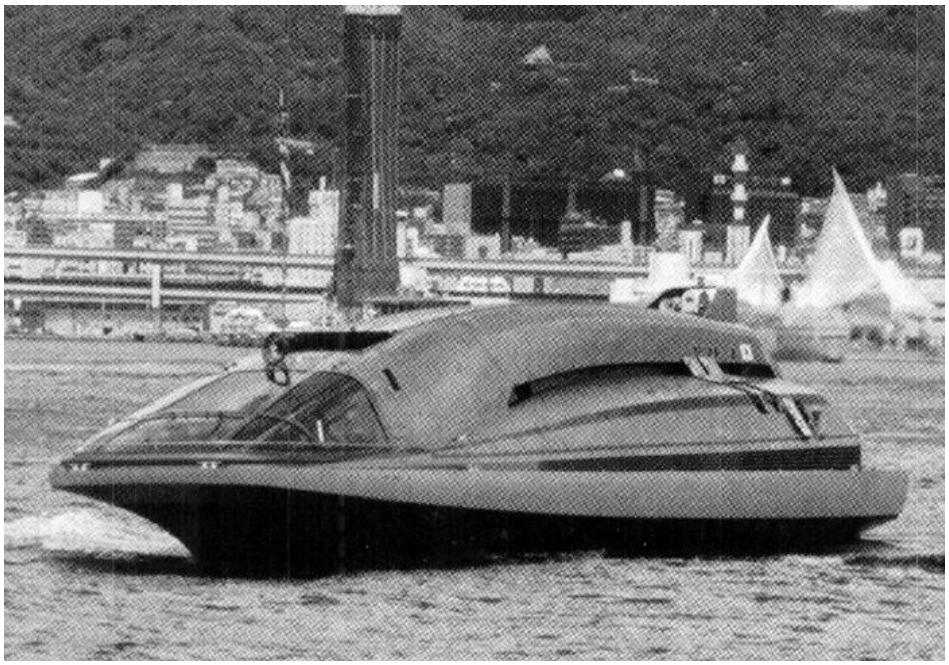
Mitchell e Gubster (1988), em uma abordagem otimista, comentam a factibilidade de um propulsor usando supercondutores. Nesse trabalho teórico, os autores demonstram que a eficiência propulsiva pode ultrapassar os 50% e atingir velocidades acima de 40 nós, usando campos magnéticos um pouco maiores que 5 T, em um volume de encapsulamento de 100 m^3.

Com sucessivos avanços tecnológicos, liderados principalmente pelo Japão, a Ship and Ocean Foundation (SOF), em 1985, criou um comitê japonês sob a direção de Yohei Sasakawa para a pesquisa e o desenvolvimento relacionados à propulsão eletromagnética e supercondutores. Este comitê tinha o objetivo de financiar, construir e conduzir testes demonstrando as qualidades da propulsão eletromagnética.

Em 1986, tendo por base o que considerou o seu sucesso com o ST-500, Saji continuou seus experimentos, dessa vez utilizando corrente alternada para alimentar as bobinas geradoras de campos magnéticos, conforme mencionado em Saji (1988). Como a tecnologia ainda era nova, o desempenho de uma bobina supercondutora AC era inferior a uma DC. Não obstante esta restrição, Saji sugere que em um “futuro próximo” esse tipo de tecnologia levaria a resultados tão bons ou melhores que a tecnologia DC.

Com o respaldo da SOF, em 1989 um navio experimental começou a ser construído baseado nas teorias e experimentos eletromagnéticos elaborados pelos diferentes pesquisadores em diferentes centros de pesquisa do globo. Esse projeto culminou na construção do Yamato-1, descrito em Sasakawa (1996) e mostrado na Figura 2.16. Tratou-se do primeiro “navio” MHD, a ser utilizado de fato nos mares, ou seja, uma embarcação com dimensões já apropriadas para o uso, muito superiores aos modelos até então experimentados. O teste inaugural ocorreu em junho de 1992.

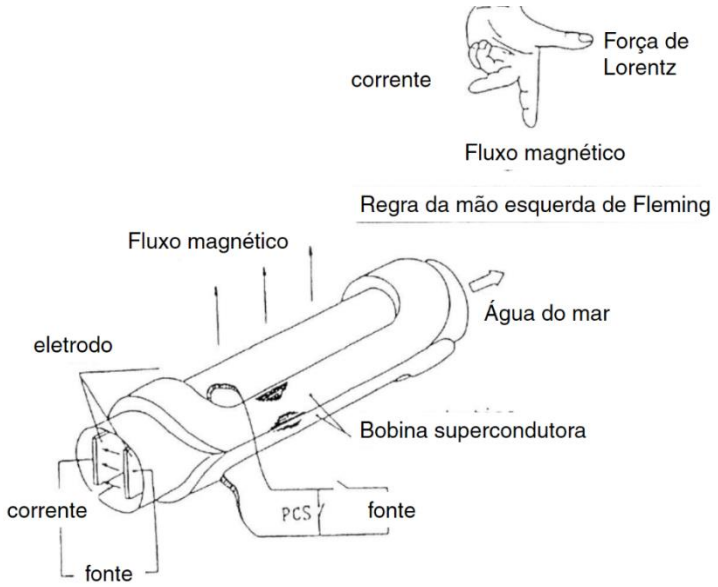
Figura 2.16 - Yamato navegando na baía de Kobe



Fonte: SASAKAWA (1996).

O propulsor utilizava os mesmos conceitos desenvolvidos ao longo das décadas anteriores (Figura 2.17), no qual as bobinas supercondutoras (refrigeradas por hélio liquido) geravam campos magnéticos intensos e estes interagiam com a corrente elétrica gerada pelos eletrodos.

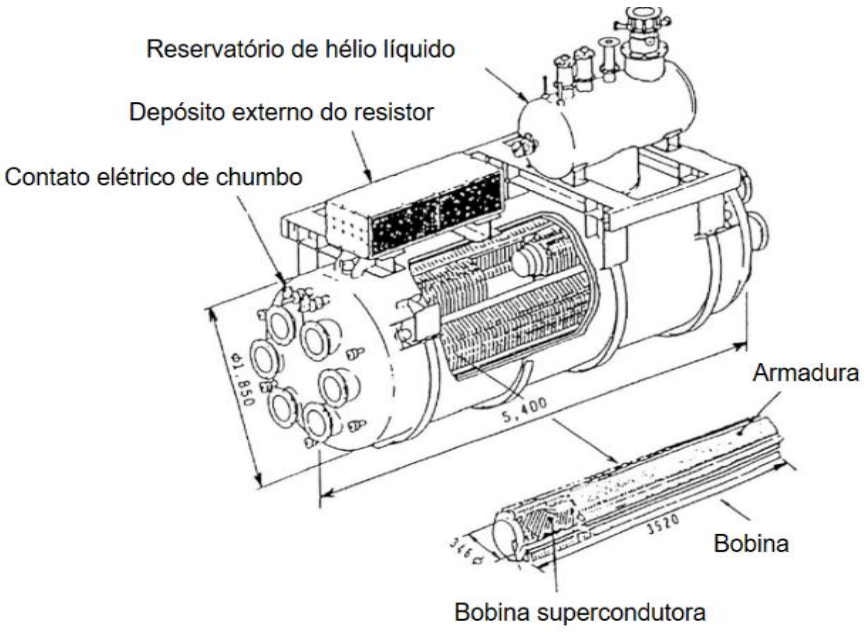
Figura 2.17 - Conceito básico de funcionamento de um propulsor MHD



Fonte: SASAKAWA (1996), tradução livre.

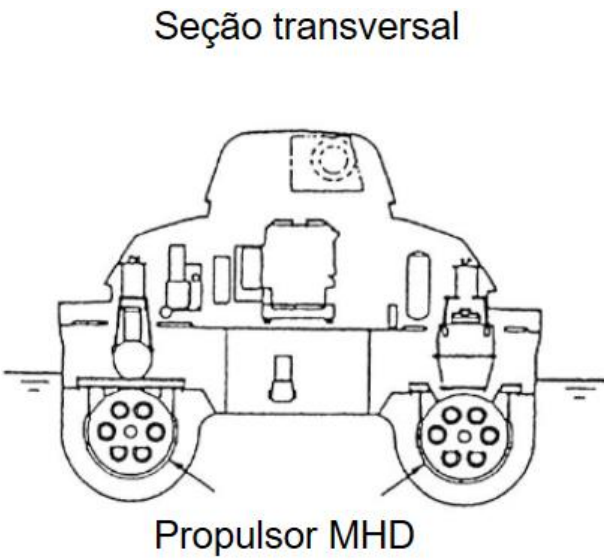
Seis propulsores como esses foram utilizados em cada lado da embarcação, totalizando 12 conjuntos de tubeiras (Figura 2.18), com um fluxo magnético de 4 T e correntes elétricas de aproximadamente 2000 A entre os eletrodos. Pesando aproximadamente 18 toneladas o conjunto foi instalado nas laterais inferiores do navio (Figura 2.19).

Figura 2.18 - Visão do conjunto de propulsores



Fonte: SASAKAWA (1996), tradução livre.

Figura 2.19 - Corte transversal do navio, mostrando os propulsores



Fonte: SASAKAWA (1996), tradução livre.

O Yamato possuía 30 m de comprimento e pesava em torno de 180 toneladas, tornando-o ainda hoje uma das maiores embarcações movidas por sistemas MHD do mundo.

Apesar dos valores numéricos mencionados acerca do campo magnético e da corrente elétrica serem altos, o desempenho do navio comparado as demais embarcações convencionais deixou muito a desejar. Como se pode ver na Figura 2.20, o sistema atingiu uma velocidade média de apenas 7 nós ou 3,6 m/s para o valor máximo do campo magnético, 4 T. Navios cargueiros podem atingir 20 a 25 nós (10,3 a 12,9 m/s), havendo velocidades de 15 nós (7,7 m/s), mas com grande calado (grande volume deslocado imerso).

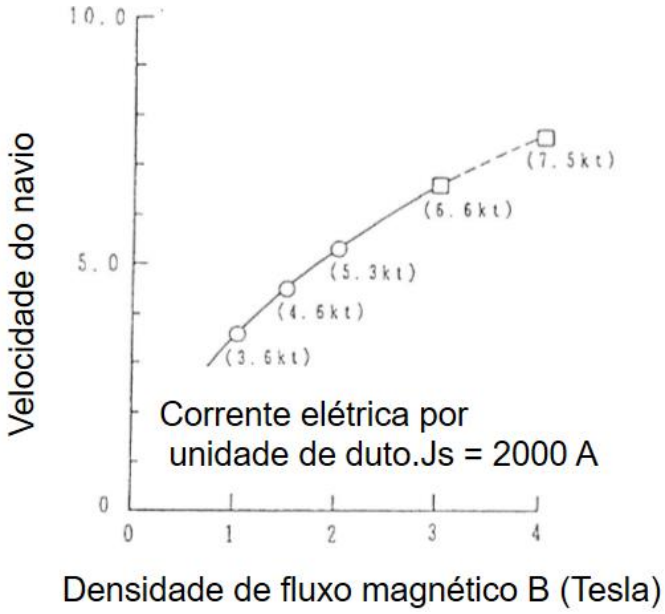
Sem dúvida houveram aspectos positivos nesse experimento, conforme arrolados abaixo:

- O Yamato foi uma das primeiras embarcações de médio porte no mundo a utilizar o sistema de propulsão MHD que, embora não atingindo a performance comercial esperada, mostrou possibilidades de movimento não atingidas até aquela época.
- A preparação dos supercondutores e sua implementação no navio, que eram consideradas operações impraticáveis alguns anos anteriores a este experimento mostraram-se factíveis e, de certa forma, atingiram o seu objetivo mais imediato, que

era o de gerar campos magnéticos intensos (o objetivo comercial, como visto, não foi atingido).

- Os estudos realizados no Yamato serviram para pesquisas mais avançadas na área de supercondutores, assim como a busca de novos tipos de bobinas e fios para geração de corrente elétrica.

Figura 2.20 - Velocidade do Yamato em função da densidade de fluxo magnético



Fonte: SASAKAWA (1996), tradução livre.

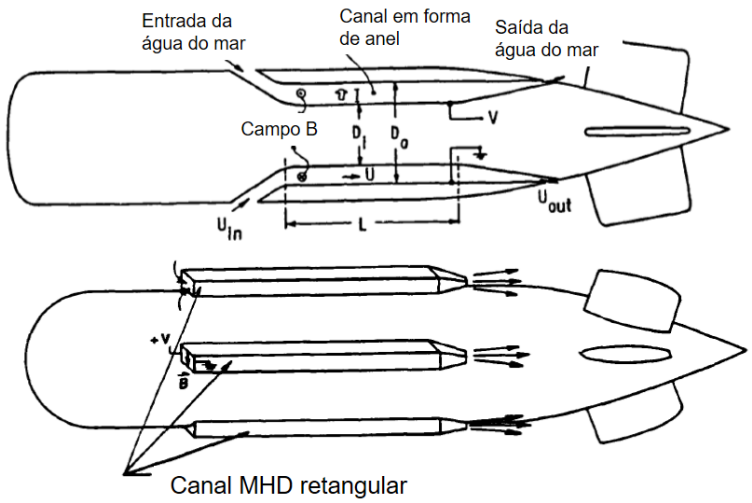
Saindo um pouco do “epicentro MHD japonês”, muitos estudos sobre propulsão MHD foram então retomados em outros países, principalmente nos Estados Unidos, inspirados no exemplo do Yamato-1.

Cerca de dois anos antes do teste inaugural do Yamato, Tempelmeyer (1990), e Tempelmeyer et al (1991), realizaram estudos sobre a eletrólise dos eletrodos de cobre e alumínio e a formação de bolhas de hidrogênio resultantes dessa interação, atentando para a sua consequência na eficiência do propulsor. Nos dois trabalhos os autores denominam essa formação de bolhas de “ruídos”, e tentam explicar em detalhes de que forma ela atrapalha o escoamento nos dutos. Levando em conta os demais trabalhos da época, os dois mencionados são considerados os mais minuciosos no tocante à formação de bolhas de hidrogênio.

Utilizando o princípio de propulsão de Phillips (1962), Lin et al (1990), abordam uma modelagem matemática utilizando o método conhecido como “dual control

volume analysis” para calcular a velocidade e o desempenho do sistema baseado nesse princípio. Em seu trabalho Lin et al. também discutem a propulsão MHD em diversos dispositivos marítimos, desde torpedos, Rov´s, veículos marítimos não tripulados até submarinos, utilizando dois tipos de geometria propulsivas diferentes, uma por campos magnéticos externos aplicados ao objeto e a segunda um propulsor interno do tipo duto. Os dois formatos podem ser vistos na Figura 2.21.

Figura 2.21 - Dois sistemas de propulsão propostos. O primeiro propulsor seria de formato anular e o segundo retangular



Fonte: LIN et al (1990), tradução livre.

Lin et al. ainda explicam a dependência da eficiência dos propulsores para com a condutividade da água do mar e apresenta métodos para melhorar as soluções salinas na água. Em um trabalho posterior e apresentando seus estudos no campo teórico, Pohjavirta (1991) analisa propulsores do tipo de condução externos, como aqueles apresentados por Li et al., buscando as suas vantagens.

Nessa época os supercondutores em formato de solenoide (no caso bobinas), permitiam um peso menor e campos magnéticos mais fortes do que imãs dipolares (campo magnético homogêneo), ou seja, se uma partícula for injetada no domínio desse imã ela terá um movimento circular num plano perpendicular ao campo e retilíneo na direção ortogonal a ele, logo resultando para a partícula uma trajetória circular ou helicoidal. No entanto para tal feito seria necessário um arranjo especial dos eletrodos, de forma que o propulsor seria da forma helicoidal, Bashkatov (1991).

Ainda em 1992, da união entre dois laboratórios, Argonne National Laboratory e Newport News Shipbuilding, resultaram dois relatórios detalhados (divididos em fase

1 e fase 2) discutindo a factibilidade de um sistema de mesmo porte utilizado no Japão (ver Doss e Sikes (1992).

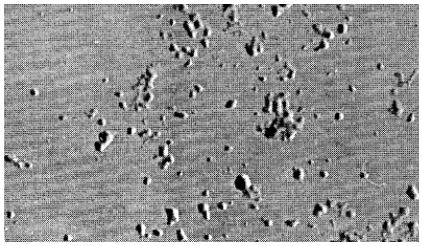
Na fase 1, o programa estaria focado principalmente no desenvolvimento de um modelo computacional MHD, enquanto que na fase 2 eles estariam focados na validação experimental do propulsor. Para a criação do campo magnético, no caso 2 T, uma bobina convencional foi proposta. Assim como os demais trabalhos, as condições de velocidade, campo magnético e eficiência propulsiva e eletromagnética foram testadas. No entanto o trabalho também focou na formação de bolhas durante a eletrólise e a eficiência do eletrólito, estudos específicos que aos quais poucos trabalhos haviam atentado no passado. Copnforme Tempelmeyer (1990), e Tempelmeyer et al (1991), tinha-se agora a informação de que a formação de bolhas, além da condutividade do líquido, possui uma relação direta na performance elétrica do propulsor. Resultados da época relativos à condutividade elétrica foram apresentados em Doss e Sikes (1992), reproduzidos aqui, como ilustração, na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Potencial elétrico, entre água do mar, solução salina e concentrada (DOSS e SIKES, 1992, tradução livre e adaptada)

Fluido utilizado	Condutividade (S/m)	Potencial eletroquímico (volts)
Solução NaCl	4,8	2,6
Solução NaCl	22,5	2,5
Água do mar	5,3	2,7

A formação e a contagem de bolhas, o “ruído” interferente descrito por Tempelmeyer (1990), e Tempelmeyer et al (1991), podem ser vistas na Figura 2.22 e na Tabela 2.2.

Figura 2.22 - Formação de bolhas no experimento



Fonte: DOSS e SIKES (1992).

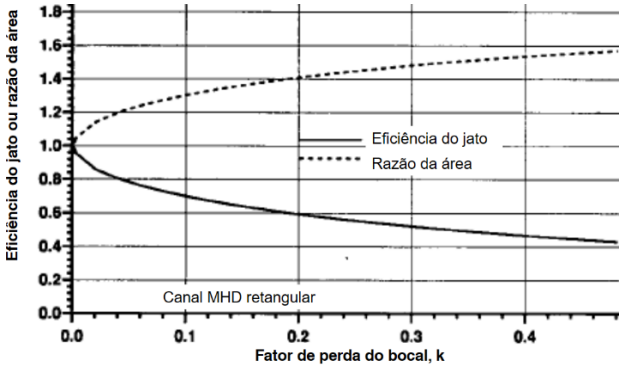
Tabela 2.2 - Contagem de bolhas durante o e no final do experimento (DOSS e SIKES, 1992, tradução livre e adaptada)

Fluido utilizado	Condutividade (S/m)	Potencial eletroquímico (volts)
Solução NaCl	4,8	2,6
Solução NaCl	22,5	2,5
Água do mar	5,3	2,7

Alguns meses depois (mas no mesmo ano e no mesmo laboratório), Petrick et al. (1992), conduziram uma pesquisa em que analisavam a performance do propulsor em regime estacionário e permanente, assim como estudos hidro acústicos (estudo da propagação do som na água e a interação das ondas mecânicas), em um campo magnético de 6 Tesla, chegando à conclusão que a perda mecânica e propulsiva era resultado do design do propulsor e dos parâmetros de operação.

Doss e Geyer (1993), por sua vez, enfatizam logo na introdução de seu trabalho as razões para se renovar o interesse pela propulsão magnetohidrodinâmica. Eles citam algumas vantagens, dentre elas ausência de partes mecânicas e a capacidade “presumivelmente” ilimitada da velocidade desses veículos, um aspecto para o qual os propulsores convencionais são limitados pela cavitação. Nesse trabalho algumas assim ditas “eficiências” são calculadas, desde aquela relacionada ao jato no duto, até a eficiência elétrica. Na Figura 2.23 é possível ver a relação entre o coeficiente de perda de carga admitido para um tipo de bocal do propulsor e a “eficiência do jato”, considerando a razão de área à qual está sujeita o bocal. Esta figura é ilustrativa, porque a sua compreensão exige a definição mais exata da “eficiência do jato” associada aos fatores geométricos mencionados.

Figura 2.23 - Variação da razão de área e sua eficiência

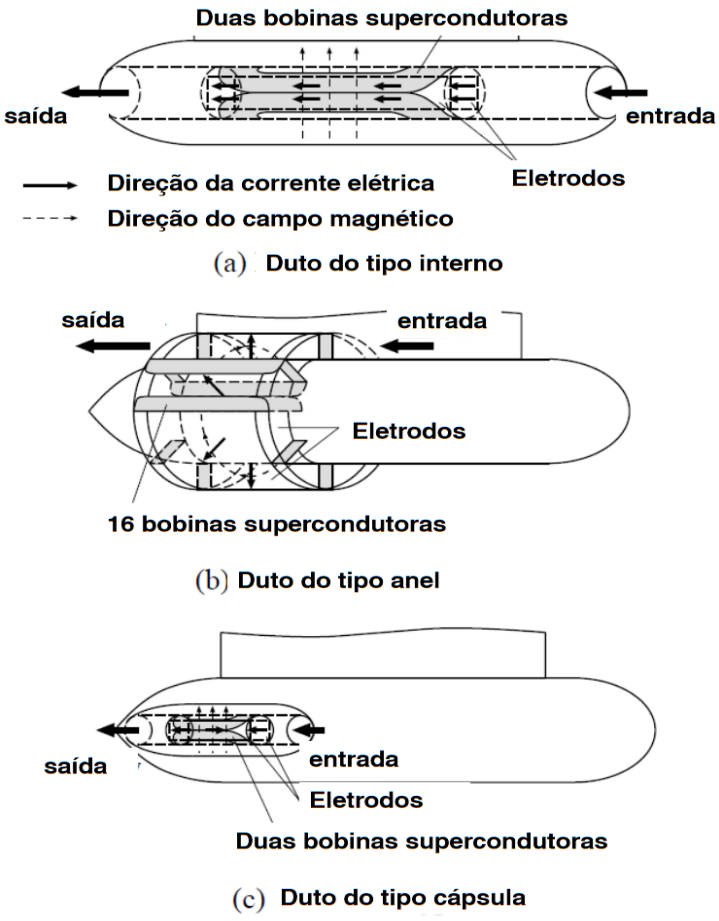


Fonte: DOSS e GEYER (1993), tradução livre.

Não obstante, a figura 2.23 permite, ainda assim, observar a inter-relação entre as variáveis consideradas. A razão entre as áreas ajudar a determinar quão eficiente seria o jato do propulsor. Por exemplo, nesta figura, se a razão for 1, a eficiência do jato será de 100%, no entanto não haverá propulsão (conclusão decorrente do balanço de quantidade de movimento). Por outro lado, à medida que k aumenta (a perda de carga, ou perda de energia), a eficiência do jato cai rapidamente. Como conclusão, deve-se buscar uma relação "harmoniosa" entre a área do propulsor (ou razão de áreas), *k* e a eficiência do jato.

Akagi et al (1994), seguindo as geometrias estudas anteriormente por Phillips (1962) e Lin et al. (1990), investigou qual modelo seria mais eficiente para o sistema propulsivo. A Figura 2.24, mostra 3 diferentes modelos: os dois mais comuns, a) Tubo interno no qual o fluxo de água entra pela proa e sai pela popa e, b) tubos externos, no qual os propulsores seriam instalados em volta da embarcação, e um terceiro c) que seria um híbrido entre o tipo a) e b).

Figura 2.24 - Modelos de propulsores analisados



Fonte: AKAGI et al (1994), tradução livre.

Os autores chegaram à conclusão que o tipo de duto interno possui a melhor eficiência propulsiva, o tubo externo possui a pior eficiência e o novo tipo híbrido possuía qualidades medianas. A Tabela 2.3 apresenta os resultados dos estudos teóricos realizados por eles.

Tabela 2.3 - Comparação dos 3 modelos de propulsão (AKAGI et al, 1994, tradução livre)

	Duto interno	Duto em anel	Montagem em cápsula
Deslocamento (ton)	180.000	177.571	192.715
Número de Froude	0.69109	0.66380	0.66380
Resistência do navio (kN)	101.442	113.931	133.920
Vazão no duto (m^3/s)	12.9496	49.1956	12.0017
Perda de carga no duto (maq)	9.08938	2.98614	5.12522
Densidade do campo magnético (T)	8.61197	5.92690	5.54785
Potência elétrica (MW)	9.01758	36.4682	31.5004
Eficiência hidráulica (%)	44.1086	39.6917	55.7128
Eficiência elétrica (%)	13.1203	8.09834	7.85133
Eficiência propulsiva (%)	5.78718	3.21437	4.37420

A partir de meados da década de 90 nota-se uma diminuição dos trabalhos relacionados à propulsão marítima, especialmente os militares envolvendo submarinos. Uma razão para isso poderia ser a extinção da União Soviética, levando países como os Estados Unidos a abandonarem inicialmente setores com resultados “menos promissores” da corrida armamentista que vigorava até então, e, consequentemente alguns projetos relacionados a indústria naval militar. No entanto existe uma bibliografia bastante extensa que pode ser resgatada desse período.

Com o final da “guerra fria” que circundava a existência da união Soviética, alguns centros de pesquisa começaram a pesquisar a propulsão associada à magnetoplasmadinâmica, que de certa forma é uma MHD aplicada a fluidos plasmáticos. Nota-se, portanto, uma especialização direcionada a plasmas e afastando-se da água do mar. Estudos baseados nos trabalhos anteriores de Alfvén surgiram, enriquecendo o tema com hipóteses de viagens espaciais utilizando essa ferramenta. Por se tratar de outra área da MHD, distinta daquela aqui abordada, os trabalhos referentes à plasmadinâmica não são mencionados aqui. Como dito

anteriormente apenas a propulsão MHD relacionada a líquidos salinos é o tema do presente estudo.

Considerando a repercussão obrida pelo experimento do Yamato, Takezawa et al (1995) publicam então informações relevantes do navio, ainda não abertas à comunidade científica em geral. A estrutura dos propulsores, as dimensões deles, a força propulsiva obtida e a corrente utilizada, são aqui reproduzidas na Tabela 2.4, Tabela 2.5,

Figura 2.25, e Figura 2.26:

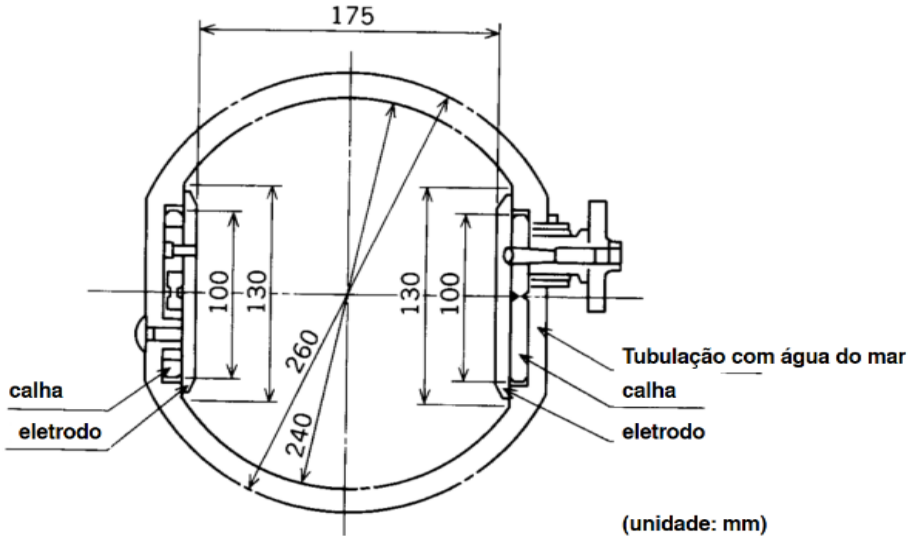
Tabela 2.4 - Características do Yamato - 1 (TAKEZAWA et al, 1995, tradução livre e adaptada)

Item	Especificação
Comprimento, total	30,00 m
Largura	10,39 m
Esboço	1,50 m
Deslocamento	185 t
Área de navegação	Águas calmas
Velocidade	8 kn
Propulsor: tipo externo, corrente elétrica passa pela água do mar	6 anéis de imãs interligados (2x) Força de Lorentz total: 16 kN Potência elétrica: 3600 kW
Refrigeração interna: compressor com hélio líquido	Turbo expansion Claud x 2 unidades e resfriador do tipo parafuso hidráulico
Gerador principal	2000 kW x 2 unidades
Gerador auxiliar	1800 kW x 1 unidade
Complemento: tripulação e outros pessoais	3 e 7

Tabela 2.5 - Características do imã supercondutor (TAKEZAWA et al, 1995, tradução livre e adaptada)

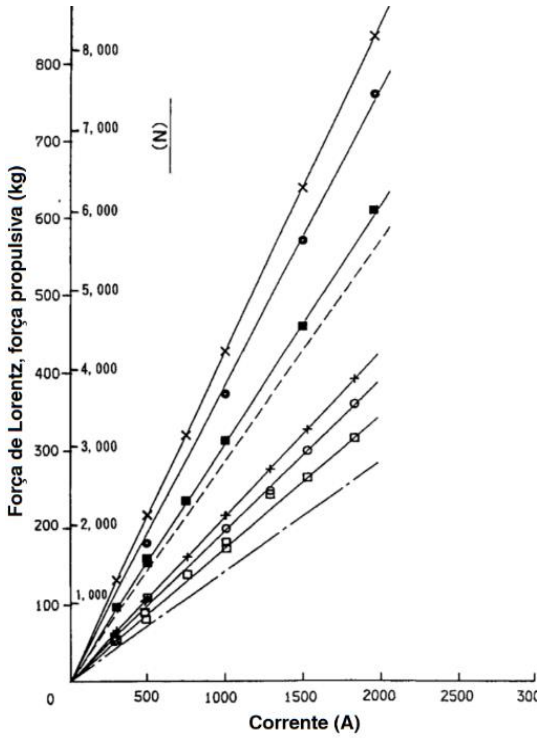
Item		Especificação
tipo		6 conjuntos de imãs em anel
Bobina supercondutora		Bobina dipolo
Performance	Densidade de fluxo no centro do duto	4T a 3770 A
	Indutância	3,0 H
	Energia eletromagnética	21,3 MJ
Dimensão	Diâmetro interno em temperatura ambiente	260 mm
	P.C.D do furo a temperatura ambiente	1050 mm
	Diâmetro externo da câmara de vácuo	1850 mm
	Comprimento da câmera de vácuo	5400 mm
Criostato	Tipo de isolação	LN_2 câmara de vácuo
	Resfriamento da bobina	Imersão de L e He
	material	Aço inoxidável e alumínio
Acessórios		Controle das bobinas, resistor de proteção.

Figura 2.25 - Secção do propulsor



Fonte: TAKEZAWA et al (1995) tradução livre.

Figura 2.26 - Força propulsiva em relação a corrente usada

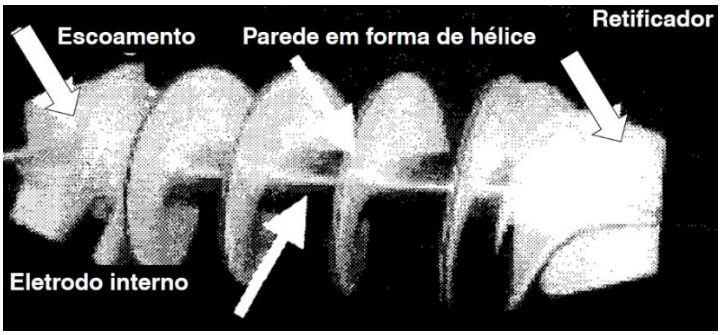


Fonte: TAKEZAWA et al (1995), tradução livre.

As informações providas por Takezawa et al. (1995) ainda são úteis como material de estudo e de comparação com propostas novas na área de propulsores.

Em 2002 o Instituto de Engenharia Elétrica da Academia Sinica (Taiwan, China), juntamente com a Universidade Marítima de Kobe (Japão), conduziram um experimento com um supercondutor magnético da ordem de 14 T, até então o mais poderoso testado nesta área. Yan et al. (2002) mencionam que apenas o propulsor foi testado, sem embarcá-lo em um veículo. Diferentemente dos demais trabalhos, o propulsor investigado possuía um formato helicoidal, conforme mostra a Figura 2.27.

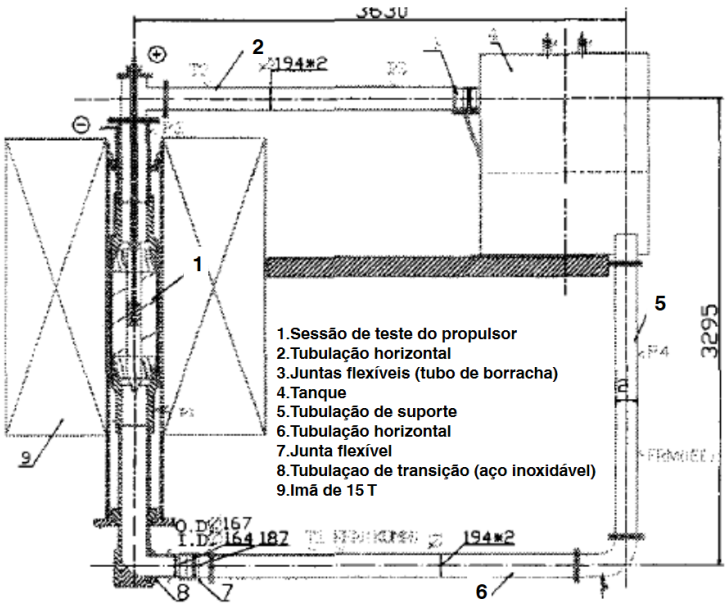
Figura 2.27 - Sistema helicoidal de propulsão



Fonte: YAN et al (2002), tradução livre.

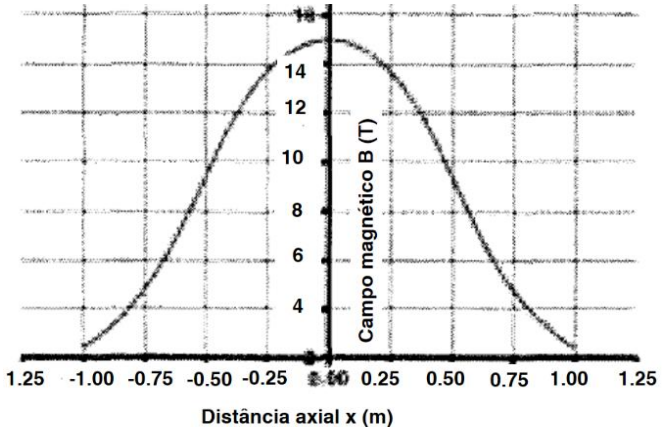
Testes relevantes, como a densidade de corrente presente nos eletrodos, a variação do campo magnético e da força propulsiva foram realizados. Os campos magnéticos foram variados de 2 T até 14 T, enquanto que a corrente entre os eletrodosvariou de 10 A até 700 A. A Figura 2.28 e a Figura 2.29 mostram o arranjo experimental e os campos magnéticos obtidos, respectivamente.

Figura 2.28 - Arranjo experimental



Fonte: YAN et al (2002), tradução livre.

Figura 2.29 - Intensidade do campo magnético. Em seu pico o valor atingiu 15 Teslas



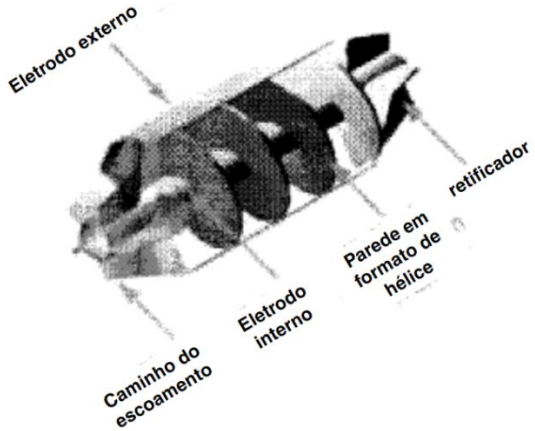
Fonte: YAN et al (2002), tradução livre.

A força propulsiva desse novo sistema atingiu valores próximos a 20.000 N/m^3 quase 5 vezes maior do que o Yamato-1 e sua densidade de corrente ultrapassou a marca dos 2000 A/m^3, valor muito maior que outros trabalhos publicados

anteriormente. Sua eficiência (13%), apesar de baixa comparada com veículos convencionais, superou em muito a eficiência do Yamato-1 (1%). Outra conclusão tirada do trabalho foi de que o sistema helicoidal de fato se mostrou mais eficiente para aplicações comerciais, como navios cargueiros (transportes de mercadorias) por exemplo.

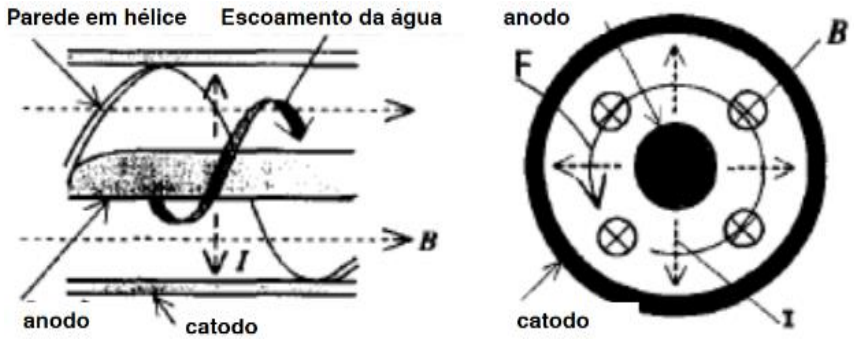
Mais detalhes desse sistema helicoidal foram mostrados no mesmo ano (2002), inclusive no mesmo congresso onde os resultados de Yan et al. (2002) foram expostos. As figuras Figura 2.30 e Figura 2.31 reproduzem aqui aquelas apresentadas por Peng et al (2002), que mostram mais detalhes do propulsor utilizado.

Figura 2.30 - Configuração geral do canal helicoidal



Fonte: PENG et al (2002) tradução livre.

Figura 2.31 - Principio de operação do propulsor MHD

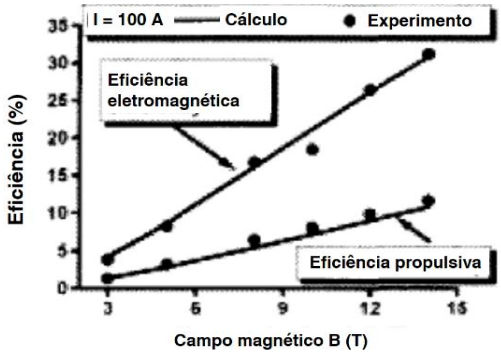


Fonte: PENG et al (2002), tradução livre.

É interessante notar que o efeito resultante gerado, no caso a força de Lorentz, tem um formato axial (vórtice), que é impulsionado pelo canal, formando o efeito helicoidal. Em estudos realizados no Brasil, esse fenômeno de vorticidade foi

estudado por Missiato (2000), utilizando água do mar em experimentos conduzidos na Escola de Engenharia de São Carlos, USP. É interessante mencionar, como ilustração, que a Escola de Engenharia de São Carlos dista algo em torno de 350 km do mar, tendo sido a água transportada em galões até o local do experimento. Peng et al. (2002) mencionam que, com esse tipo de geometria foi alcançada uma eficiência eletromagnética em torno de 30% e uma eficiência propulsiva em torno de 10%, utilizando campos magnéticos da ordem de 15 T, como mostra a Figura 2.32.

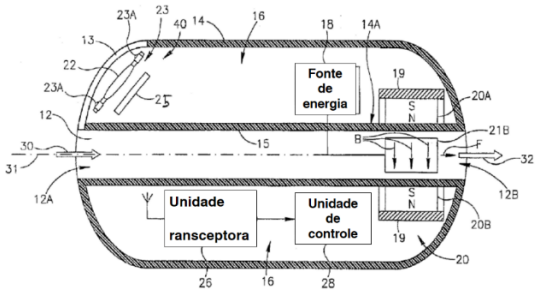
Figura 2.32 - Eficiência eletromagnética e propulsiva



Fonte: PENG et al (2002), tradução livre.

Diferentes abordagens têm surgido envolvendo o tema de propulsão MHD. Por exemplo, em sua patente de número: US 6.939.290, Iddan (2005) propõe uma embarcação autossuficiente movida à propulsão eletromagnética. Para ser mais exato, trata-se de um modelo na forma de uma cápsula contendo sensores que ajudariam o veículo a ser mover de modo autônomo. Segundo o inventor esse dispositivo poderia ser miniaturizado para ser aplicado na área biomédica. A Figura 2.33 expõe as linhas gerais de sua ideia.

Figura 2.33 - Cápsula autônoma movida a propulsão MHD os números de interesse são o 19, 20, 30 e 32, uma vez que eles estão relacionados ao movimento MHD



Fonte: patente IDDAN (2005), tradução livre

É possível notar que o sistema MHD é do tipo duto interno, e os números 30 e 32 representam a entrada e a saída do fluido, respectivamente e os números 19 e 20 seus domínios magnéticos e elétricos respectivamente.

2.4.4. Quarto estágio (2000 – dias atuais)

Com avanço da computação, que trouxe processadores mais rápidos e placas gráficas mais poderosas a preços acessíveis ocorreu a popularização da simulação computacional. Apesar de estar presente desde a década de 70 do século XX, a simulação computacional se tornou ferramenta principal nas análises preliminares de um fenômeno. Muitos centros de pesquisas optaram por esse método por ser, enquanto realizado com abordagens menos detalhistas, mais barato do que construir um modelo e testá-lo em campo. Note-se que o custo de cálculos computacionais detalhados, que visam utilizar a Simulação Numérica Direta ou métodos suficientemente detalhados para grandes números de Reynolds, pode ser ainda proibitivo, envolvendo o uso dos assim denominados “supercomputadores”. Tais máquinas não são acessíveis ao pesquisador comum e tornam os experimentos laboratoriais ainda uma opção viável. A isto deve ser adicionado que qualquer equação inserida em um computador é um modelo da realidade, e não a própria realidade. Assim, ela está sujeita às limitações do modelo. O experimento, por outro lado, utiliza-se de componentes do meio real. As simulações para os propulsores MHD, entretanto, não envolvem, para uma grande gama de propostas, cálculos excessivamente detalhados. Como visto anteriormente, poucos centros de pesquisa possuíam direcionamento investigativo e investimentos para as simulações numéricas nos períodos iniciais dos estudos em MHD. Mas a partir da década de 90 do século XX e, mais notadamente com o início do século XXI (a partir de 2000) houve um aumento significativo no número de trabalhos que utilizaram simulações computacionais, mostrando que mais países passaram a participar dessa área de pesquisa, podendo-se talvez dizer que “entraram na corrida” da propulsão MHD.

Desalinhando-se momentaneamente da tendência observada nos três primeiros estágios, a pesquisa em propulsão MHD nos dias atuais não estabeleceu ainda uma “história” de avanços que conduziu aos passos posteriores. Quando a

história de uma área está estabelecida, um foco de pesquisa “contundente” pode ser localizado como o modelo base para a expansão dos demais focos espalhados no globo, ou seja, consegue-se estabelecer uma conexão cronológica. Isto também foi visto nos três primeiros estágios aqui descritos da MHD. A partir do início do século XXI isso “mudou” na MHD. Os estudos se mostraram mais independentes e menos conectados uns aos outros. Sem dúvida será formada uma “cadeia de eventos” que, *a posteriori*, poderá ser localizada como composta pelos estudos mais “contundentes”. Uma vez que tal “cadeia” ainda não está estabelecida, para a revisão bibliográfica deste estágio foram citados trabalhos que não possuem uma ligação histórica ou evolutiva, mas que têm em comum se relacionarem com a propulsão MHD em veículos.

Vários pesquisadores e centros de pesquisa seguem as características de simulação deste quarto período. Jiang et al. (2008), continuando seu trabalho publicado em 2002, usam as ferramentas computacionais para avaliar seu projeto de propulsor MHD helicoidal, informando ser essa uma boa forma de avaliar seus projetos. Mais tarde Zhao (2012), calculam computacionalmente as perdas de energia e corrente desse sistema helicoidal na água.

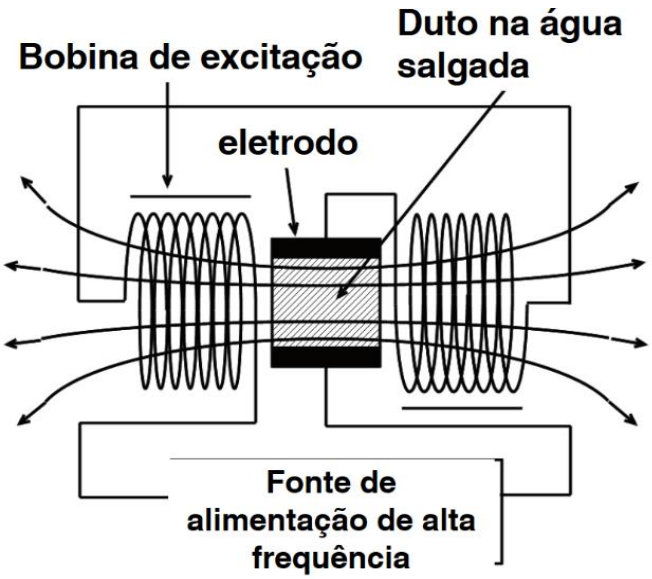
O deslocamento horizontal de corpos flutuantes de pequeno calado na superfície da água pode ocorrer com pouca resistência ao movimento. Isso permite que a propulsão MHD possa ser utilizada com pequena potência para gerar movimentos em pequenos modelos. Assim, experimentos com veículos leves em movimento horizontal são razoavelmente profusos, por vezes não acompanhados de informações técnicas, mas que ilustram possibilidades de uso desta propulsão. Podemos citar o experimento de Sutcliffe e Neisser (2009), no qual os autores investigaram a construção de sistemas de propulsão MHD de pequena escala, buscando otimizações na performance do motor em um mini-modelo de embarcação. A Figura 2.34 mostra o aspecto exploratório que evidencia esse experimento (e outros do gênero).

Figura 2.34 – Mini-modelo de veículo aquático de *superfície*

Fonte: SUTCLIFFE & NEISSER (2009).

No tocante à tecnologia de eletrodos, Kubota e Shimaoka (2011) apresentam um propulsor eletromagnético que funciona com tensão alternada (AC) ao invés de tensão contínua (DC). O motivo para propor o uso de corrente alternada é que a corrente contínua gera eletrólise, e, consequentemente o desgaste dos eletrodos. Tal desgaste pode implicar em grandes taxas temporais de perda de material, inviabilizando o uso em veículos que, evidentemente, precisam de autonomia de deslocamento. Quando se aplica uma corrente AC de alta frequência grande parte desse desgaste é evitado e o eletrólito se mantem conservado. O esquema proposto por Kubota e Shimaoka (2011) pode ser visto na Figura 2.35:

Figura 2.35 - Esquema de montagem do propulsor AC



Fonte: KUBOTA e SHIMAOKA (2011), tradução livre.

Wen (2013) propôs um conceito de propulsão inovador, utilizando alta tensão pulsada (600 Hz) e utilizando apenas um anodo. Apesar da baixa eficiência do

propulsor, que atingiu 10^{-7} na ordem de magnitude, e da baixa velocidade atingida, de 2 cm/s, o experimento foi considerado um sucesso, uma vez que não havia necessidade de usar supercondutores.

Avançando nos conceitos da área, Jamalabadi e Park (2014), investigaram analiticamente o comportamento de uma tubeira propulsiva MHD, considerando variações do número de Stuart, um parâmetro magnetohidrodinâmico.

No contexto numérico, Meng (2016) fez uma simulação para a otimização de um propulsor MHD, usando o programa de elementos finitos Fluent®. O autor analisou o comportamento dos campos magnéticos dentro do propulsor e sua variação com o aumento de corrente. Como consequência dessas variações, também os perfis de velocidade e valores de referência são apresentados.

Seguindo uma linha algo “mista”, Trepanese (2016) faz primeiramente um estudo analítico levando em conta um modelo eletromagnético e térmico do propulsor e posteriormente compara resultados desse modelo com simulações tridimensionais procurando soluções adequadas alternativa para o problema de propulsão MHD.

Pode-se dizer que a partir de 2010 houve uma diminuição nos estudos práticos sobre propulsão MHD e um aumento nas simulações. Os estudos dos propulsores também voltaram para as pranchetas de projeto e muitos são testados estaticamente (sem serem embarcados em navios ou submarinos). Pode-se citar aqui alguns dos fatores que contribuíram para a redução das produções práticas:

- A preocupação dos pesquisadores em tentar melhorar a eficiência antes de pôr o equipamento em pratica.
- A preocupação ambiental que surgiu devido aos experimentos MHD em ambiente marítimo. O produto resultante da eletrólise dos eletrodos (como o hidróxido de sódio NaOH, por exemplo), assim como os gases formados na reação como o Cloro Cl_2 e o hidrogênio H_2 podiam causar danos locais aos mares, o que acabou limitando esses experimentos.
- A popularização da magnetoplasmadinâmica e a possibilidade das viagens espaciais com as expectativas de propulsão e uso de “combustíveis” alternativos, a MPD se tornou umas das alternativas mais viáveis para o movimento fora do ambiente terrestre, tornando esta, uma das áreas mais estudadas da física de plasmas.

CAPÍTULO 3

3. MODELO ANALÍTICO DA MAGNETOHIDRODINÂMICA COM SUAS BASES FÍSICAS

3.1. Introdução

O modelo físico proposto no trabalho é baseado em um único fluido contínuo, incompressível e newtoniano. Isto leva a usar, como modelo matemático, a formulação clássica das equações de Navier-Stokes, com termos adicionais resultantes da interação do fluido condutor com campos eletromagnéticos. O modelo matemático fica completo com a lei de Ohm geral, que relaciona a densidade de corrente com o campo elétrico gerado por ela, e com as equações de Maxwell – Faraday e Ampère – Maxwell. A equação geral de Ohm descreve um plasma, para o qual a condutividade não tem natureza escalar e depende da interação “ou colisão” do campo magnético com o fluido condutor: a interação, ou as “colisões”, favorecem a difusão das partículas carregadas. Aqui o modelo estatístico para plasmas é apresentado primeiramente, pois ele direciona todos os demais modelos, inclusive o da magnetohidrodinâmica.

3.2. A Física de Plasmas

A descrição de plasmas utilizando o modelo MHD é discutida em qualquer livro de magnetohidrodinâmica (por exemplo Goedbloed e Poedts, 2004) ou de física de plasmas (por exemplo Bellan, 2006; Goldston e Rutherford, 1995).

Uma definição de plasma é aquela que o descreve como um gás ionizado constituído por partículas carregadas eletricamente (elétrons e íons), possuindo, portanto, cargas positivas e negativas. Na presença de campos eletromagnéticos essas cargas apresentam comportamentos distintos. Outra descrição de plasma foi apresentada por Goldston e Rutherford (1995), que o descrevem como o resultado do

movimento relativo de cada uma das partículas do meio em análise e pelas suas constantes colisões. A sua abordagem minuciosa envolveria a descrição detalhada da dinâmica de cada uma das partículas e de sua interação com os campos elétricos e magnéticos. Todas essas partículas estariam sujeitas às leias físicas fundamentais (leis de Maxwell e de Newton) (ver também Xisto, 2014).

No entanto a abordagem detalhada mencionada no parágrafo anterior é impraticável, dado o elevado número de partículas presentes no plasma (ou em qualquer porção de matéria utilizável em escala humana). Para resolver esse problema deve-se identificar “parâmetros” ou “variáveis adequadas” que façam com que a utilização das equações básicas na descrição do escoamento decorrente dos movimentos e interações seja uma boa aproximação. Portanto, trata-se de optar por um modelo matemático suficientemente capaz de expressar o comportamento do sistema real (físico).

Um dos métodos mais eficientes e abordados na física de plasmas é considerar a distribuição coletiva das partículas no plasma, o que faz com que o movimento individual de cada partícula possa ser desprezado. Conforme menciona Fitzpatrick (2014), partindo das funções de distribuição de velocidades e momentos, utilizando as equações de Boltzmann e Vlasov, pode-se descrever estatisticamente o comportamento das partículas em tela, pela eq. (3.1):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0 \qquad (3.1)$$

A equação (3.1) é a equação de Boltzman sem colisão, usada para plasmas nos quais as colisões podem ser desprezadas. A equação está escrita em temos da força generalizada. Para plasmas, a força de Lorentz deve ser adicionada, gerando a equação (3.2a):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{q}{m}\left[\mathbf{E} + \left(\mathbf{v} \times \mathbf{B}\right)\right] \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0 \qquad (3.2a)$$

Onde **F**, **v**, *m* e **r**, são respectivamente as forças de Lorentz, velocidade, massa e trajetória da partícula. Esta é a equação de Vlasov, amplamente usada na teoria cinética de plasmas. Ela pode ser escrita também na forma.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f + \frac{q}{m}\left[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})\right] \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0 \qquad (3.2b)$$

Onde q, **E** e **B** são as cargas das partículas, o campo elétrico e o campo magnético respectivamente. A equação (3.1), na presença de colisões, é modificada convenientemente para:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{col} \qquad (3.3)$$

Verifica-se que o lado direito é uma inserção que “expressa” a taxa de variação de f devido às colisões. Trata-se de um artifício matemático que visa diferenciar este equacionamento daquele gerado para a situação sem colisões. Similarmente, a equação (3.3) de Vlasov pode então ser escrita como:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f + \frac{q}{m}\left[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})\right] \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{col} \qquad (3.4)$$

No entanto, sob certas condições, nem sempre é necessário obter a função real de distribuição, quando só se está interessado em valores macroscópicos. Ao invés de resolver a equação de Boltzman–Vlasov para uma função de distribuição e daí integrar, pode-se usar a equação (3.4) e integrá-la diretamente para obter as quantidades de interesse. Essa operação de integração leva às equações de quantidade de movimento ou de “momentum” (momento linear). Os resultados são conhecidos como equações de transportes macroscópicos e formam a base da teoria de fluidos aplicados a plasma.

Essa integração é encontrada nos livros sobre plasmas, produzindo a equação integral da continuidade para plasmas:

$$\int \frac{\partial f}{\partial t} d\mathbf{v} + \int \mathbf{v} \cdot \nabla f d\mathbf{v} + \int \frac{q}{m}\left[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})\right] \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} d\mathbf{v} = \int \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{col} d\mathbf{v} \qquad (3.5)$$

O detalhamento das parcelas da equação (3.5) permite chegar a formas mais úteis delas, como mostrado na sequência.

Parcela 1
1º Membro

$$\int \frac{\partial f}{\partial t} d\mathbf{v} = \frac{\partial}{\partial t} \int f d\mathbf{v} = \frac{\partial n}{\partial t} \tag{3.6}$$

Parcela 2
1º Membro

$$\int \mathbf{v} \cdot \nabla f d\mathbf{v} = \nabla \cdot (n\mathbf{u}) \tag{3.7}$$

Parcela 3
1º Membro

$$\int \mathbf{E} \cdot \frac{\partial f}{\partial v} d\mathbf{v} = \int \frac{\partial}{\partial v} \cdot (f\mathbf{E}) d\mathbf{v} = \int f\mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 0 \tag{3.8a}$$

Parcela 4
1º Membro

$$\int f (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{S} - \int f \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) d\mathbf{v} = 0 \tag{3.8b}$$

Parcela 1
2º Membro

$$\int \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{col} d\mathbf{v} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\int f d\mathbf{v} \right] = 0 \tag{3.9}$$

Combinando as equações (3.6 - 3.9), obtém-se:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{u}) = 0 \tag{3.10}$$

Onde *n* é o número de partículas, **u** a velocidade média e **S** elemento de área. A equação (3.10) é a equação da continuidade na forma diferencial para a massa ou o transporte de carga, se multiplicada por *m* ou *q*, respectivamente. Utilizando a equação (3.4) novamente e multiplicando-a por *m***v** e integrando sobre *d***v**, obtém-se a equação de quantidade de movimento (algumas vezes denominada apenas de equação do movimento).

$$m \int \mathbf{v} \frac{\partial f}{\partial t} d\mathbf{v} + m \int \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \nabla) f d\mathbf{v} + q \int \left[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \right] \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} d\mathbf{v} = \int m\mathbf{v} \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{col} d\mathbf{v} \tag{3.11}$$

Onde:

$$m\int \mathbf{v}\frac{\partial f}{\partial t}d\mathbf{v} = m\frac{\partial}{\partial t}\int \mathbf{v}fd\mathbf{v} = m\frac{\partial(n\mathbf{u})}{\partial t} \tag{3.12}$$

$$q\int \mathbf{v}\left[\mathbf{E}+(\mathbf{v}\times\mathbf{B})\right]\cdot\frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}}d\mathbf{v} = -q\int f\,(\mathbf{E}+\mathbf{v}\times\mathbf{B})d\mathbf{v} = -qn\,(\mathbf{E}+\mathbf{v}\times\mathbf{B}) \tag{3.13}$$

Para resolver a segunda integral da equação (3.11) classicamente se admite que **v** não depende do operador gradiente e toma-se a média das quantidades de partículas:

$$\int \mathbf{v}(\mathbf{v}\cdot\nabla)fd\mathbf{v} = \nabla\cdot(n<\mathbf{vv}>)$$

Trata-se de uma abordagem clássica. A simbologia < > representa a média mencionada. Neste particular, a formulação ainda admite propostas diferentes daquela seguida, podendo ser a base para desenvolvimentos futuros. Note-se que médias podem ser definidas de diferentes maneiras. Uma possibilidade de exploração com definições alternativas seria utilizar as ondas quadradas aleatórias, semelhantemente ao apresentado por Schulz et al. (2011) para escoamentos turbulentos. Separando *v* em velocidade média do fluido **u** e velocidade térmica **w**, tem-se:

$$\mathbf{v} = \mathbf{u} + \mathbf{w}$$

A parcela dita “térmica” corresponde à parcela aleatória da velocidade, que justamente permite que se fale de uma “média”. Através de operações vinculadas ao operador de média (justamente aquele que pode ter definições alternativas), as equações para o movimento médio são obtidas. No presente texto, como já mencionado, seguiu-se o desenvolvimento clássico, que pode ser encontrado nos livros que tratam de plasma dinâmica (ver Fitzpatrick (2014) e Bittencourt (2004), por exemplo), que leva à equação (3.14) para a equação da quantidade de movimento (ou apenas “movimento”) do escoamento:

$$mn\left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}+(\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}\right]=qn(\mathbf{E}+\mathbf{u}\times\mathbf{B})-\nabla\cdot\mathbf{P}+\mathbf{P}_{ij} \qquad (3.14)$$

3.2.1. Teoria do fluido único: MHD

De fato, existem equações macroscópicas para cada espécie de plasma com que se trabalha. Dependendo das hipóteses escolhidas para “acomodar” características físicas consideradas relevantes, o modelo matemático MHD pode assumir diferentes formulações. Geralmente duas teorias são abordadas: 1) a de múltiplos fluidos, onde cada espécie é tratada como fluido independente, e 2) a teoria do fluido único, onde todo o plasma pode ser considerado como um único fluido. Essa segunda teoria é mais comumente designada de magnetohidrodinâmica (MHD).

Geralmente essa abordagem não diferencia os íons e elétrons e é um método utilizado frequentemente para fluidos condutores (inclusive água salgada), loops coronais, tokamaks, etc.

A teoria MHD é útil quando um plasma é altamente ionizável e os elétrons e íons são forçados a agir em conjunto, seja por frequentes colisões entre eles ou por um campo magnético externamente aplicado. Nesse caso, a MHD afirma que:

i - Macroscopicamente o modelo assume que o plasma se comporta como um meio contínuo num estado de ionização e equilíbrio.

ii - Se a frequência de colisão entre as partículas é muito alta, pode-se aproximar para um equilíbrio termodinâmico.

iii - O plasma deve estar neutro, ou seja, o número de cargas positivas e negativas deve estar em uma forma que todas se anulem, impedindo que contribuam para a evolução do escoamento. Para que isso possa ser “garantido”, essa neutralidade deve se encontrar num volume bastante pequeno (isto é, nas menores escalas do movimento, e não apenas considerando o movimento global), do tamanho da esfera de Debye. A esfera de Debye é um volume cujo raio é o comprimento de Debye que é a distância em partes da qual uma separação significativa das cargas pode ter lugar.

Para que a formulação possa representar o que foi dito no item iii acima, o comprimento de referência do plasma (ou, para uma compreensão mais imediata, a “escala de comprimento” do movimento global), deve ser muito maior do que a “escala de comprimento” para o qual a condição de neutralidade se impõe, ou seja:

$$\lambda_H \gg \lambda_D \tag{3.15}$$

Onde λ_H é o comprimento de referência do plasma e λ_D é o raio de esfera de Debye.

O uso de “escalas de comprimento” e de “escalas temporais” é de uso corriqueiro na física estatística, permitindo analisar os fenômenos como constituídos por “escalas” nas quais diferentes princípios podem estar agindo. Esta terminologia foi incorporada aos estudos de Mecânica dos Fluidos, estabelecendo-se procedimentos de análise que implicam em “alta iteração” ou em “baixa interação” entre parcelas de fluidos nas quais vigoram diferentes escalas. No caso da MHD, as escalas temporais macroscópicas do escoamento devem ser superiores ao inverso da frequência ciclotrônica dos íons, Xisto (2014):

$$\tau_i \gg \tau_H \tag{3.16}$$

Onde $\tau_i \sim \left(M_i/m_e\right)^{1/2} \tau_e$ é o tempo de colisão dos íons e τ_H é a escala temporal de interesse. Sabe-se que o equilíbrio térmico depende das trocas de energia das partículas e elas são proporcionais à razão $\left(m_e/M_i\right)$, onde m_e é a massa de um elétron e M_i a massa do íon. Assume-se que esse mesmo equilíbrio ocorre após um determinado período de tempo, o que induz ao uso de $\left(M_i/m_e\right)\tau_e$, onde τ_e é o tempo de colisão dos elétrons. Logo a equação (3.17) fica:

$$\tau_i \ll \left(\frac{m_e}{M_1}\right)^{1/2} \tau_H \tag{3.17}$$

Segundo comentado em Xisto (2014), a vantagem desse método é a possibilidade de combinar equações de múltiplos fluidos em um conjunto de equações para um único fluido. Assumindo duas espécies de plasmas, de íons e elétrons $\left(j = e = i\right)$, e utilizando as equações (3.10 e 3.14) obtém-se:

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla \cdot \left(n_j \mathbf{v}_j\right) = 0 \tag{3.18}$$

$$m_j n_j \left[\frac{\partial \mathbf{v}_j}{\partial t} + \left(\mathbf{v}_j \cdot \nabla\right)\mathbf{v}_j\right] = q_j n_j \left(\mathbf{E} + \mathbf{v}_j \times \mathbf{B}\right) - \nabla \cdot \mathbf{P}_j + \mathbf{P}_{ij} \tag{3.19}$$

Para um plasma de duas espécies o momento linear total (quantidade de movimento total) que deve ser conservado é expresso como:

$$P_{ei} = -P_{ie}$$

Se no plasma ocorrer frequências relativamente baixas, isto é, oscilações inferiores do que se notaria em um plasma normal (frequências de oscilações muito altas na densidade de elétrons) e menor que a frequência ciclotrônica (quando os elétrons movendo-se em um caminho circular experimentam um campo magnético ou outro tipo de força externa), podemos assumir que o plasma se encontra eletricamente neutro $n_i \approx n_e$.

Na condição descrita no parágrafo anterior os movimentos independentes dos elétrons e íons podem ser desprezados. Nesse caso pode-se definir os parâmetros macroscópicos para o fluido como segue:

$$\rho_m = n_e m_e + n_i m_i \qquad \text{Densidade da massa fluídica}$$

$$\mathbf{J} = n_e q_e \mathbf{v}_e + n_i q_i \mathbf{v}_i \qquad \text{Corrente elétrica}$$

$$\mathbf{v} = \frac{n_e m_e \mathbf{v}_e + n_i m_i \mathbf{v}_i}{n_e m_e + n_i m_i}$$ Velocidade da massa fluídica

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_e + \mathbf{P}_i$$ Tensor de pressão total

Usando a equação (3.18), multiplicando-a por q_i e q_e e adicionando equações da continuidade chega-se à equação de continuidade da corrente elétrica:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \qquad (3.20)$$

Onde $\mathbf{J}$ é a densidade de corrente dada por $J = n_e q_e v_e + n_i q_i v_i$ e ρ é a densidade de carga elétrica dada por:

$$\rho = n_e q_e + n_i q_i$$

Multiplicando novamente a equação (3.18) por m_i e m_e obtém-se a equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \rho_m \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \qquad (3.21)$$

A equação de movimento (quantidade de movimento) para um “elemento” de massa de plasma (ou a equação diferencial governante) é obtida somando as equações de transporte para íons e elétrons (equação 3.19 aplicada aos íons e aos elétrons):

$$\left(m_e n_e + m_i n_i\right)\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(\mathbf{P}_e + \mathbf{P}_i\right) + \left(q_e n_e + q_i n_i\right)\mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \qquad (3.22)$$

O termo $\left(\mathbf{v} \cdot \nabla\right)\mathbf{v}$ foi desprezado considerando a aproximação relativa à independência entre as escalas do escoamento global e as escalas que se vinculam

à esfera de Debye. Em outras palavras, considera-se que as perturbações induzidas pelas últimas nas primeiras são mínimas. Esta é uma maneira conveniente de linearizar a equação no tocante ao movimento (a equação diferencial original possui uma parcela em que o coeficiente dos termos diferenciais é função da própria variável dependente), permitindo que se utilizem ferramentas apenas válidas para as equações lineares (como a superposição de soluções para obter a solução geral). Vale frisar que, se não houvesse a grande dificuldade associada ao entendimento e manipulação de equações diferenciais não-lineares, o termo $(\mathbf{v}\cdot\nabla)\mathbf{v}$ não precisaria ser desprezado. Na sequência dos desenvolvimentos, o segundo termo da equação é zero, pois admitiu-se que as cargas no plasma são neutras. Logo a equação (3.19) fica:

$$\rho_m \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla\cdot\mathbf{P} + \mathbf{J}\times\mathbf{B} \qquad \text{Equação de movimento}$$

Para um plasma isotrópico (que possui propriedades físicas iguais, independentemente da direção considerada), $\nabla\cdot\mathbf{P} = \nabla p$ onde a pressão total é $p = p_e + p_i$. Para este caso a equação de movimento se torna:

$$\rho_m \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \mathbf{J}\times\mathbf{B} \qquad (3.23)$$

No estudo de plasmas a variação da densidade corrente $\mathbf{J}$ é relevante. Para obtê-la manipula-se a equação (3.16). Neste caso, multiplica-se primeiramente a equação pela parcela referente do elétron, q_e/m_e, obtendo uma primeira equação "intermediária". Em seguida, multiplica-se a equação (3.16) pela parcela referente do íon q_i/m_i, obtendo-se uma segunda equação "intermediária". Finalmente, somam-se as duas equações "intermediárias", obtendo:

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = -\frac{q_e}{m_e}\nabla\cdot\mathbf{P}_e - \frac{q_i}{m_i}\nabla\cdot\mathbf{P}_i + \left(\frac{n_e q_e^2}{m_e} + \frac{n_i q_i^2}{m_i}\right)\mathbf{E} + \left(\frac{n_e q_e^2}{m_e}\mathbf{v}_e + \frac{n_i q_i^2}{m_i}\mathbf{v}_i\right)\times\mathbf{B} + \left(\frac{q_e}{m_e}P_{ei} + \frac{q_i}{m_i}P_{ie}\right) \tag{3.24}$$

O seguinte conjunto de hipóteses (ou condições) permite atingir uma equação mais utilizável (no contexto dessas hipóteses):

- Utilizar a densidade de massa fluídica e a velocidade de massa fluídica.
- Admitir que para um plasma eletricamente neutro $|q_e n_e| \approx |q_i n_i|$.
- A partir do fato de a massa do elétron ser muito menor que a massa do íon, utilizar: $m_e \ll m_i \Rightarrow q_e/m_e \gg q_i/m_i$ e $n_e q_e^2/m_e \gg n_i q_i^2/m_i$.
- Admitir que no equilíbrio térmico as pressões cinéticas dos íons e dos elétrons sejam iguais, ou seja, $\mathbf{P}_e \approx \mathbf{P}_i$.
- Utilizar os termos de colisão em função da resistividade e admitir que as colisões aconteçam devido às forças de Coulomb entre os elétrons e os íons. Adicionalmente, considerar que as quantidades de movimento totais transferidas entre eles aconteçam de forma elástica.

Com essas condições a equação (3.24) pode ser escrita na forma:

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = -\frac{q_e}{m_e}\nabla\cdot\mathbf{P}_e + \frac{n_e q_e^2}{m_e}\left(\mathbf{E} + \mathbf{v}\times\mathbf{B}\right) + \frac{q_e}{m_e}\left(\mathbf{J}\times\mathbf{B}\right) - \frac{n_e q_e^2}{m_e}\hat{\eta}\cdot\mathbf{J} \tag{3.25}$$

A equação (3.25) é a lei de Ohm geral para os tipos de plasma que se adequam às hipóteses que foram arroladas.

Particularizando a equação obtida para o caso de uma corrente estacionaria, isto é, $\partial\mathbf{J}/\partial t = 0$, e um campo magnético **B** uniforme, encontramos, para o campo elétrico **E**:

$$E = \underbrace{-\mathbf{v}\times\mathbf{B}}_{1} - \underbrace{\frac{\mathbf{J}\times\mathbf{B}}{n_e q_e}}_{2} + \underbrace{\frac{\nabla\cdot\mathbf{P}}{n_e q_e}}_{3} + \underbrace{\hat{\eta}\cdot\mathbf{J}}_{4} + \underbrace{\frac{m_e}{n_e q_e}\frac{\partial\mathbf{J}}{\partial t}}_{5} \tag{3.26}$$

Esta equação permite efetuar uma classificação mais imediata do sentido físico de cada parcela (ou a qual efeito físico esta parcela está associada). Considerando as parcelas numeradas do lado direito da equação (3.26), temos:

- O primeiro termo da equação está associado ao movimento do plasma em um campo magnético.
- O segundo termo está associado ao efeito Hall (surgimento de uma diferença de potencial em um condutor).
- O terceiro termo está relacionado à difusão ambipolar do campo elétrico $\mathbf{E}$, ou à difusão de partículas positivas e negativas em um plasma.
- O quarto termo está relacionado às perdas ôhmicas e ao aquecimento Joule.
- O quinto termo considera a inércia dos elétrons.

3.2.2. Equação simplificada MHD

As características do fluido condutor utilizado no presente trabalho, permitem utilizar algumas condições adicionais:

- O plasma (fluido condutor) é isotrópico, ou seja, $\nabla \cdot \mathbf{P} = \nabla p$.
- O efeito Hall e a difusão ambipolar podem ser desprezados, uma vez que no problema abordado a velocidade do fluido é baixa e as forças atuando nos elétrons e íons são muito próximas em seus valores.
- A inercia do elétron também pode ser desprezada, uma vez que a variação de $\mathbf{J}$ é baixa.

Essas condições fazem com que a equação (3.25), da lei de Ohm geral, seja convertida em:

$$\mathbf{J} = \sigma \left(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) \tag{3.27}$$

As equações finais para a MHD finalmente podem ser escritas como:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \rho_m \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{3.28}$$

$$\rho_m \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \tag{3.29}$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} = \left[\sigma \left(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) \right] \times \mathbf{B} \tag{3.30}$$

Onde (3.28), (3.29) e (3.30) representam a, equação da continuidade, equação de Navier-Stokes na forma conservativa com acréscimo da força de Lorentz e a força de Lorentz respectivamente.

As equações para o movimento do fluido (conservação de massa e conservação de quantidade de movimento) devem ser resolvidas utilizando-se como termo fonte (gerador de movimento) as equações de Maxwell reduzidas para campos (porque serão campos que imporão o movimento às partículas ionizadas do fluido):

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \tag{3.31}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{3.32}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_c}{\varepsilon_0} \tag{3.33}$$

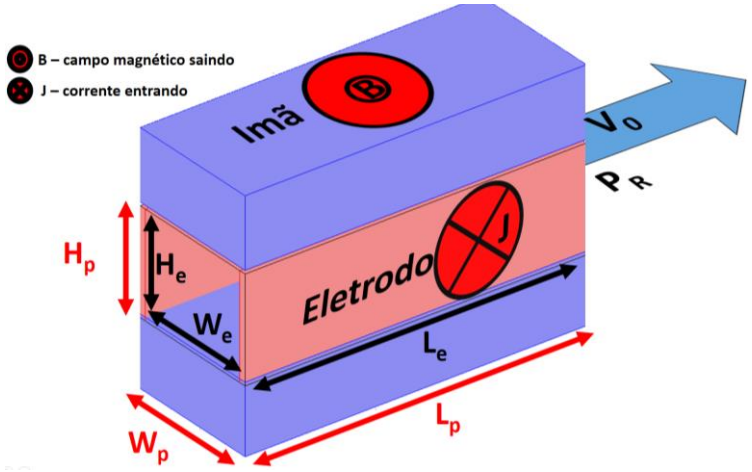
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{3.34}$$

A equação (3.31) representa a indução da densidade de corrente $\mathbf{J}$ a partir de uma alteração no campo magnético $\mathbf{B}$. A equação (3.32) mostra que um campo elétrico pode gerar um campo magnético através da indução. A equação (3.33) mostra que o fluxo elétrico em uma dada superfície é proporcional à densidade de carga q e inversamente proporcional à permissividade elétrica no vácuo ε_0. A equação (3.34) mostra que o campo magnético é solenoidal, que implica, por exemplo, que na natureza não podem haver monopólios magnéticos.

3.3. Aplicação nos propulsores MHD

Partindo das equações aqui reproduzidas da MHD e das equações de Navier-Stokes, podem-se obter parâmetros relevantes para o estudo do propulsor. Considere-se a geometria e as condições de contorno do propulsor apresentada na Figura 3.1:

Figura 3.1 - Diagrama do sistema propulsivo



Fonte: do autor.

No presente momento considera-se a velocidade do veículo igual à velocidade de entrada do fluido no propulsor (ou seja, estando o referencial no veículo, o que se move é o fluido e, por outro lado, estando o referencial no fluido, o que se move é o veículo). Evidentemente ambas as possibilidades dependem exclusivamente da força eletromagnética do propulsor. Considerando que as forças decorrentes da tensão de cisalhamento possam ser desprezadas junto à região de entrada do propulsor e que a pressão na seção imediatamente posterior à saída do propulsor seja igual à própria pressão na saída, podemos escrever a equação da velocidade como:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2P_R}{\rho}} \tag{3.35}$$

No problema proposto, sendo o duto um único, com seção constante, a conservação de massa do fluido incompressível escoando impõe que a velocidade média seja a mesma ao longo de um tubo de seção constante. Logo V_0 estará presente ao longo de todo o tubo.

A pressão ao longo do duto do propulsor depende da força de Lorentz e das perdas devido ao cisalhamento (que foram desprezadas aqui), o que está representado na equação (3.36), Way (1967), modificada para nosso experimento):

$$P_R = JBL_p - C_f \rho \frac{V_0^2}{2W_p} L_p \tag{3.36}$$

Os termos J, B, L_p, W_p e C_f representam a densidade de corrente, a densidade do campo magnético, o comprimento do canal, a largura do canal e o coeficiente de fricção respectivamente. Como as perdas por fricção são baixas o segundo termo pode ser desconsiderado.

A lei de Ohm, equação (3.27), permite apresentar o campo elétrico $\mathbf{E}$ como:

$$J = \sigma \left(\frac{V}{W_e} - V_0 B \right) \tag{3.37}$$

Onde, $E = V/W_e$ e W_e é a distância entre os eletrodos e V a tensão entre eles. Admite-se que essa velocidade seja igual à velocidade no interior do duto ao entrar em contato com os eletrodos. O termo $-V_0 B$ é um termo parasita, ou seja, ele atua contra a força de Lorentz que impulsiona o veículo (ou o fluido, dependendo do referencial). No entanto, em muitos casos este termo parasita é muito pequeno e pode ser desconsiderado. No presente texto este termo é em torno de 100 a 1000 vezes menor do que o termo V/W_e, dependendo do experimento. A densidade de potência elétrica total de entrada, ou densidade de potência elétrica (W/m^3), é dada por:

$$P_{te} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \tag{3.38}$$

Onde $\mathbf{E}$ é o campo elétrico e $\mathbf{J}$ a densidade de corrente definida em (3.37). A potência elétrica do propulsor (W) pode ser calculada a partir da equação (3.38):

$$P_e = VJL_eH_e = \sigma \frac{V^2}{W_e} L_e H_e \tag{3.39}$$

Onde L_e, H_e e W_e são o comprimento, altura e distância dos eletrodos. Podemos usar essa equação para comparar a potência do propulsor e a potência fornecida da fonte de alimentação usada $P_{fonte}=V_{fonte} \times I_{fonte}$. A equação 3.39 também pode ser deduzida através da potência da fonte. Seja A_e é a área do eletrodo tem-se que:

$$I_{fonte} = JA_e \tag{3.40}$$

Como a tensão da fonte é a mesma nos eletrodos, $V_{fonte} = V$:

$$P_{fonte} = VJA_e \tag{3.41}$$

$$P_{fonte} = VJL_eH_e \tag{3.42}$$

Pela (3.37) segue que:

$$P_{fonte} = \sigma \frac{V^2}{W_e} L_e H_e \tag{3.43}$$

Comparando com a potência da fonte:

$$VI_{fonte} = \sigma \frac{V^2}{W_e} L_e H_e \tag{3.44}$$

Ou em termos da resistência:

$$\frac{V^2}{R} = \sigma \frac{V^2}{W_e} L_e H_e \tag{3.45}$$

Analisando a (3.37) e a (3.39) podemos notar que elas tratam de parâmetros constantes, como dimensões dos eletrodos e condutividade do fluido. No entanto nem sempre isso ocorre. No caso do trabalho apresentado, esses parâmetros podem ser

variáveis. Os eletrodos podem sofrer eletrólise e mudar sua geometria, ou no caso da condutividade, ela pode ser alterada, uma vez que o fator $J = \sigma / W_e$ está relacionado com o inverso da resistência (ver equação 3.45), e essa pode mudar de acordo com as condições nos eletrodos ou no próprio fluido. Logo o lado esquerdo e direito da equação deveriam ser iguais o que não ocorre e isso é demonstrado no capítulo 5 de resultados. Combinando as equações (3.35) e (3.36) tem-se:

$$\frac{J}{\sigma V_0 B} = \frac{V_0^2}{\xi} + \frac{C_f}{\xi}\frac{L_p}{W_p} \tag{3.46}$$

Onde:

$$\xi = \frac{2L_p \sigma B^2}{V_0} \tag{3.47}$$

A equação (3.47) é o parâmetro de interação MHD, ele mede a razão das forças de Lorentz para com as forças inerciais, nesse caso as forças de Lorentz parasitas, ou induzidas. Outra forma de calcular essa relação é partindo das equações de Navier Stokes acopladas às forças eletromagnéticas, conforme mostrado em Missiato (1996), que considera a força de Lorentz real, levando a:

$$\frac{\left|\mathbf{J} \times \mathbf{B}\right|}{\rho\left(\mathbf{u} \cdot \nabla\right)\mathbf{u}} = \frac{\sigma\left(V / W_e\right)B}{\left|\rho\left(V_0 / L_p\right)\right|} \tag{3.48}$$

A equação (3.46) pode ser colocada na seguinte forma

$$\frac{J}{\sigma V_0 B} = K - 1 \tag{3.49}$$

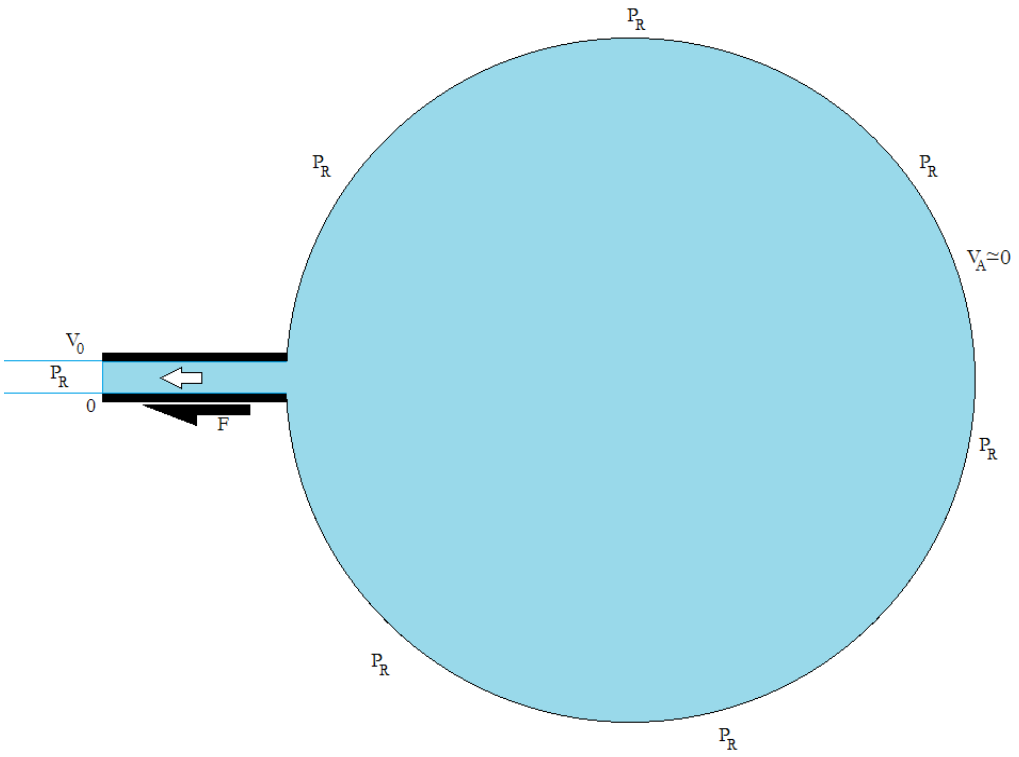
Onde $K = V / V_0 B W_p$. O cálculo da força propulsiva considerando apenas o fluido se deslocando é obtido da equação integral da quantidade de movimento para o fluido, (ver, por exemplo, Schulz, 2013):

$$\mathbf{F}_t = \frac{\partial}{\partial t} \int_{Volume\ de\ controle} \mathbf{u}\rho dVol + \int_{Superfície\ de\ controle} \mathbf{u}\rho\mathbf{u}.d\mathbf{A} \qquad (3.50)$$

Desconsiderando a fase de aceleração, apenas interessa a segunda parcela do segundo membro. As velocidades do escoamento no elemento propulsor permitirão então avaliar o esforço. A área será dada pela largura e altura do propulsor.

Admitindo-se que o propulsor está parado e o fluido está sendo impelido por ele. É necessário calcular a força **F** que o mantém no lugar. A Figura 3.2 mostra o volume de controle para o problema em questão.

Figura 3.2 – Volume de controle aplicado ao propulsor



Fonte: do autor.

A água sai do propulsor devido a quantidade de movimento que adquiriu dentro dele. No entanto ao sair do propulsor, a água perde toda a pressão que poderia ter em relação ao meio. Logo após a seção de saída, a pressão no jato que escoa é P_R , que é a pressão de referência do fluido na cota do propulsor.

Adotando o volume de controle como o volume azul, claro que se estende para a região distante do propulsor antes dele, tem-se que nessa região distante a

pressão também é a pressão de referência na cota do propulsor. Adicionalmente, na área correspondente à superfície esférica do volume de controle não há movimento relevante do fluido, isto é, $V_A \approx 0$ (por uma questão de conservação de massa, essa área, sendo muito maior que a área do propulsor, possibilita uma velocidade média para a água que a atravessa muito menor que a velocidade que passa no propulsor). Como queremos calcular a força apenas na direção x do propulsor, temos a equação integral da quantidade de movimento, (3.51) dada por:

$$F_x = \frac{d}{dt}\int_{VC} u_x \rho dVol + \int_{SC} u_x \rho \mathbf{u}.\mathrm{d}\,\mathbf{A} \tag{3.51}$$

Em regime permanente:

$$F_x = \int_{SC} u_x \rho \mathbf{u}.\mathrm{d}\,\mathbf{A} \tag{3.52}$$

O primeiro membro é dado pela somatória das forças que atuam no volume de controle na direção horizontal:

$$F_x = \sum_i \left(F_i\right)_x = -F + P_R A_p - P_R A_p \tag{3.53}$$

Onde A_p é a área projetada. Essa área é dada pelo círculo sobre qual atua P_R. Logo:

$$\int_{SC} u_x \rho \mathbf{u}.\mathrm{d}\,\mathbf{A} = \rho V_A^2 A_{esf} - \rho V_0^2 A_0 \tag{3.54}$$

Onde A_{esf} é a área externa da esfera. Combinando as equações 3.53 e 3.54:

$$-F_t = \rho V_A^2 A_{esf} - \rho V_0^2 A_0 \tag{3.55}$$

Aplicando a equações da conservação de massa ao mesmo volume de controle para um regime permanente tem-se:

$$\rho V_A^2 A_{esf} - \rho V_0^2 A_0 = 0 \tag{3.56}$$

O que leva a:

$$V_A = \frac{V_0 A_0}{A_{esf}} \tag{3.57}$$

Combinando as 3.56 e 3.57:

$$-F_t = \rho V_0^2 A_0 \left(\frac{A_0}{A_{esf}} - 1 \right) \tag{3.58}$$

Como a área da esfera A_{esf} é muito maior que A_0 a equação 3.58 fica:

$$F_t = \rho V_0^2 A_0 \tag{3.59}$$

A área de referência A_0 será dada por $A_0 = W_p H_p$, onde W_p e H_p são a largura e a altura do propulsor respectivamente. Com essas equações pode-se derivar uma série de cálculos de eficiência. Partindo da potência propulsiva:

$$P_t = \rho V_0^2 W_p H_p = F_t V_0 \tag{3.60}$$

Podemos encontrar a eficiência propulsiva, como sendo a razão da potência propulsiva pela potência elétrica:

$$\eta = \frac{F_t V_0}{P_e} = \frac{F_t V_0}{VJL_e H_e} \tag{3.61}$$

Ainda é possível calcular a eficiência elétrica do sistema. Tomando o produto escalar dos lados da equação (3.27) por $\mathbf{J}$ e rearranjando ela com a equação (3.38), tem-se:

$$P_{et} = \mathbf{v} * \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \frac{J^2}{\sigma} \tag{3.62}$$

A densidade de potência propulsiva efetiva é dada por Bednarczyk (1989):

$$P_{te} = \mathbf{v} * \mathbf{J} \times \mathbf{B} \tag{3.63}$$

Dividindo a equação (3.63) pela (3.62), chega-se a eficiência elétrica:

$$\eta_e = \frac{P_{te}}{P_{et}} = \frac{V_0 JB}{V_0 JB + J^2/\sigma} = \frac{1}{1 + J/V_0 B\sigma} \tag{3.64}$$

Que ainda pode ser simplificada para, Doragh (1963):

$$\eta_e = \frac{P_{te}}{P_{et}} = \frac{V_0 B W_e}{V} \tag{3.65}$$

O trabalho feito pela força de Lorentz no duto é dado por:

$$P_L = JBW_p H_p L_p V_0 \tag{3.66}$$

3.4. Eletrólise

Por definição, eletrólise é um processo no qual se faz passar (induzida ou forçadamente) uma corrente elétrica em um sistema com o intuito de se obter uma reação química. Ela tem um papel fundamental na indústria, pois é através dela que se produzem substâncias essenciais ao cotidiano humano do mundo moderno, como metais alcalinos, alcalinos-terrosos, gás hidrogênio, gás cloro e elementos químicos como sódio, alumínio, cloro, etc.

Para o presente estudo utilizou-se uma solução salina de cloreto de sódio como o fluido no qual o veículo de densidade unitária foi imerso. Em outros termos, o

propulsor MHD visa o deslocamento em água salgada, como já mencionado no capítulo 2.

Quando a corrente elétrica passa na solução de cloreto de sódio ($NaCl$), os íons (partículas carregadas) migram para o eletrodo de carga oposta. Em uma solução salina de *NaCl* as espécies dominantes de íons são o sódio Na^+ e o cloro Cl^-, havendo uma pequena parcela da água H_2O que também é ionizada em íons H^+ e OH^-.

Apesar de ser inerente à eletrólise, para propulsão magnetohidrodinâmica essa migração é prejudicial e pode inviabilizar a aplicação almejada, pois a oxidação (processo de perda de elétrons por uma espécie química, que, no caso da eletrólise, são transferidos para a outra espécie participante) dos eletrodos utilizados e a formação de precipitados na solução podem diminuir consideravelmente a condutividade do fluido e a capacidade de transferência de elétrons no eletrodo, afetando diretamente na propulsão.

Quando uma solução aquosa é utilizada como célula eletrolítica deve-se considerar onde (cátodo ou ânodo) a água ou a solução serão oxidadas ou reduzidas. A água, em uma solução salina aquosa, sofre oxidação (evidenciada pelo presença de O_2) e redução (evidenciada pela presença de H_2). No caso do presente estudo, ao aplicar corrente elétrica na solução de cloreto de sódio acontece o seguinte fenômeno no anodo e no catodo respectivamente:

Anodo $$2Cl^-_{(aq)} \rightarrow Cl^2_{(g)} + 2e^- \quad (3.67)$$

Seguida pela fase aquosa, Oliveira et al (2006):

Anodo $$Cl^2_{(aq)}H_2O_{(l)} \rightleftharpoons H^+_{(aq)} + Cl^-_{(aq)} + HClO_{(aq)} \quad (3.68)$$

O ácido hipocloroso ($HClO$) se dissocia:

Anodo $$HClO_{(aq)} \rightleftharpoons H^+_{(aq)} + ClO^-_{(aq)} \quad (3.69)$$

Catodo $$2e^- + 2H_2O_{(l)} \rightarrow H_{2(g)} + 2(OH)^-_{(aq)} \quad (3.70)$$

A formação de hidroxilas aumenta o pH na superfície da reação catódica. Em meio alcalino, os íons hidroxila e o cloro formado no anodo reagirão formando o ânion hipoclorito, Oliveira et al (2006):

Catodo $$Cl_{2(aq)} + OH^{-}_{(aq)} \rightarrow HClO_{(aq)} + Cl^{-}_{(aq)} \quad (3.71)$$

Assim, a reação geral será dada por:

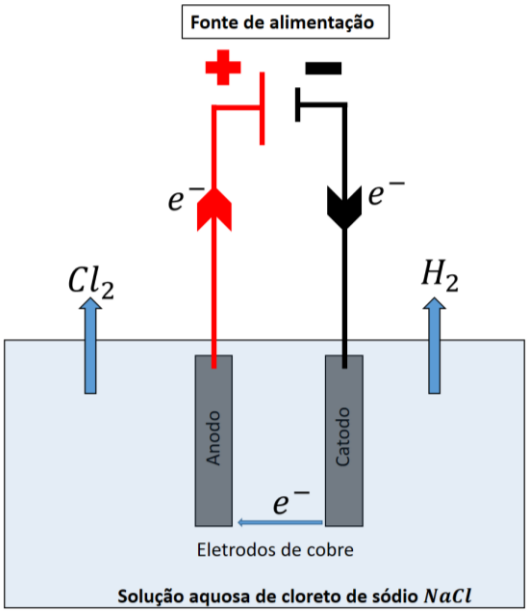
$$2NaCl_{(aq)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow H_{2(g)} + Cl_{2(g)} + 2NaOH_{(aq)} \quad (3.72)$$

Note que hidróxido de sódio ($NaOH$) foi produzido na reação. Como os íons de sódio são íons espectadores (não participam da reação), eles podem ser desconsiderados da equação final de reação. A reação geral iônica será:

$$\begin{aligned} &\text{Cátodo:} \quad 2H_2O_{(l)} + 2e^{-} \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^{-}_{(aq)} \\ &\text{Anodo:} \quad\quad 2Cl^{-}_{(aq)} \rightarrow Cl_{2_{(g)}} + 2e^{+} \\ &\overline{\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad} \\ &2H_2O_{(l)} + 2Cl^{-}_{(aq)} \rightarrow H_{2(g)} + Cl_{2(g)} + 2OH^{-}_{(aq)} \end{aligned} \quad (3.73)$$

Os gases resultantes do processo acima descrito são prejudiciais. O gás cloro Cl_2 é tóxico quando inalado em grandes quantidades e o gás hidrogênio H_2 é inflamável, ver Figura 3.3.

Figura 3.3 - Esquema simplificado da eletrólise em cloreto de sódio e a liberação dos gases cloro e hidrogênio



Fonte: do autor.

A sua produção em MHD ainda é vista como um “efeito colateral” para o qual soluções futuras deverão ser encontradas. No momento ainda se busca uma viabilização da propulsão em si. Dependendo da quantidade de corrente fornecida no sistema, as reações químicas podem ser tornar mais complexas. O cloro gerado no anodo pode sofrer hidrólise rapidamente e possibilitar a liberação de gás hidrogênio:

$$Cl_{2(g)} + H_2O_{(l)} \rightleftharpoons HClO_{(aq)} + Cl^-_{(aq)} + H^+_{(aq)} \quad (3.74)$$

$$HClO_{(aq)} \rightleftharpoons H^+_{(aq)} + (ClO)_{(aq)} \quad (3.75)$$

$$(ClO)^-_{(aq)} + Na^+_{(aq)} \rightarrow Na(ClO)_{(aq)} \quad (3.76)$$

$$H^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)} \rightarrow H_2O_{(l)} \quad (3.77)$$

$$2H^+_{(aq)} + 2e \rightarrow H_{2(g)} \quad (3.78)$$

Arjmand e Adrianes (2012), entre outros, mencionam que é sabido que o mecanismo de corrosão de eletrodos de cobre utilizados em eletrólise com solução de NaCl é fortemente dependente da presença dos íons cloreto. Esta corrosão

envolve a dissolução do cobre no anodo e a redução eletroquímica de outras espécies como oxigênio no catodo. Em soluções de cloreto de sódio o primeiro passo para a dissolução anódica é a formação do complexo $CuCl_2^-$, Klaled (2011). A reação que parte do cobre e termina no cloreto de sódio é mostrada a seguir:

$$Cu_{(s)} + 2Cl^-_{(aq)} \leftrightarrow CuCl^-_{2(aq)} + e^- \tag{3.79}$$

$$\begin{aligned} Cu_{(s)} &\leftrightarrow Cu^+_{(aq)} + e^- \\ Cu^+_{(aq)} + 2Cl^-_{(aq)} &\leftrightarrow CuCl^-_{2(aq)} \end{aligned} \tag{3.80}$$

$$\begin{aligned} Cu_{(s)} + Cl^-_{(aq)} &\leftrightarrow CuCl_{(aq)} + e^- \\ CuCl_{(aq)} + Cl^-_{(aq)} &\leftrightarrow CuCl^-_{2(aq)} \end{aligned} \tag{3.81}$$

Quando a reação é exotérmica, há excessiva liberação de calor na reação, na sequência, a reação do cloreto de cobre com o hidróxido de sódio:

$$CuCl^-_{2(aq)} + 2NaOH_{(aq)} \rightarrow Cu(OH)_{2(s)} + 2NaCl \tag{3.82}$$

O hidróxido de cobre quando aquecido $Cu(OH)_{2(s)}$ sofre a seguinte reação:

$$Cu(OH)_{2(s)} \rightarrow CuO_{(s)} + H_2O_{(l)} \tag{3.83}$$

Resultando em óxido de cobre $CuO_{(s)}$, que dá uma coloração amarela/marrom a solução.

As equações (3.79 e 3.80) mostram a formação do cloreto de cobre $CuCl_2^-$, responsável pela cor esverdeada/azulada na solução, enquanto a equação (3.81) representa a dissolução do cobre em cloreto cuproso. Segundo Khaled (2011), óxido de cobre e hidróxido podem ser formados através da reação catódica e da redução do oxigênio:

$$O_{2(g)} + 2H_2O_{(l)} + 4e^- \leftrightarrow 4OH^-_{(aq)} \quad (3.84)$$

Segundo Li et al (2013) outras reações podem ocorrer na dissolução catódica do cobre:

$$4H^+_{(aq)} + O_{2(g)} + 4e^- \rightarrow 2H_2O_{(l)} \quad (3.85)$$

Levando a reação total de corrosão do cobre na solução:

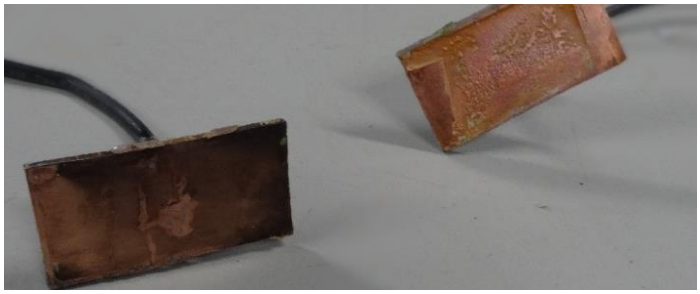
$$2Cu_{(s)} + 4H^+_{(\mathrm{aq})} + 4Cl^-_{(aq)} + O_{2(g)} \rightarrow 2Cu^+_{(aq)} + 4Cl^-_{(aq)} + 2H_2O_{(l)} \quad (3.86)$$

Se a solução está muito quente (acima dos 70 graus), clorato de sódio é formado:

$$NaCl_{(aq)} + 3H_2O_{(l)} \rightarrow NaClO_{3(aq)} + 3H_{2(g)} \quad (3.87)$$

A Figura 3.4 e a Figura 3.5 mostram o efeito da eletrólise nos eletrodos de cobre e em um suporte de alumínio utilizado em um dos testes. Como se pode notar, esse efeito é indesejável no experimento. Ele diminui não apenas a vida útil dos materiais utilizados, como também a eficiência do propulsor.

Figura 3.4 - Eletrodos de cobre depois de um experimento

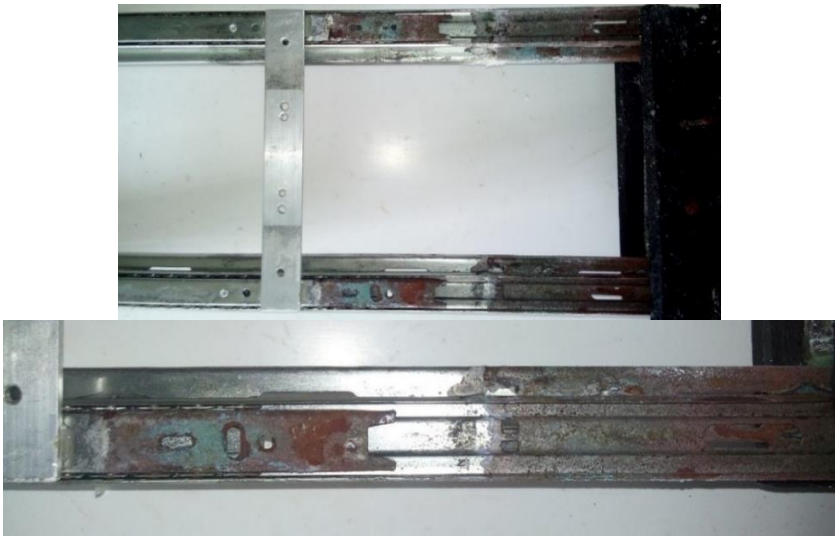


Fonte: do autor

No alumínio ocorre uma reação de redução:

$$Al^{3+} + 3e^- \Rightarrow Al \quad (3.88)$$

Figura 3.5 - Desgaste do suporte de alumínio



Fonte: do autor.

A Figura 3.6, mostra a eletrolise do cobre que gerou dois produtos, o óxido de cobre (amarelo) e o cloreto de cobre (azul), ambos resultantes do mesmo experimento; embora o óxido de cobre seja resultado de temperaturas mais elevadas, enquanto o cloreto de cobre surge quando a eletrólise não é tão quente ou quando a cuba contendo a solução esfria.

Figura 3.6 - Resultados da eletrólise do cobre em um mesmo experimento. Na esquerda óxido de cobre, resultante de temperaturas altas e na direita cloreto de cobre resultante de temperaturas mais baixas

Fonte: do autor.

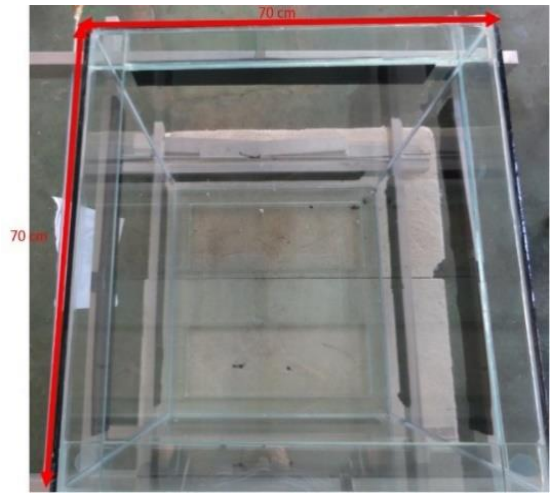
CAPÍTULO 4

4. MATERIAIS E MÉTODOS

No decorrer do trabalho, uma série de propostas experimentais foram traçadas e testadas pelo autor e seu orientador, até que se chegasse ao modelo final de estudo. Componentes cruciais como fonte de alimentação e eletrodos foram trocados ao longo dos trabalhos, assim como equipamentos de medição de pressão e tensão. Para fins de reprodução e conhecimento futuros, resolveu-se enumerar as diversas propostas mencionadas, assim como erros de construção e medição no decorrer do trabalho. Cada experimento realizado foi divido em fases, tanto na parte da metodologia quanto na de resultados e conclusão.

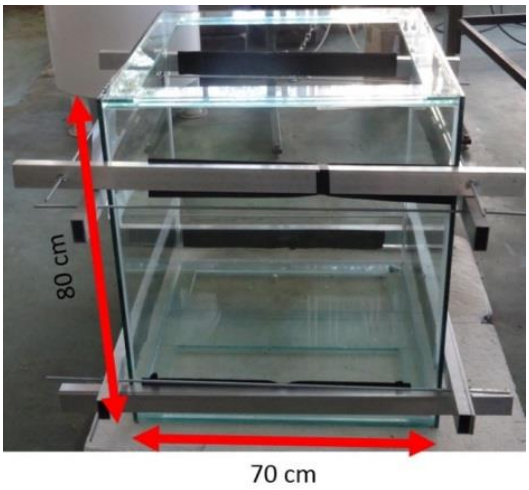
Para o funcionamento do veículo, o ambiente marítimo foi “mimetizado” em escala laboratorial, com um tanque de vidro de 70 cm de lado e 80 cm de altura contendo uma solução concentrada de água e sal, conforme mostrado na Figura 4.1. Reforços externos foram necessários (Figura 4.2), de modo a garantir a integridade do tanque durante os experimentos.

Figura 4.1 - Área do aquário com 70 cm de lado



Fonte: do autor

Figura 4.2 - Altura de 80 cm e reforços de alumínio



Fonte: do autor

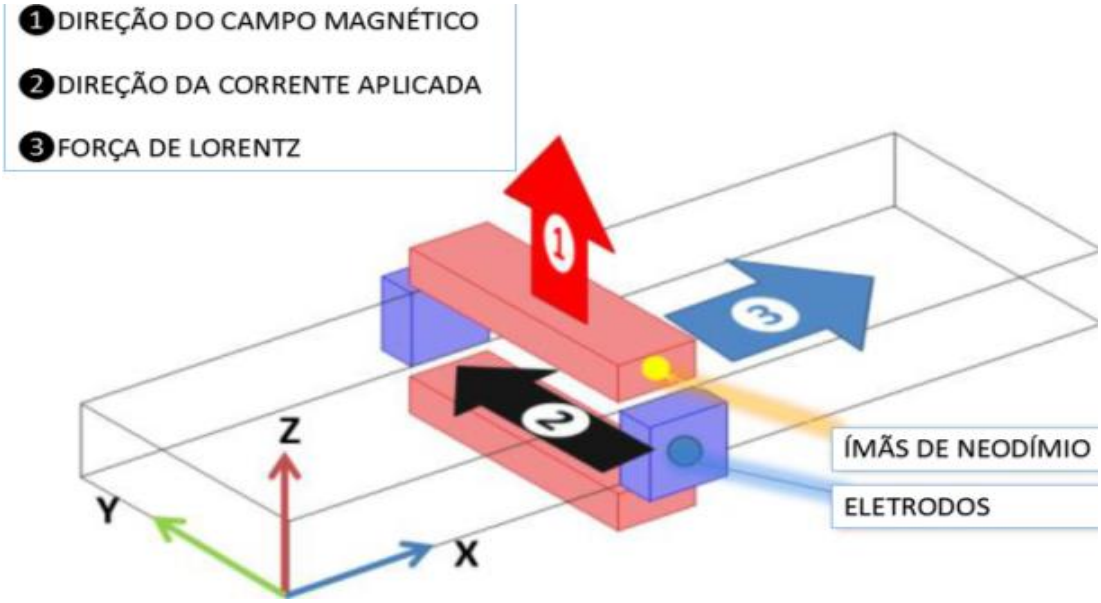
Uma descrição dos propulsores e dos eletrodos da Água-Viva MHD são mostradas a seguir.

- **Propulsores**

Para a construção dos propulsores da Água-Viva MHD, dados obtidos do conjunto de estudos anteriores dessa linha de pesquisa, entre os quais o trabalho de mestrado do presente candidato, permitiram concluir que a construção de um propulsor em escala laboratorial e com condições de movimentar-se verticalmente, utilizando forças eletromagnéticas, seria viável. Por se tratar de uma linha de pesquisa, entendeu-se que se poderia testar modificações de acordo com eventuais limitações experimentais, como baixas velocidades ou rápido desgaste dos eletrodos.

Para facilitar a visualização de um propulsor simples, a Figura 4.3 mostra um esquema baseado em Aoki (2011), para um canal ou túnel.

Figura 4.3 - Túnel MHD com sua resultante eletromagnética



Fonte: do autor.

O presente projeto foi proposto na linha de pesquisa do orientador e considerou inicialmente a indicação de Schulz (2003), no qual a unidade propulsora como um todo contém múltiplas unidades simples, formando um polígono fechado. O movimento de um corpo acoplado à unidade propulsora estará, evidentemente, limitado pelo seu peso na água. Para compensar esse peso residual, foi sugerido que um corpo vazio deve ser instalado e a relação (4.1) verificada.

$$\rho_{meio} = \left(\frac{\text{massa dos propulsores + massa dos equipamentos}}{\text{volume total (corpo vazio + propulsores)}} \right) \tag{4.1}$$

Ou seja, para permitir o movimento com maior certeza, o peso deveria ser compensado pelo empuxo provocado pelo volume de água deslocado. Essa situação foi definida como “densidade unitária”, por igualar em média a massa específica do meio.

Na condição descrita no parágrafo anterior, espera-se que qualquer esforço provocado pela unidade propulsora possa ser observável através do movimento do conjunto "Unidade Propulsora + Corpo", que se convencionou denominar de “Água Viva MHD”. No projeto inicial da linha de pesquisa não se podia ainda prever a ordem de grandeza do movimento do conjunto, uma vez que o volume final do veículo ainda era desconhecido. Para uma dada geometria, quanto maior o volume, tanto maior a

força resistiva ao movimento. Isto decorre do fato de a área de contato entre o veículo e a água aumentar com o volume e a força resistiva ser (dito de forma simples) proporcional a esta área. Assim, o presente projeto vem fornecer as informações necessárias acerca das possibilidades de um propulsor na escala laboratorial mencionada.

- **Eletrodos**

Apesar do trabalho ter se divido em várias etapas, o que envolveu uma maior quantidade de procedimentos particulares, uma característica decorrente do próprio uso da MHD em solução salina sempre esteve presente desde o princípio em todas as etapas, que é a preocupação com a utilização dos eletrodos da maneira mais conveniente.

Os eletrodos são essenciais para o funcionamento do veículo MHD. Geralmente se utilizam metais como alumínio, aço inox ou cobre para a confecção deles. Aqui técnicas de manufatura e utilização dos eletrodos são mostradas detalhadamente, uma vez que não foram encontradas referências que explicassem sua confecção, sua soldagem aos cabos de energia e se ouve algum tipo de isolação térmica.

A experiência anterior (trabalhos anteriores em MHD) induziu inicialmente a considerar apenas eletrodos de metal. No contexto das discussões com o orientador, também o grafite foi considerado. Um estudo foi então realizado acerca de qual material deveria ser comprado para fazer os eletrodos. A curto prazo analisou-se as características de:

- **Condutibilidade térmica**: a habilidade do material em transferir calor. Quanto menor esse valor, melhor para o experimento, pois a transferência de calor para a solução salina será baixa e consequentemente a temperatura final da solução será menor.
- **Condutibilidade elétrica**: a habilidade do material em conduzir corrente elétrica. Quando maior seu valor melhor condutor ele será e mais eficiente será sua transferência de corrente.

- **Maleabilidade**: facilidade em se cortar e confeccionar os eletrodos.
- **Soldagem**: facilidade em se soldar os fios de energia aos eletrodos, nesse caso utilizando estanho como solda.
- **Disponibilidade**: refere-se à facilidade de se conseguir o material na cidade, no caso São Carlos, isso inclui contatos com vendedores, distância até a matéria prima e tempo para receber o material.
- **Durabilidade**: tempo que o material resiste à eletrólise, quanto maior o tempo mais experimentos podem ser feitos.
- **Custo**: o preço do material por quilo. Os dados foram retirados de cotações de preços no mercado de metais no ano de 2016.

A Tabela 4.1 mostra os pontos analisados.

Tabela 4.1 - Características dos materiais analisados pelo autor

	Alumínio	**Aço Inox**	**Cobre**	**Grafite**	**Ouro**
Condutibilidade térmica (W/mK)	205	**16**	405	168	310
Condutibilidade elétrica (S/m)	$3{,}50\times10^{7}$	$1{,}45\times10^{6}$	**$5{,}96\times10^{7}$**	$2{,}00\times10^{5}$	**$4{,}10\times10^{7}$**
Maleabilidade	**Muito boa**	Média	**Muito boa**	Ruim	**Muito boa**
Soldagem	Muito difícil	Muito difícil	**Muito fácil**	Muito difícil	**Muito fácil**
Disponibilidade	Fácil	Fácil	**Muito fácil**	Difícil	Muito difícil
Durabilidade	Curta/média	Média	Curta	**Longa**	**Longa**
Custo (R$/Kg)	**5,00 reais/kg**	**2,00 reais/kg**	15,00 reais/kg	13,00 reais/kg	130.000,00 reais/kg

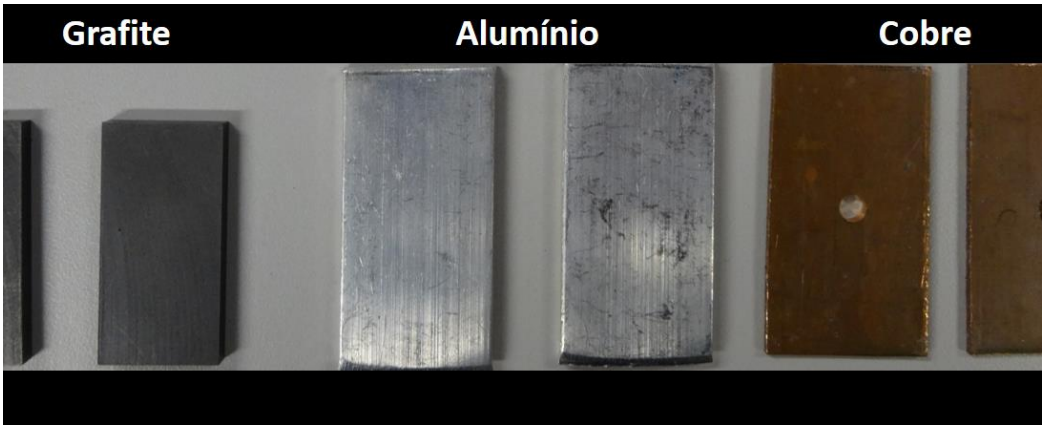
Apesar de possuir ótimas propriedades o ouro foi descartado logo no início pelo seu alto valor no mercado. Mesmo estando entre os mais caros, o cobre foi

escolhido para servir como matéria prima do eletrodo devido à boa condutibilidade elétrica, disponibilidade e boa maleabilidade.

O alumínio e o grafite também foram usados em alguns testes, mas algumas características operacionais dificultaram momentaneamente seu uso e levaram à decisão pelo cobre. Essas dificuldades são descritas ao longo da metodologia. Contudo, menciona-se que há uma proposta da linha de pesquisa de testar com mais atenção o grafite. A

Figura *4.4*, mostra alguns eletrodos confeccionados no experimento. Para o corte das chapas de cobre ou do alumínio, usou-se uma guilhotina.

Figura 4.4 - Eletrodos utilizados



Fonte: do autor.

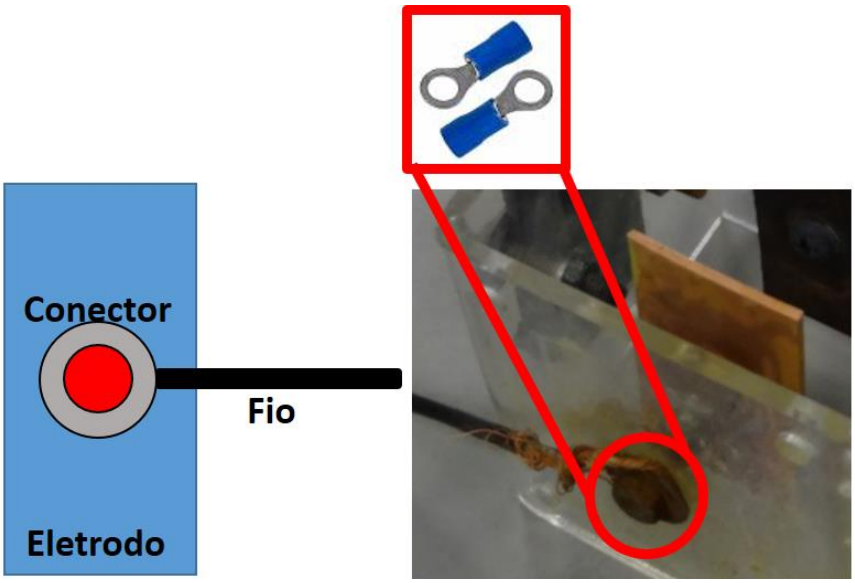
Para haver um eletrodo considerado como o mais apropriado, decisão esta que evidentemente implicou em testes com os diferentes tipos, observa-se que se necessitou efetuar conexões adequadas dos diferentes eletrodos com os fios de energia. Para tanto necessita-se saber de antemão a intensidade de corrente à qual

os eletrodos estariam submetidos nos experimentos, pois uma alta corrente demanda uma bitola maior do fio, podendo implicar em procedimentos mais específicos para garantir o bom contato entre eletrodo e fio condutor. O apêndice A, mostra os diâmetros de cada fio normatizados para cada corrente de trabalho.

Definida a fiação a ser trabalhada sugerida pela norma consultada, efetuou-se a união dos eletrodos com os fios. Apesar de não se ter encontrado referências que explicitassem técnicas para a junção dos eletrodos aos fios condutores, acredita-se que algumas abordagens utilizadas aqui podem ou poderiam ter feito parte dos trabalhos consultados relacionados a MHD.

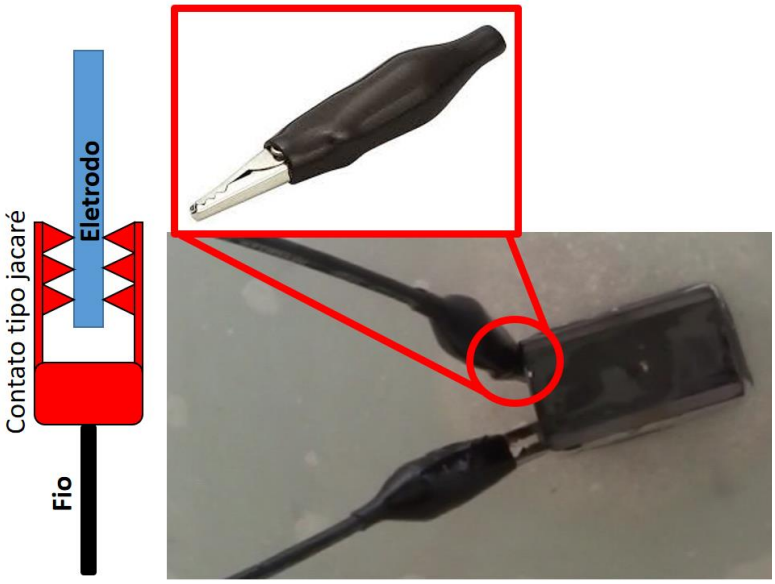
- **Primeira técnica**: contato por superfície. O eletrodo seria ligado pelo fio através de um contato simples, seja ele uma arruela presa ao eletrodo e ao fio (terminal tipo anel), Figura 4.5, ou presa por contatos do tipo jacaré (Figura 4.6).

Figura 4.5 - Terminal tipo anel



Fonte: do autor.

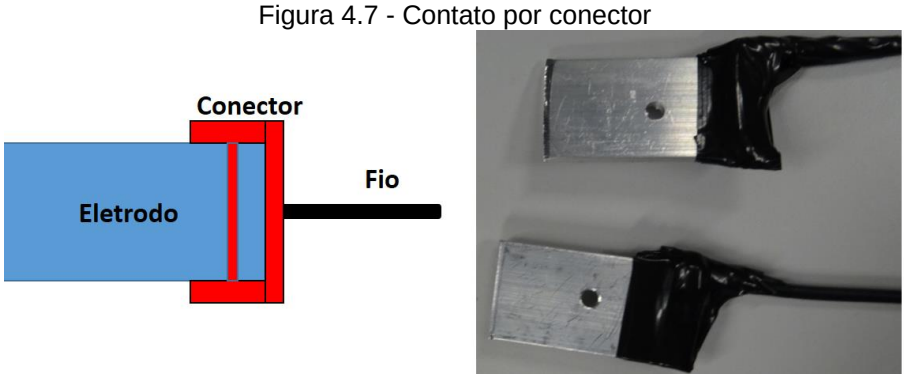
Figura 4.6 - Contatos do tipo jacaré



Fonte: do autor.

- **Segunda técnica**: uso de conectores. Parte do eletrodo estaria preso a um conector ligado ao fio. O sistema de retirada do eletrodo funcionaria como a remoção de uma lâmpada ou um chip de celular. A Figura 4.7 exemplifica isso.

Figura 4.7 - Contato por conector



Fonte: do autor.

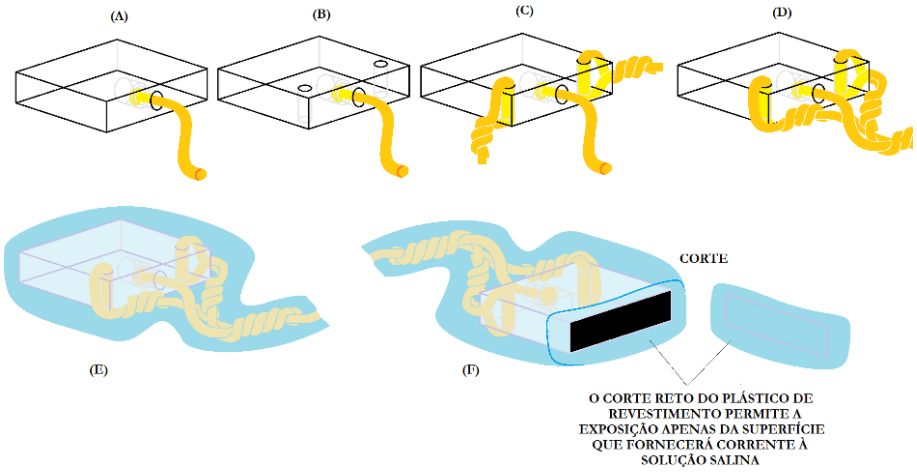
- **Terceira técnica**: soldagem ou brasagem. O eletrodo seria soldado ao fio com o uso de estanho e uma solda ou alguma fonte de calor (Figura 4.8). Ao contrário das outras técnicas essa não se poderia retirar o eletrodo com facilidade.

Figura 4.8 - Contato por soldagem

Fonte: do autor.

- **Quarta técnica**: especificamente para eletrodos de grafite, alguns experimentos conduzidos na linha de pesquisa e no presente trabalho pelo orientador utilizaram as assim denominadas “escovas de carvão” de máquinas elétricas (como furadeiras ou serras manuais, por exemplo). Tais componentes elétricos são adquiridos já com o fio inserido no grafite. Entretanto, pelo fato de serem geralmente fios com bitola insuficiente, dois furos adicionais são executados no grafite, nos quais são inseridos mais dois fios, gerando uma condição de múltiplos pontos de contato superficial. Os três fios ligados ao grafite são entrelaçados e conectados ao fio da fonte elétrica dos experimentos. Todo o conjunto (grafite e três fios) é isolado com revestimento plástico de secagem rápida, sendo posteriormente descartado o isolamento da superfície a ser posta em contato com a solução salina. Este descarte é feito por simples corte do material plástico do isolamento. A Figura 4.9 apresenta um esquema da produção de eletrodos segundo esta técnica.

Figura 4.9 - Contato para eletrodos de grafite de máquinas elétricas. A) A “escova de carvão” original, com o fio inserido no “carvão” (grafite); B) A execução de dois furos para inserir mais dois fios; C) Os fios já inseridos e enrolados, aumentando a área de contato entre os fios e o grafite; D) A união de todos os fios que alimentam este eletrodo; E) Revestimento plástico de secagem rápida sobre todo o conjunto; F) Simples corte do plástico expondo apenas a superfície de contato com a solução salina. (*Esquema gerado na linha de pesquisa do orientador e cedido para compor o presente texto de tese*)



Fonte: do autor.

A definição do eletrodo e da técnica a utilizar para a junção dos eletrodos e dos fios é relevante devido à repetição desta operação nos diversos testes. Após sucessivos experimentos, concluiu-se que o contato por solda era a melhor alternativa, considerando principalmente o transporte de corrente. Notou-se que nas demais técnicas havia uma queda de corrente excessiva, uma vez que os contatos não estavam apenas perto do eletrodo, mas também em contato direto com a água salgada. Parte desses contatos sofriam eletrólise e se desagastavam, inutilizando-os. Uma ressalva pode ser feita com relação à quarta técnica, a qual isolava todo o conjunto com resina plástica, liberando apenas a superfície de fato em contato com a água.

Antes de soldar os eletrodos duas providências eram tomadas: lixar a superfície do metal para retirar impurezas e usar pasta para solda. Essa última tem como função evitar a oxidação da superfície onde se efetuará a solda (Figura 4.10).

Figura 4.10 - Pasta para solda BEST ®

Fonte: do autor

Após a solda e, mais especificamente, quando os eletrodos seriam montados na unidade propulsora verificou-se a necessidade de lixar o lado oposto da solda (que transmite a corrente para o fluido), pois dependendo do tempo de armazenamento e do lugar onde estiverem armazenados, essas superfícies do eletrodo acumulam poeira e outros “detritos” (eventualmente suspensos no ar), sofrendo oxidação novamente. Esses fatores (acumulação de “detritos” e oxidação) podem alterar drasticamente a condução de corrente elétrica e atrapalhar os experimentos no tocante à produção de resultados úteis. Uma lixa comum foi usada para limpar a superfície dos eletrodos quando de seu uso, Figura 4.11

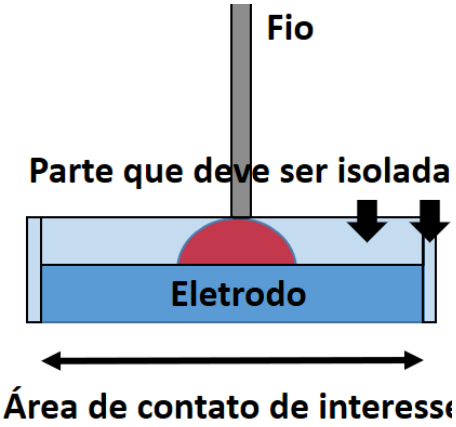
Figura 4.11 - Limpeza dos eletrodos. Eletrodo da esquerda sem lixar e eletrodo da direita parcialmente lixado

Fonte: do autor.

Como mencionado, a limpeza com a lixa garante uma superfície mais polida e livre de agentes externos, facilitando a condução.

Para a condução do experimento deve-se garantir que apenas a superfície de interesse esteja em contato com a agua salgada. Qualquer superfície do eletrodo que produza um contato adicional pode conduzir corrente em locais não adequadamente localizados no campo magnético, atrapalhando os testes. Assim, um tipo de mento deve ser feito na área do eletrodo que não deve entrar em contato com a água. Para a geometria definida neste trabalho, a superfície de interesse era aquela oposta à soldagem do fio. A Figura 4.12 ilustra o comentado.

Figura 4.12 - Isolação do eletrodo



Fonte: do autor.

Note que o isolamento, na figura 4.12, também envolve o estanho da solda, uma vez que ele é altamente condutor. Escolheu-se resina epóxi para ser aplicada como isolamento. Essa resina possui vantagens como isolação elétrica, isolação térmica e resistência à solução salina. Uma das desvantagens é que, quando submetida por longos tempo a temperaturas e correntes elevadas, a resina se desfaz, sendo necessária outra aplicação. A Figura 4.13 mostra uma aplicação da resina epóxi e o eletrodo com a camada finalizada.

Figura 4.13 - Isolação com resina epóxi

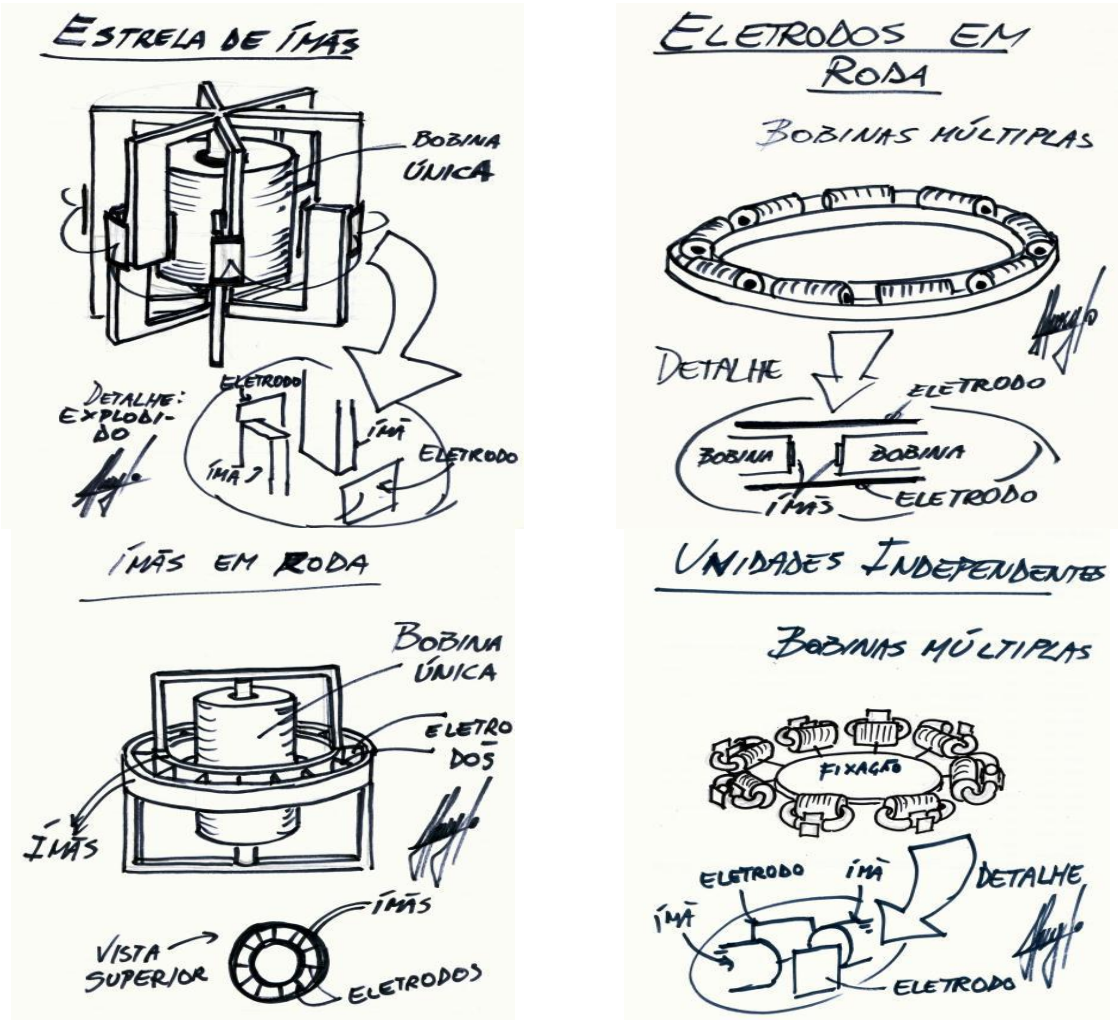
Fonte: do autor.

O próximo passo foi a conexão dos eletrodos com o propulsor propriamente dito. Para a geometria adotada neste estudo, cada propulsor necessita de dois conectores, sendo que ambos foram instalados simetricamente paralelos, para otimizar a corrente gerada pela fonte. Para garantir esse paralelismo, os eletrodos foram grudados com cola instantânea.

4.1. Primeira fase

Nas primeiras propostas desta linha de pesquisa considerou-se o uso de eletroímãs para gerar o campo magnético. A possibilidade do eletroímã fez com que diferentes geometrias a ele associadas fossem sugeridas para a configuração da unidade propulsora. A Figura 4.14 mostra um conjunto desses primeiros esboços (Schulz, 2003).

Figura 4.14 - Primeiros esboços da geometria e propulsores

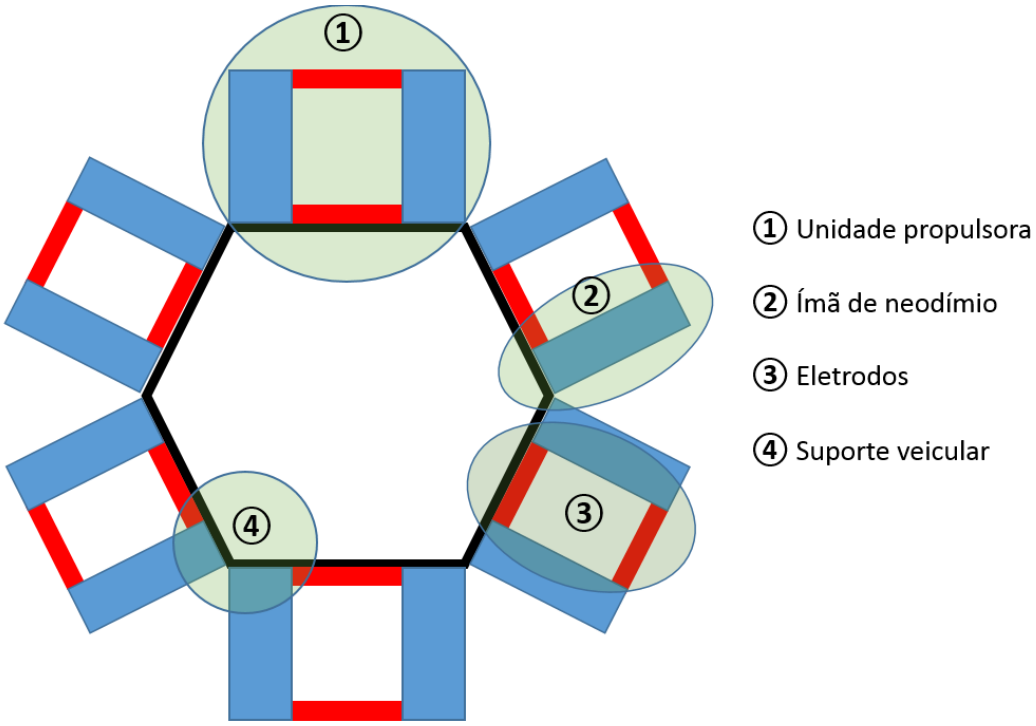


Fonte: Schulz (2003).

Nota-se que, apesar das diferentes possibilidades construtivas, predomina a disposição circular do conjunto, ou de um polígono fechado, decorrente da ideia de fixar o conjunto em torno de um sólido vazio ou de incorporá-lo neste sólido. Decidiu-se, após algumas considerações de ordem prática e considerando a disposição

geométrica de eletrodos formando um polígono fechado de Schulz (2003), utilizar ímãs permanentes para a confecção do primeiro veículo, o que fez com que a configuração segue o esboço básico da Figura 4.15. Os ímãs foram adquiridos com verbas destinadas à pesquisa após o devido estabelecimento de suas características (ver a seguir neste mesmo item) e avaliação de custos em diferentes fornecedores, conforme os procedimentos legais.

Figura 4.15 - Geometria hexagonal proposta

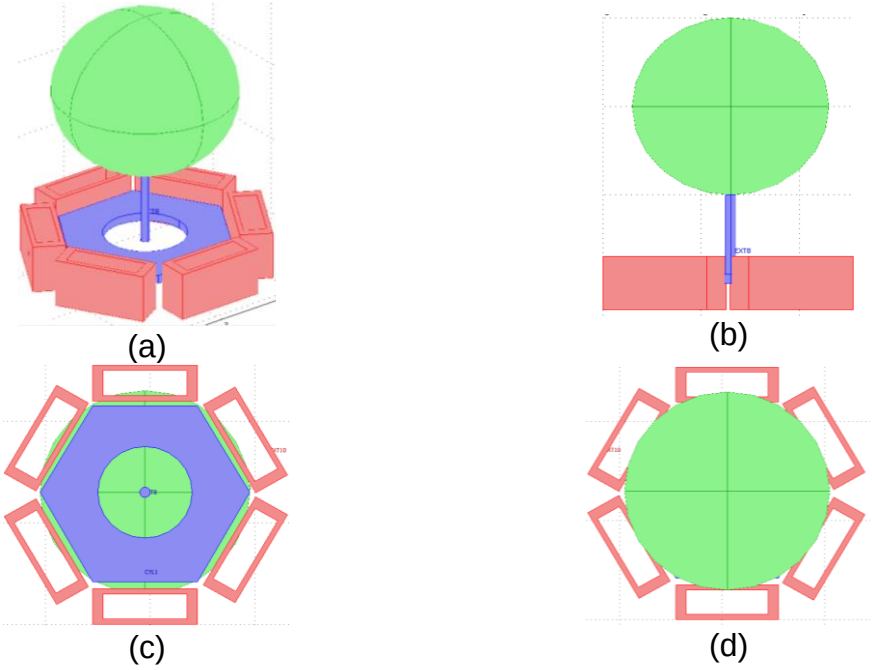


Fonte: do autor

Para o corpo vazio, que confere flutuabilidade ao veículo (Schulz, 2013), exemplificam-se aqui a forma de esfera (

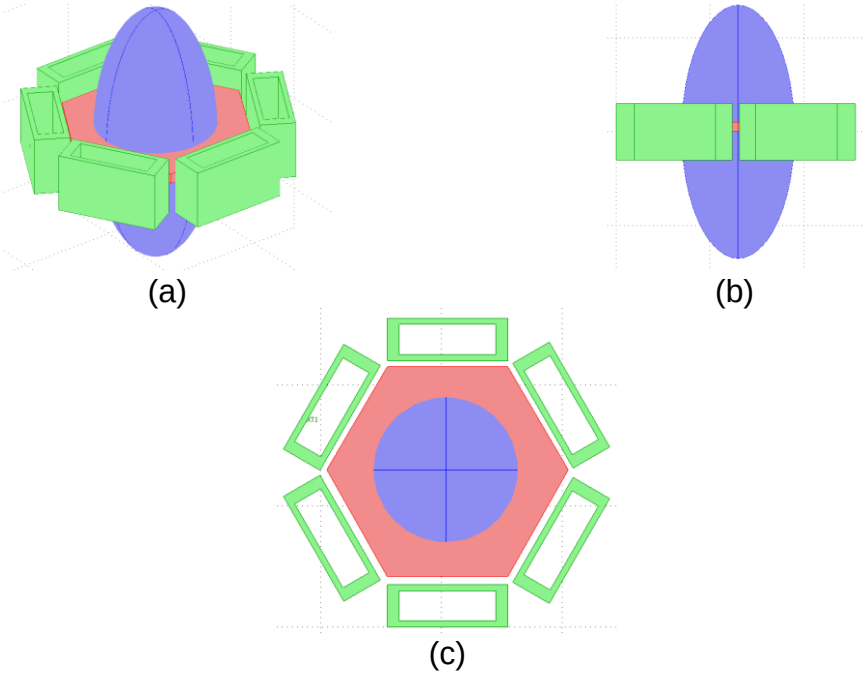
Figura 4.16) e a forma de charuto (Figura 4.17).

Figura 4.16 - Formato esférico



Fonte: do autor.

Figura 4.17 - Formato charuto



Fonte: do autor

Para visualizar a ordem de grandeza do volume do flutuador, Schulz (2003), fez uma avaliação superestimada, considerando para o conjunto de ímãs, eletrodos e acessórios acoplados ao corpo vazio uma massa de 2 kg. Trata-se de uma massa acima daquela esperada para o real uso, mas permite estabelecer dimensões

superiores de trabalho. Nesse caso, o volume de uma esfera vazia (corpo vazio) em água com massa específica de 1000 kg/m^3 deve ter um diâmetro de 15,6 cm para que haja compensação entre peso e empuxo. Aumentando a massa para 4 kg (como máximo exploratório) o diâmetro aumenta para 19,7 cm. Ou seja, a esfera tem ainda dimensões reduzidas, que podem ser utilizadas em tanques convenientemente dimensionados para estudos laboratoriais. Assim, para as massas realmente utilizadas os volumes necessários serão menores.

Partindo dos esboços iniciais das figuras 4.14 a 4.17, dois tipos de estrutura propulsora foram elaborados.

Inicialmente foi proposto o uso de seis unidades similares àquela da figura 5. Imãs com alta intensidade magnética, de 0,4 T, e dimensões de 50 × 20 × 10 mm, foram utilizados para estabelecer o domínio magnético. Como mencionado, inicialmente eletrodos de alumínio e cobre foram usados para transferir a diferença de potencial, que foi aplicada no fluido através de uma fonte chaveada de corrente continua 110/200 V e saída de 13,8 V. Note-se que na Figura 4.3 a corrente flui na direção y produzindo uma Força de Lorentz na direção *x*. Caso se inverta a direção de corrente para $-y$, a força de Lorentz também inverterá. Esse princípio, quando aplicado à dimensão vertical, conferirá os movimentos ascendentes e descendentes ao veículo ao qual estarão acopladas as unidades propulsoras. As unidades propulsoras foram dispostas em formato hexagonal porque se procurava um polígono fechado, mas também devido às facilidades construtivas.

Para uma pré-análise da Água-Viva MHD, duas forças foram consideradas. A primeira definida por **J**×**B** (força de Lorentz), e a segunda transmitida ao veículo. Em termos simples, avalia-se que a força transmitida ao veículo possa ser obtida da equação integral da quantidade de movimento aplicada ao fluido que transita através dos eletrodos. Em suma, pelo princípio da ação e da reação, a força transmitida à água tem mesmo módulo e sentido oposto daquela que a água faz sobre o veículo. A equação integral da quantidade de movimento mostra que:

$$\mathbf{F}_t = \frac{\partial}{\partial t} \int_{Volume\ de\ controle} \mathbf{V} \rho dVol + \int_{Superfície\ de\ controle} \mathbf{V} \rho \mathbf{V}.d\mathbf{A} \qquad (4.2)$$

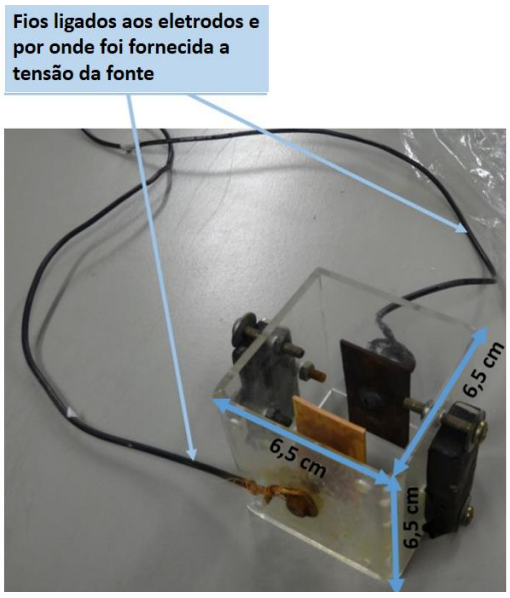
Desconsiderando a fase de aceleração, apenas interessa a segunda parcela do segundo membro. Já foi mostrado no capítulo anterior, que a velocidade do escoamento no elemento propulsor permite avaliar a força feita para impulsionar o líquido.

O valor da área transversal depende da geometria adotada, mas a forma utilizada neste estudo sempre foi retangular. Evidentemente pretende-se movimentar um corpo acoplado à unidade propulsora, mas os primeiros valores de velocidade mostram que este movimento está limitado pelo peso do corpo. Para possibilitar um movimento menos influenciado pela força da gravidade, a equação (3.2) será aplicada. O desempenho do veículo, *r*, no tocante à força, em uma primeira avaliação, pode ser calculado pela razão entre as duas forças mencionadas, na forma:

$$r = \text{força propulsiva} / \text{força de lorentz} \tag{4.3}$$

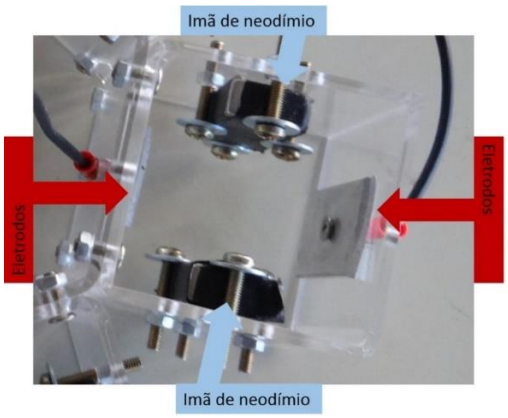
É importante ressaltar que a equação 4.3 não se refere a eficiência do propulsor. Os modelos de propulsores inicialmente adotados estão apresentados na Figura 4.18 e Figura 4.19. O material utilizado para a estrutura de sustentação foi o acrílico, na expectativa de permitir uma melhor visualização do escoamento e maior durabilidade em ambientes aquáticos.

Figura 4.18 - Dimensão do propulsor e sua ligação com a fonte de tensão



Fonte: do autor.

Figura 4.19 - Disposição dos eletrodos e imãs no propulsor em uma segunda configuração



Fonte: do autor.

Como visto nas figuras, o propulsor inicial possui a estrutura suporte com 6,5 cm de lado. Os imãs utilizados no presente estudo são de neodímio e foram acoplados através de parafusos, assim como os eletrodos. O mesmo se aplica às outras 5 unidades inicialmente propostas.

A fonte de alimentação permitiu estabelecer a tensão de trabalho e transmitir a corrente que, a partir dos eletrodos, gerou o campo elétrico no meio condutor (solução salina, ou água salgada). Com os campos magnéticos gerados pelos imãs, estabeleceu-se assim força de Lorentz que movimentou o fluido.

Para a geração da tensão, uma fonte de 100 A e 13,8 V de saída, e potência total de 1380 W da marca Maxtron® foi utilizada, conforme mostrado na Figura 4.20. A fonte foi adquirida com verbas destinadas à pesquisa, após o estabelecimento da melhor especificação para a mesma e dos procedimentos de avaliação de custos em diferentes fornecedores, conforme as normas para essas verbas.

Figura 4.20 - Fonte de alimentação de corrente contínua Maxtron®. 13,8 Volts e 100 Ampères

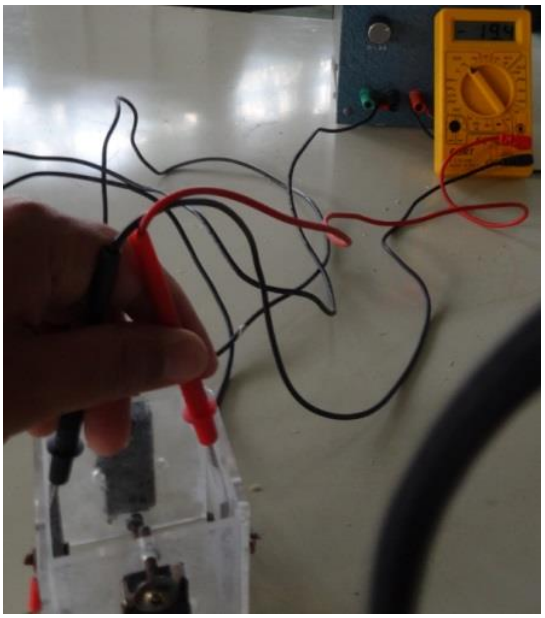
Fonte: do autor.

Por ser uma fonte de corrente contínua e chaveada, a tensão não pode ser variada, limitando os primeiros experimentos a valores fixos de 13,8 V de saída.

Após a confecção dos propulsores, o seu teste foi realizado conforme descrito a seguir:

- Verificou se os eletrodos estavam corretamente ligados a fonte de alimentação.
- Com um multímetro registrou-se que a tensão gerada pela fonte era igual à tensão medida nos eletrodos. Isso representa um primeiro teste para verificar se não há deficiência de contatos entre os diferentes componentes e o os cabos. Ver Figura 4.21.

Figura 4.21 - Verificação da tensão entre os eletrodos



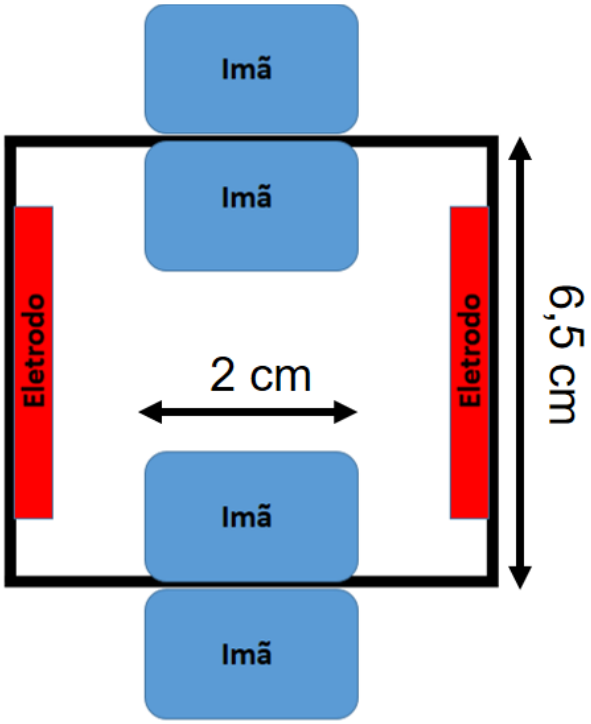
Fonte: do autor.

- Verificou-se a integridade dos imãs e seu correto posicionamento. Os imãs deveriam estar perpendiculares aos eletrodos. Para manter a fixação, parafusos foram colocados como primeira opção. Por esses parafusos atrapalharem o escoamento, resolveu-se retirar os parafusos e prender os imãs utilizando ímãs justapostos (ver figura 4.22).
- Embora o projeto inicial considerasse seis propulsores, apenas um propulsor foi utilizado nos primeiros testes. A prática mostrou que a otimização de um propulsor

era mais objetiva, pelo menos nesse primeiro estágio. O peso dos fios e sua rigidez, a solução salina, que induz estratificações no líquido e a dificuldade em trabalhar com a unidade completa (seis propulsores) levaram à paulatina decisão de usar apenas um propulsor.

- Eletrodos de diferentes materiais foram utilizados. Como já foi mencionado, para analisar a factibilidade e a funcionalidade do propulsor em uma escala maior, diferentes tipos de eletrodos foram utilizados. O primeiro testado foi o alumínio, seguido pelo de cobre. Eletrodos de grafite foram utilizados em um estágio posterior dos estudos.
- Alterações geométricas se fizeram necessárias. Notou-se que a distância entre eletrodos, imãs e a presença de parafusos na unidade propulsora interferem no campo de velocidade do escoamento do fluido. Diferentes configurações foram adotadas com objetivo de otimizar a velocidade do fluido.

Figura 4.22 - Verificação da tensão entre os eletrodos

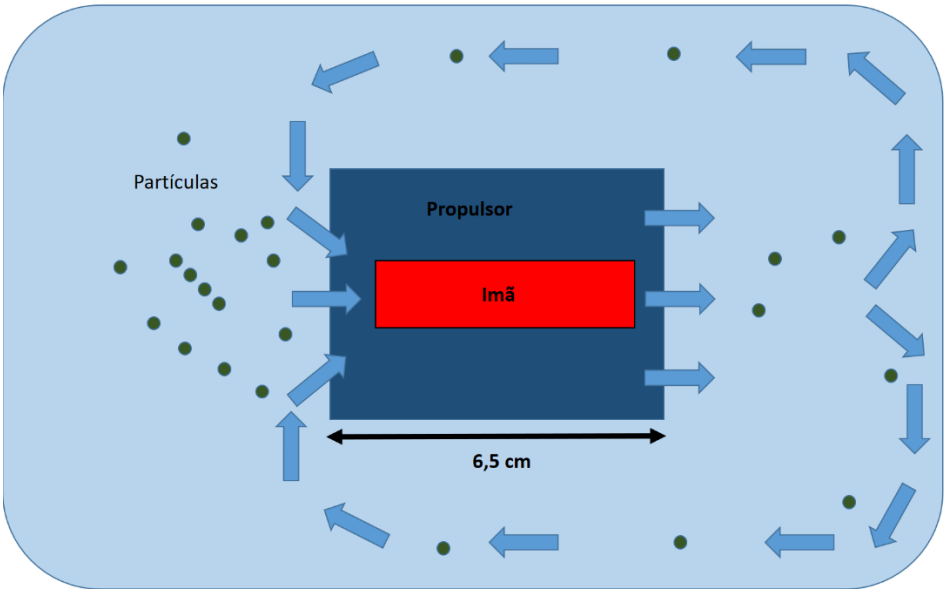


Fonte: do autor.

Os testes com o propulsor foram primeiramente realizados em uma cuba de menor dimensão visando uma visualização mais imediata. Nesta cuba foi colocada uma solução de água e sal composta de uma parte de sal para 4 partes de água. A

Figura 4.23 mostra um esquema do comportamento aproximado do fluido na cuba e o movimento de suas partículas. A Figura 4.24 mostra o propulsor real na cuba.

Figura 4.23 - Esquema do experimento com partículas e movimento aproximado delas na cuba



Fonte: do autor.

Figura 4.24 - Testes iniciais do propulsor

Fonte: do autor.

O propulsor era imerso em água salgada e ligado à fonte. Inicialmente analisou-se o movimento induzido pelo motor à água horizontalmente, para adquirir o conhecimento inicial e os dados necessários para a posterior análise vertical. A visualização do movimento foi feita acompanhando partículas flutuantes na superfície da solução salina (água e sal). Diferentes partículas podem ser usadas (serragem,

bolas de isopor, por exemplo). No presente estudo verificou-se que o condimento composto de folhas trituradas de orégano permitia uma visualização inicial aceitável. Houve a sugestão de utilizar o equipamento de velocimetria a laser existente no Laboratório de Hidráulica situado no Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA – USP) no município de Itirapina. Optou-se por não utilizar este equipamento considerando a distância ao município vizinho e a fase inicial da visualização efetuada. Houve também a sugestão de utilizar micromolinetes ou manômetros, porém as dimensões dos primeiros mostraram-se ainda muito grandes para os experimentos e os custos mostraram-se elevados em relação à verba disponível.

Logo após ligar a fonte, iniciou-se a filmagem do experimento. O propulsor rapidamente começou a funcionar e a movimentar as partículas de orégano. Observando as partículas que chegavam à entrada do propulsor em condições de atravessá-lo (isto é, de não ficar presas por efeitos de capilaridade junto às paredes ou outras partículas), fazia-se a contagem do tempo utilizado para atravessar o duto central do propulsor. Como a distância era conhecida, podia-se avaliar a velocidade. Note-se que este é um valor entendido como aproximado, porque a partícula pode sofrer choques ou efeitos de capilaridade no interior do duto, dependendo de sua localização no escoamento. Tais incertezas são inerentes à metodologia de visualização e avaliação empregada. A câmera usada para registrar o experimento foi uma Sony Cyber-Shot DSC-WX 300, com resolução de 1920 × 1080 e 60 FPS, mostrada na Figura 4.25.

Figura 4.25 - Câmera utilizada para gravação dos experimentos. Sony Cyber-shot DSC - WX 300

Foto: do autor

Para a contagem das partículas e do tempo de passagem, o reprodutor de vídeos Windows Media Player 11® e o aplicativo Media Player Classic®, com leitura do tempo em até 3 casas, foram usados. A precisão da escala temporal foi de 1/60 segundos, ou 0,017s.

- **Visualização da geometria**

Após o experimento com um propulsor, voltou-se à montagem completa do veículo (6 propulsores), para verificar a viabilidade de seu uso. A geometria real é apresentada na Figura 4.26.

Figura 4.26 - Primeiro modelo de água viva, executado em madeira

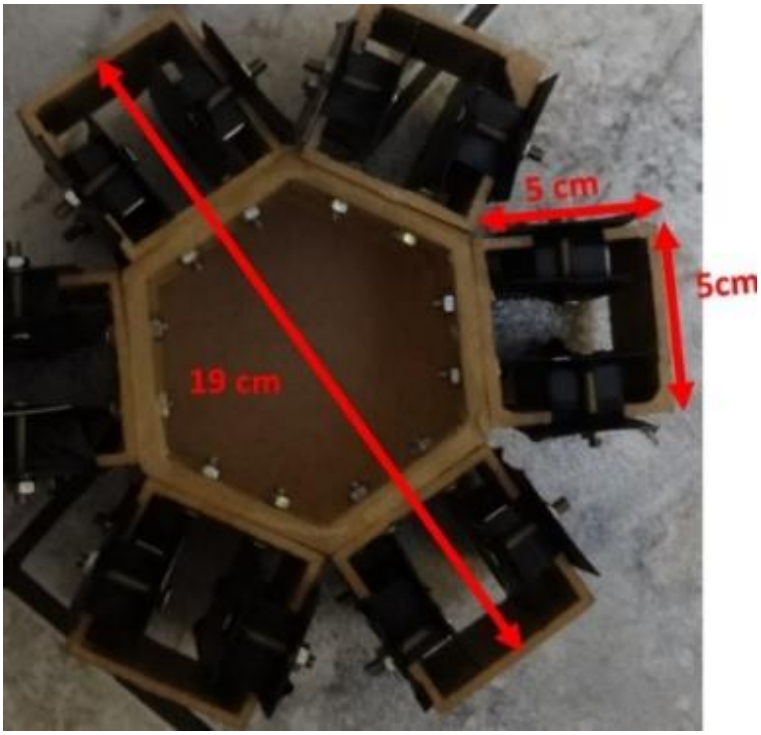


Foto: do autor

O modelo real de compensado foi feito para testes preliminares como peso e avaliação da configuração. A geometria mostrou-se factível, mas, devido à permeabilidade e à fragilidade do material, o mesmo foi descartado e novos materiais foram utilizados.

- **Geometria (segundo esboço)**

Partindo do modelo de madeira compensada, um modelo para ser construído em acrílico foi projetado no programa Solid Works®, juntamente com as unidades propulsoras. A Figura 4.27 mostra o esboço.

Figura 4.27 - Esboço em formato hexagonal com todos os componentes dos propulsores

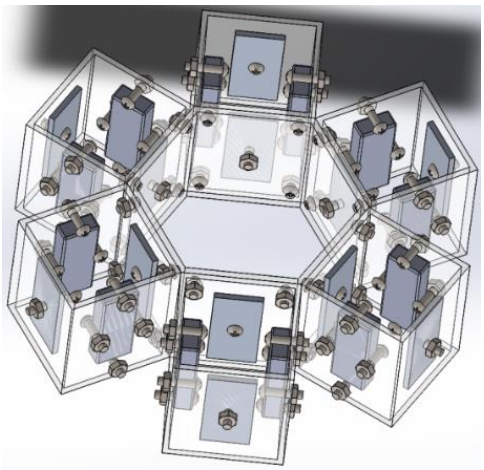


Foto: do autor.

De posse desse esboço, o segundo modelo real foi construído, conforme mostra a Figura 4.28.

Figura 4.28 - Modelo real do motor da segunda água viva

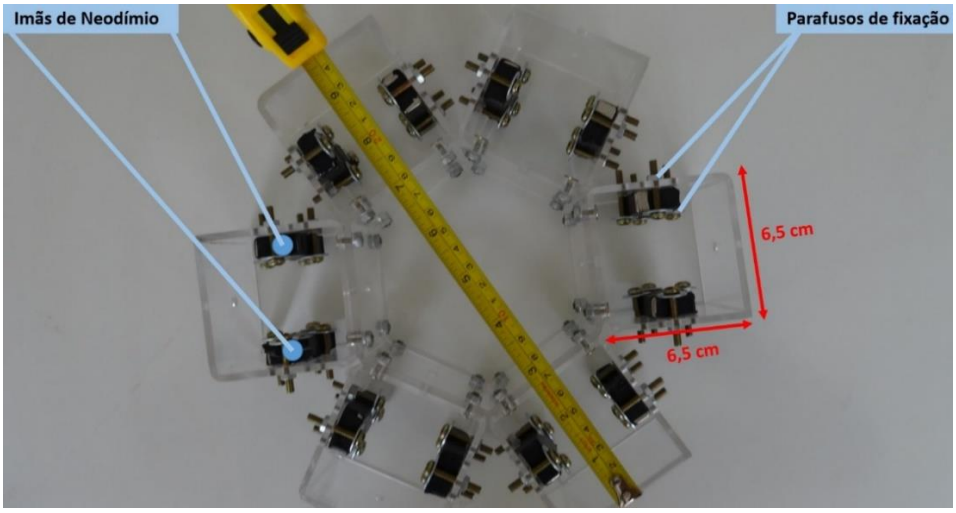
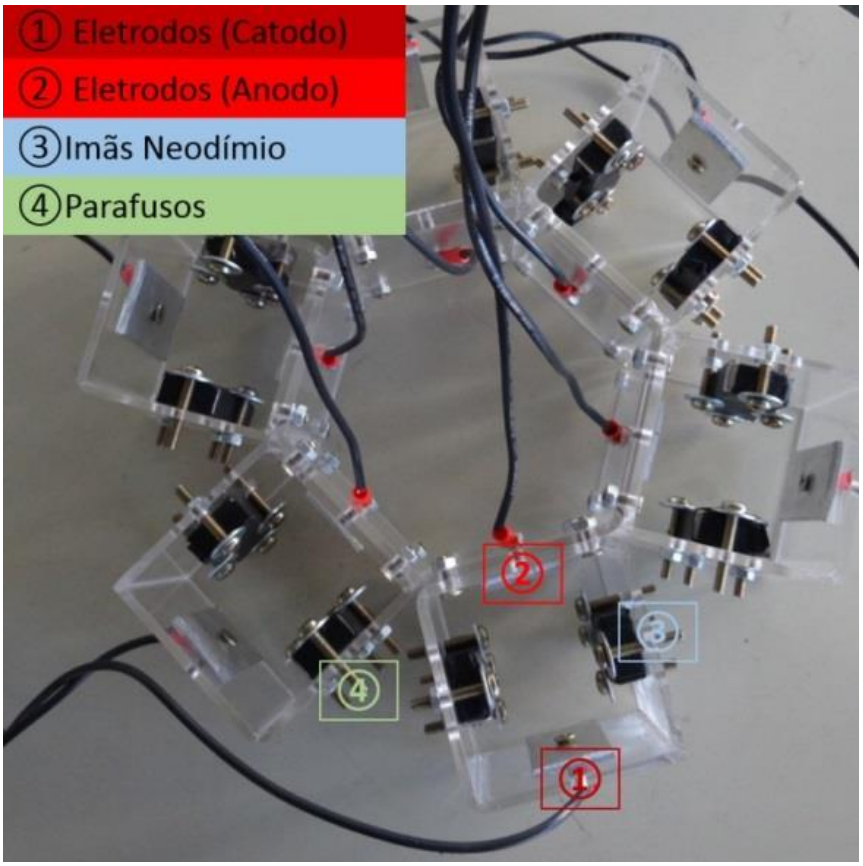


Foto: do autor.

Esse modelo, muito mais robusto em relação ao primeiro (feito de madeira compensada), resistiu ao ambiente aquático salino assim como às forças de atração dos imãs, que poderiam danificar o protótipo. Vale lembrar que a intensidade dos imãs de neodímio era de aproximadamente 0,4 T.

O objetivo inicial era adaptar o conjunto de propulsores ao corpo vazio, no intuito de estabelecer o volume que produzisse uma densidade unitária ao conjunto. Após essa etapa os propulsores deveriam ser ligados à fonte (Figura 4.29), e esta forneceria a tensão necessária para a propulsão do veículo, que deveria realizar movimentos ascendentes e descendentes.

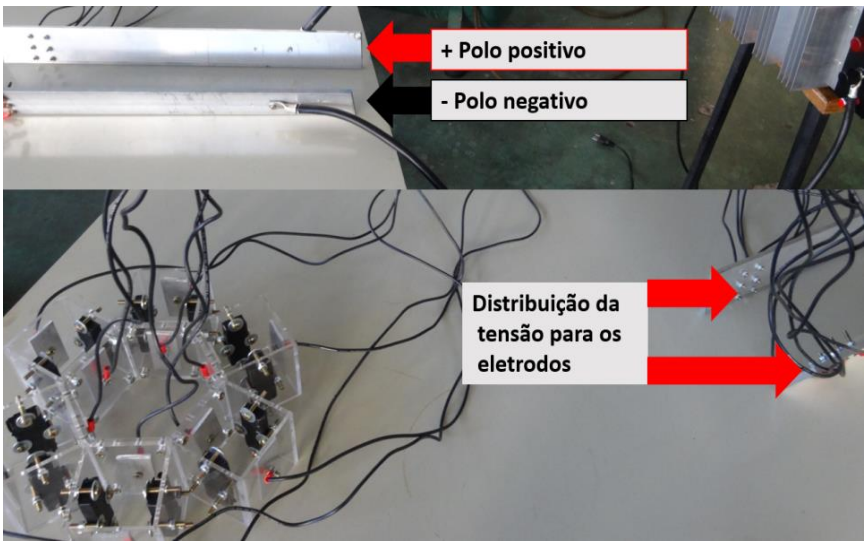
Figura 4.29 - configuração da água viva sem o corpo vazio



Fonte: do autor

Duas chapas de alumínio foram conectadas às saídas positivas e negativas da fonte, distribuindo a tensão e a corrente para os demais eletrodos (12 no total). A Figura 4.30 mostra o esquema utilizado.

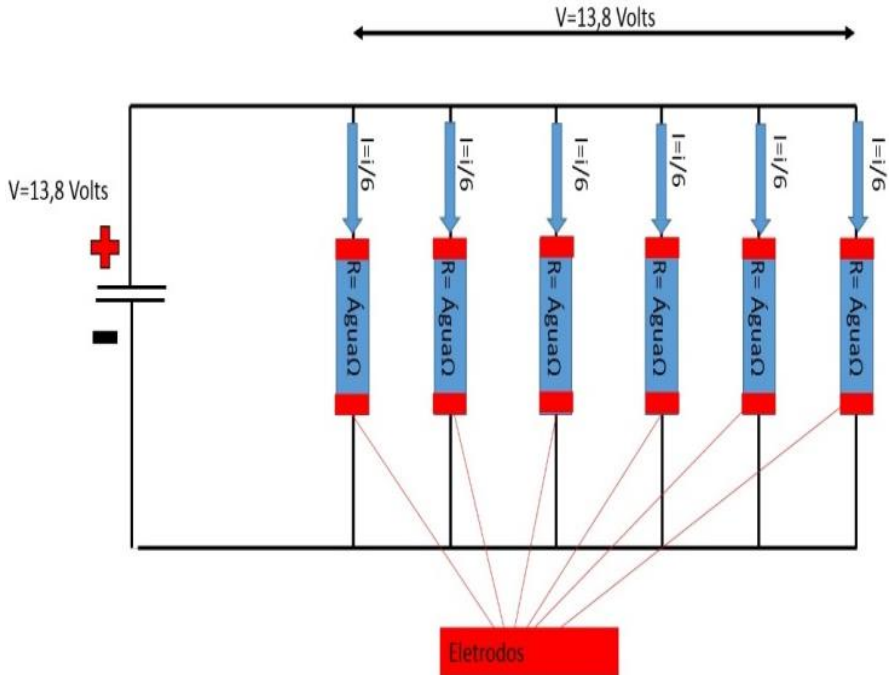
Figura 4.30 - Distribuição dos fios para os eletrodos



Fonte: do autor.

O circuito simplificado da Figura 4.31 mostra a disposição dos eletrodos e as divisões de corrente e tensão para o veículo.

Figura 4.31 - Esquema simplificado do circuito

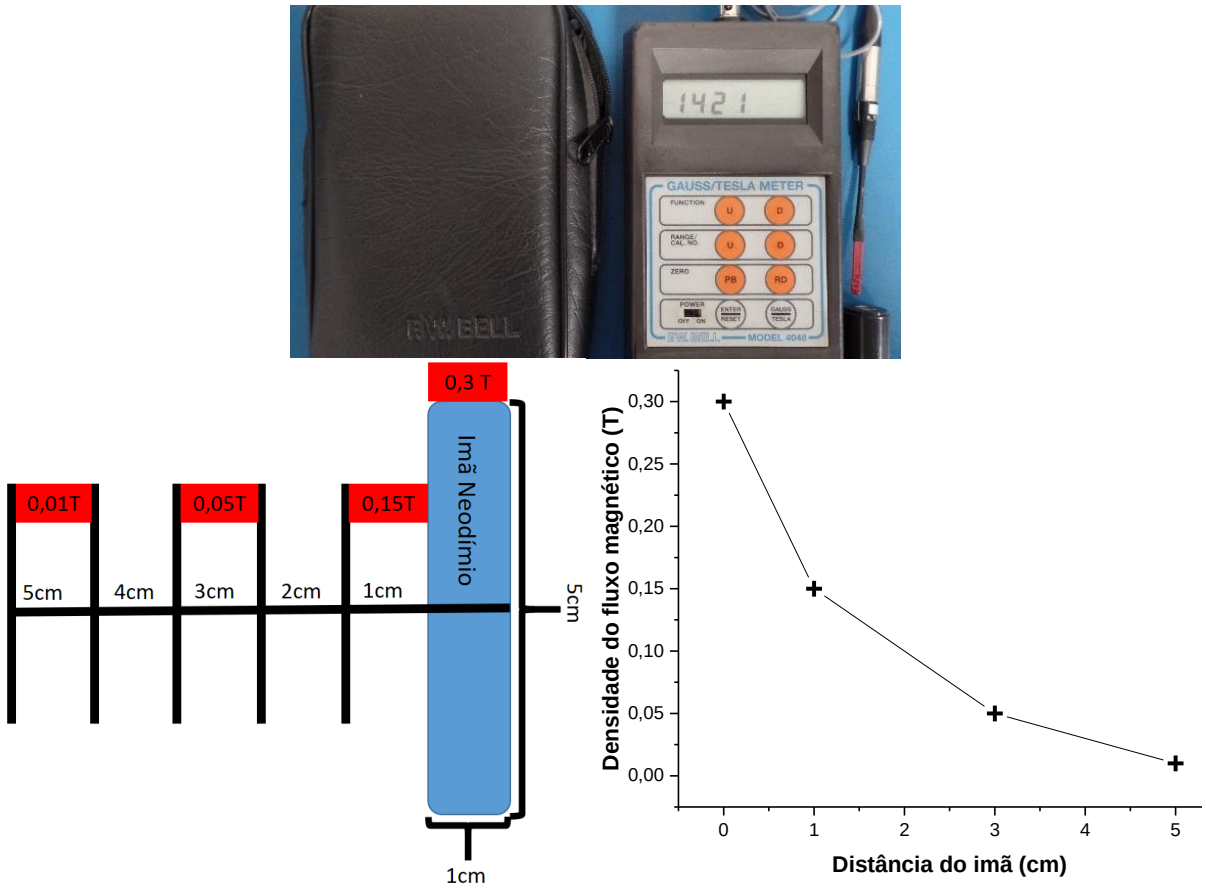


Fonte: do autor.

Note-se que os propulsores são montados em paralelo, assim a tensão fornecida pela fonte é igual para todos os motores. A corrente, por sua vez, é dividida

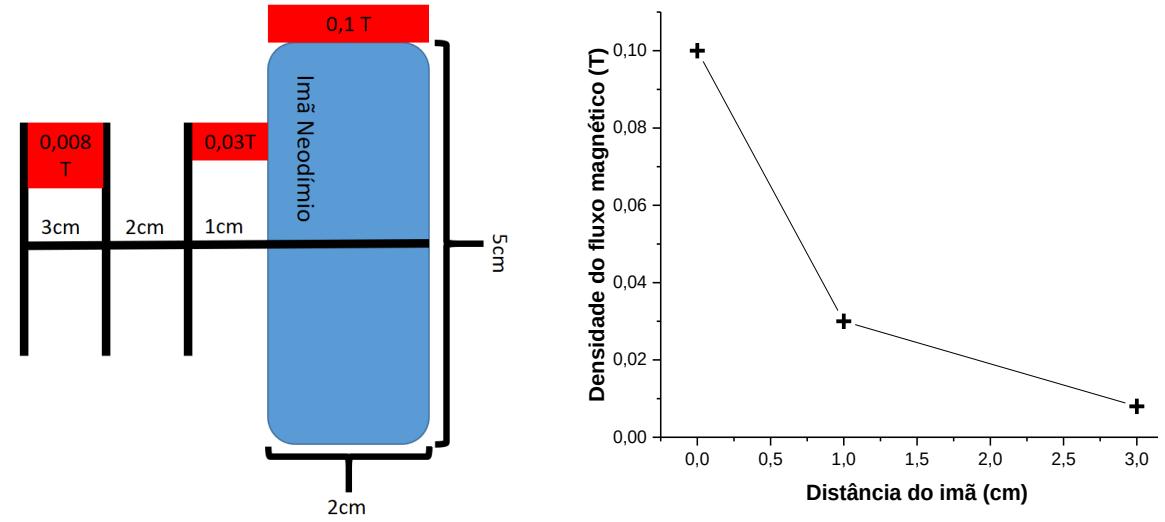
em 6 ramos do circuito, por isso a necessidade de uma fonte com alta corrente. A densidade do fluxo magnético também foi medida. Utilizando um gaussímetro da marca FW Bell Gauss/Tesla meter modelo 4048 (figura 4.32), mediu-se o valor da densidade do fluxo magnético em Tesla dos imãs utilizados, assim como sua variação com a distância. Os ímãs têm formato de paralelepípedo de base retangular, com as seis faces possuindo três áreas distintas. Considerando a disposição construtiva do propulsor, apenas as áreas compostas pela maior dimensão linear do paralelepípedo forma consideradas para as medidas (as áreas de topo, menores, não foram consideradas). O imã escolhido para o teste foi posicionado, em relação ao gaussímetro, com a superfície de sua maior área disposta horizontalmente (Figura 4.32) e verticalmente (Figura 4.33), notando-se que a densidade era fortemente dependente da posição adotada. A Figura 4.33 e a Figura 4.33 mostram a evolução e os valores das medidas, que conduziram à melhor condição para o propulsor indicada na Figura 4.34.

Figura 4.32 - Variação da densidade de fluxo magnético com o imã disposto horizontalmente



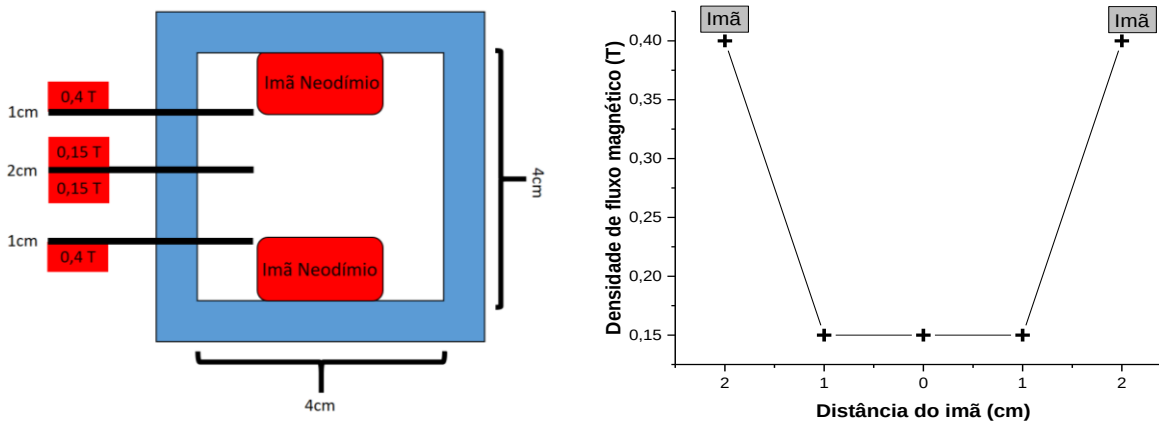
Fonte: do autor.

Figura 4.33 – Gaussímetro FW Bell 4048 acima e variação da densidade de fluxo magnético com o imã disposto verticalmente abaixo



Fonte: do autor.

Figura 4.34 - Campo magnético dos imãs dentro do propulsor



Fonte: do autor.

A geometria proposta, bem como os materiais utilizados, geraram os seguintes problemas:

1 - Os cabos utilizados (12 no total estavam ligados ao conjunto propulsor) mostraram-se pesados e rígidos demais, o que interferia diretamente na movimentação do veículo (devido à rigidez).

2) A distribuição da corrente. Como pode ser visto na Figura 4.31, a corrente estava sendo dividida entre os seis propulsores, o que resultava em cerca de 16 A para cada propulsor, um valor baixo para o adequado funcionamento deles.

3) A fonte incialmente dimensionada. Quando o presente experimento foi dimensionado, o conjunto de informações disponíveis a partir da revisão bibliográfica

até então feita conduziu à proposta de uma fonte com a tensão próxima aos 14 V. Esta fonte de fato é adequada para o estudo de uma unidade propulsora. O fato de se ter proposto uma geometria com seis unidades, entretanto, mostrou que o conjunto "tensão e corrente elétrica" para as seis unidades estava subdimensionado. Este fato fez com que a Água Viva MHD passasse por um redirecionamento geométrico profundo, passando a se constituir de apenas um propulsor e do corpo vazio correspondente. Adicionalmente, para evitar que os trabalhos se realizassem de maneira excessivamente limitada pela fonte inicialmente adquirida, novo dimensionamento para a fonte foi feito e nova fonte foi adquirida. Os dados obtidos no presente estudo, portanto, foram referentes a um propulsor, obtendo-se dele os valores de velocidade, força eletromagnética e efetuando-se seu ajuste ao corpo vazio para compor o novo veículo. Os dados obtidos são mostrados no capítulo de resultados.

4.2. Segunda fase

Conforme comentado, os resultados obtidos no primeiro teste experimental descartaram o uso de mais propulsores, adotando-se um propulsor apenas para o veículo. Note-se que o subdimensionamento inicial da fonte limitou a partição da corrente elétrica, e as características dos cabos elétricos necessários conferiam rigidez exagerada ao conjunto que deveria se movimentar. O uso de apenas um propulsor e de uma nova fonte permitiu utilizar valores de tensão e corrente adequados para a continuidade dos trabalhos no estudo dos escoamentos proporcionados. O movimento vertical do veículo, entretanto, ainda dependia de um conhecimento maior das forças geradas, para verificar a possibilidade de vencer a rigidez dos dois cabos restantes, ligados aos eletrodos.

A nova fonte de tensão CC (corrente contínua), mostrada na Figura 4.35, permitiu realizar experimentos alterando-se a tensão e a corrente do propulsor. O novo modelo, Powerbrás 1830, possui uma tensão de saída de (0 – 80) Vcc e corrente de saída de (0 – 30) A, ambas variáveis (e com resolução, em torno de 0,1 V e 0,1 A para ajustes finos), e com potência máxima de 2400 W, com a precisão do medidor de ±1%.

A mesma foi adquirida com verba destinada à pesquisa, seguindo os procedimentos normatizados para este tipo de aquisição.

Figura 4.35 - Fonte de alimentação Powerbrás 1830 com tensão e correntes ajustáveis

Fonte: do autor.

Após a aquisição da nova fonte, os propulsores também foram modificados. Vários testes com alterações geométricas para os propulsores foram feitos. Verificando o empuxo (força gerada) produzido a partir dos dados obtidos anteriormente, concluiu-se que o propulsor deveria ser menor, diminuindo a distância entre os eletrodos para melhorar a transmissão de corrente entre eles. No entanto há uma otimização que deve ser buscada nesse procedimento de diminuição de distâncias. A equação (4.2) mostra que a força é proporcional à velocidade ao quadrado e à área transversal do escoamento. Assim, em princípio, uma área maior proporcionaria uma força propulsiva maior. No entanto, a força eletromagnética decresce com o aumento da distância entre os eletrodos (vinculado à resistividade ou condutividade do meio). Assim, uma área menor aumenta a força de Lorentz e a velocidade, enquanto uma área maior tem o efeito contrário. Como valores extremos, uma área transversal nula gera uma força propulsiva nula (não há espaço para o escoamento) assim como uma área transversal infinita gera uma força propulsiva nula (não há força eletromagnética para impulsionar o fluido). Consequentemente, há uma otimização a ser feita, a qual depende das disposições construtivas adotadas. A Figura 4.36, mostra um dos primeiros propulsores utilizados.

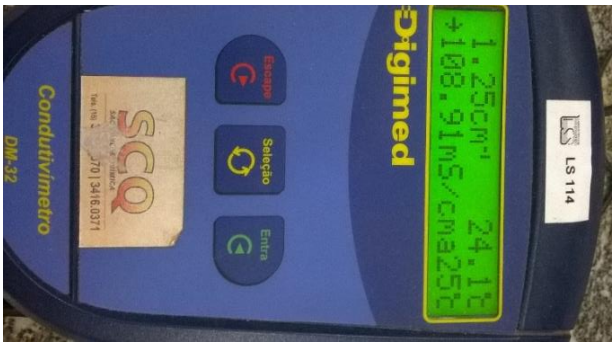
Figura 4.36 - Primeiro propulsor utilizado

Fonte: do autor.

Esse propulsor possuía dimensões de (50 × 34 × 25) mm, 23% menor em comprimento, 62% menor em largura e 48% menor em altura, quando comparado ao propulsor da primeira fase.

Nessa segunda fase os equipamentos de medição foram modificados, alguns atualizados e outros trocados. Por exemplo, um condutivímetro foi incorporando às medições (na primeira fase uma tabela comparativa com medidas de água e sal foi utilizada para definir a condutividade do fluido). Este condutivímetro é mostrado na Figura 4.37.

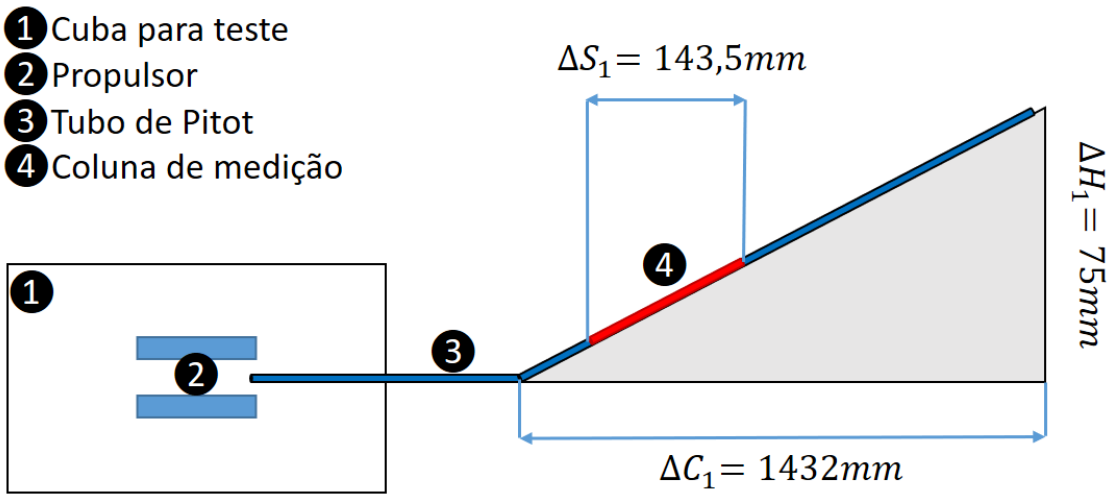
Figura 4.37 - Condutivímetro Digimed DM-32



Fonte: do autor.

O modelo de condutivímetro adotado, Digimed DM-32, permite efetuar medidas em um leque bastante amplo de soluções, inclusive a solução salina de NaCl. A resolução do equipamento para fluidos de baixa condução era de 0,1 cm^{-1} e sua precisão relativa de 0,05 %, o que o tornava seguro para medições de condutividade do presente estudo. Para a medição da velocidade do propulsor, inicialmente um tubo de Pitot inclinado foi montado. Este primeiro equipamento visou testar a viabilidade da medida de velocidade a partir do diferencial de pressão, ou seja, da coluna de água deslocada pelo movimento induzido pelo propulsor. O uso do tubo de Pitot foi proposto pelo orientador, após ser descartado o uso da velocimetria a laser no Laboratório de Hidráulica de Itirapina. A possibilidade do uso do manômetro inclinado decorre do estudo de Merege (2003), que utilizou esta técnica na Escola Politécnica da USP. A Figura 4.38 mostra o esquema de montagem do tubo.

Figura 4.38 - Esquema de montagem do conjunto pitot + manômetro



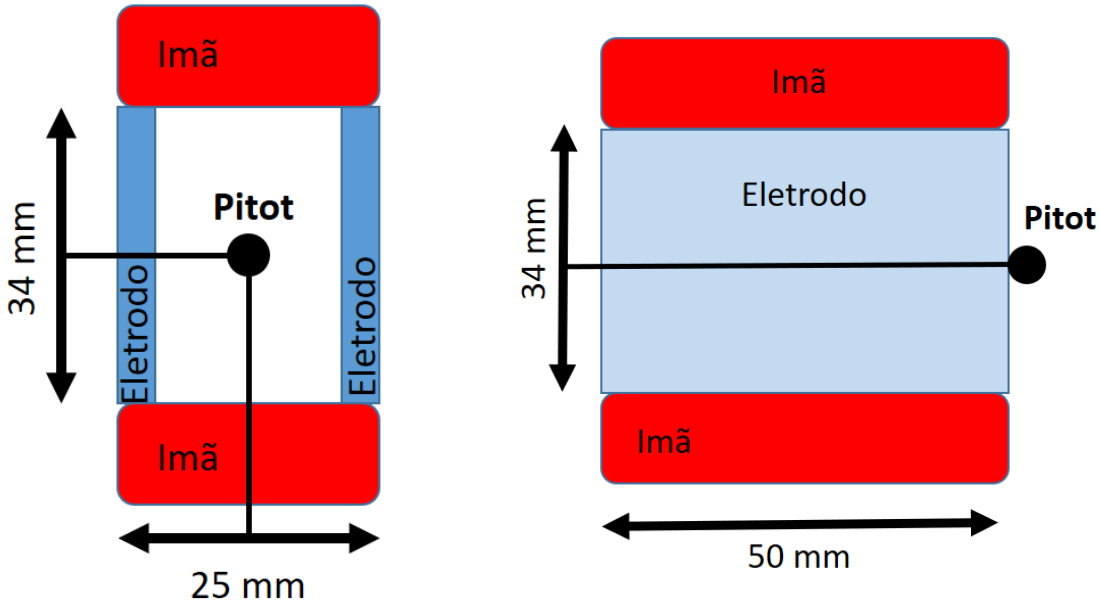
Fonte: do autor.

Em uma cuba de plástico contendo aproximadamente 4 litros de água para 500 gramas de sal, totalizando uma condutividade de 7 S/m, foi inserido um dos propulsores para teste. Ao final da saida do propulsor, o tudo de Pitot foi inserido por um furo na cuba e conectado ao seu suporte inclinado (que podia ser movido) no qual a altura da coluna de água seria medida. Para a medição dos dados algumas etapas foram seguidas:

- Primeiro o propulsor, devidamente ligado aos eletrodos, foi inserido na cuba (reservatório).
- Preencheu-se o reservatório com solução salina.
- Temperatura e condutividade da solução foram medidas para controle.
- O tubo de Pitot foi inserido e colocado imediatamente na saída do propulsor e no centro da área lateral, Figura 4.39. Esperou-se a água atingir o equilíbrio, (item número 4) da Figura 4.38. Após isso marcava-se o ponto zero para medição
- Ligava-se o propulsor e esperava-se estabilizar a variação da coluna de água observada no manômetro inclinado. Anotava-se o valor medido para a altura da coluna.
- Através dos valores inicial e final da coluna de água, calculava-se a velocidade com a qual o propulsor expelia a água. A formulação encontra-se no apêndice B.

Assim como na primeira fase, os erros referentes aos equipamentos e às medições foram considerados. Como a coluna de medição do tubo de Pitot foi montada utilizando-se uma régua, considerou-se o erro de leitura do equipamento que é de ± 0,05 cm (menor divisão possível na régua). Inicialmente propôs-se estabelecer um ângulo de 3 graus para o manômetro. Como já mencionado, durante essa etapa outros propulsores foram confeccionados.

Figura 4.39 - Posicionamento central do Pitot visão frontal e lateral



Fonte: do autor.

Para a medição da temperatura da água foi utilizado um termômetro infravermelho da marca e modelo ADDTOOL ADD7830, com precisão de ± 1,5% e resolução de 0,1 °C, mostrado na Figura 4.40

Figura 4.40 - Termômetro infravermelho ADD7830

Fonte: do autor.

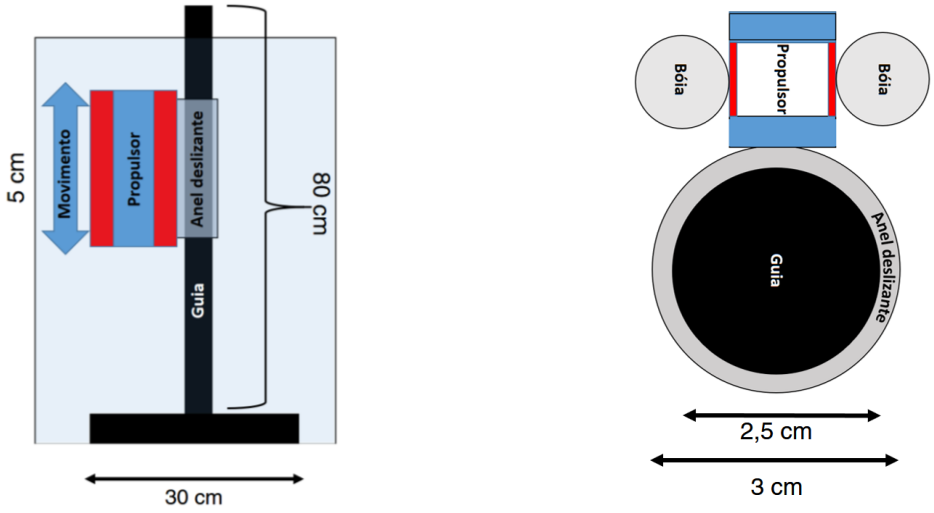
4.3. Terceira fase

Seguindo os estudos com os propulsores preparados na segunda fase, uma guia vertical para o movimento do veículo foi construída.

Nesta etapa dos trabalhos as propostas elaboradas em conjunto com a orientação vinculavam-se a procurar eliminar o problema da rigidez dos fios. Por conseguinte, uma estrutura que permitisse o movimento vertical e um contato móvel foi aventada. Tal estrutura imporia o movimento junto a ela, havendo a preocupação imediata em se minimizar atritos. O uso do corpo vazio para fornecer a densidade global unitária foi evidentemente mantido.

Utilizando apenas um propulsor, o modelo foi primeiramente esboçado como na Figura 4.41.

Figura 4.41 - Esquema de montagem da guia e propulsor com a vista lateral e vista de cima, respectivamente

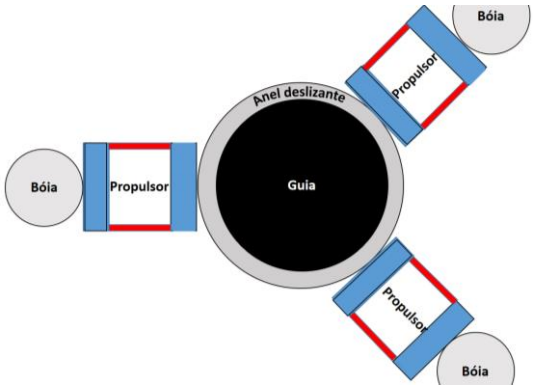


Fonte: do autor.

O propulsor foi fixado a um anel deslizante (no caso um tubo de PVC), e este possuía uma folga para poder deslizar sobre a guia (outro tubo de PVC maior). Boias foram instaladas nas laterais do propulsor para dar flutuabilidade e manter o motor com densidade unitária.

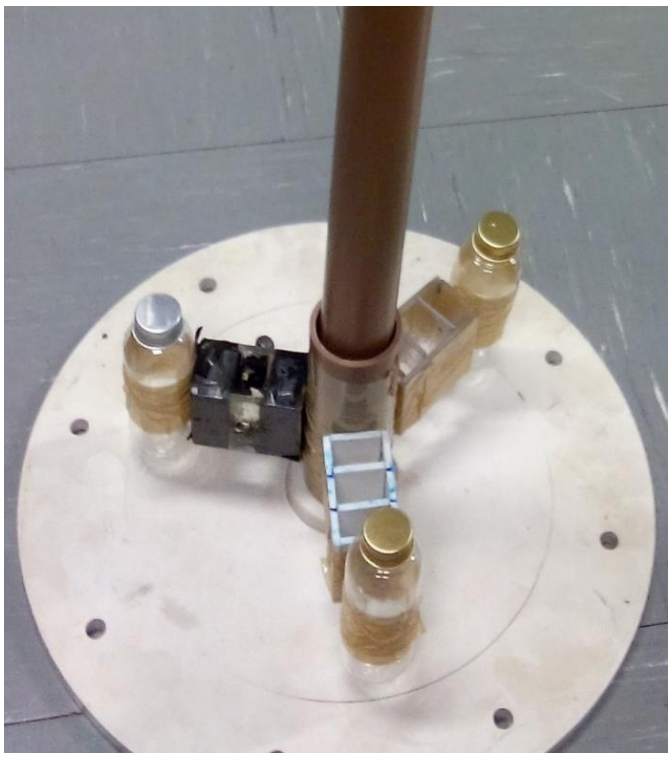
Juntamente com o modelo flutuador proposto, foi construído um segundo modelo. Dessa vez simétrica em relação ao eixo central. Aproveitou-se a mesma guia e o mesmo anel deslizante, no entanto esse flutuador possuía três propulsores e as boias foram distribuídas entre cada um deles. A Figura 4.42 mostra o esquema e a Figura 4.43 o modelo real.

Figura 4.42 - Vista de cima do veículo composto de três boias



Fonte: do autor.

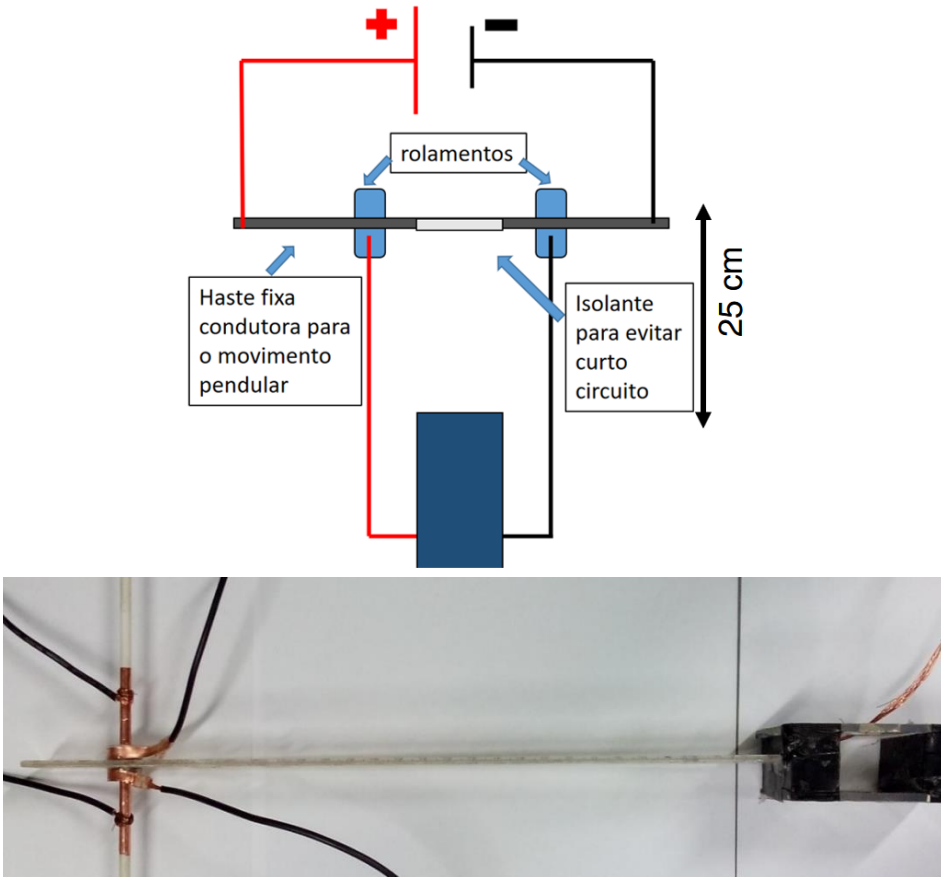
Figura 4.43 - Modelo real dos três propulsores com a base e a guia



Fonte: do autor.

Nessa fase também se discutiu no contexto da linha de pesquisa, para este e futuros trabalhos, a possibilidade de medir a força do propulsor utilizando um pêndulo como instrumento de medição. O propulsor seria acoplado a uma haste e essa encaixada a um rolamento, permitindo o movimento pendular. Como descrito no apêndice E, o deslocamento do conjunto permite o cálculo da força propulsiva real (isto é, sem efetuar a medida da velocidade). No contexto da orientação, foi evidenciada uma maneira de eliminar o efeito dos fios. Nesse caso a sua deformação lateral (perpendicular ao eixo) impõe um efeito elástico (efeito de mola) que mascara a medida da força. A solução imediata, conforme, exposto por Schulz, é concentrar a passagem de corrente em elementos condutores no eixo do pêndulo e no rolamento. O movimento pendular é livre, a menos do contato já existente das esferas do rolamento. Do propulsor ao eixo os fios seguem acoplados ao braço do pêndulo, sendo então ligados ao eixo e ao rolamento (devidamente isolados um do outro). A partir do eixo e do rolamento os fios podem novamente ser usados normalmente, porque não interferem no movimento do pêndulo. Um possível esquema é mostrado na Figura 4.44.

Figura 4.44 - Esquema de montagem do pendulo e modelo real



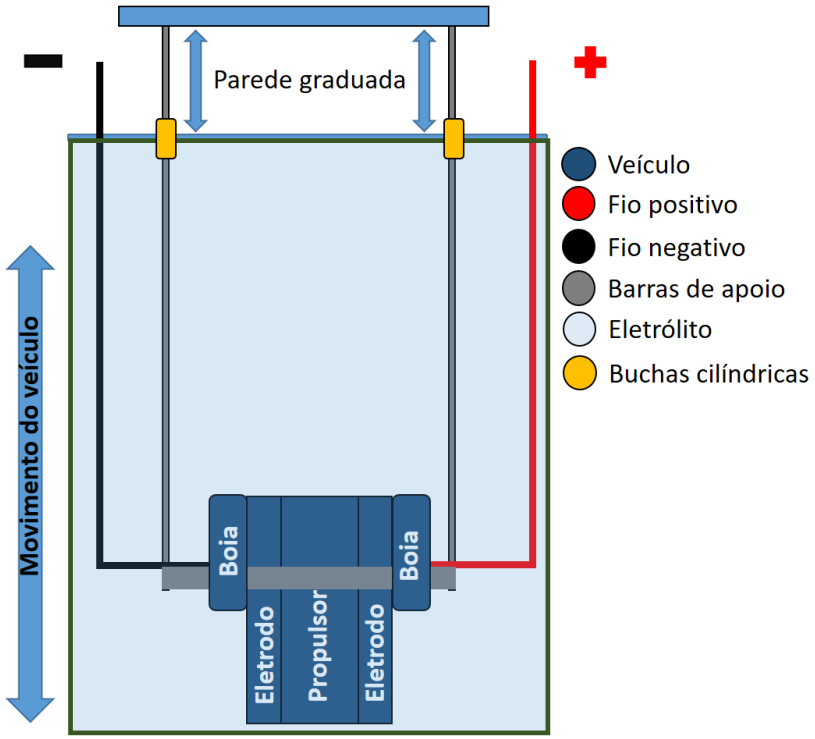
Fonte: do autor.

4.4. Quarta fase

Os testes mostraram que o sistema de guia único com anel deslizante não era viável. A dificuldade prática de garantir a simetria das forças do conjunto "propulsor/boias", adicionado à presença dos cabos de energia, mantinham o anel deslizante inclinado em relação ao eixo central, provocando um atrito não superável pela força imposta pelo propulsor.

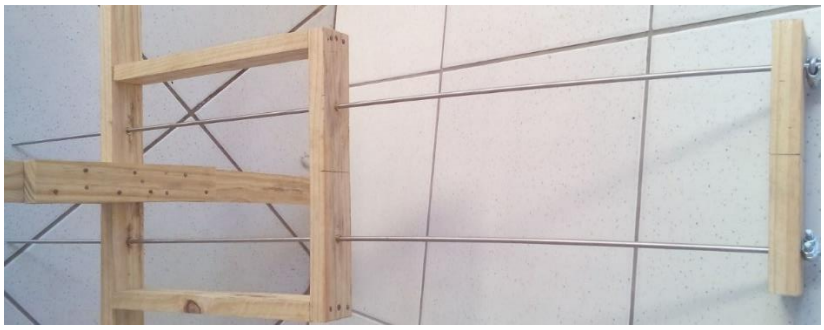
Um teste adicional foi feito com uma estrutura composta por duas guias. Nesse caso, esperava-se que a inclinação em relação às guias não ocorresse (ou fosse minimizada), impedindo o atrito anteriormente mencionado. O esquema de dupla guia e o modelo real encontram-se na Figura 4.45 e Figura 4.46.

Figura 4.45 - Esquema de montagem da guia dupla



Fonte: do autor.

Figura 4.46 – Modelo real de guia dupla



Fonte: do autor.

Os propulsores foram conectados a guias de alumínio e presos por parafusos, assim como as boias de apoio. O sistema segue para fora do aquário onde passa por uma tampa de madeira, que contem buchas que auxiliam no deslizamento. No topo (fora do aquário) as barras de alumínio são conectadas por outra tampa de madeira, onde uma escala graduada seria inserida para verificar o movimento do conjunto.

As observações de que o atrito não seria superado fizeram com que uma segunda estrutura com guia dupla fosse construída. Ao contrário da primeira estrutura, não haviam barras passando por buchas. A própria guia deslizante nesse caso tinha

rolamentos. Para tal usou-se trilhos telescópicos, utilizados em gavetas. A nova estrutura é vista na Figura 4.47.

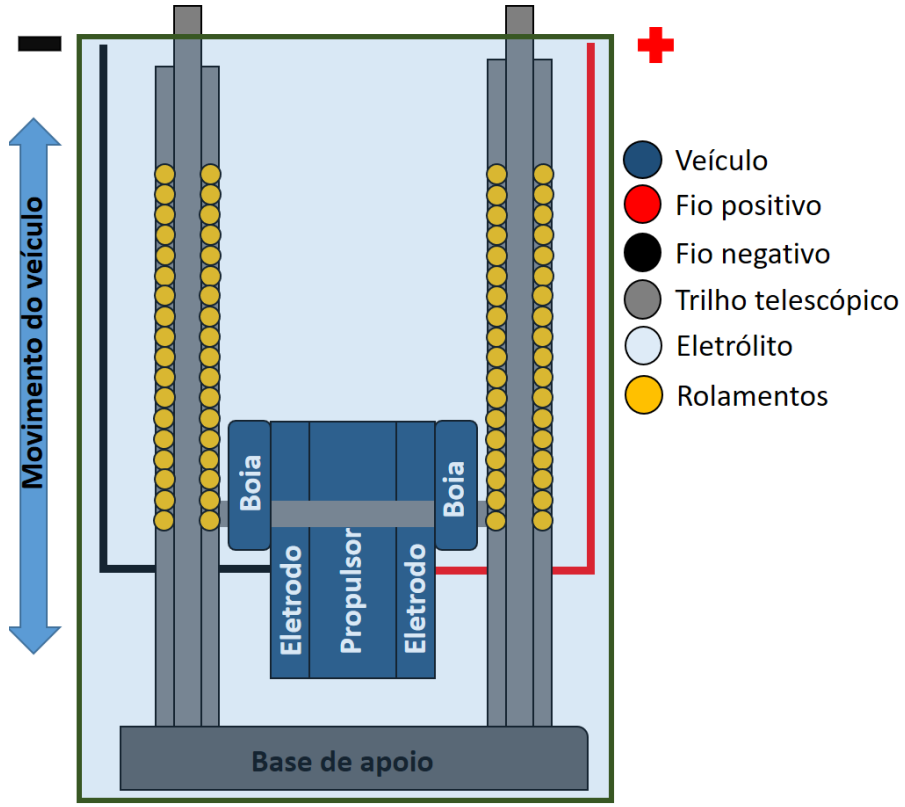
.

Figura 4.47 - Trilho telescópico usado de guia para o propulsor

Fonte: do autor.

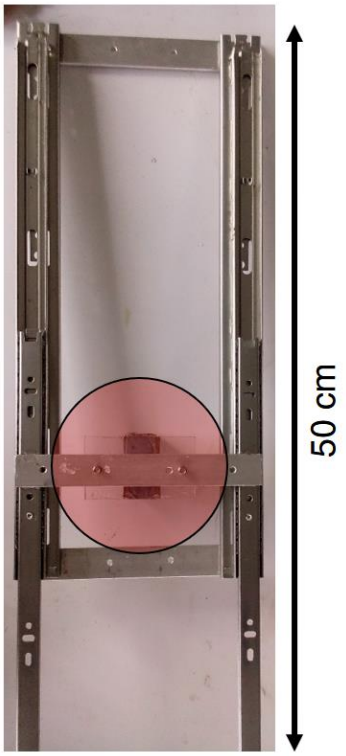
O propulsor e as boias foram então presas por parafusos no em uma chapa metálica que foi conectada entre os dois trilhos (guias). A Figura 4.48 mostra o esquema e a Figura 4.49 o modelo real.

Figura 4.48 – Esquema de montagem da guia dupla



Fonte: do autor.

Figura 4.49 - Base e guia utilizando trilhos telescópicos. O propulsor é mostrado no círculo vermelho preso a chapa



Fonte: do autor.

O primeiro teste para verificar a possibilidade de medir a força do propulsor utilizando o pêndulo anteriormente descrito seguiu os passos abaixo descritos.

- O propulsor foi acoplado a uma régua de 30 cm. No ponto 25 cm, fez-se um furo que permitiu ajustar nele um rolamento juntamente com uma guia para manter o conjunto balançando na forma de um pêndulo.
- Mediu-se o peso (massa) do conjunto inteiro e posteriormente ele foi mergulhado na solução salina com aproximadamente 6 S/m – 7 S/m de condutividade.
- Uma régua auxiliar foi posta horizontalmente ao lado do propulsor para medir o deslocamento.
- Ligou-se o propulsor e os dados do deslocamento foram anotados.
- Apesar de se observar um deslocamento muito pequeno, este foi anotado e com o seu valor e a massa anteriormente medida efetuou-se uma primeira avaliação aproximada da força propulsiva (ver apêndice E). A Figura 4.50 mostra o esquema do pêndulo:

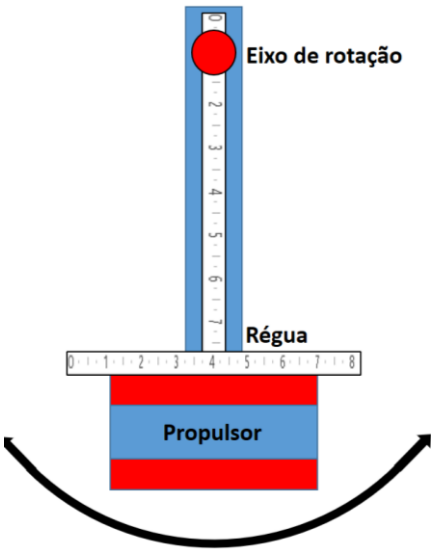
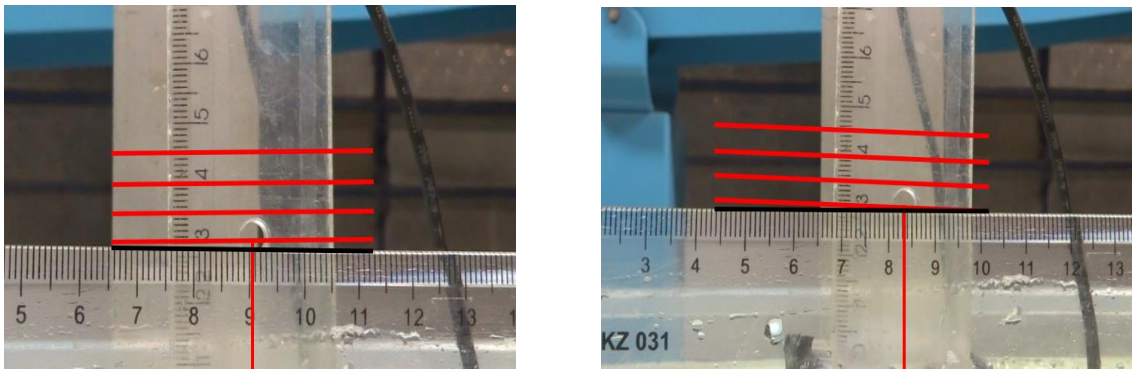


Figura 4.50 - Esquema do pêndulo

Apesar de haver graduações que facilitassem a leitura do pêndulo, utilizou-se o PowerPoint com linhas de grade definidas em 0,5 cm para poder analisar com mais precisão o movimento. A Figura 4.51 mostra um dos experimentos pendulares.

Figura 4.51 - Técnica utilizada para medição do movimento pendular em um dos experimentos



Fonte: do autor.

A linha escura representa a linha reta da régua auxiliar e as linhas vermelhas o movimento pendular. Note que os ângulos são muito pequenos (em torno de 1,8 graus), o que possibilita fazer a aproximação definida no apêndice E.

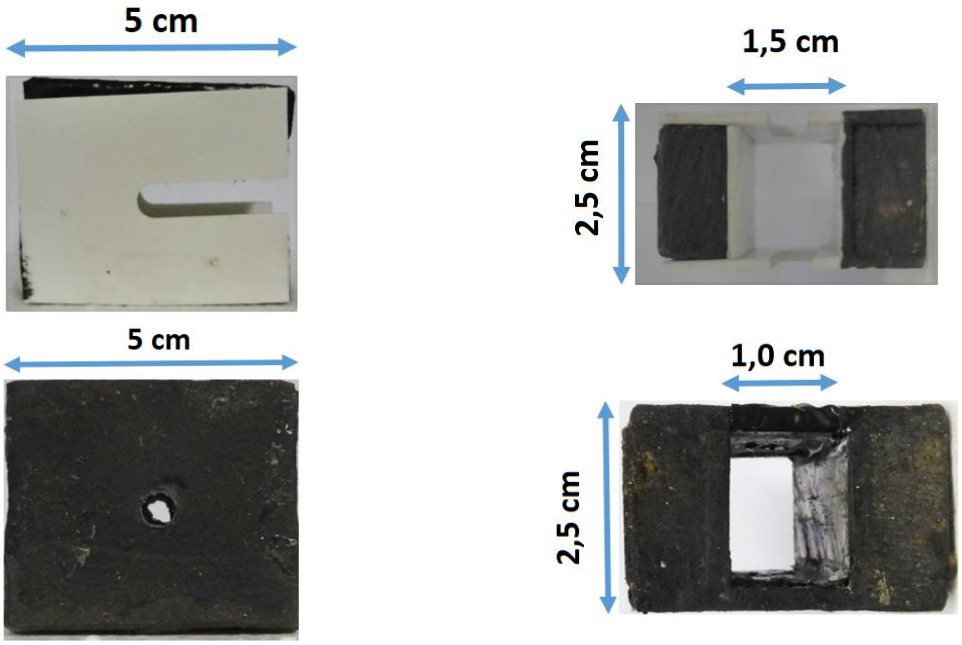
A obtenção da força do propulsor com o uso de pêndulo foi suspensa nesta fase devido a uma questão construtiva. O aquecimento produzido pela passagem de corrente no rolamento fez com que o isolamento plástico utilizado derretesse, produzindo a queda do braço do pêndulo. Embora outros isolamentos pudessem ser

utilizados, como fibra de vidro ou mesmo madeira, a necessidade de obtenção de dados objetivos de velocidade fez com que este procedimento (do uso do pêndulo) fosse deixado para passos futuros.

4.5. Quinta fase

As dificuldades observadas na fase 4, relativa à construção da guia para o deslocamento vertical e o uso do pêndulo fizeram com que se procurasse obter os dados de velocidade com o propulsor fixo. Uma vez que a força está vinculada à área transversal do propulsor e a velocidade do líquido que o atravessa, verificou-se a possibilidade de melhorara força propulsiva e a eficiência elétrica, diminuindo-se mais o espaço entre os imãs. Um tamanho menor para o propulsor proporcionaria uma força eletromagnética melhor, e, pelo fato de usar menos material, um peso também menor ao conjunto propulsivo. Vários propulsores foram fabricados e testados durante essa fase. A Figura 4.52 mostra alguns deles.

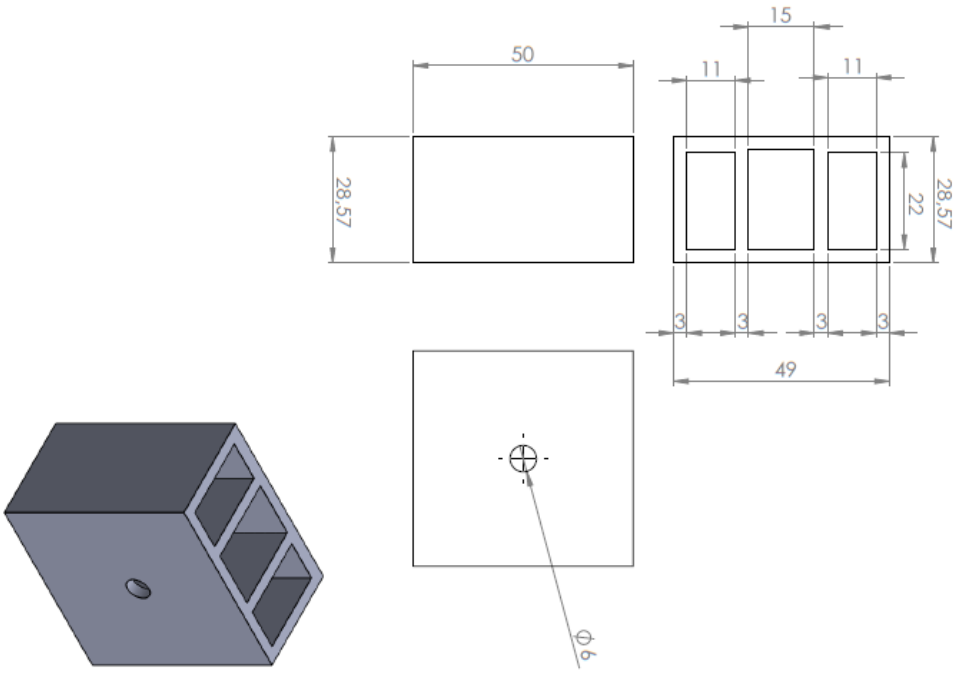
Figura 4.52 - Dois tipos de propulsores utilizados. Um com material PVC e outro acrílico. O primeiro modelo possuía as mesmas dimensões do modelo final utilizado, e o segundo 10 mm de altura



Fonte: do autor.

Foi aplicada uma camada de “tinta batida de pedra” nos propulsores. Isso garantia a impermeabilização e a proteção dos imãs no ambiente salino, assim como uma proteção térmica extra. A Figura 4.53 mostra o novo propulsor, denominado modelo A.

Figura 4.53 - Esquema do novo propulsor A



Fonte: do autor.

Comparando com o propulsor da terceira fase, a geometria permaneceu retangular, assim como o comprimento e sua largura. No entanto sua altura sofreu uma diminuição de 40 %, (15 mm). Outros 3 modelos foram construídos e utilizados, mas o modelo A mostrou-se mais atraente, pois possuía uma boa área e também era mais fácil inserir e retirar os eletrodos dele. Um propulsor muito pequeno inviabilizaria essa operação, ver Figura 4.52.

A partir desta fase dos trabalhos utilizou-se um manômetro diferencial digital da marca GULpress modelo 201 (Figura 4.54), com alcance de –1000 Pa a 3000 Pa acoplado ao tubo de Pitot na saída do propulsor. Este manômetro digital substituiu o manômetro inclinado anteriormente descrito. Sua precisão é de classe A2, ou seja, ele possui uma exatidão de ± 0,5 % do total da faixa de indicação.

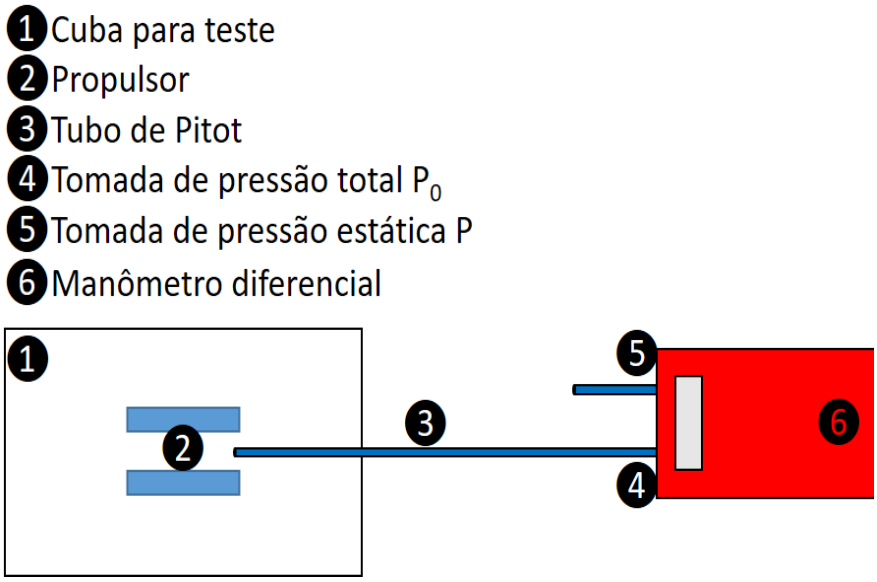
Figura 4.54 - Manômetro digital utilizado no experimento

Fonte: do autor.

Assim como os experimentos anteriores, o propulsor foi inserido na cuba de água contendo água salgada e o tubo de Pitot foi instalado próximo a sua saída. Devido à impossibilidade de instalar um tubo de pressão estática no propulsor, apenas o de pressão total foi utilizada. A entrada da pressão estática (presente no manômetro) foi ajustada para a pressão atmosférica, Figura 4.55

Apesar de não ser o procedimento mais indicado, as medidas ainda são adequadas como primeira avaliação. Note-se que o manômetro inclinado ainda pode ser utilizado, uma vez que não possui essa restrição. A ordem de grandeza das medidas efetuadas anteriormente, em comparação com as medidas com o manômetro digital, entretanto, mostra que os valores obtidos são aceitáveis.

Figura 4.55 - Esquema de montagem com manômetro digital



Fonte: do autor.

Assim como os experimentos anteriores, deixou-se a água atingir o valor de equilíbrio dentro do tubo (cada experimento tinha seu próprio valor) e depois se

iniciaram os experimentos com o ligamento da fonte. Dessa vez, ao contrário das fases anteriores, foi possível posicionar o manômetro ao lado da fonte e tomar medidas continuamente, filmando as alterações da pressão da tensão e da corrente durante todo o teste, como visto na Figura 4.56.

Figura 4.56 - Medidas do propulsor sendo tomadas

Fonte: do autor.

Depois de cada experimento desligava-se a fonte e esperava-se o líquido do tubo se estabilizar. Como não era possível uma estabilização em 0 Pa, dadas as condições de operação do equipamento e erros assumidos (isto é, o ajuste do zero admitindo uma pequena coluna de água sobre o tubo de Pitot), admitiu-se o valor de estabilização final como sendo o erro do procedimento seguido. Por exemplo:

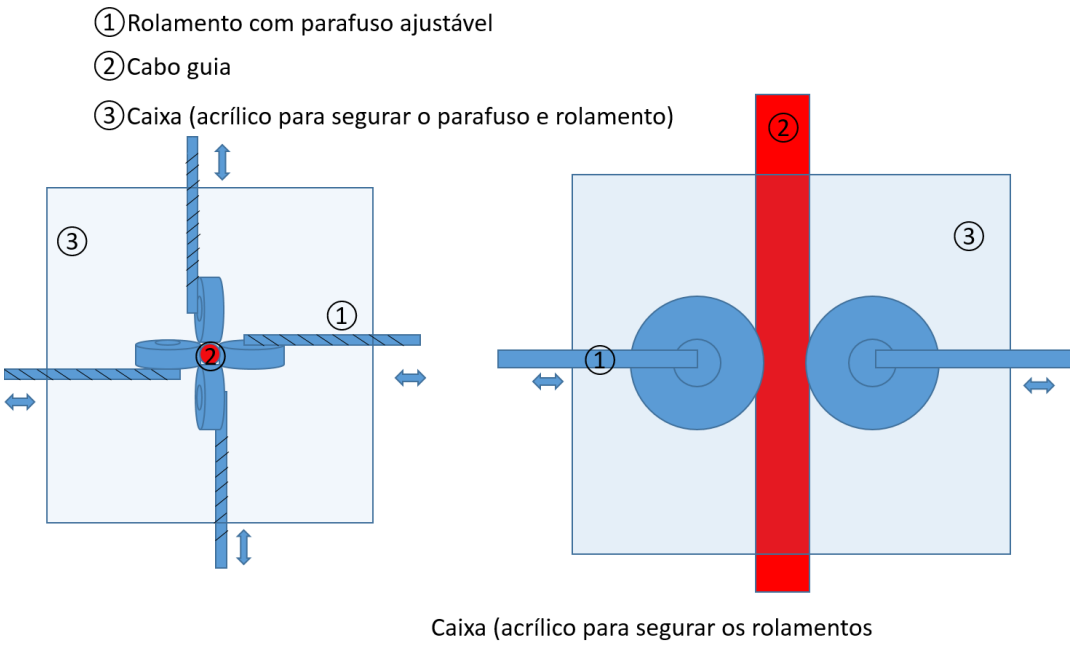
Antes do experimento ajustou-se a pressão de equilíbrio como sendo 0 Pa. Depois do experimento anotou-se o valor final de equilíbrio, que não estava mais em zero, mas em 14 Pa. Logo, o erro de medição desse experimento foi de ± 14 Pa, mesmo com o erro nominal do manômetro sendo de menos de ± 1 Pa. Isso foi feito para incluir de forma mais realista as interferências dos procedimentos adotados, como o ajuste do zero havendo uma altura de água, eventuais influências do formato do Pitot, e interferências externas como vibrações..

4.6. Sexta fase

Com os dados de velocidade obtidos do novo propulsor, o projeto de construção do veículo e da guia foram retomados. Como já mencionado, o empecilho para o movimento ascendente/descendente era o atrito gerado entre os anéis de apoio

e a guia, ou, no caso da guia dupla da figura 4.47, entre os rolamentos e a guia. Nesse caso o atrito foi aumentado pelo depósito de uma camada de precipitado nas esferas dos rolamentos e na superfície deslizante. Vários esboços foram feitos para minimizar o atrito, mantendo-se a conclusão de utilizar rolamentos. A Figura 4.57 mostra um exemplo de uma possível configuração utilizando rolamentos.

Figura 4.57 – Uma configuração para o uso de rolamentos. Visão de cima e lateral respectivamente



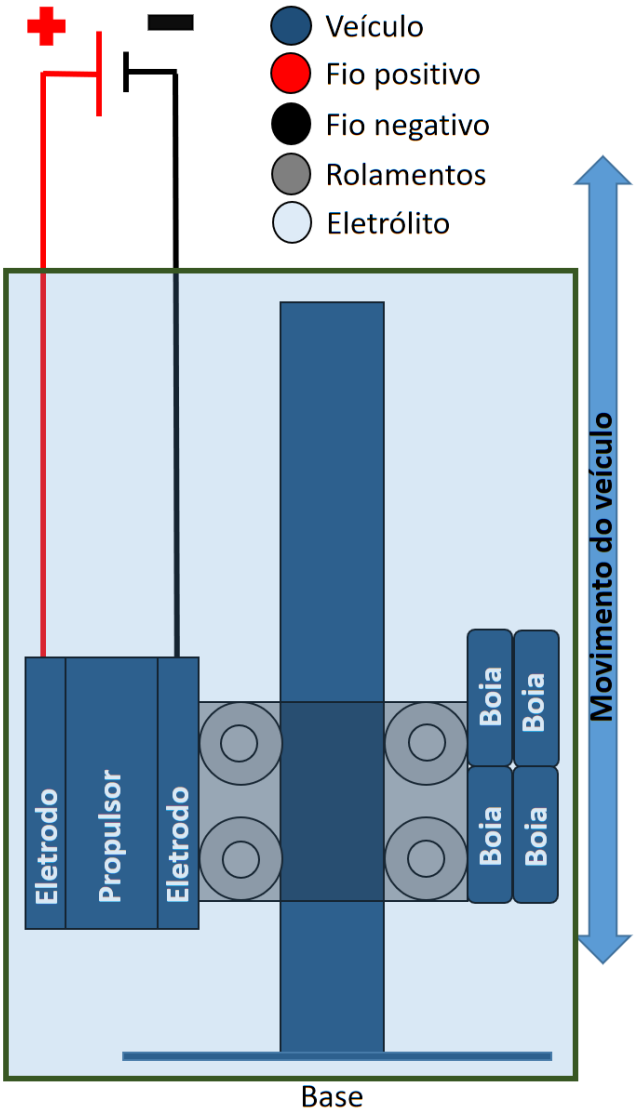
Fonte: do autor.

Considerando que o depósito de precipitados poderia sempre ter efeito negativo, mesmo tardio, nas esferas de rolamento, e considerando que se devia evitar a fuga do paralelismo entre o eixo da guia e o eixo do propulsor, a seguinte proposta foi feita no contexto da orientação deste estudo: criar uma estrutura de apoio que formasse uma via plana de quatro faces para um suporte do propulsor que tocasse cada face com quatro rodas. O distanciamento entre os eixos das rodas funciona como o controle da inclinação e o diâmetro da própria roda impede que haja o toque entre superfícies. Importante é evitar o contato de superfícies metálicas, como o rolamento tradicional (esfera metálica/superfície metálica). Utilizando peças de Lego® se poderia construir uma guia de quatro superfícies planas e um sistema que deslizasse por ela, e em sua lateral. Neste sistema deslizante seriam acoplados o propulsor e as boias de flutuação. Note-se que o fato de haver um sistema de quatro rodas em cada superfície faz com que possa haver assimetria de forças, além do fato de os eixos

metálicos estarem em contato com plástico, o que elimina o contato metal/metal. A escolha do Lego deu-se pelos seguintes fatos: 1) facilidade em se construir múltiplas configurações de guia, 2) baixa possibilidade de corrosão intensa com a água salgada no período dos experimentos, e 3) alto controle de qualidade na produção das peças, uma vez que todas elas possuem dimensões precisas, diminuindo os erros de construção e medida.

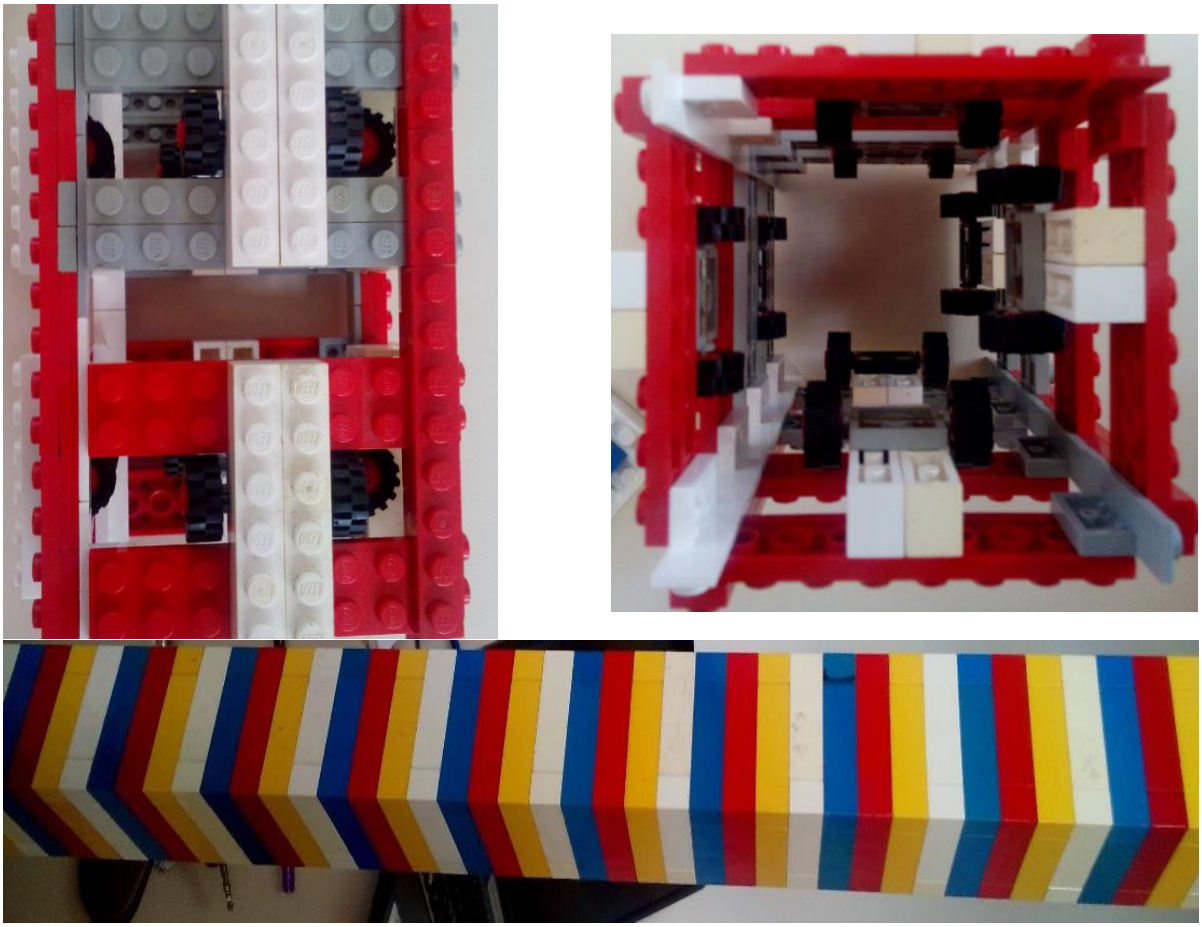
A Figura 4.58 e Figura 4.59 mostra o esquema e o modelo inicial respectivamente das guias de Lego.

Figura 4.58 - Esquema de montagem do propulsor e guia



Fonte: do autor.

Figura 4.59 - Conjunto de rolamentos para a guia e a guia desenvolvido por Schulz (contexto da orientação do presente estudo). No alto, à esquerda: a visão do sistema deslizante pelo lado de fora. No alto, à direita: a visão do sistema deslizante pelo lado de dentro. Vê-se os quatro conjuntos de quatro rodas, cada qual destinado a uma superfície plana da estrutura guia. Embaixo: A estrutura guia em torno da qual o sistema deslizante se desloca. Nota-se que são quatro superfícies planas cuja qualidade está associada ao controle de qualidade das peças Lego®

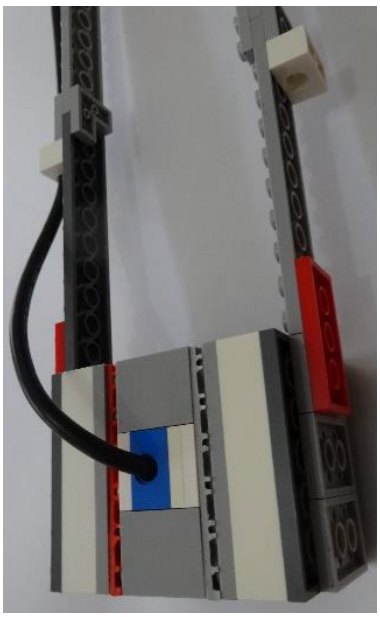


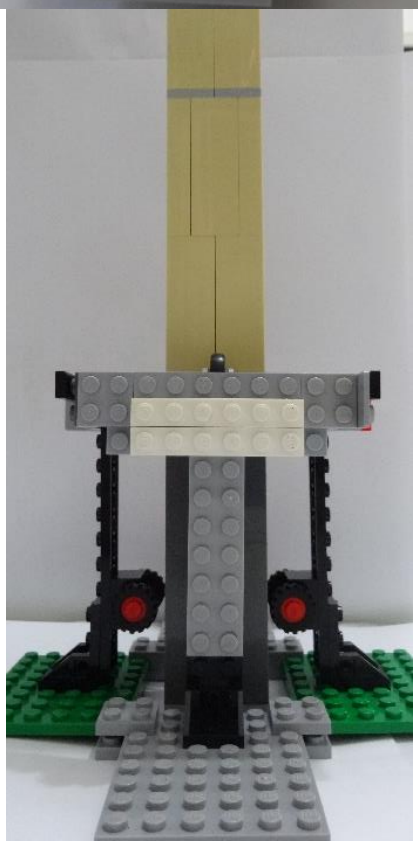
Fonte: do autor.

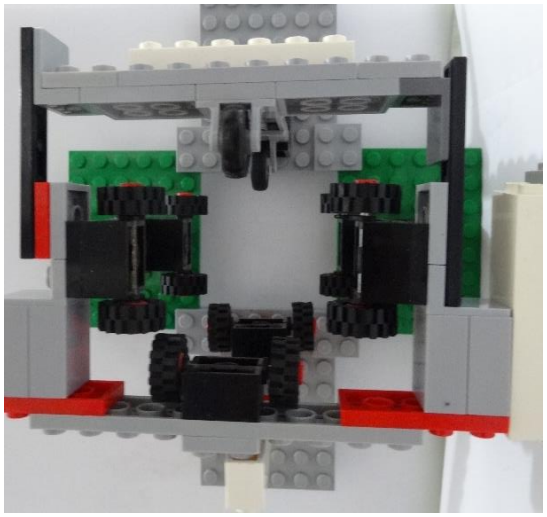
Ao analisar a Figura 4.59 é possível ver os “rolamentos”, no caso as rodas de borracha, que tornariam mais suave o movimento e o contato da guia e propulsor.

Argumentou-se então que esse sistema também deveria estar situado fora da cuba de testes, uma vez que a água salgada, com suas partículas de precipitados, poderia ainda interferir no movimento dos rolamentos (eixos das rodas). O “modelo inicial” serviu, portanto, como base para a construção de uma segunda guia que pudesse acoplar o sistema de guias fora da água e também outros equipamentos de medição como um dinamômetro. Nesse caso, a possibilidade de uso de um dinamômetro foi observada ao longo dos testes com as diferentes possibilidades de guias. Utilizando as vantagens de uso das peças de Lego e tendo por base a guia da figura 4.59, a nova guia foi construída, sendo apresentada na Figura 4.60.

Figura 4.60 – Propulsor, guia e rolamentos montados com peças de Lego. No alto a esquerda: propulsores. No alto a direita: propulsores ligados a haste. A baixo na esquerda: Vista lateral do sistema de rolamentos com a guia entre eles. A baixo na direita: vista de cima do conjunto de rolamentos







Fonte: do autor.

Note-se que, na presente configuração, os propulsores também foram montados de peças de Lego, uma vez que há a vantagem de desmontá-lo rapidamente para trocar os eletrodos ou a fiação, bem como testar rapidamente

configurações diferentes. A base do rolamento visou facilitar sua fixação acima da cuba contendo água.

A Figura 4.61 mostra o sistema de rolamento acima da cuba e fora dela enquanto o sistema de guia acoplado ao propulsor encontra-se dentro dos rolamentos e da cuba.

Figura 4.61 - Sistema de rolamento e guia em funcionamento

Fonte: do autor.

O sistema de rolamentos foi montado com uma folga, de forma que a guia se movesse com mais liberdade, mas mantendo uma margem de linha vertical. Caso

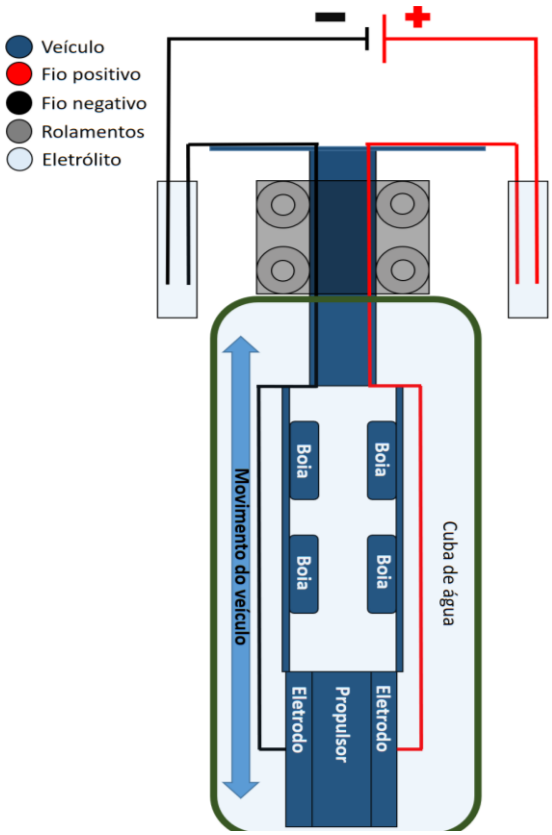
fizesse mais justo, os rolamentos impediriam o movimento do conjunto. Em seu topo pesos poderiam ser adicionados ou removidos de acordo com o interesse do experimentador.

O experimento inicial para este conjunto foi conduzido em uma cuba (caixa de isopor), com capacidade de 30 litros e com altura de 43 cm, e os seguintes procedimentos foram adotados:

- Colocou-se o conjunto guia/propulsor na água com o sistema de rolamentos (rodas de borracha e eixo de metal) acima da cuba.
- Os fios foram passados por dentro da guia, o que elimina a necessidade de cuidar para que não interfiram no movimento do veículo. Os fios permitiam contato externo apenas fora da guia (parte superior) e da cuba.
- As boias foram colocadas no propulsor. Diferenças de empuxo foram controladas com pesos colocados ou retirados no topo do sistema até o conjunto imerso móvel atingir a massa especifica aproximada da água (o que se convencionou como “densidade unitária”).
- Ligou-se o propulsor e verificou-se o movimento inicial do sistema móvel. Desligou-se e repetiu-se o procedimento liga/desliga várias vezes, alternando a polaridade para que ocorresse o movimento ascendente e descendente.

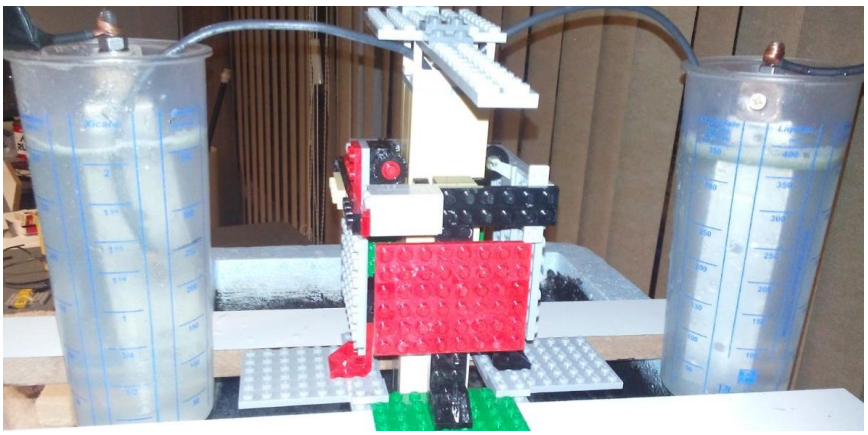
Durante os testes percebeu-se que a rigidez da fiação externa ao sistema móvel ainda agia como uma mola e interferia no movimento do veículo (isto é, a deformação lateral dos ainda ocorria, produzindo um efeito elástico, brevemente denominado de “efeito mola”). Várias ideias surgiram no contexto das discussões com o orientador desses estudos, visando contornar o problema, desde o uso de rolamentos metálicos externos presos aos fios que supriam energia, o uso de escovas de malha de aço (contatos metálicos flexíveis) deslizando sobre uma superfície condutora, até o uso de um “contato líquido”, no qual o fio móvel que supria a corrente ao propulsor não se fixava ao fio que trazia a corrente ao sistema. Nesse caso, cada polo necessitaria de uma cuba própria que servisse para o contato líquido. Esta proposta pareceu factível e considerou-se que se deveria testá-la. A Figura 4.62 e a Figura 4.63 mostra a proposta adotada.

Figura 4.62 - Modelo para testes final



Fonte: do autor.

Figura 4.63 - Modelo com cubas externas para cada polo. O líquido condutor foi água salgada



Fonte: do autor.

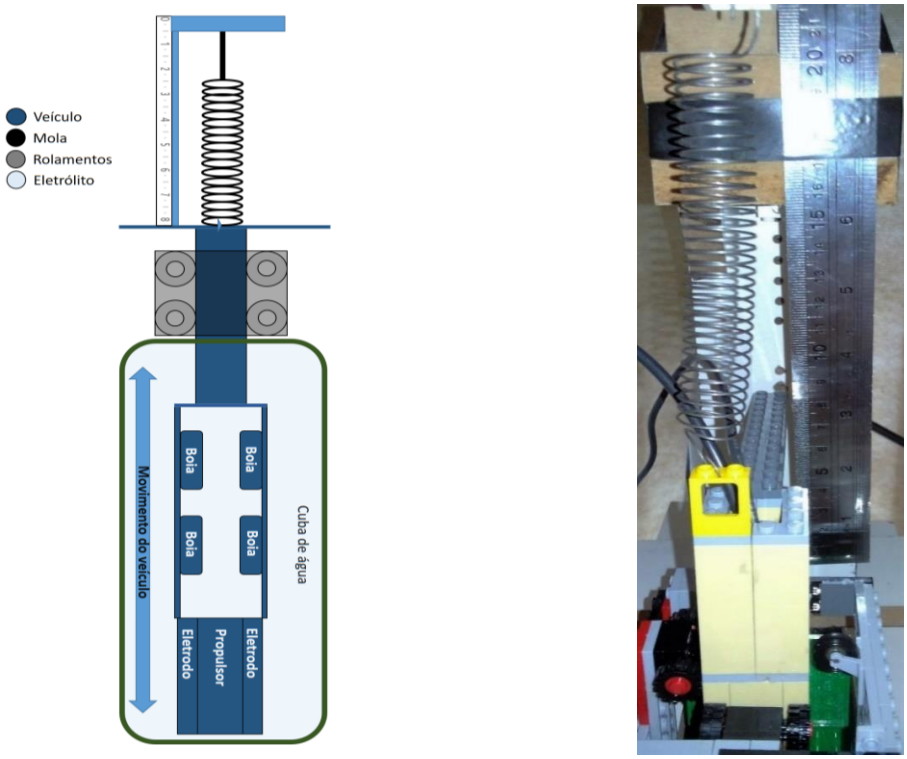
Com esse arranjo os fios dos eletrodos do propulsor não estariam ligados diretamente à fonte, evitando o efeito mola. A Figura 4.63 mostra os fios dos eletrodos imersos cada qual em uma cuba própria contendo água salgada, onde poderiam fazer seus movimentos verticais livremente (movimentos do sistema móvel em torno da guia, induzidos pelo propulsor). Enquanto isso os fios oriundos da fonte

permaneceram imersos nessa mesma cuba conduzindo corrente pela solução, que a supria aos fios dos eletrodos, suprimindo o efeito mola.

Posteriormente um dinamômetro foi adicionado ao conjunto experimental para calcular a força propulsiva experimentada. Para tanto utilizou-se uma mola com constante conhecida (constante da mola), que, acoplada ao sistema móvel, permitia acompanhar deslocamentos tanto no seu movimento ascendente como descendente. Uma régua graduada foi afixada paralelamente à mola para registrar os deslocamentos e permitir o cálculo da força correspondente. A partir do registro dos deslocamentos e do tempo gasto pretendia-se calcular a velocidade e a aceleração do veículo. O tempo era contabilizado nas filmagens.

Como mencionado, a princípio utilizou-se uma mola fixa que podia ser comprimida e distendida pelo sistema móvel. A Figura 4.64, mostra o esquema simplificado do conjunto + dinamômetro, à esquerda, e o conjunto real à direita.

Figura 4.64 - Esquema simplificado do conjunto e do dinamômetro e o conjunto real



Fonte: do autor.

O procedimento experimental seguiu-se como anteriormente, no entanto medindo-se agora também o deslocamento da mola na fase ascendente/descendente.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS

Como mencionado no capítulo anterior, uma série de experimentos foi realizada até que se chegasse ao modelo final de propulsor para este estudo. Apesar de alguns testes não ocorrerem como o esperado, achou-se necessário e importante discutir alguns dados obtidos nesses experimentos, para futuras discussões, trabalhos paralelos ou mesmo para que outros pesquisadores nessa área tenham material para comparação ou verificação de repetibilidade em seus experimentos.

É importante notar que os valores de tensão e corrente, foram arredondados em uma casa decimal, de acordo com o erro da fonte. Assim, se um dado aparece como “zero” no presente texto significa que ele foi arredondando apenas. O mesmo vale para a velocidade, que, apesar de ser uma medida indireta (decorrente da medida da pressão), teve os valores arredondados para três casas decimais depois da vírgula.

5.1. Primeira fase

Nessa etapa apenas um dos propulsores construídos foi utilizado. No entanto ele foi testado sob duas condições de operação, mudando-se os tipos de eletrodos e alterando a distância entre eles.

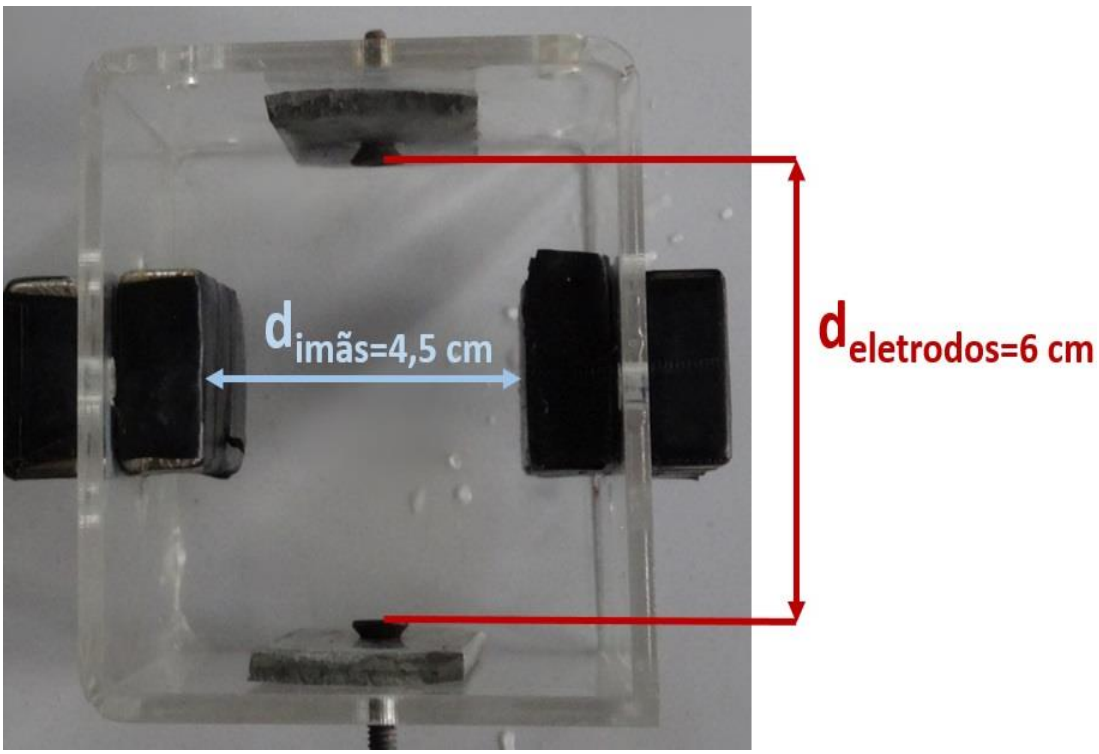
5.1.2. Configuração dos propulsores

1) Configuração 1 - Geometria retangular com imãs internos e eletrodos de alumínio retangulares a uma distância de 6 cm.

A geometria do propulsor encontra-se na Figura 5.1. Note que os imãs foram dispostos paralelamente entre si e perpendicular aos eletrodos, como adequado para

prover o máximo de eficiência à força eletromagnética. Os mesmos também se encontram na parte interna da cavidade.

Figura 5.1 - Configuração dos eletrodos a 6 cm de distância um do outro



Fonte: do autor.

A distância dos eletrodos foi de aproximadamente 6 cm e dos imãs 4 a 4,5 cm. Como mencionado, o objetivo estipulado até o momento foi estimar a força propulsora, consequentemente a força eletromagnética obtida nessa geometria. Para a primeira avaliação aproximada, partículas de orégano foram dispersas na superfície da água, esperando-se até que as mesmas fossem “sugadas” pelo propulsor. O tempo de trânsito das partículas dentro do propulsor permite uma avaliação de sua velocidade, uma vez que a geometria (comprimento do canal) é definida. Com a velocidade assim avaliada pode-se estimar a vazão do propulsor e sua força propulsora, o campo elétrico (uma vez que se sabe a tensão aplicada entre os eletrodos) e sua área de atuação, assim como estimar a força eletromagnética. Os erros associados a esse método de avaliação decorrem de efeitos superficiais como adesão de partículas a irregularidades e superfícies via efeitos de capilaridade, às disposições geométricas aproximadas. A Figura 5.1 mostra que não há um duto retangular fechado, cujas superfícies estejam cobertas em lados opostos pelos

eletrodos ou pelos ímãs. Há, de fato, segmentos de uma seção retangular coberta por parcelas de eletrodos e de ímãs, conferindo ao conjunto um aspecto de polígono aberto *no que tange aos elementos eletromagnéticos*. Adicionalmente, a presença de cabeças de parafusos protuberantes nos eletrodos acrescenta irregularidades que podem propiciar caminhos preferenciais para a corrente elétrica). A indução a erros devido às condições construtivas mencionadas e ao método de medição de velocidade adotado sem dúvida era conhecido. Mas deve-se lembrar que estes são os primeiros valores medidos, aqueles ainda aproximativos e norteadores das primeiras melhorias a serem implementadas.

A Tabela 5.1, Tabela 5.2, Tabela 5.3 e Tabela 5.4 mostram os dados obtidos no propulsor, para as primeiras análises.

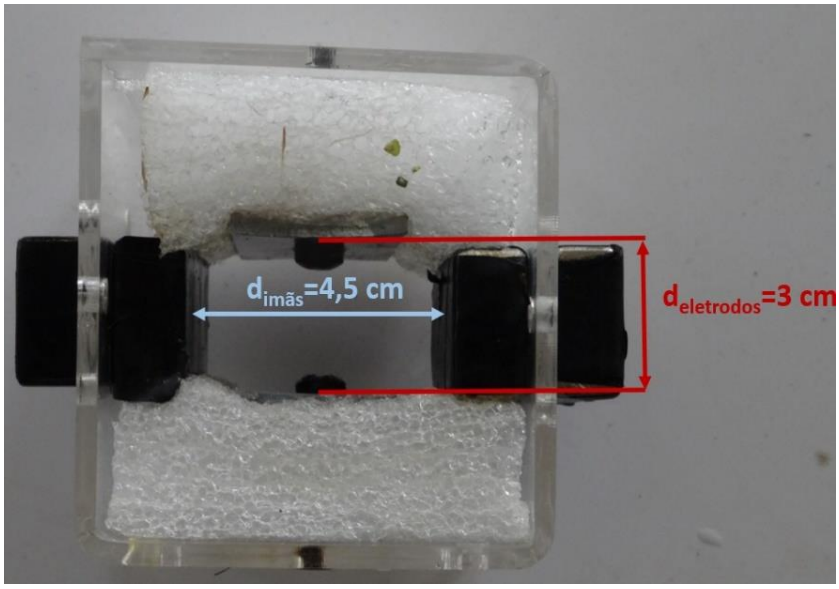
Tabela 5.1 - Dados para a configuração 1 do propulsor, destacando a velocidade

Tempo de percurso das partículas (s) erro±0,12	Comprimento do canal 10^{-2}(m) erro±0,15	Velocidade da partícula 10^{-2} (m/s)	Tempo decorrido do experimento (s)
0,47	6,50	13,830±0,591	14,386
0,52	6,50	12,573±0,596	17,322
1,03	6,50	6,298±0,649	19,701
0,87	6,50	7,446±0,633	23,315
0,21	6,50	30,516±0,564	23,732
0,70	6,50	9,259±0,615	24,579
0,61	6,50	10,673±0,605	27,174
0,83	6,50	7,822±0,628	28,239
0,76	6,50	8,564±0,621	29,154
0,60	6,50	10,833±0,604	29,812
0,53	6,50	12,381±0,596	29,92
0,82	6,50	7,908±0,627	31,103
0,77	6,50	8,486±0,621	48,493
1,12	6,50	5,819±0,658	52,19
1,33	6,50	4,887±0,680	53,775
Média	-	10,486	-

2) Configuração 2: Geometria retangular com imãs internos e eletrodos de alumínio retangulares a uma distância de 3 cm.

Erro! Fonte de referência não encontrada. mostra a segunda configuração do propulsor com distância entre os eletrodos de 3 cm.

Figura 5.2 - Configuração dos eletrodos a 3 cm de distância



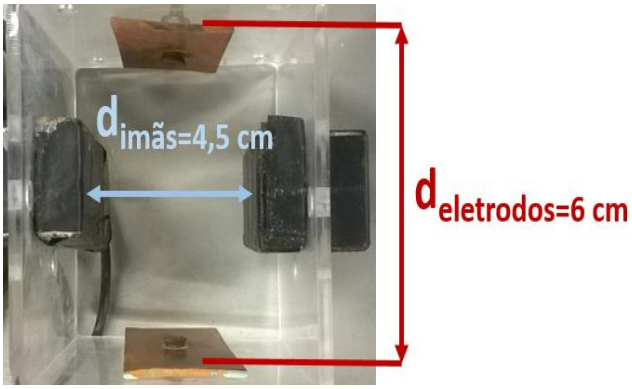
Fonte: do autor.

Tabela 5.2 - Dados para a configuração 2 do propulsor, destacando a velocidade

Tempo de percurso das partículas (s) erro±0,12	Comprimento do canal 10^{-2}(m) erro±0,15	Velocidade da partícula 10^{-2} (m/s)	Tempo decorrido do experimento (s)
0,92	6,50	7,065±0,637	4,97
0,92	6,50	7,065±0,637	13,13
0,72	6,50	9,028±0,617	21,03
0,88	6,50	7,386±0,633	24,43
0,52	6,50	12,500±0,596	26,7
0,72	6,50	9,028±0,617	32,4
0,64	6,50	10,156±0,608	34,1
0,93	6,50	6,989±0,639	36,33
0,6	6,50	10,833±0,604	40,27
0,76	6,50	8,553±0,621	44,4
0,76	6,50	8,553±0,621	46,23
0,8	6,50	8,125±0,625	49,97
1,44	6,50	4,514±0,692	57,23
Média	-	8,446	-

3. Configuração 3: Geometria retangular com imãs internos e eletrodos de cobre retangulares a uma distância de 6 cm.

Figura 5.3 - Configuração 3 com d=6cm



Fonte: do autor.

A coleta de dados, velocidades das partículas com o decorrer do experimento e forças eletromagnéticas e impulsivas foram estimadas baseadas nos eletrodos de alumínio, não havendo necessidade de mostrar os gráficos, pois os mesmos possuem o mesmo comportamento do alumínio, apenas com valores diferentes.

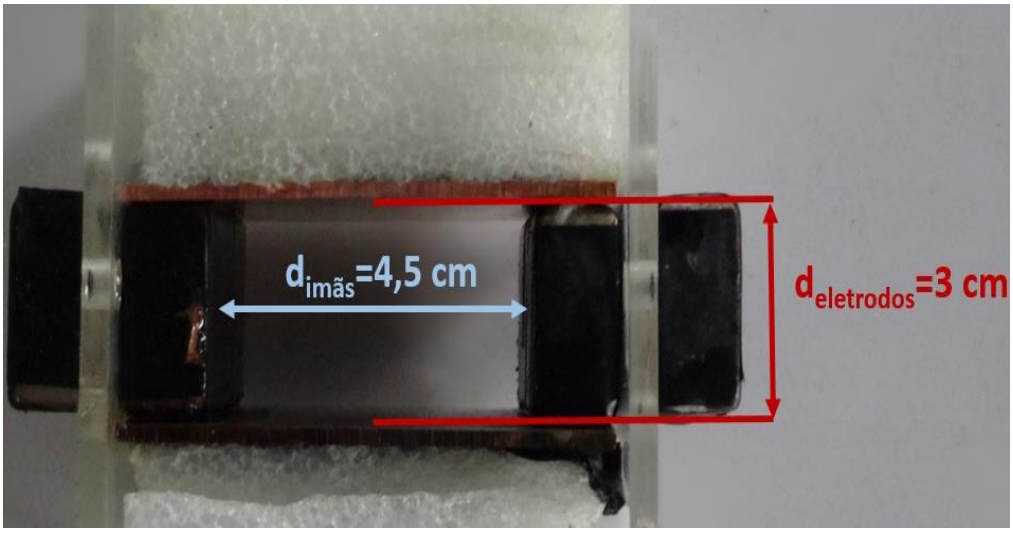
Tabela 5.3 - Dados para a configuração 3 do propulsor com ênfase nas velocidades

Tempo de percurso das partículas (s) erro±0,12	Comprimento do canal 10^{-2}(m) erro±0,15	Velocidade da partícula 10^{-2} (m/s)	Tempo decorrido do experimento (s)
1,18	6,50	5,518±0,664	4,97
1,00	6,50	6,500±0,646	13,13
0,92	6,50	7,065±0,637	21,03
1,44	6,50	4,514±0,692	24,43
1,89	6,50	3,448±0,738	26,7
2,16	6,50	3,009±0,767	32,4
2,20	6,50	2,955±0,771	34,1
2,16	6,50	3,009±0,767	36,33
2,28	6,50	2,851±0,779	40,27
1,48	6,50	4,392±0,696	44,4
1,76	6,50	3,693	46,23
1,93	6,50	3,368	49,97
1,76	6,50	3,693	57,23
Média	-	4,155	-

4. Configuração 4: Geometria retangular com imãs internos e eletrodos de cobre retangulares a uma distância de 3 cm.

Nessa configuração, Figura 5.4, os eletrodos são trocados por cobre e dispostos a 3 cm de distância um do outro.

Figura 5.4 - Eletrodos de cobre dispostos a 3 cm de distância



Fonte: do autor.

Os imãs se mantiveram como na configuração anterior. Uma camada de espuma foi adicionada para diminuir a área do propulsor. Os dados foram obtidos da mesma forma que a primeira configuração.

Tabela 5.4 - Dados para a configuração 4 do propulsor com ênfase nas velocidades

(Continua)

Tempo de percurso das partículas (s) erro±0,12	Comprimento do canal 10^{-2}(m) erro±0,15	Velocidade da partícula 10^{-2} (m/s)	Tempo decorrido do experimento (s)
0,87	6,5	7,471±0,632	4,97
1,30	6,5	5,000±0,677	13,13
0,98	6,5	6,633±0,644	21,03
0,97	6,5	6,701±0,643	24,43
1,41	6,5	4,610±0,689	26,7
1,03	6,5	6,311±0,649	32,4
1,10	6,5	5,909±0,656	34,1

Tabela 5.4 - Dados para a configuração 4 do propulsor com ênfase nas velocidades

(Conclusão)

Tempo de percurso das partículas (s)	Comprimento do canal 10^{-2}(m)	Velocidade da partícula	Tempo decorrido

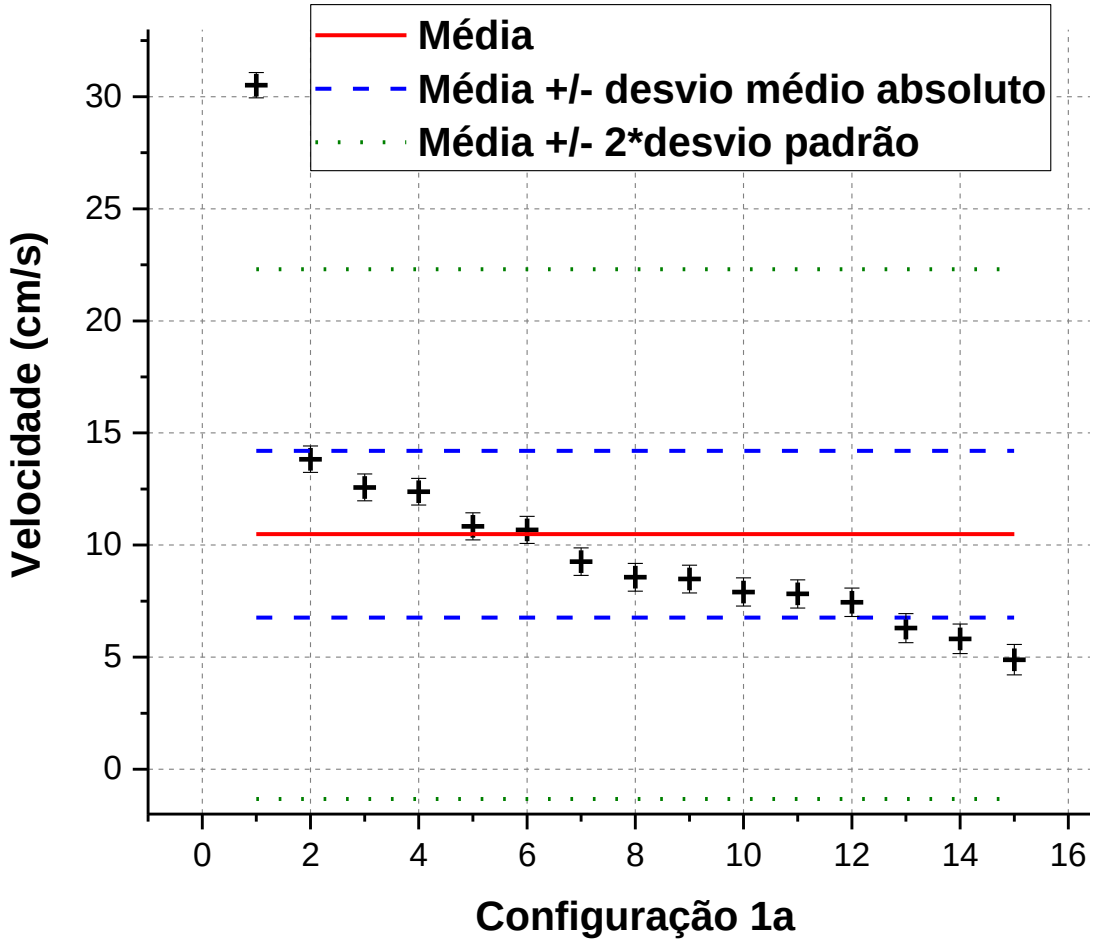
erro±0,12	erro±0,15	10^{-2} (m/s)	do experimento (s)
0,98	6,5	6,633±0,644	36,33
1,30	6,5	5,000±0,677	40,27
1,17	6,5	5,556±0,664	44,4
1,20	6,5	5,417±0,667	46,23
1,93	6,5	3,368±0,743	49,97
1,44	6,5	4,514±0,692	57,23
Média	-	5,625	-

De posse desses dados, uma análise estatística da velocidade, pode ser feita. Os erros de medida assim como dos equipamentos utilizados devem ser considerados. Para a análise das partículas de orégano que passaram pelo propulsor as fontes de erro podem ser o tempo que o experimentador levou para olhar a primeira partícula e depois pausar o vídeo para analisar sua posição, assim como o tamanho das partículas, que variam de uma para outra dentro do duto. Admitindo essas duas fontes de erro e usando a propagação de erros no cálculo da velocidade (ver apêndice A), tem-se:

$$V = \frac{(S \pm \Delta S)}{(t \pm \Delta t)} = \frac{S}{t} \pm \frac{1}{t^2} \times (S \times \Delta t + t \times \Delta S) \qquad (5.1)$$

ΔS e Δt são os erros relacionados ao comprimento e ao tempo respectivamente. O tempo de reação do experimentador (tempo de ver a partícula e pausar o vídeo) foi de aproximadamente 0,12 segundos e a média de diferença de tamanho entre uma partícula e outra, somado ao erro de medição (no caso o erro de escala da régua) é de aproximadamente ΔS = 0,001 m +0,0005 m = 0,0015 m. A velocidade acrescida de erro será atendida pela equação 5.1:

Figura 5.5 - Velocidades das partículas para a configuração 1

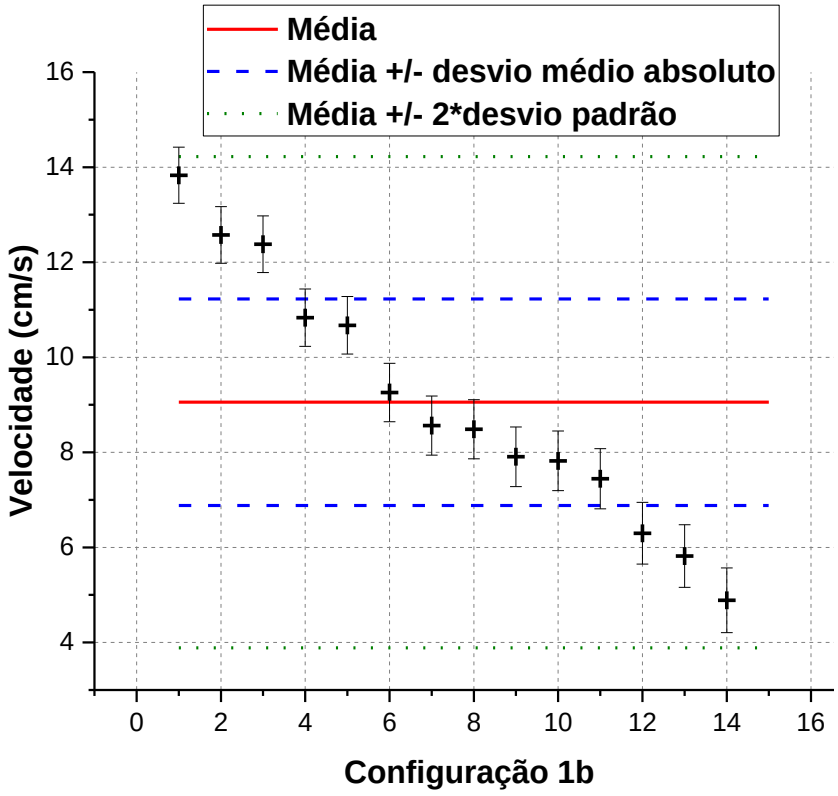


Fonte: do autor.

A Figura 5.5 mostra as velocidades obtidas para a configuração 1 ordenadas do maior valor para o menor valor. A linha vermelha horizontal representa a média para a velocidade: $V_{média}$=10,49 cm/s. As linhas azuis mostram a média acrescida e diminuída do desvio absoluto médio: $V_{absoluto}$=10,49+/-3,72. As linhas verdes mostram a média acrescida e diminuída de duas vezes o desvio padrão: $V_{padrão}$=10,49+/-11,82. Este uso do desvio padrão implica em considerar, em média, 95,4% da população em se admitindo uma distribuição normal para os valores calculados. Aqui está-se usando a definição “n” do desvio padrão, isto é, utilizando toda a população de estudo e não apenas uma amostra dela. O desvio padrão foi 5.91, bem distante do valor do desvio médio absoluto, 3,72.

Neste experimento verifica-se que a maior velocidade está distante do universo da população obtida, indicando provavelmente um erro experimental. Em se retirando este valor das análises, tem-se a Figura 5.6.

Figura 5.6 - Velocidades das partículas para a configuração 1b a menos do valor distante da população



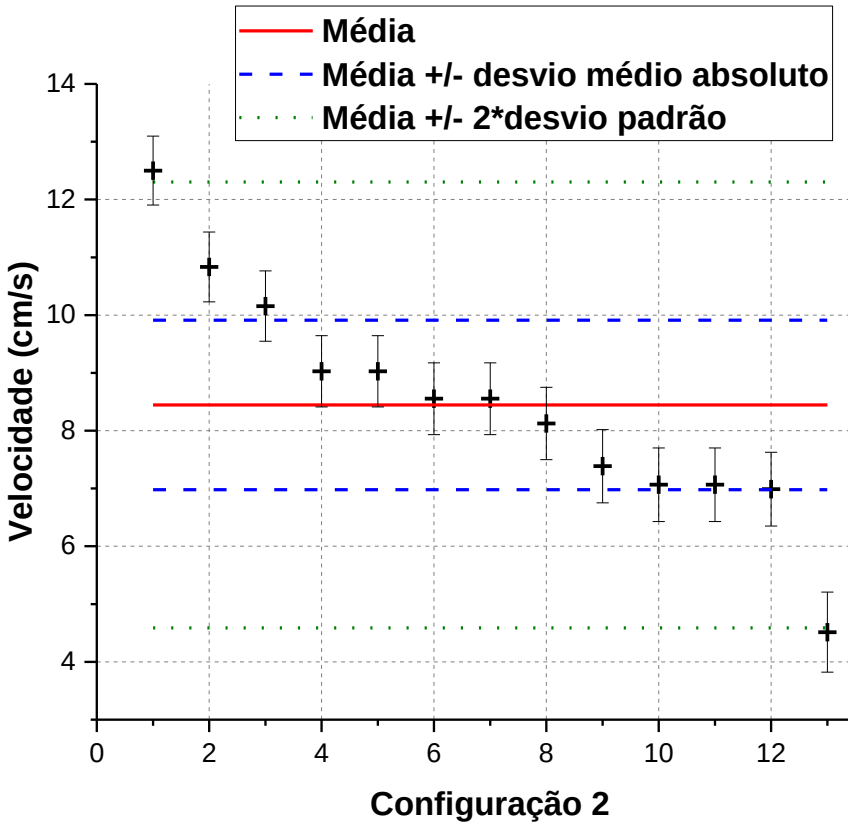
Fonte: do autor.

Para a Figura 5.6 a linha vermelha horizontal representa agora a média para a velocidade: $V_{média}$=9,06 cm/s. As linhas alaranjadas mostram a média acrescida e diminuída do desvio absoluto médio: $V_{absoluto}$=9,06+/-2,17. As linhas verdes mostram a média acrescida e diminuída de duas vezes o desvio padrão: $V_{padrão}$=9,06+/-5.17. O desvio padrão foi agora 2,58, próximo do valor do desvio médio absoluto, 2,17.
Entende-se que para esta configuração, a segunda análise representa melhor as velocidades experimentais, que variaram entre aproximadamente 5 cm/s e 14 cm/s.

A Figura 5.7 mostra as velocidades obtidas para a configuração 2 ordenadas do maior valor para o menor valor. A linha vermelha horizontal representa a média para a velocidade: $V_{média}$=8,45 cm/s. As linhas azuis mostram a média acrescida e diminuída do desvio absoluto médio: $V_{absoluto}$=8,45+/-1,47. As linhas verdes mostram a média acrescida e diminuída de duas vezes o desvio padrão: $V_{padrão}$=8,45+/-3,86. O desvio padrão foi 1,93, comparável ao valor do desvio médio absoluto, 1,47.

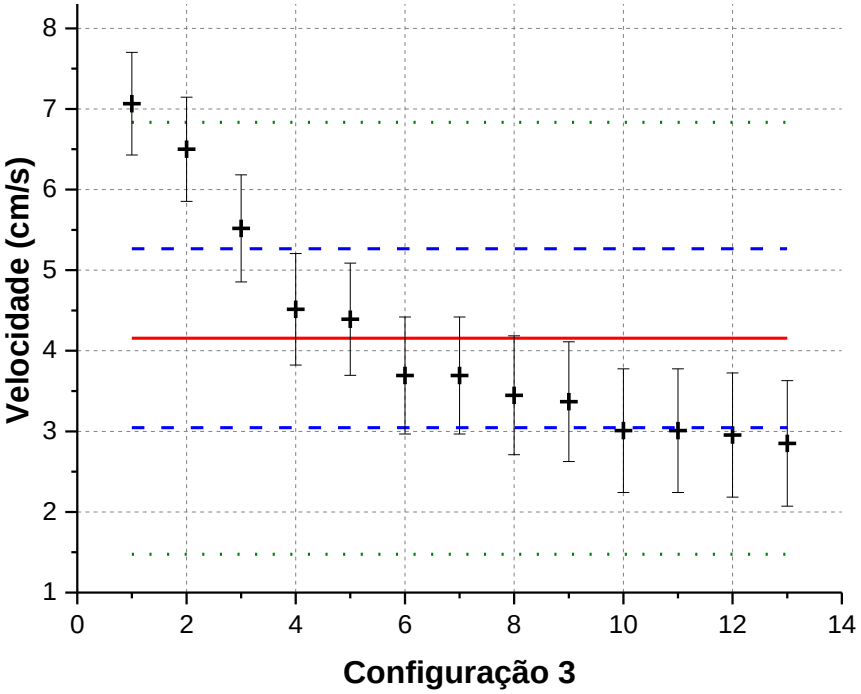
Neste experimento as velocidades mantiveram-se coesas no universo da população obtida. Assim, nenhum valor foi retirado da análise.

Figura 5.7 - Velocidades das partículas para a configuração 2



Fonte: do autor.

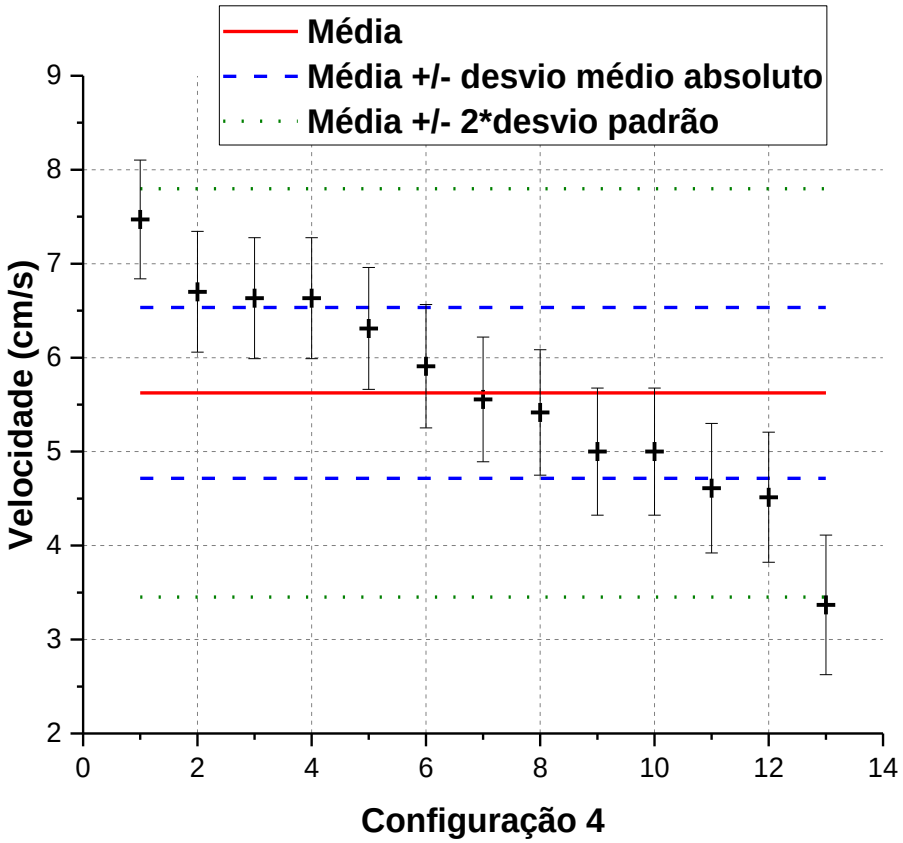
Figura 5.8 - Velocidades das partículas para a configuração 3



Fonte: do autor.

A Figura 5.8 mostra as velocidades obtidas para a configuração 3 ordenadas do maior valor para o menor valor. A linha vermelha horizontal representa a média para a velocidade: $V_{média}$=4,16 cm/s. As linhas azuis mostram a média acrescida e diminuída do desvio absoluto médio: $V_{absoluto}$=4,16,49+/-1,11. As linhas verdes mostram a média acrescida e diminuída de duas vezes o desvio padrão: $V_{padrão}$=4,16+/-2,67. Este uso do desvio padrão implica em considerar, em média, 95,4% da população em se admitindo uma distribuição normal para os valores calculados. Aqui está-se usando a definição “n” do desvio padrão, isto é, utilizando toda a população de estudo e não apenas uma amostra dela. O desvio padrão foi 1,34, bem próximo do valor do desvio médio absoluto, 1,11.

Figura 5.9 - Velocidades das partículas para a configuração 4



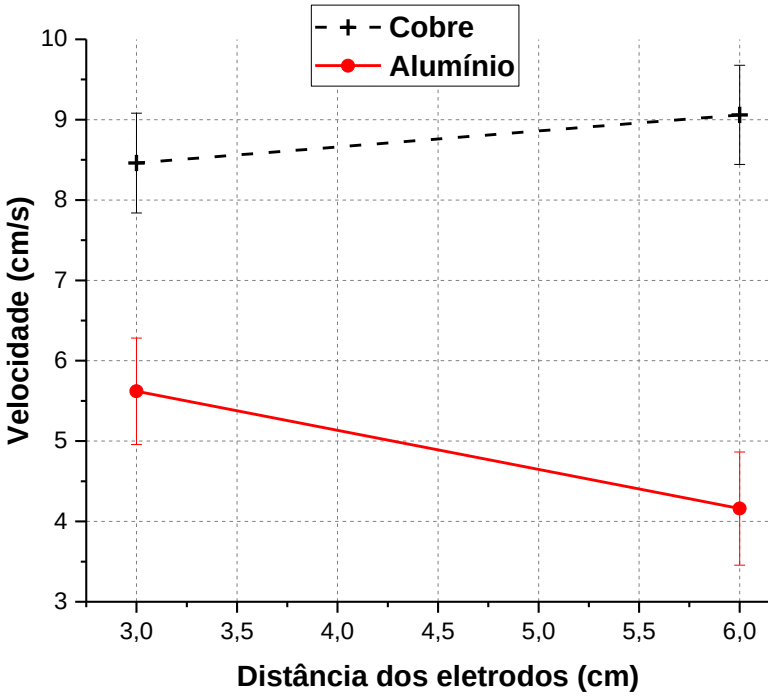
Fonte: do autor.

A Figura 5.9 mostra as velocidades obtidas para a configuração 4 ordenadas do maior valor para o menor valor. A linha vermelha horizontal representa a média para a velocidade: $V_{média}$=5,63 cm/s. As linhas azuis mostram a média acrescida e diminuída do desvio absoluto médio: $V_{absoluto}$=5,63,49+/-0,90. As linhas verdes

mostram a média acrescida e diminuída de duas vezes o desvio padrão: $V_{padrão}$=5,63+/-2,17. Este uso do desvio padrão implica em considerar, em média, 95,4% da população em se admitindo uma distribuição normal para os valores calculados. Aqui está-se usando a definição “n” do desvio padrão, isto é, utilizando toda a população de estudo e não apenas uma amostra dela. O desvio padrão foi 1,1, próximo do valor do desvio médio absoluto, 0,91.

A Figura 5.10 mostra os resultados para os experimentos com eletrodos de Cobre e Alumínio, discriminados de acordo com a distância, em centímetros, entre os eletrodos. As velocidades obtidas com os eletrodos de Cobre mostraram-se maiores do que aquelas com os eletrodos de Alumínio. O aumento da distância entre eletrodos produziu com os presentes dados, para o Cobre, um aumento da velocidade média observada, enquanto que para o Alumínio houve uma diminuição da velocidade média observada.

Figura 5.10 - Os pontos médios de todos os experimentos dispostos de acordo com a distância entre eletrodos e de acordo com o material usado



Fonte: do autor.

Considerando os erros de medida, observa-se que há sobreposição das regiões de erro para os pontos do gráfico referentes ao Cobre. Assim, o maior mérito desta análise repousa no valor médio das velocidades do Cobre em relação àquele

do Alumínio. A análise do efeito da distância entre eletrodos exige experimentos mais apropriados.

Utilizando os cálculos obtidos no capítulo 3, podemos obter gráficos da força propulsiva dada equação 3.53:

$$F_t = \rho V_0^2 A_0$$

Da eficiência propulsiva (global), dada pela equação (3.55), onde $P_e = \sigma \left(V^2 / W_e\right) L_e H_e$ e L_e, H_e e W_e, representam respectivamente o comprimento do eletrodo, a altura do eletrodo e a distância entre eles no propulsor.

$$\eta = \frac{F_t V_0}{P_e}$$

Da eficiência elétrica, dada pela equação (3.59):

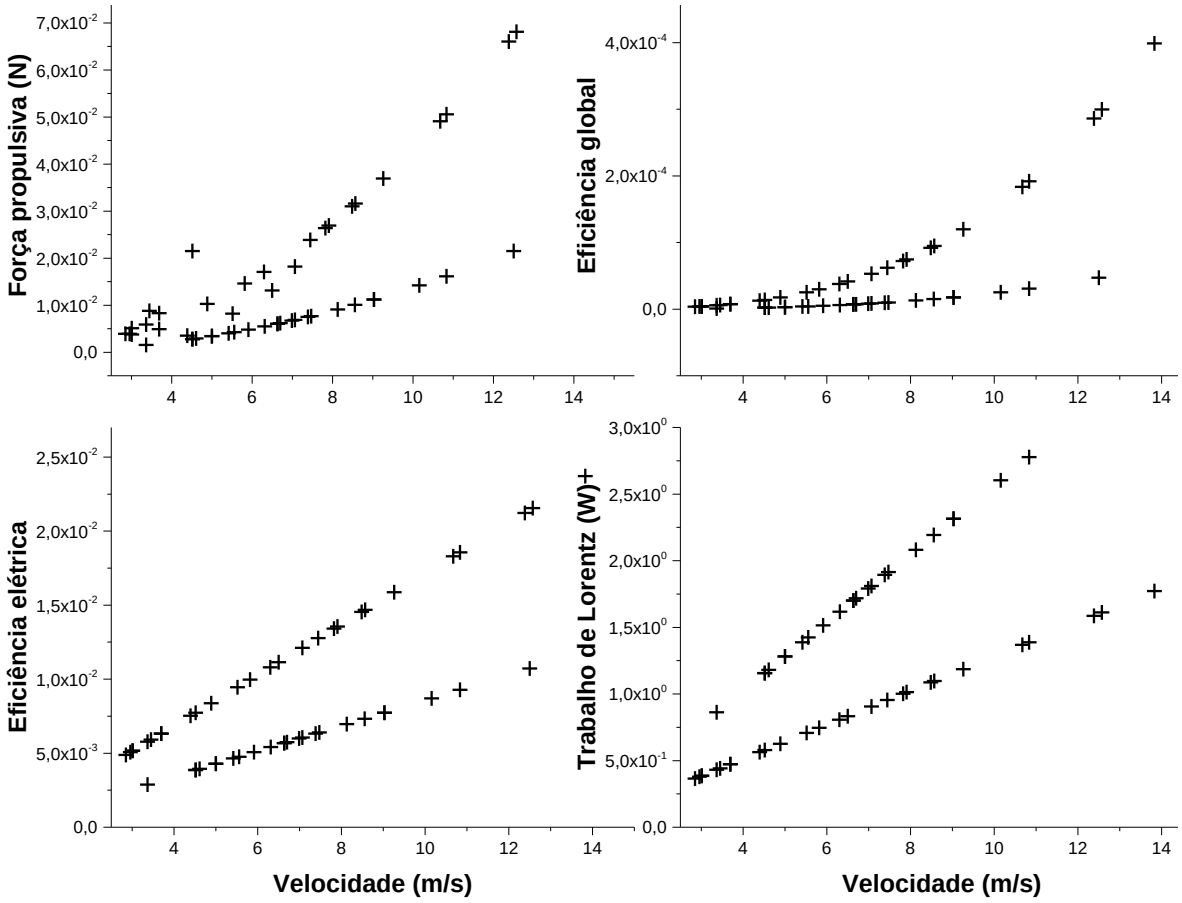
$$\eta_e = \frac{P_{te}}{P} = \frac{VJB}{VJB + J^2/\sigma} = \frac{1}{1 + J/V_0 B\sigma}$$

E do trabalho de Lorentz, equação 3.60:

$$P_L = JBW_p H_p L_p V_0$$

Onde ρ representa a densidade do fluido (1020 kg/m^3), V_0 a velocidade das partículas, A_0 a área do propulsor, J a densidade de corrente dada por $J = \sigma \left(V / W_p\right)$ B a densidade de campo magnética (no caso 0,4 T), V a tensão aplicada nos eletrodos (14 V) , σ a condutividade do fluido (aproximadamente 7 S/m).

Figura 5.11 - Parâmetros propulsivos em função da velocidade



Fonte: do autor.

Em cada gráfico os pontos se dividem em duas ramificações. Os que formam uma linha com inclinação maior estão associados a eletrodos mais distantes entre si, portanto uma área de seção transversal maior. Os que formam uma linha com inclinação menor estão associados a eletrodos mais próximos, portanto uma área de seção transversal menor. Esses resultados sugerem que uma área maior melhoraria todos os parâmetros propulsivos. Interessantemente os campos magnéticos decaem com o aumento da distância.

Note que a força propulsiva e a eficiência global crescem como polinômios de segundo grau, o que decorre da teoria do capitulo 3, expresso nas equações $F_t = \rho V_0^2 A_0$ e $\eta = F_t V \big/ J L_p W_p$. A eficiência global mostrou-se muito baixa, o que era de se esperar em experimentos MHD. No entanto notou-se que ela cresce polinomialmente com o aumento da velocidade, assim como a força propulsiva. Logo para obter um desempenho melhor seria necessário aumentar a velocidade, nesse caso, diminuindo a área do propulsor.

As conclusões mais gerais sobre esta primeira fase é que o método de observação de partículas flutuantes utilizando uma câmera e olho nu foi adequado para comparar macroscopicamente os eletrodos de diferentes materiais, mas não se mostrou eficiente se se almeja observar detalhes. Os erros associados às medidas, quantificados por propagação de erros, em alguns casos se aproximam dos valores médios analisados. Nesses casos o erro da medida assim avaliado possuiu cerca de 80% da grandeza dos valores médios calculados.

Como esse método visava obter primeiras estimativas e testar a funcionalidade do propulsor, seu uso tem saldo positivo para esta fase dos estudos. Com a fonte de 14 V de saída foi possível obter velocidades satisfatórias para o experimento, o que culminou no avanço para a próxima fase, que envolveu a compra de uma nova fonte, a construção de novos propulsores e a elaboração de novos métodos de obtenção de dados.

Ao calcularmos a força de Lorentz, utilizando a equação (3.30) pode-se achar o valor da força eletromagnética produzida que é em torno de 0,05 N. Utilizando a equação (4.3) e fazendo-se a razão com a maior força obtida nos experimentos no caso força propulsiva de (0,08 N) obtém-se um rendimento de 62,5%. Obviamente esse resultado é tocante a força, mas não considera outros parâmetros como o a eficiência do duto ou eficiência elétrica ou potência elétrica, no entanto é um bom parâmetro para se der ideia se a força de Lorentz produzida é suficiente para gerar movimento, nesse caso converter em força propulsiva.

5.2. Segunda fase

Para esta análise, uma cuba contendo 4 litros de água e 500 gramas de sal (NaCl) foi utilizada. A condutividade variou de 6 S/m a 7 S/m. Tensões abaixo de 30 V foram testadas na primeira fase dos experimentos, de modo que agora, com a nova fonte, passou-se a testar tensões acima desse valor e de forma discriminada, ou seja, escolheu-se um valor de tensão e esse permaneceu fixo durante 2 minutos. Os objetivos imediatos eram de analisar as variações da coluna de água (pressão) para uma dada tensão e o tempo que cada eletrodo resistiria antes de colapsar. As tabelas 7 a 9 mostram os primeiros testes para 37 e 40 V. A velocidade do propulsor é

calculada usando a equação de Bernoulli para a pressão no ponto de estagnação do tubo de Pitot, e a equação fundamental da hidrostática para relacionar esta pressão com a altura da coluna de água (apêndice D). Tem-se, para a velocidade:

$$V = \sqrt{2gS_1} \tag{5.2}$$

Onde S_1 é a altura da coluna de água medida no manômetro de coluna de água. Como a velocidade é uma medida indireta, obtida a partir da leitura da coluna de água, pode-se considerar a propagação do erro na leitura feita na coluna, através da relação:

$$f = f(v) \Rightarrow \Delta V = \left|\frac{df}{ds_1}\right| \Delta s_1 \tag{5.3}$$

Onde Δs_1 é o erro associado a medida de S_1. Logo:

$$\Delta V = \frac{g\Delta S_1}{\sqrt{2gS_1}} \tag{5.4}$$

As tabelas (Tabela 5.5,Tabela 5.6, Tabela 5.7 , Tabela 5.8, Tabela 5.9, Tabela 5.10, Tabela 5.11, Tabela 5.12 e Tabela 5.13) apresentam as variações da coluna de água para um ângulo de inclinação do manômetro de aproximadamente 2,998 graus ou 75 mm da altura. Os eletrodos utilizados foram de cobre e suas dimensões foram de 34 mm de comprimento por 25 mm de altura.

Tabela 5.5 – Experimento 1: 40 VOLTS. Condutividade = 6 S/m. Ti = 24˚C Tf=27˚C

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
37,6	10,6	0,0	0,000±0,000
37,6	10,4	1,0	0,032±0,035
37,6	10,3	2,0	0,045±0,025
37,6	10,7	5,0	0,0726±0,016
37,6	10,6	4,0	0,064±0,018

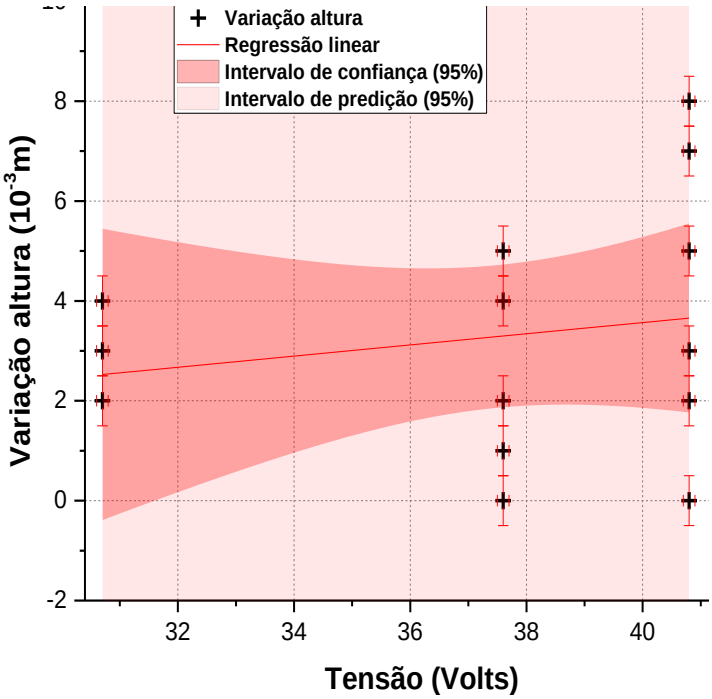
Tabela 5.6 – Experimento 2: 40 VOLTS. Condutividade 6 S/m. Ti = 25˚C Tf=33,7˚C

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
40,8	15,8	0,0	0,000±0,000
40,8	15,3	5,0	0,072±0,016
40,8	15,2	7,0	0,085±0,013
40,8	15,1	8,0	0,091±0,012
40,8	15,0	2,0	0,045±0,025
40,8	14,9	3,0	0,056±0,020

Tabela 5.7 – Experimento 3: 30 VOLTS. Condutividade 6S/m Ti= 24,3˚C Tf=25,6˚C

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
30,7	11,3	4,0	0,064±0,018
30,7	11,1	2,0	0,045±0,025
30,7	11,0	3,0	0,056±0,020

Figura 5.12 - Variação da coluna de água em função da tensão das tabelas 7, 8 e 9

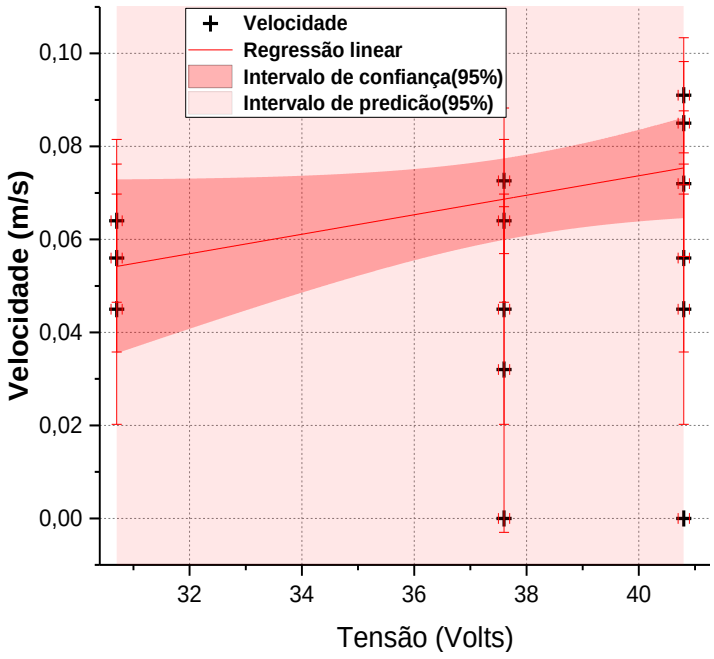


Fonte: do autor.

As medidas mostradas na Tabela 5.5,Tabela 5.6 e Tabela 5.7, foram anotadas ao longo do tempo. Os valores nulos representam valores iniciais e não podem ser tomados como representativos da tensão aplicada. Também se observa uma

tendência ao crescimento e posterior decrescimento, algo que pode estar relacionado à oxidação do eletrodo. Os valores de altura da coluna de água mostraram-se muito abaixo do esperado para a tensão aplicada. Tomando a medida indireta da velocidade com seu respectivo erro podemos notar a baixa velocidade do fluido, na Figura 5.13.

Figura 5.13 - Variação da velocidade em função da tensão das tabelas 7, 8 e 9



Fonte: do autor.

Observa-se que os erros obtidos da análise de propagação possuem a mesma ordem de grandeza da velocidade calculada, sugerindo haver algum erro na medição ou algum problema com o equipamento (disposições construtivas, fuga de corrente, irregularidades na montagem do eletrodo, por exemplo). Dados anteriores mostraram que mesmo com tensões abaixo de 14 V, a velocidade era maior do que aquelas apresentadas na Figura 5.13. Análises mais detalhadas foram feitas e, além das disposições construtivas mencionadas, também se considerou um problema no próprio tubo de Pitot. Partículas resultantes da eletrólise, bem como o cloreto de sódio, podiam entupir o tubo, também impedindo que uma leitura correta pudesse ser estabelecida. Mesmo com as dificuldades mencionadas, uma vez que provavelmente ocorreram em todos os experimentos iniciais desta fase, foi possível notar que a velocidade tende a aumentar ao aumentar a tensão (algo esperado).

Cuidando da possibilidade de entupimento, novas medições foram feitas. As seguintes tabelas: Tabela 5.8,Tabela 5.9, Tabela 5.10,Tabela 5.11, Tabela 5.12 e

Tabela 5.13, mostram a variação da coluna de água para experimentos realizados com a tensão indicada durante um tempo de 2 minutos. Nesses experimentos procurou-se avaliar a confiabilidade do sistema manômetro/tubo de Pitot, obter uma média das alturas medidas, assim como observar a variação da tensão e da corrente elétrica com o passar do tempo, bem como o aumento da temperatura da água. Os eletrodos foram novamente confeccionados de cobre, com as mesmas dimensões já mencionadas.

Tabela 5.8 – Experimento 4: 30 VOLTS. Condutividade 6,5 - 6,9 S/m. Ti = 24,3˚C Tf=35,2˚C

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
29,9	13,2	58,0	0,244±0,005
29,9	13,1	60,0	0,248±0,005
29,9	13,3	62,0	0,252±0,004
29,9	13,0	64,0	0,256±0,004
29,9	12,9	57,0	0,242±0,005

Tabela 5.9 – Experimento 5: 45 VOLTS. Condutividade 6,3 S/m. Ti = 24,1˚C Tf=45˚C

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
45,2	30,1	50	0,227±0,005
45,1	30,1	51	0,229±0,005
45,2	30	60	0,248±0,005

Tabela 5.10 – Experimento 6: 50 VOLTS. Condutividade 6,1 S/m. Ti = 23,9˚C Tf=32,9˚C

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
50,2	25,3	105	0,328±0,003
50,2	24,1	125	0,358±0,003
50,2	22,9	132	0,368±0,003
50,2	22,4	138	0,377±0,003
50,2	23,7	162	0,408±0,003
50,2	22,5	138	0,377±0,003
50,2	23,3	173	0,422±0,003
50,2	24	115	0,344±0,003
50,2	23,3	181	0,431±0,003

Tabela 5.11 – Experimento 7: 50 VOLTS. Condutividade 6,5 S/m. Ti = 24,9˚C Tf=34˚C

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
50,0	25,2	73,0	0,274±0,004
50,0	24,2	65,0	0,258±0,004
50,0	23,2	62,0	0,252±0,004
50,0	28,0	70,0	0,268±0,004
50,0	27,3	80,0	0,287±0,004
50,0	25,1	81,0	0,289±0,004
50,0	24,2	76,0	0,279±0,004

Tabela 5.12 – Experimento 8 60 VOLTS. Condutividade 6,7 S/m. Ti = 24,9˚C Tf=35,5˚C

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
59,8	24,2	110	0,336±0,003
59,8	24,3	130	0,365±0,003
59,8	24,5	122	0,354±0,003
59,8	24,4	106	0,330±0,003

Tabela 5.13 – Experimento 9: 60 VOLTS. Condutividade 6,7 S/m. Ti = 24˚C Tf=47,2˚C

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
57,1	31	115,0	0,344±0,003
56,8	31	87,0	0,299±0,004
56,6	31	84,0	0,294±0,004
55,9	31	81,0	0,289±0,004

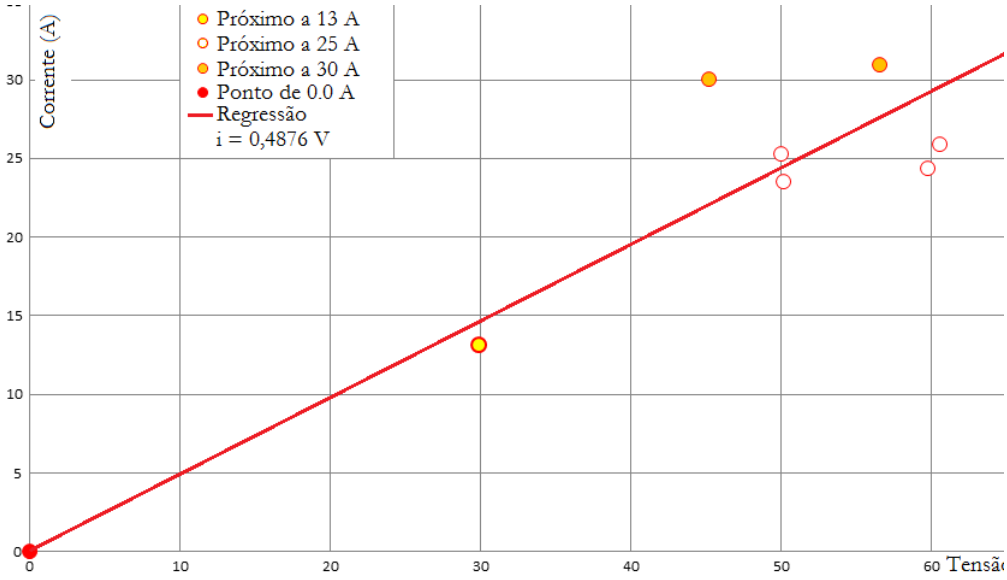
A Tabela 5.14 e Tabela 5.15 representam os experimentos para uma inclinação de 8,34 graus ou 210 mm de altura. Isso foi feito para testar o quão forte era o jato do propulsor e se ele conseguiria mover a coluna de água acima de 2,998 graus.

Tabela 5.14 - Experimento 10: 60 VOLTS. Condutividade 6,7 S/m. Ti = 23,9˚C Tf=37,4˚C. Equipamento com inclinação maior. 210 mm ou 8,34 graus

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
60,9	25,9	35,0	0,317±0,006
60,6	25,9	36,0	0,322±0,006
60,3	25,9	38,0	0,331±0,006

Comparando os valores da corrente pela tensão dos experimentos 4 a 10 tem-se a Figura 5.14.

Figura 5.14 - Comparação dos valores médios da corrente versus a tensão imposta para os experimentos de 4 a 10. A reta de regressão apresenta um valor de R2 de 0,84 se a origem é considerada no cálculo da regressão. Sem a origem, o valor de R2 é de 0,43. Note que não foram inseridas barras de erros, pois o valor seria 100 vezes menor que a medida, tornando imperceptível a leitura



Fonte: do autor.

O gráfico da Figura 5.14 mostra quatro marcadores: 1) Vermelho: é a origem segura. Se não houver tensão, não há corrente. Este é um ponto sempre presente. 2) Amarelo: menor corrente observada nesta série de experimentos, com valor médio de 13,1 A. 3) Laranja: Amperagens observadas com valores médios (por experimento) de 30,07 A e 31,0 A. 4) Branco: Amperagens observadas com valores médios (por experimento) variando de 23,5 A a 25,9 A. Tem-se, então, quatro “grupos” de amperagens para esses dados. Apesar do espalhamento dos dados, em termos médios observa-se a tendência de crescimento entre corrente e tensão. Disposições

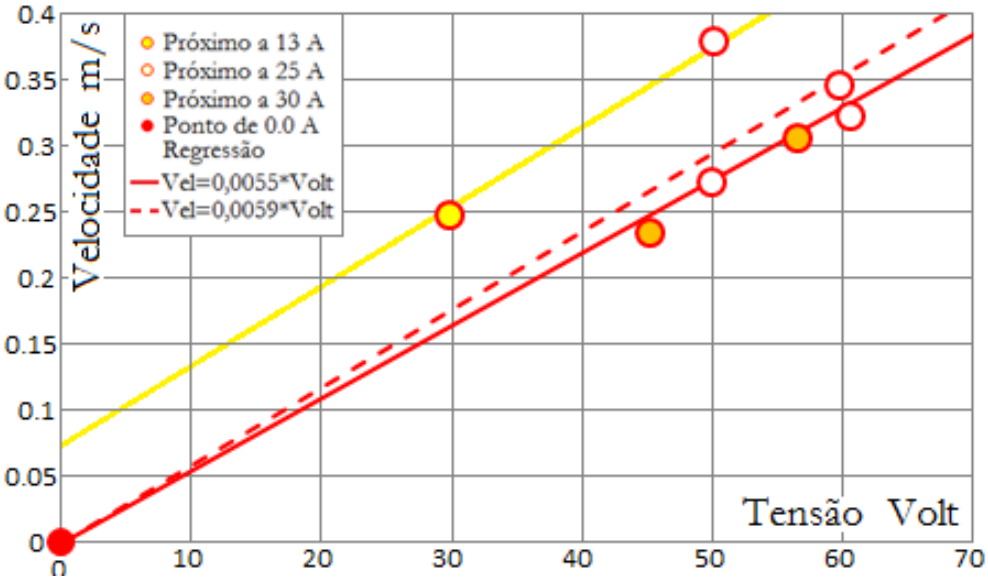
construtivas (diferenças não percebidas na execução dos eletrodos) podem ser as causas das diferenças, bem como eventuais variações na condutividade do líquido ao longo do tempo, mas a tendência geral pode ser considerada satisfatória. Nesse caso, pode-se adotar uma tendência linear para os dados, tendo sido apresentada a reta de regressão correspondente.

Nota-se o controle da fonte, conferindo precisão e confiança para os experimentos mesmo com a mudança da condutividade do fluido. Não há queda de tensão nos experimentos específicos, observando-se uma leve mudança na corrente, permitindo inferir que a queda de condutividade não altera drasticamente a velocidade do fluido.

A Figura 5.15 mostra os valores médios de velocidade, conforme calculados a partir da Tabela 5.8 a Tabela 5.14 e

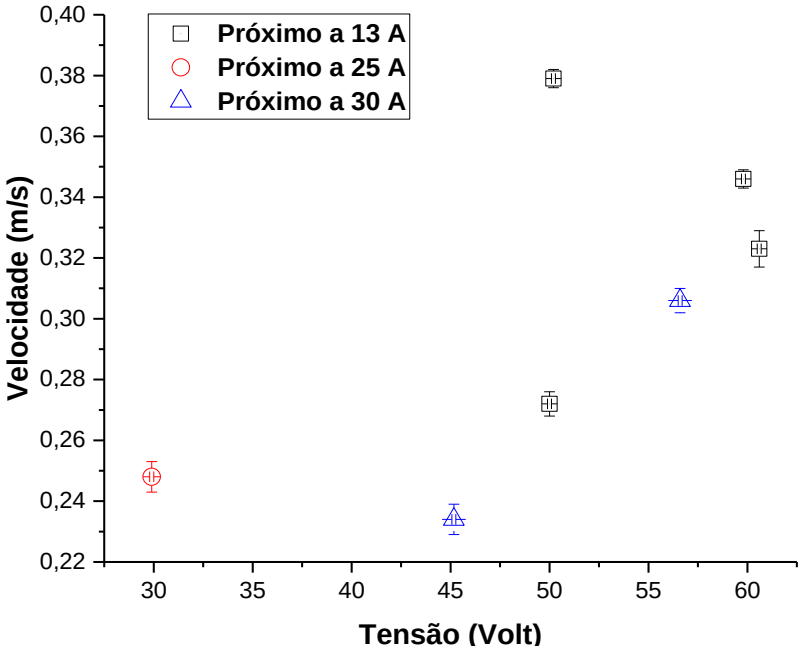
Figura *5.16* os mesmo experimentos com seus erros. Considerando a origem, tem-se R 2 =0,993. Sem a origem tem-se R 2 =0,92., Os dois pontos sobre a linha amarela parecem sujeitos a erros experimentais.

Figura 5.15 - Os mesmos experimentos Figura 5.14, agora relacionando velocidades e tensões. A regressão em linha tracejada foi feita para todos os pontos (com origem) tendo R2=0,84. A regressão em linha cheia vermelha foi feita sem considerar os pontos sobre a origem.



Fonte: do autor.

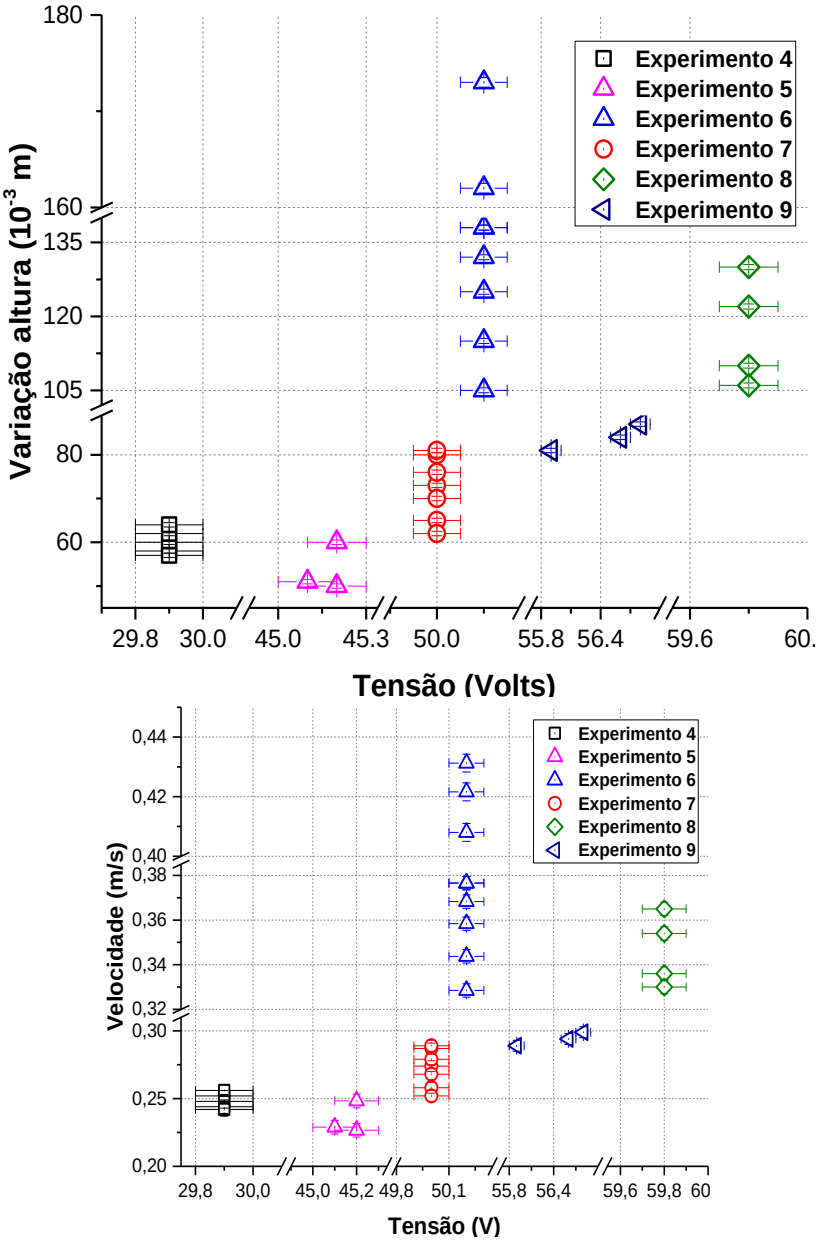
Figura 5.16 - Os mesmos experimentos da figura 5.14, agora relacionando velocidades e tensões e suas barras de erros



Fonte: do autor.

A Tabela 5.8 a Tabela 5.13 mostram oscilações da coluna de água (e, consequentemente, da velocidade) para cada tensão plicada. Essas oscilações foram também grafitadas, obtendo-se a Figura 5.17:

Figura 5.17 - - Comparação da variação da coluna de água e da velocidade para os experimentos de 4 a 9



Fonte: do autor.

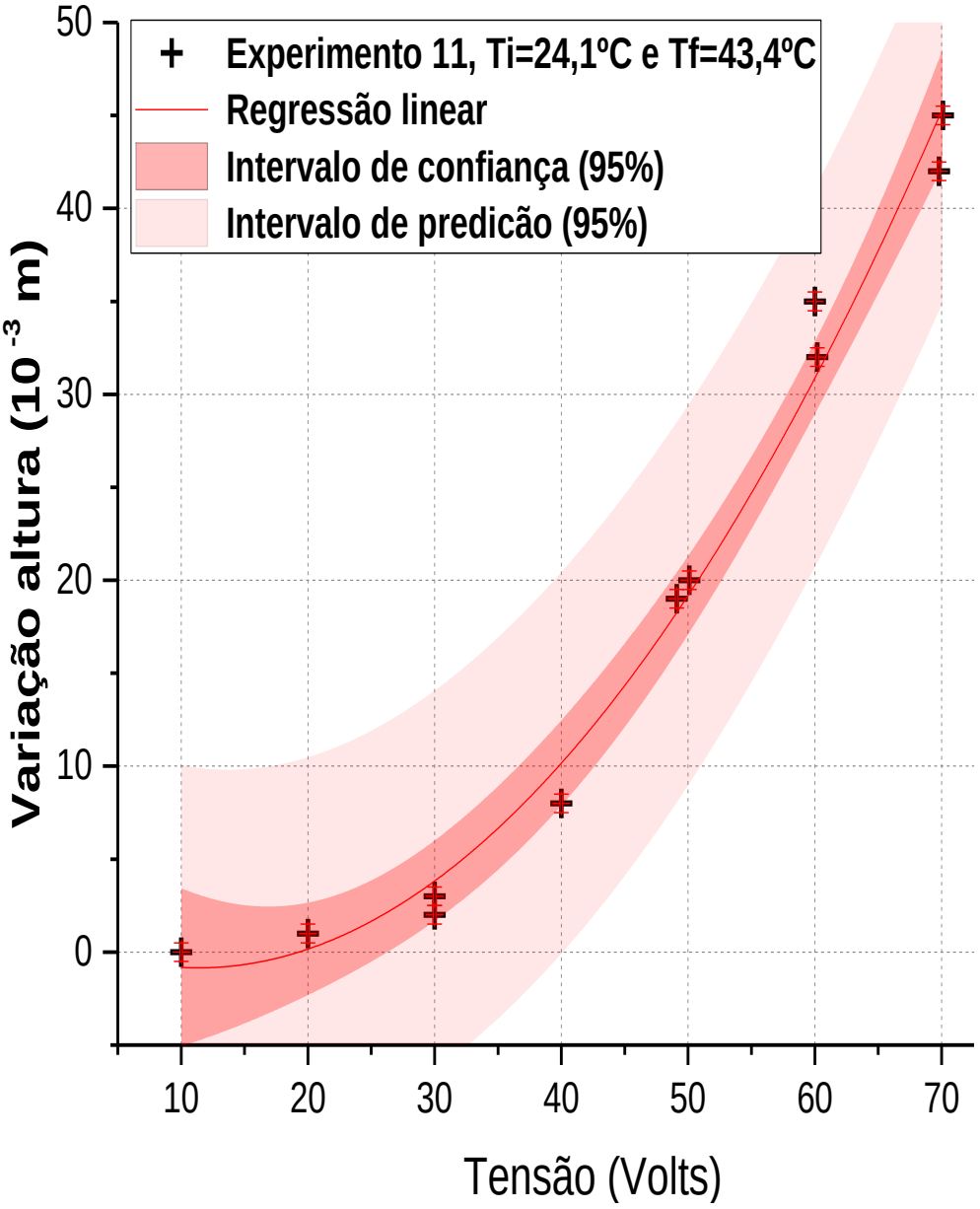
Para as tensões próximas a 50 V houve uma maior oscilação da coluna de água, sendo que o experimento 6 mostra a maior oscilação. Essas oscilações não são observadas nos erros porque elas são da ordem de 10^{-4} m.

A Tabela 5.15 mostra um experimento realizado continuamente para diferentes valores da tensão aplicada. A fonte foi ligada inicialmente a 10 V e foram-se alterando os valores até 70 V, sem trocar os eletrodos ou o fluido. A inclinação do manômetro foi alterada de 2,998 graus para 8.34 graus. Analisando as variações de medida da coluna de água ainda inclinada, tem-se a Figura 5.18.

Tabela 5.15 - Experimento 11, variando de 10 a 70 Volts. Condutividade 7,3 S/m. Ti = 24,1˚C Tf=43,4˚C. Equipamento com inclinação maior. 210 mm ou 8.34 graus.

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Altura 10^{-3} (m) erro±0,5	Velocidade (m/s)
10	0,8	0,0	0±1,107
20	3,0	1,0	0,054±0,035
30	8,1	2,0	0,076±0,025
30	8,2	3,0	0,093±0,020
40	15,0	8,0	0,152±0,012
50,1	20,3	20,0	0,239±0,008
49,1	20,0	19,0	0,234±0,008
60,2	26,1	32,0	0,303±0,006
60	25,0	35,0	0,317±0,006
69,8	30,0	42,0	0,348±0,005
70,1	30,0	45,0	0,359±0,005

Figura 5.18 - Experimento 11. Variação da leitura da coluna de água inclinada em variando a tensão de 10 a 70 Volts. Ajustou-se um polinômio de segundo grau

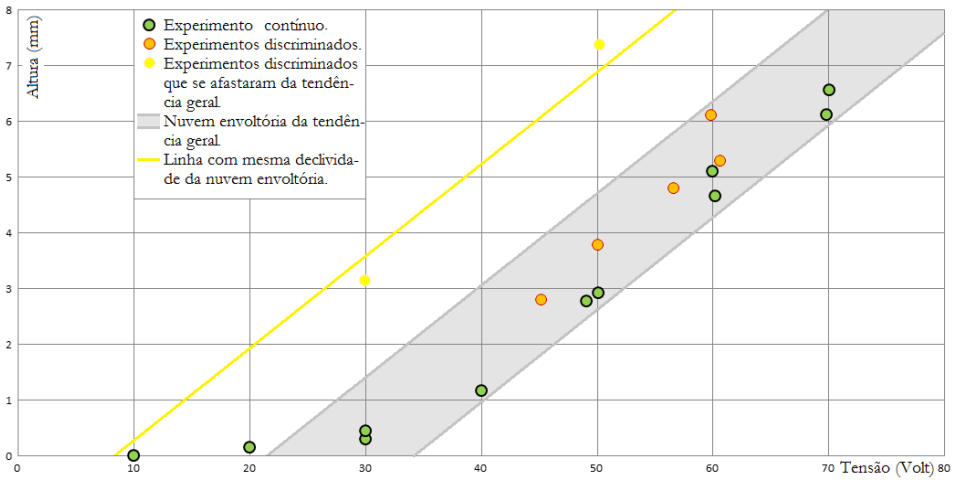


Fonte: do autor.

Como era esperado, a altura da coluna de água aumentou com a tensão. Observa-se que os pontos seguem um comportamento não-linear, que foi aproximado aqui a uma função polinomial de segundo grau. A real “altura” da coluna de água se obtém multiplicando-a pelo seno do ângulo de inclinação do manômetro (altura vertical). Nesse caso, fez-se uma comparação das medidas efetuadas no presente item, obtendo-se Figura 5.19 e Figura 5.20 (com os erros).

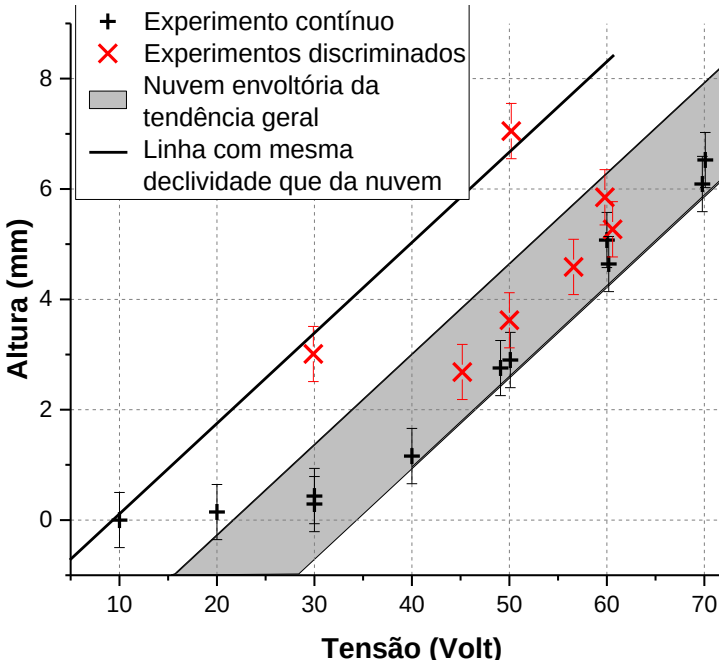
Figura 5.19 - Tendência observada para a evolução da altura média (na vertical) da coluna de água para os experimentos deste item. Observa-se uma tendência coerente para os diferentes experimentos. Mesmo aqueles que estão “fora” da nuvem envoltória mostram crescimento com

declividade similar à da nuvem. Os experimentos sobre a linha amarela da figura 5.15 são aqueles indicados em amarela “fora” da nuvem na presente figura



Fonte: do autor.

Figura 5.20 - Tendência observada para a evolução da altura média (na vertical) da coluna de água para os experimentos deste item e seus erros



Fonte: do autor.

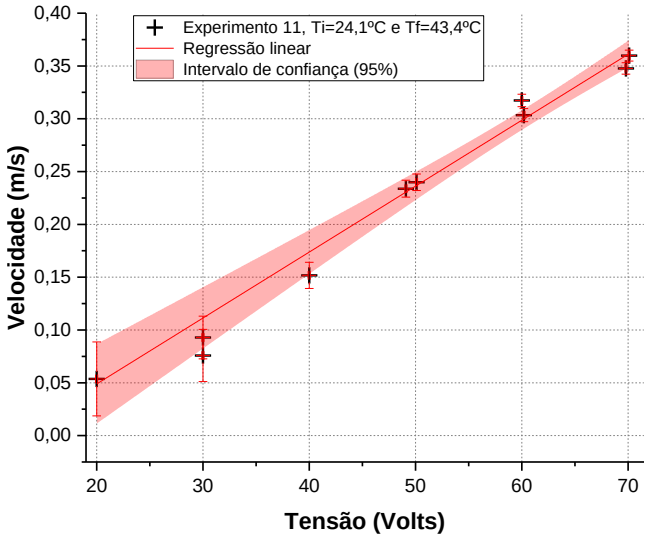
A nuvem envoltória da Figura 5.19 não passa pela origem, nesta representação de crescimento linear. Muitos fatores podem ser aventados para este comportamento: 1) A relação entre tensão e movimento pode ser de fato não linear, pelo menos para as menores tensões; 2) O movimento pode depender de um limite de tensão aplicada, dependente da configuração geométrica adotada; 3) Podem haver modificações das condições experimentais (desgaste dos eletrodos, alteração da

condutividade do fluido, superposição desses efeitos). O fato de o mesmo comportamento ser observado para os experimentos discriminados e para o experimento contínuo sugere que os itens 1 e 2 acima mencionados sejam mais prováveis. Ao analisar a velocidade em função da tensão (Figura 5.21) para as maiores tensões, pode-se dizer que os pontos comportam-se linearmente. Na Figura 5.21 o ponto referente a 10 V não foi incluído pois a altura da coluna foi muito baixa para contabilizar no cálculo da velocidade (igualada a zero nos presentes experimentos).

A Figura 5.22 foi elaborada considerando conjuntamente os dados do experimento contínuo e dos experimentos discriminados, e a Figura 5.23 seus erros. Nesse caso, apenas os dois pontos sobre a linha amarela da Figura 5.15 não foram inseridos na análise. O ajuste pelo método dos mínimos quadrados para obter a evolução não linear da velocidade para com a tensão aplicada produziu o expoente 1,68. A

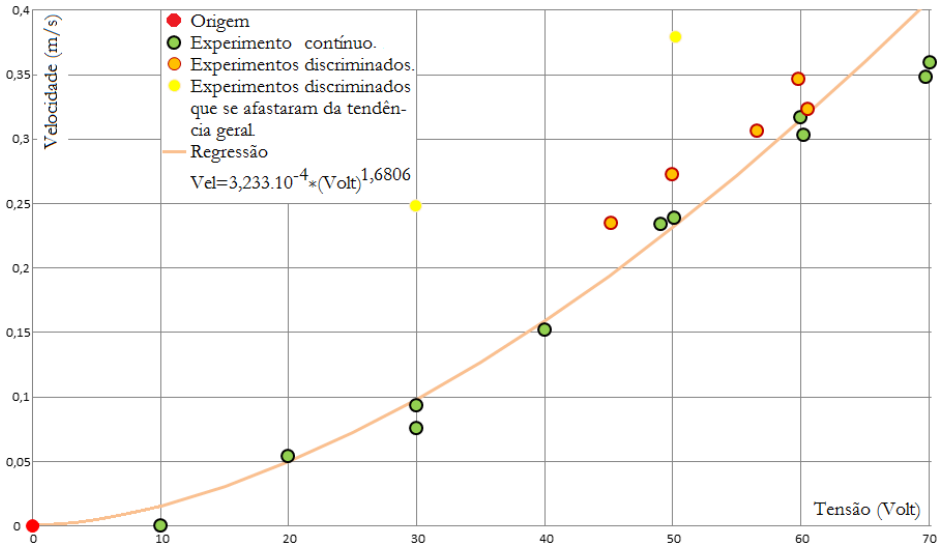
Figura *5.24* mostra a relação da corrente com a tensão. Em se considerando que a resistência do meio (ou a resistividade) não se altera ao longo do experimento contínuo, espera-se que os dados se comportem como uma reta. Nesse caso, pode-se observar uma boa aderência a uma reta para os dados obtidos.

Figura 5.21 - Experimento 11, variando de 20 a 70 Volts em função da velocidade. Uma tendência linear pode ser sugerida para essa faixa de tensões



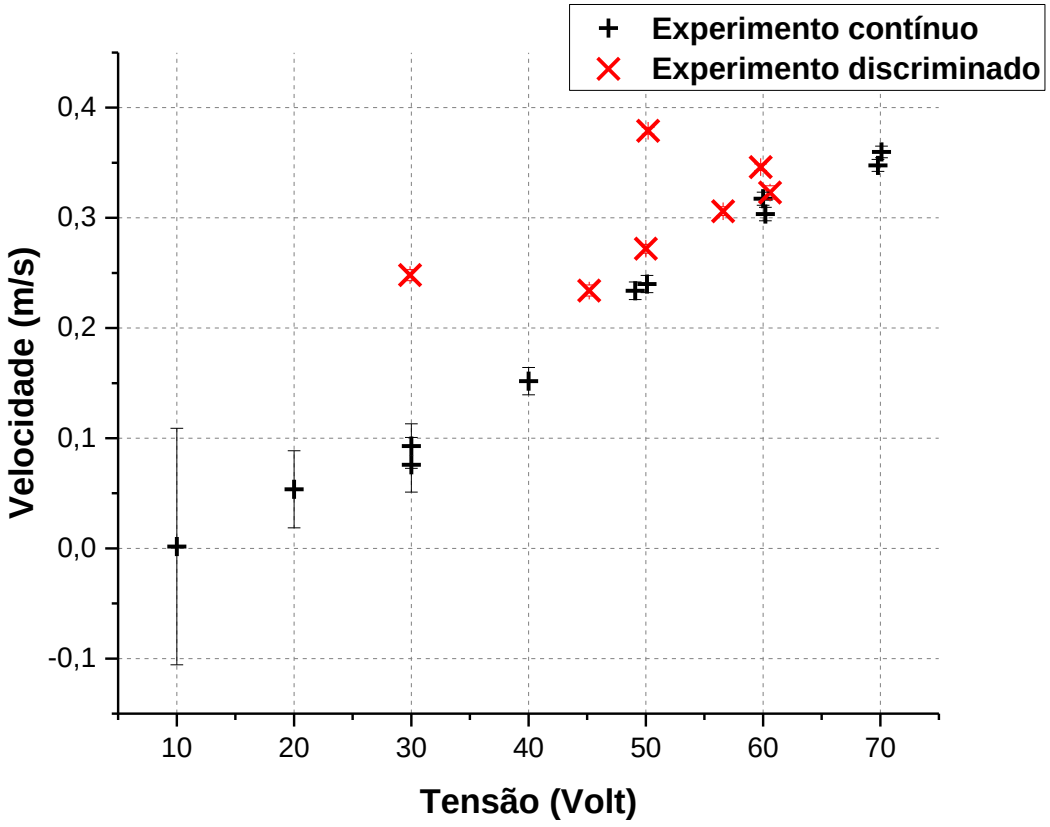
Fonte: do autor.

Figura 5.22 - A velocidade medida em função da tensão aplicada, para os dados dos experimentos discriminados em conjunto com os dados do experimento contínuo. Aqui o ajuste do melhor expoente levou à equação apresentada, com R2=0,96. Os pontos amarelos foram desconsiderados neste ajuste



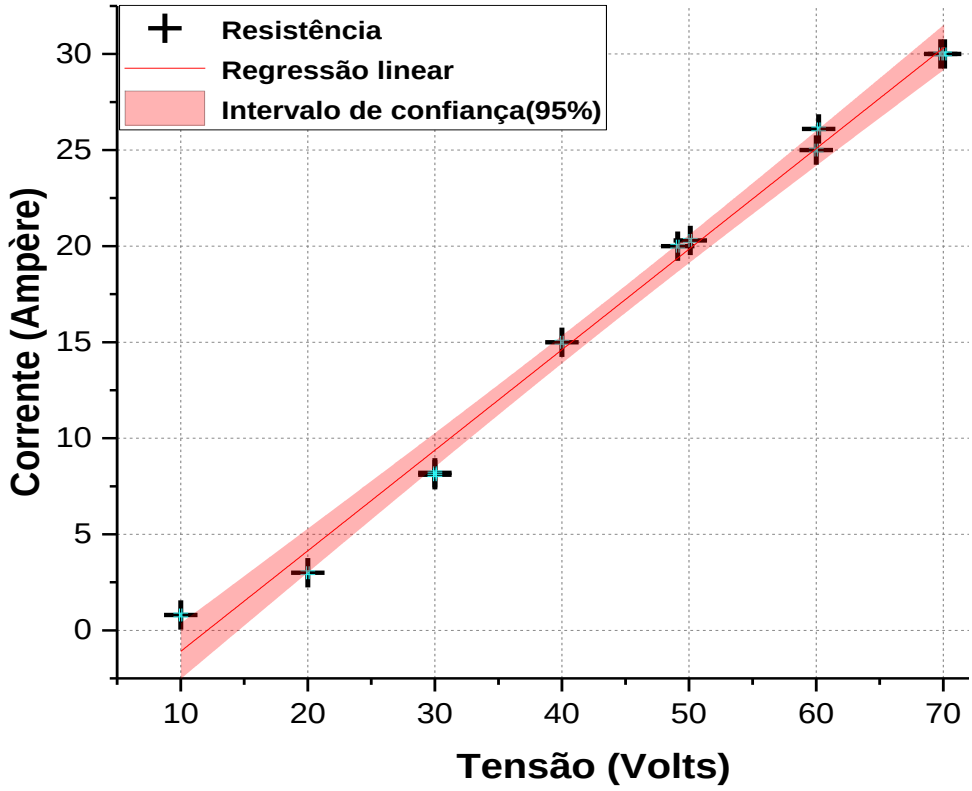
Fonte: do autor.

Figura 5.23 - A velocidade medida em função da tensão aplicada, para os dados dos experimentos discriminados em conjunto com os dados do experimento contínuo e suas barras de erros



Fonte: do autor.

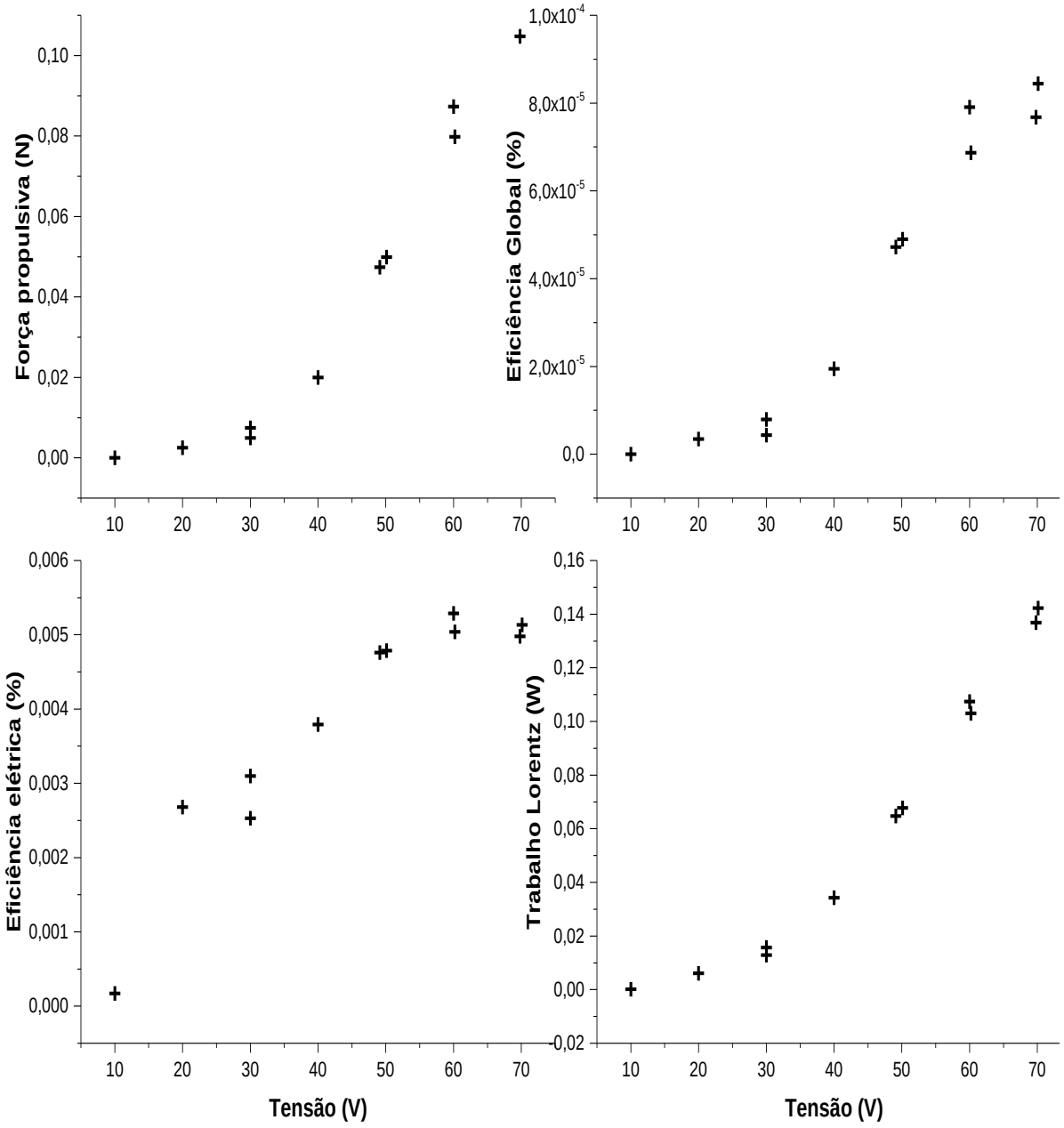
Figura 5.24 - Comportamento da corrente em função da tensão do experimento 11



Fonte: do autor.

O experimento contínuo (número 11) foi utilizado para avaliar os parâmetros propulsivos do propulsor, o que é mostrado na Figura 5.25. As dimensões utilizadas para o propulsor (mencionadas anteriormente) foram de (50 x 34 x 25) mm. As equações utilizadas para cada item da figura foram a força propulsiva $\left(F_t = \rho V_0^2 A_0\right)$, eficiência global $\left(\eta = F_t V_0 / J L_e W_e\right)$, eficiência elétrica $\left(\eta_e = P_{te}/P = V_0 B W_e / V\right)$ e trabalho de Lorentz $\left(P_L = J B W_p H_p L_p V_0\right)$.

Figura 5.25 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para o experimento 11

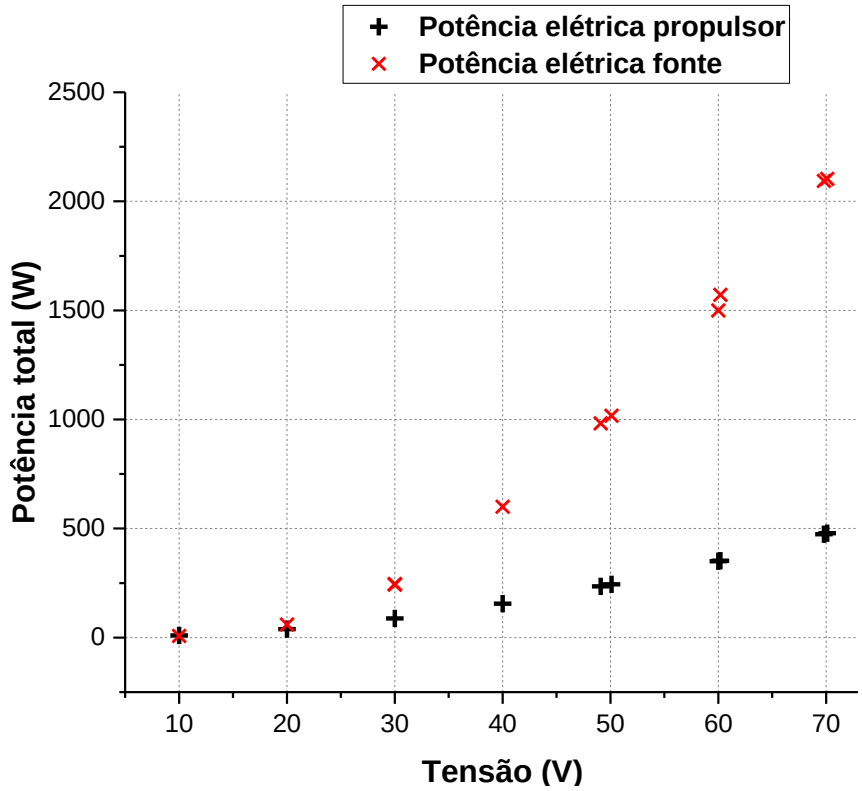


Fonte: do autor.

Nota-se na figura que a força propulsiva e o trabalho de Lorentz tendem a aumentar com o aumento da tensão, mas o mesmo não ocorre com as eficiências, verificando-se que a partir de 50 V e 60 V as curvas inflexionam indicando que começam a decrescer.

No presente texto também se comparou a potência elétrica fornecida pela fonte com a potência elétrica utilizada pelo propulsor. Isto é mostrado na Figura 5.26.

Figura 5.26 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para o experimento 11



Fonte: do autor.

Note que as potências fornecidas pela fonte e aquelas utilizadas pelo propulsor divergem a partir de 30 V. Utilizando os experimentos 1-11, calculou-se então a quantidade de calor gerada na cuba de água. Isto foi feito tendo conhecimento da variação da temperatura, utilizando a equação:

$$Q = m_a c_a \left(T_{af} - T_{ai}\right) \tag{5.5}$$

Onde c_a e m_a é o calor especifico sensível da água (0,76 kcal/kg·ºC) e sua massa (4 kg) respectivamente. O tempo médio aproximado dos experimentos foi em torno de 1 minuto ou 60 segundos. Com esse valor, pode-se estimar também sua potência térmica:

$$P_{térmica} = \frac{Q}{t} \tag{5.6}$$

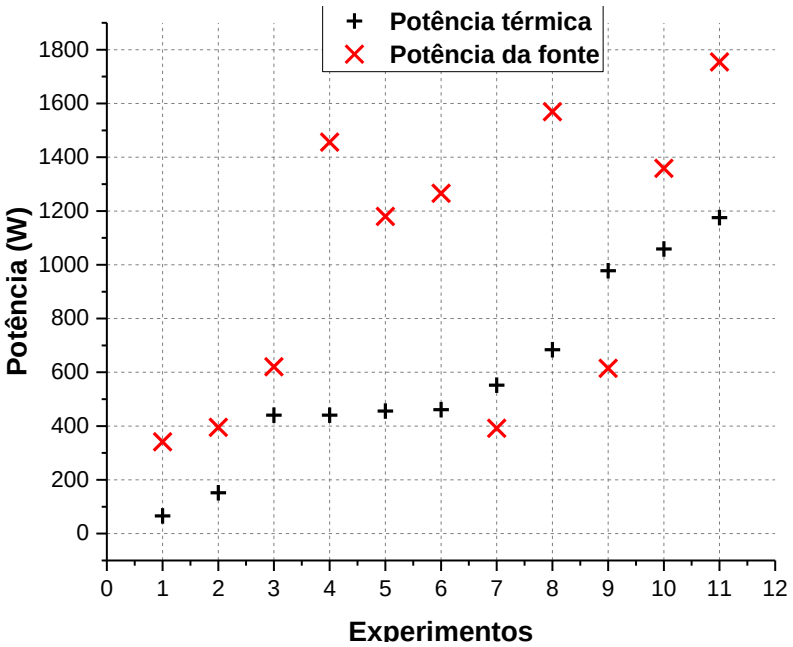
A tabela mostra os valores de calor gerado calculados para os experimentos aqui efetuados assim como a potência média da fonte para cada experimento.

Tabela 5.16 - Calor gerado nos 11 experimentos

	Quantidade de calor gerada (kJ)	Potência térmica (W)	Potência média da fonte (W)	Porcentagem convertida (%)
Exp. 1	9,12	152	395,55	38,42
Exp. 2	26,45	440,83	620,84	71,00
Exp. 3	3,95	65,83	341,79	19,26
Exp. 4	33,14	552,33	391,69	não se aplica
Exp. 5	63,54	1059	1359,01	77,92
Exp. 6	27,36	456	1179,70	38,65
Exp. 7	27,66	461	1265,71	36,42
Exp. 8	26,45	440,83	1456,13	30,27
Exp. 9	70,53	1175,5	1754,60	66,99
Exp. 10	41,04	684	1569,54	43,58
Exp. 11	58,67	977,83	614,97	não se aplica

A porcentagem convertida na Tabela 5.16 não se aplica aos experimentos 4 e 11 pois ela seria maior que 100%. A título de curiosidade podemos comparar o calor utilizado para aquecer a cuba contendo água salgada com a potência utilizada da fonte para aquecer esse fluido (Figura 5.27), os valores das potencias foram colocados em ordem crescente.

Figura 5.27 - Comparação da potência térmica com a potência da fonte



Fonte: do autor.

Note que, como era de se esperar, a potência fornecida pela fonte é maior que a potência térmica utilizada para aquecer a cuba. A diferença da potência da fonte e da térmica, pode ter sido convertida em outro tipo de energia como a necessária para impulsionar o fluido por exemplo.

É importante notar que nos experimentos 4 e 11 a potência média fornecida pela fonte é menor que a gerada no aquecimento da água. Não há criação de potência aqui. Esse fato pode ser explicado da seguinte maneira: no experimento 4 o tempo do experimento ultrapassou a média de 1 minuto, ou seja, mesmo com tensão e corrente baixas, um tempo longo de exposição dos eletrodos na água aumentou significativamente a temperatura dela. Logo a potência térmica seria maior. No experimento 11 houve uma grande alteração das tensões e correntes, que variaram desde 10 V e 0,8 A até 70 V e 30,1 A respectivamente. Logo a média desses valores daria uma potência inferior.

A fase denominada de “segunda” permitiu que se efetuassem comparações bem mais objetivas entre os diferentes experimentos, em se variando a tensão aplicada aos eletrodos.

Em termos de força propulsiva, atingiu-se o valor aproximado de 0,10N (Figura 5.25), que mostra que um propulsor pode impulsionar um veículo laboratorial. As questões construtivas desse veículo foram sendo ajustadas na sequência das fases deste estudo.

5.3. Terceira fase

Na terceira fase o propulsor da segunda fase foi utilizado. Conforme mencionado no item 4.3, esta fase envolveu a ideia de utilizar um eixo vertical com anel deslizante para permitir o movimento da Água Viva MHD. O atrito que se formou impossibilitou o movimento e nenhum dado foi, portanto, gerado.

Quanto ao pêndulo, foi possível obter movimentos que pudessem ser medidos e, a partir dessas medidas, possibilitar o cálculo da força realizada pelo propulsor. No entanto, ao seccionar os fios, deixando metade deles em contato com os rolamentos e a outra metade na haste de contato, houve uma grande “perda” de corrente, esquentando o conjunto excessivamente. Isto levou, como já comentado, ao

derretimento da parte do eixo que servia de isolamento, na disposição construtiva utilizada no presente estudo. Avalia-se que um experimento que deveria utilizar 30 A da fonte podia contar com apenas metade (ou menos) deste valor no propulsor, diminuindo em muito sua eficiência.

Esta fase, portanto, não produziu resultados para análise. O aspecto positivo foi verificar que, para utilizar o pêndulo como um medidor de força, elementos isolantes mais eficazes devem ser utilizados em conjunto com contatos que permitam melhor passagem de corrente.

5.4. Quarta fase

Inicialmente houve um movimento do conjunto (propulsor + guia + boias) melhor do que os demais modelos testados (a maior parte restrita pelos atritos), apesar do espaço percorrido ser muito pequeno (menos de 1 cm). No entanto, não foi possível obter dados quantitativos relacionados ao movimento vertical, uma vez que o conjunto guia e rolamentos sofreu corrosão e/ou deposição de precipitados da solução após dois experimentos de visualização consecutivos (isto é, experimentos não destinados às medidas propriamente ditas).

Os movimentos pendulares, por sua vez, puderam ser efetuados, uma vez que os experimentos de deslocamento vertical e de avaliação da força via pêndulos eram independentes. Como visto na metodologia, réguas foram utilizadas para a medição do movimento e a aproximação do cálculo da força propulsiva foi baseada no exposto no apêndice E. Uma série testes foi conduzida. A condutividade de todos os testes foi em torno de 7,21 S/m, pois utilizou-se uma cuba de 20 litros misturada ao sal, o que permitiu realizar mais experimentos com a mesma solução (isto é, sem a necessidade de preparar uma solução para cada experimento) garantido sua homogeneidade. Novamente o erro de medida relacionado à régua era de 0,5 mm. Entretanto, erros associados à própria metodologia de experimentação foram considerados. A Tabela 5.17 mostra todos os experimentos realizados, assim como o máximo deslocamento e o deslocamento estabilizado. Como a condutividade da solução foi a mesma e os deslocamentos não foram grandes, os dados foram

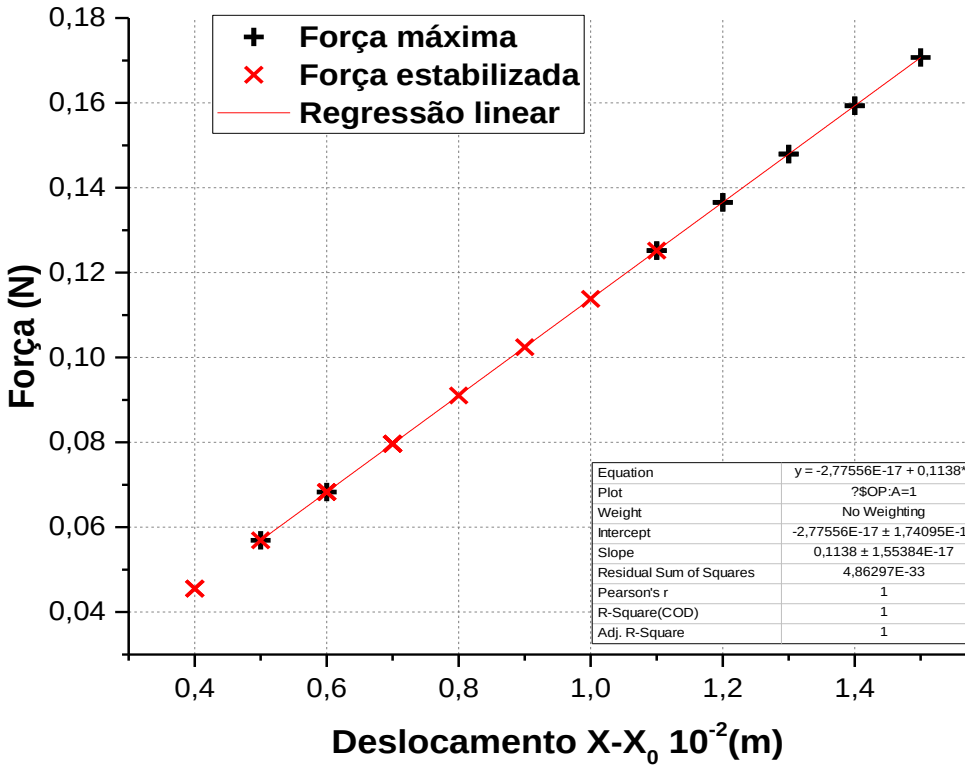
colocados em uma mesma tabela. A massa do (propulsor + rolamentos + régua + fio) foi em torno de 290 grama.

Tabela 5.17 - Dados do deslocamento do pêndulo para todos os experimentos

Posição inicial 10^{-2} (m) erro ± 0,01	Posição máx. 10^{-2} (m) erro ± 0,01	Posição est. 10^{-2} (m) erro ± 0,01	Força máxima (N)	Força estabilizada (N)
9,00	9,50	9,40	0,06	0,05
9,30	10,60	10,40	0,15	0,13
9,30	10,50	10,30	0,14	0,11
9,40	10,60	10,00	0,14	0,07
9,40	10,50	10,10	0,13	0,08
9,30	10,40	9,90	0,13	0,07
9,00	9,60	9,50	0,07	0,06
9,00	9,60	9,40	0,07	0,05
9,00	9,60	9,40	0,07	0,05
9,10	10,50	9,80	0,16	0,08
9,10	10,60	9,70	0,17	0,07
9,10	10,50	9,80	0,16	0,08
9,00	10,30	9,90	0,15	0,10
9,00	10,20	9,80	0,14	0,09
9,10	10,20	9,80	0,13	0,08

Não se colocou a barra de erros para a força porque, conforme o apêndice C, a ordem de grandeza do erro seria em torno de 10^{-4}, pequena em relação ao valor médio das variáveis em questão. A Figura 5.28 mostra a força calculada a partir do deslocamento. Aqui os dados obtidos da Tabela 5.17 foram de um único experimento em diferentes momentos.

Figura 5.28 - Força propulsiva máxima e estabilizada



Fonte: do autor.

Anteriormente (segunda fase) foi calculada uma força propulsiva máxima de 0,1 N, com base na velocidade da solução (medida) e na área transversal atravessada por ela. Agora avaliou-se uma força máxima de 0,17 N. Note-se que não é possível efetuar comparações diretas, porque não se mediu concomitantemente a velocidade de ejeção da solução. Isto se deve por exemplo à questão relativa ao aquecimento, que derreteu a parte do eixo correspondente ao isolamento. Mas a ordem de grandeza atingida para a força é similar àquela anteriormente obtida, o que mostra que esta metodologia pode ser melhor explorada em estudos futuros.

5.5. Quinta fase

Nessa etapa os dados de pressão foram obtidos utilizando-se um manômetro digital, como mencionado no capitulo 4. A velocidade e seu erro foram calculadas utilizando-se as relações abaixo:

$$V = \sqrt{\frac{2\left(P_2 - P_1\right)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2P_r}{\rho}} \tag{5.7}$$

$$f = f(v) \Rightarrow \Delta V = \left|\frac{df}{dP}\right| \Delta P \tag{5.8}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta P}{1020\sqrt{2P_r/\rho}} \tag{5.9}$$

Essas relações de velocidade e pressão podem ser encontradas no apêndice B, no final do trabalho. Para os experimentos, esperou-se o fluido atingir um equilíbrio assim como o valor inicial do manômetro. Como não era possível obter um valor "zero", na leitura, utilizou-se o valor mais próximo do equilíbrio. Após as medidas desligou-se o propulsor e esperou-se novamente o manômetro atingir seu valor de equilíbrio anotando seu valor final. Por exemplo, no início do experimento mediu-se a pressão inicial que marcava 8 Pa, logo esse seria o valor de referência ou o "zero" da medida. Ao desligar o equipamento esperava-se o "zero" como medida. No entanto esse marcava por exemplo 5 Pa, logo para compensar o erro do equipamento e das medidas somou-se o erro inicial de 8 Pa com os 5 Pa finais resultando em 13 Pa.

5.5.1. Eletrodos de 15mm por 40 mm. Condutividade 7,785 S/m

Para esses experimentos e todos os demais envolvendo troca de eletrodos e formatos, utilizou-se inicialmente água limpa, ou seja, água misturada apenas com sal. Após o primeiro experimento a água já estava com resíduos da eletrólise do eletrodo, sendo chamada de água suja. Os experimentos se seguiram com a água suja até o desgaste dos eletrodos.

Após isso, dados da pressão foram coletados, obtendo-se a velocidade do fluido para cada experimento, assim como as eficiências, força propulsiva, trabalho de Lorentz e eficiência elétrica do propulsor.

A potência útil fornecida pela fonte também foi comparada a potência elétrica do propulsor, assim como as forças de propulsão foram comparadas as forças de

Lorentz. No entanto para essa segunda análise, apenas os experimentos contendo água limpa foram utilizados, pois como é sabido, a solução inicial salina possui maior condutibilidade e menor resistência elétrica que a solução final, uma vez que resíduos de oxidação não estão presentes para interferir.

Devido à grande quantidade de dados presentes, cada tabela referente a um dado experimento foi exposta em páginas diferentes, para facilitar a leitura.

É possível notar que em algumas tabelas o valor da corrente é apresentado como “zero”. No entanto atribui-se esse valor devido à baixa corrente que a fonte apresentou para esse dado ponto. Logo esse valor “zero” pode ser valores da ordem de 10^{-2} a 10^{-3}, por exemplo. Como as tabelas foram definidas com uma casa de precisão depois da vírgula, os valores que possuíam 2 ou 3 casas foram arredondadas de acordo com as tabelas, logo um valor 0,08 por exemplo, aparece como 0,1 e 0,01 aparece como 0, apesar deles terem sido calculados pelo autor para obter a resistência.

Tabela 5.18 - Variando tensão de 10 a 80 Volts (Ti = 24,2 ˚C Tf=37,3)˚C. Valor estabilizado após o experimento: 8 Pa. Valor inicial de 5-8 Pa (água limpa sem resíduos da eletrólise). Experimento 1

(Continua)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±16	Velocidade (m/s)
10,0	0,1	142,5	6	0,108±0,145
10,0	0,1	250,0	6	0,108±0,145
10,0	0,1	250,0	5	0,099±0,158
10,0	0,1	333,3	5	0,099±0,158
10,0	0,0	333,3	5	0,099±0,158
19,1	2,0	9,6	17	0,183±0,086
19,1	1,8	10,6	20	0,198±0,079
19,1	1,8	10,6	22	0,208±0,076
19,1	1,9	10,1	22	0,208±0,076
29,9	8,2	3,6	87	0,413±0,038
29,9	8,3	3,6	91	0,422±0,037
29,9	8,3	3,6	91	0,422±0,037
29,9	8,4	3,6	94	0,429±0,037
29,9	8,3	3,6	95	0,432±0,036
40,0	14,3	2,8	152	0,546±0,029
40,0	14,4	2,8	165	0,569±0,028
40,0	14,3	2,8	173	0,582±0,027
40,0	14,4	2,8	181	0,596±0,026
40,0	14,4	2,8	187	0,606±0,026
40,0	14,5	2,8	190	0,610±0,026
50,3	20,5	2,5	250	0,700±0,022
50,3	20,6	2,4	264	0,719±0,022
50,3	20,5	2,5	267	0,724±0,022
50,3	20,7	2,4	275	0,734±0,021
50,3	20,8	2,4	281	0,742±0,021
50,3	21,2	2,4	281	0,742±0,021
59,7	26,2	2,3	316	0,787±0,020
59,7	26,8	2,2	325	0,798±0,020
59,7	26,9	2,2	332	0,807±0,019

Tabela 5.18 - Variando tensão de 10 a 80 Volts (Ti = 24,2 ˚C Tf=37,3)˚C. Valor estabilizado após o experimento: 8 Pa. Valor inicial de 5-8 Pa (água limpa sem resíduos da eletrólise). Experimento 1

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±16	Velocidade (m/s)
59,7	26,9	2,2	332	0,807±0,019
59,7	26,6	2,2	342	0,819±0,019
59,7	26,4	2,3	350	0,828±0,019
59,7	26,9	2,2	376	0,859±0,018
59,7	26,7	2,2	382	0,865±0,018
59,7	21,1	2,8	372	0,854±0,018
59,7	20,1	3,0	330	0,804±0,020
70,0	25,5	2,7	304	0,772±0,020
70,0	25,3	2,8	333	0,808±0,019
70,0	24,8	2,8	326	0,800±0,020
70,0	23,2	3,0	255	0,707±0,022
70,0	25,8	2,7	323	0,796±0,020
70,0	24,4	2,9	232	0,674±0,023
70,0	25,3	2,8	306	0,775±0,020
70,0	26,8	2,6	420	0,907±0,017
70,0	25,5	2,7	361	0,841±0,019
71,2	26,8	2,7	286	0,749±0,021
80,6	30,1	2,7	311	0,781±0,020
80,3	30,7	2,6	375	0,857±0,018
78,2	30,6	2,6	468	0,958±0,016
80,6	30,7	2,6	490	0,980±0,016
79,8	30,9	2,6	504	0,994±0,016
77,5	30,8	2,5	534	1,023±0,015
79,1	30,5	2,6	555	1,043±0,015

Tabela 5.19 - Variando tensão de 10 a 80 Volts (Ti =35 ˚C Tf=45,3)˚C. Estabilizou em 6 Pa. Valor inicial de 6-8 Pa (água suja). Continuação do experimento 1. Experimento 2

(Continua)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±14	Velocidade (m/s)
10,1	0,1	126,3	26	0,226±0,052
10,1	0,1	126,3	24	0,217±0,054
20,1	3,6	5,6	45	0,297±0,040
20,1	3,5	5,7	51	0,316±0,037
20,1	3,4	5,9	51	0,316±0,037
20,1	3,3	6,1	50	0,313±0,038
20,1	3,3	6,1	45	0,297±0,040
20,1	3,2	6,3	47	0,304±0,039
29,9	10,6	2,8	114	0,473±0,025
29,9	10,5	2,8	117	0,479±0,025
29,9	10,5	2,8	115	0,475±0,025
29,9	10,5	2,8	116	0,477±0,025
29,9	10,5	2,8	120	0,485±0,024
40,1	17,9	2,2	185	0,602±0,020
40,1	18,1	2,2	182	0,597±0,020
40,0	17,7	2,3	182	0,597±0,020
40,0	18,0	2,2	196	0,620±0,019
40,1	18,1	2,2	193	0,615±0,019
40,1	18,2	2,2	194	0,617±0,019
40,1	18,0	2,2	191	0,612±0,019
40,0	18,1	2,2	190	0,610±0,019
40,0	18,2	2,2	203	0,631±0,019
49,9	24,7	2,0	267	0,724±0,016
49,9	24,9	2,0	270	0,728±0,016
49,9	25,2	2,0	285	0,748±0,016
49,9	25,1	2,0	296	0,762±0,015
49,9	25,3	2,0	285	0,748±0,016
49,9	25,1	2,0	285	0,748±0,016
49,9	25,2	2,0	281	0,742±0,016

Tabela 5.19 - Variando tensão de 10 a 80 Volts (Ti =35 ˚C Tf=45,3)˚C. Estabilizou em 6 Pa. Valor inicial de 6-8 Pa (água suja). Continuação do experimento 1. Experimento 2

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±14	Velocidade (m/s)
49,9	25,3	2,0	291	0,755±0,016
59,7	31,0	1,9	344	0,821±0,014
60,9	25,4	2,4	355	0,834±0,014
60,9	23,9	2,5	265	0,721±0,016
60,9	24,1	2,5	290	0,754±0,016
60,9	24,4	2,5	335	0,810±0,015
60,9	24,9	2,4	380	0,863±0,014
60,9	29,8	2,0	300	0,767±0,015
70,2	28,9	2,4	353	0,832±0,014
70,2	28,3	2,5	380	0,863±0,014
70,3	30,5	2,3	253	0,704±0,017
70,3	29,5	2,4	345	0,822±0,014
70,2	29,0	2,4	312	0,782±0,015
70,2	29,7	2,4	336	0,812±0,014
70,2	30,6	2,3	366	0,847±0,014
66,5	30,8	2,2	462	0,952±0,012

Tabela 5.20 - Variando tensão de 10 a 80 Volts (Ti = 39,6 ˚C Tf=51,6)˚C. Estabilizou em 15 Pa. Valor inicial de 5 Pa (água suja). Continuação do Experimento 2. Experimento 3. Desgaste total dos eletrodos

(Continua)

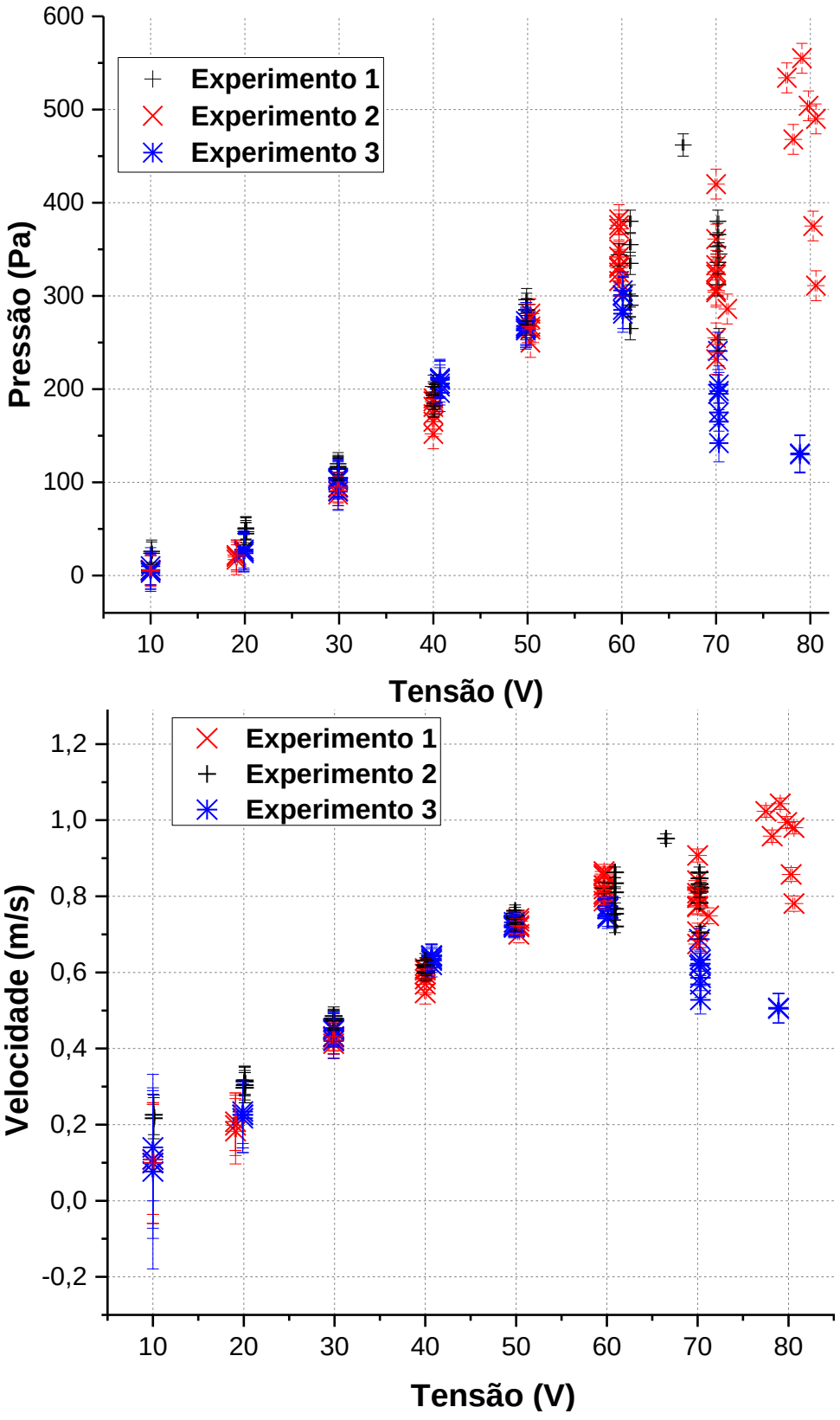
Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±20	Velocidade (m/s)
10,0	1,1	9,1	10	0,140±0,140
10,0	0,1	111,1	6	0,108±0,181
10,0	0,1	125,0	5	0,099±0,198
10,0	0,1	142,9	3	0,077±0,256
19,9	3,1	6,4	26	0,226±0,087
19,9	3,0	6,6	28	0,234±0,084
19,9	2,6	7,7	26	0,226±0,087
19,9	2,8	7,1	24	0,217±0,090
19,9	2,7	7,4	24	0,217±0,090
29,9	7,4	4,0	103	0,449±0,044
29,9	7,1	4,2	105	0,454±0,043
29,9	7,4	4,0	95	0,432±0,045
29,9	7,4	4,0	104	0,452±0,043
29,9	7,1	4,2	102	0,447±0,044
29,9	6,9	4,3	90	0,420±0,047
40,7	16,4	2,5	196	0,620±0,032
40,7	16,6	2,5	203	0,631±0,031
40,7	16,5	2,5	206	0,636±0,031
40,7	16,1	2,5	212	0,645±0,030
40,7	16,5	2,5	211	0,643±0,030
40,7	16,2	2,5	210	0,642±0,031
49,8	21,4	2,3	268	0,725±0,027
49,8	20,9	2,4	265	0,721±0,027
49,8	20,4	2,4	273	0,732±0,027
49,8	20,1	2,5	263	0,718±0,027
49,8	20,0	2,5	267	0,724±0,027
49,8	20,3	2,5	265	0,721±0,027
60,1	25,0	2,4	301	0,768±0,026

Tabela 5.20 - Variando tensão de 10 a 80 Volts (Ti = 39,6 ˚C Tf=51,6)˚C. Estabilizou em 15 Pa. Valor inicial de 5 Pa (água suja). Continuação do Experimento 2. Experimento 3. Desgaste total dos eletrodos

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±20	Velocidade (m/s)
60,1	24,2	2,5	306	0,775±0,025
60,1	23,7	2,5	285	0,748±0,026
60,1	22,9	2,6	300	0,767±0,026
60,1	21,8	2,8	281	0,742±0,026
70,2	17,6	4,0	241	0,687±0,029
70,3	16,1	4,4	198	0,623±0,031
70,3	16,4	4,3	205	0,634±0,031
70,2	14,0	5,0	195	0,618±0,032
70,3	13,2	5,3	175	0,586±0,033
70,3	12,7	5,5	165	0,569±0,034
70,3	10,1	7,0	142	0,528±0,037
78,9	10,0	7,9	131	0,507±0,039
78,9	9,2	8,6	130	0,505±0,039

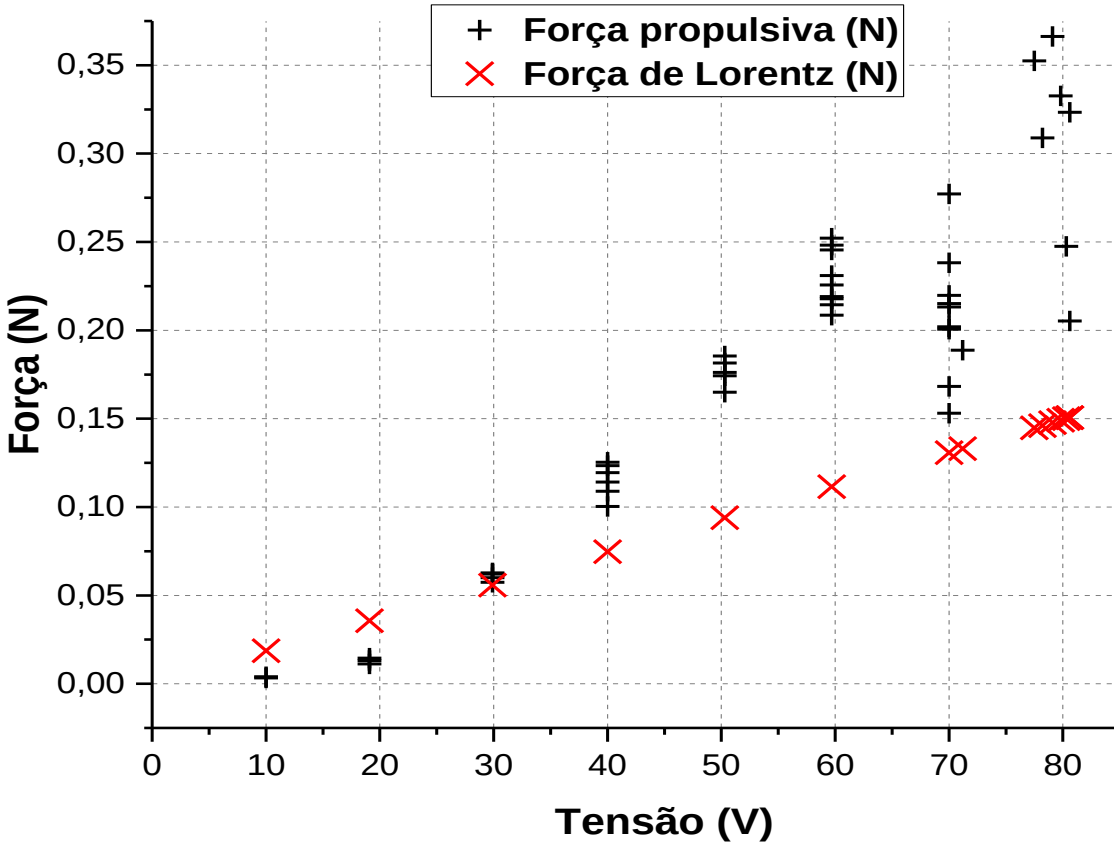
Figura 5.29 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 1,2 e 3



Fonte: do autor.

A Figura 5.29 mostra o aumento da pressão e da velocidade com o aumento da tensão. No entanto nota-se que a partir de cerca de 60 V esses valores começam a se dispersar e as flutuações aumentam gradativamente. Não se conseguiu ultrapassar os 70 V com o experimento 2, entendendo-se que os eletrodos não conseguiram demandar mais da fonte. A Figura 5.30 compara as forças de Lorentz e as forças propulsivas.

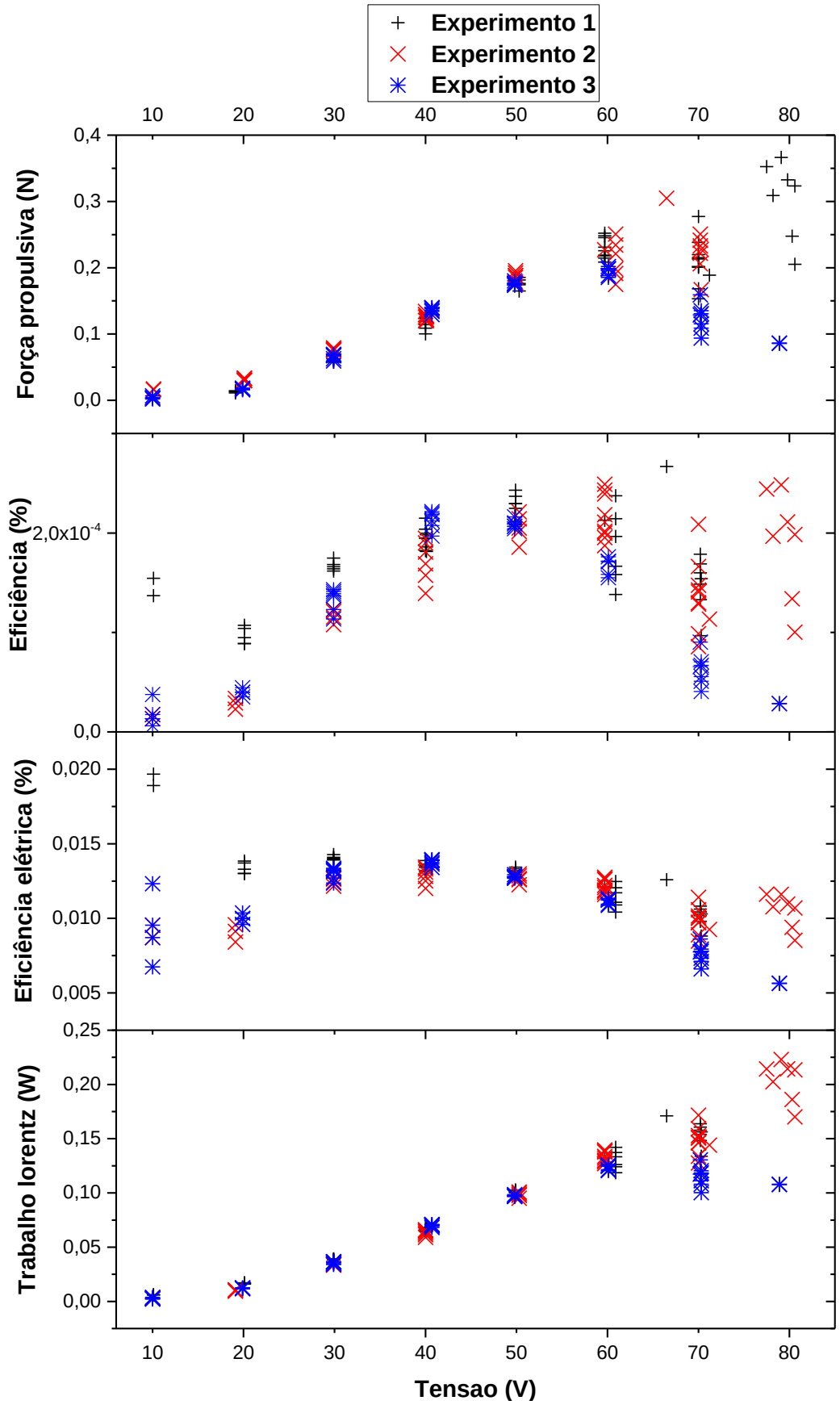
Figura 5.30 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 1



Fonte: do autor.

Note pela figura que a força propulsiva tende a melhorar a aumentarmos a tensão. Em 80 V a força propulsiva é mais que o dobro da força de Lorentz, quando se utilizada a equação 4.3 $r = (\text{força propulsiva}/\text{força de lorentz})$.

Figura 5.31 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimentos 1, 2 e 3



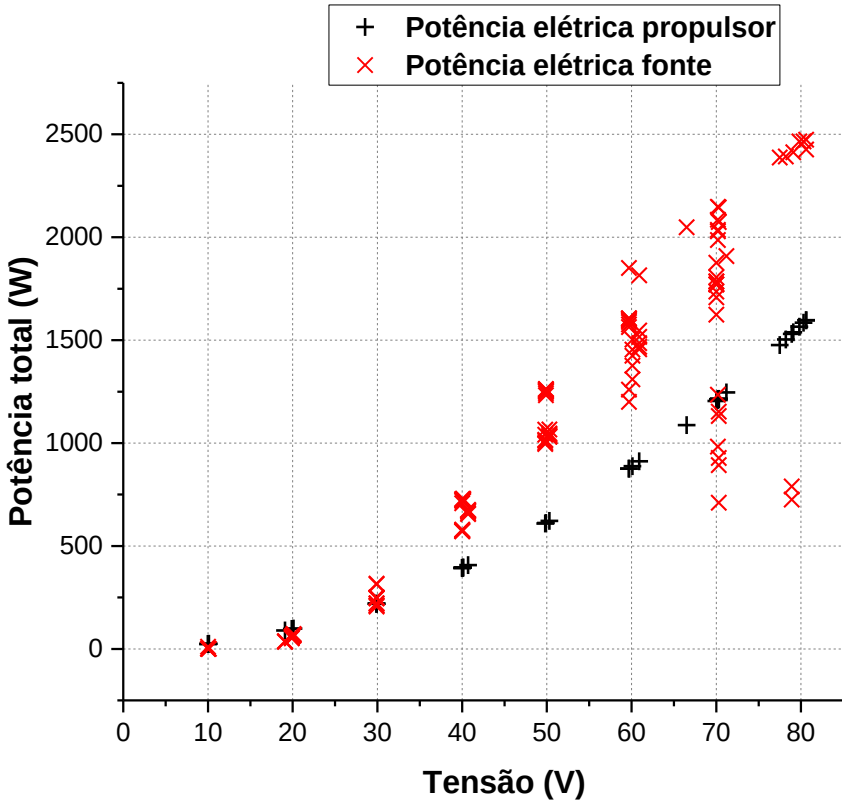
Fonte: do autor.

A

Figura *5.31* mostra que a força propulsiva aumenta com o aumento da tensão. Isto é uma tendência mais segura para o experimento 1 (água limpa, eletrodos recentes), havendo uma oscilação para o valor da tensão em torno de 60 V. Para os outros experimentos, a partir dos 60 V há uma tendência à constância e à diminuição da força, esta última tendência sendo observada para o experimento 3. Comportamentos semelhantes foram observados para a eficiência global do propulsor e da eficiência elétrica, cujos valores decaem para altas tensões, embora o ponto de máximo não seja atingido a 60 V (valores menores correspondem ao ponto de máximo).

A Figura 5.32, relaciona a potência elétrica do propulsor com a da fonte, note que os valores ficam bem próximos, indicando que há uma boa utilização da fonte. No entanto próximo dos 70 V ocorre uma discrepância. Isso pode estar relacionado ao desgaste dos eletrodos ou o aumento da resistência causando uma queda na potência.

Figura 5.32 – Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 1, 2 e 3



Fonte: do autor.

Tabela 5.21 - Variando tensão de 10 a 70 Volts e novamente10 (Ti = 25,3 ˚C Tf=46,1)˚C. Estabilizou em -6 Pa. Valor inicial de 2 Pa (água limpa). Experimento 4

(Continua)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±8	Velocidade (m/s)
10,0	2,2	4,5	18	0,188±0,083
10,0	1,6	6,3	15	0,171±0,091
10,0	1,4	7,1	12	0,153±0,102
10,0	1,1	9,1	5	0,099±0,158
20,0	3,2	6,3	25	0,221±0,071
20,0	3,2	6,3	31	0,247±0,064
20,0	3,1	6,5	25	0,221±0,071
30,0	10,7	2,8	97	0,436±0,036
30,0	10,7	2,8	101	0,445±0,035
30,0	10,7	2,8	95	0,432±0,036
30,0	10,7	2,8	93	0,427±0,037
40,0	18,4	2,2	165	0,569±0,028

40,0	18,5	2,2	163	0,565±0,028
40,0	18,4	2,2	171	0,579±0,027
40,0	18,5	2,2	160	0,560±0,028
40,1	18,6	2,2	176	0,587±0,027
50,2	26,3	1,9	237	0,682±0,023
50,2	26,5	1,9	245	0,693±0,023
50,2	26,5	1,9	254	0,706±0,022
50,2	25,9	1,9	251	0,702±0,022
60,1	30,9	1,9	275	0,734±0,021
70,8	29,8	2,4	264	0,719±0,022
71,2	30,8	2,3	140	0,524±0,030
70,6	31,2	2,3	224	0,663±0,024
71,5	29,2	2,4	202	0,629±0,025
71,5	30,8	2,3	257	0,710±0,022
Instável	Instável	instável	Instável	instável
47,9	30,9	1,6	187	0,606±0,026
47,8	30,9	1,5	178	0,591±0,027

Tabela 5.21 - Variando tensão de 10 a 70 Volts e novamente10 (Ti = 25,3 ˚C Tf=46,1)˚C. Estabilizou em -6 Pa. Valor inicial de 2 Pa (água limpa). Experimento 4

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±8	Velocidade (m/s)
47,7	30,9	1,5	145	0,533±0,029
46,8	30,8	1,5	190	0,610±0,026
39,5	23,4	1,7	143	0,530±0,030
39,5	23,3	1,7	123	0,491±0,032
31,1	17,0	1,8	52	0,319±0,049
31,1	16,9	1,8	88	0,415±0,038
31,1	17,1	1,8	84	0,406±0,039
31,1	17,0	1,8	73	0,378±0,041
31,1	17,0	1,8	99	0,441±0,036
20,8	5,3	3,9	35	0,262±0,060
20,8	5,1	4,1	33	0,254±0,062
20,8	5,2	4,0	40	0,280±0,056

10,7	1,6	6,7	3	0,077±0,205
10,7	1,7	6,3	0	instável
10,7	1,7	6,3	4	0,089±0,177

Tabela 5.22 - Variando tensão de 10 a 50 Volts (Ti = 39,6 ˚C Tf=41,8)˚C. Estabilizou em 16 Pa. Valor inicial de -3 Pa (água suja). Continuação do experimento 4. Experimento 5

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±19	Velocidade (m/s)
0,0	0,0	0,0	-3	instável
10,1	1,9	5,3	23	0,212±0,055
10,1	1,8	5,6	21	0,203±0,058
10,1	1,8	5,6	16	0,177±0,066
20,1	4,8	4,2	35	0,262±0,045
20,1	4,8	4,2	44	0,294±0,040
20,1	5,0	4,0	46	0,300±0,039
30,2	15,3	2,0	140	0,524±0,022
30,2	15,2	2,0	150	0,542±0,022
30,2	15,2	2,0	155	0,551±0,021
30,2	15,2	2,0	145	0,533±0,022
40,0	24,9	1,6	245	0,693±0,017

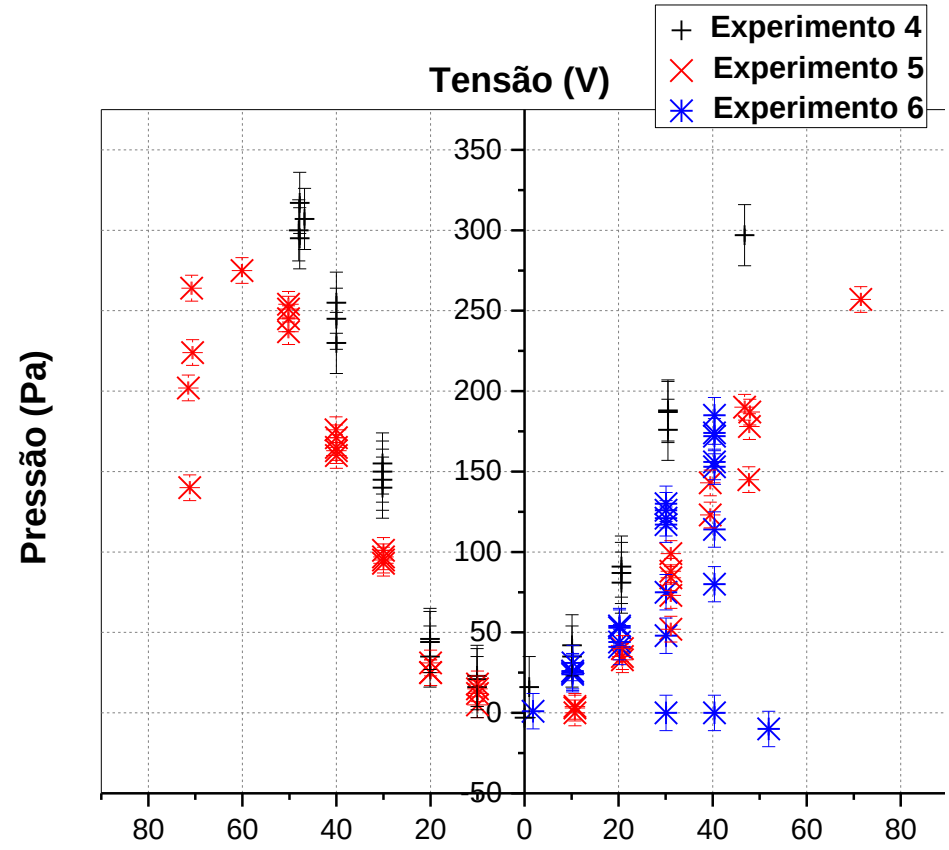
40,0	24,7	1,6	255	0,707±0,017
40,0	24,6	1,6	230	0,672±0,018
48,0	30,8	1,6	300	0,767±0,015
47,8	30,8	1,6	317	0,788±0,015
47,8	30,8	1,6	295	0,761±0,015
46,8	30,8	1,5	307	0,776±0,015
46,8	30,8	1,5	297	0,763±0,015
30,5	15,7	1,9	187	0,606±0,019
30,5	15,7	1,9	176	0,587±0,020
30,5	15,8	1,9	188	0,607±0,019
20,6	5,6	3,7	91	0,422±0,028
20,6	5,5	3,7	87	0,413±0,028
20,6	5,4	3,8	81	0,399±0,030
10,1	1,5	6,7	42	0,287±0,041
10,1	1,6	6,3	35	0,262±0,045
1,0	0,0	100,0	16	0,177±0,066

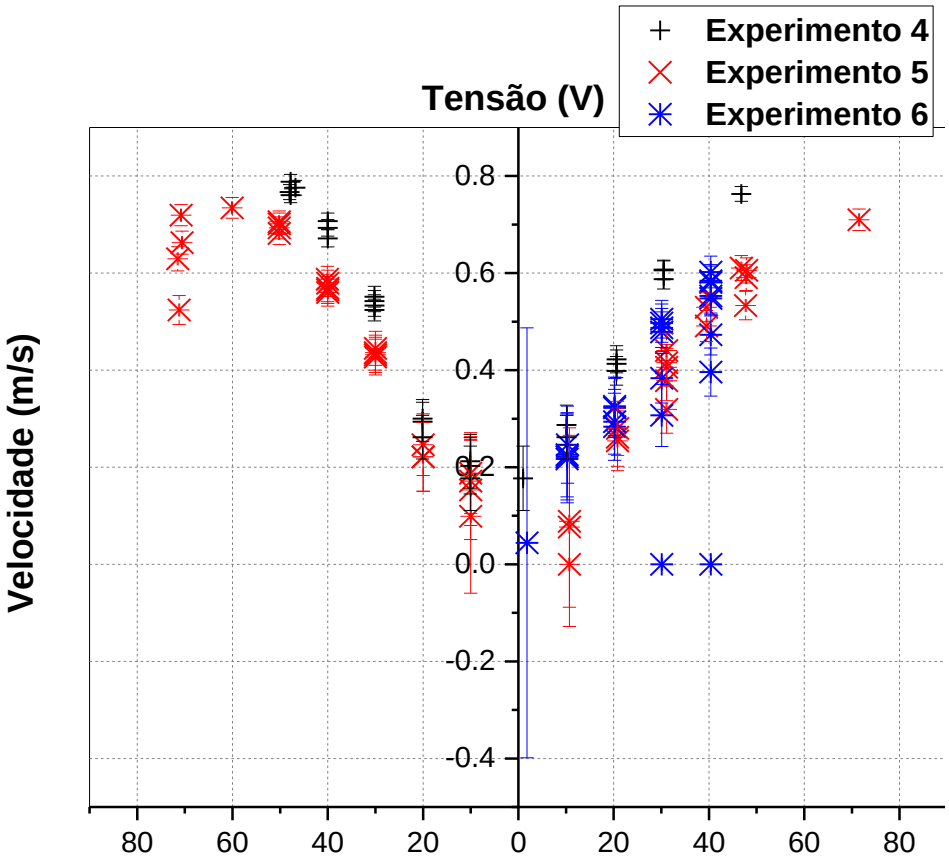
Tabela 5.23 - Variando tensão de 10 a 50 Volts (Ti = 39,7 ˚C Tf=41,1)˚C. Estabilizou em 10 Pa. Valor inicial de 1 Pa (água suja). Continuação Experimento 5. Experimento 6. Desgaste total dos eletrodos

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±11	Velocidade (m/s)
1,8	0,06	30,0	1	0,044±0,443
10,3	1,4	7,4	31	0,247±0,080
10,2	1,3	7,8	25	0,221±0,089
10,2	1,3	7,8	26	0,226±0,087
10,2	1,3	7,8	24	0,217±0,090
20,2	3,8	5,3	53	0,322±0,061
20,2	3,6	5,6	44	0,294±0,067
20,2	3,5	5,8	54	0,325±0,060
20,2	3,1	6,5	41	0,284±0,069
30,1	8,6	3,5	75	0,383±0,051
30,1	8,0	3,8	48	0,307±0,064
30,1	10,6	2,8	0	instável

30,1	10,6	2,8	130	0,505±0,039
30,1	10,4	2,9	117	0,479±0,041
30,1	10,8	2,8	121	0,487±0,040
30,1	10,3	2,9	126	0,497±0,039
40,4	15,6	2,6	156	0,553±0,035
40,4	16,1	2,5	114	0,473±0,041
40,4	14,3	2,8	80	0,396±0,050
40,4	16,1	2,5	0	instável
40,4	16,2	2,5	185	0,602±0,033
40,4	15,9	2,5	174	0,584±0,034
40,4	14,8	2,7	172	0,581±0,034
40,4	14,6	2,8	153	0,548±0,036
51,9	13,4	3,9	-10	instável

Figura 5.33 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 4,5 e 6

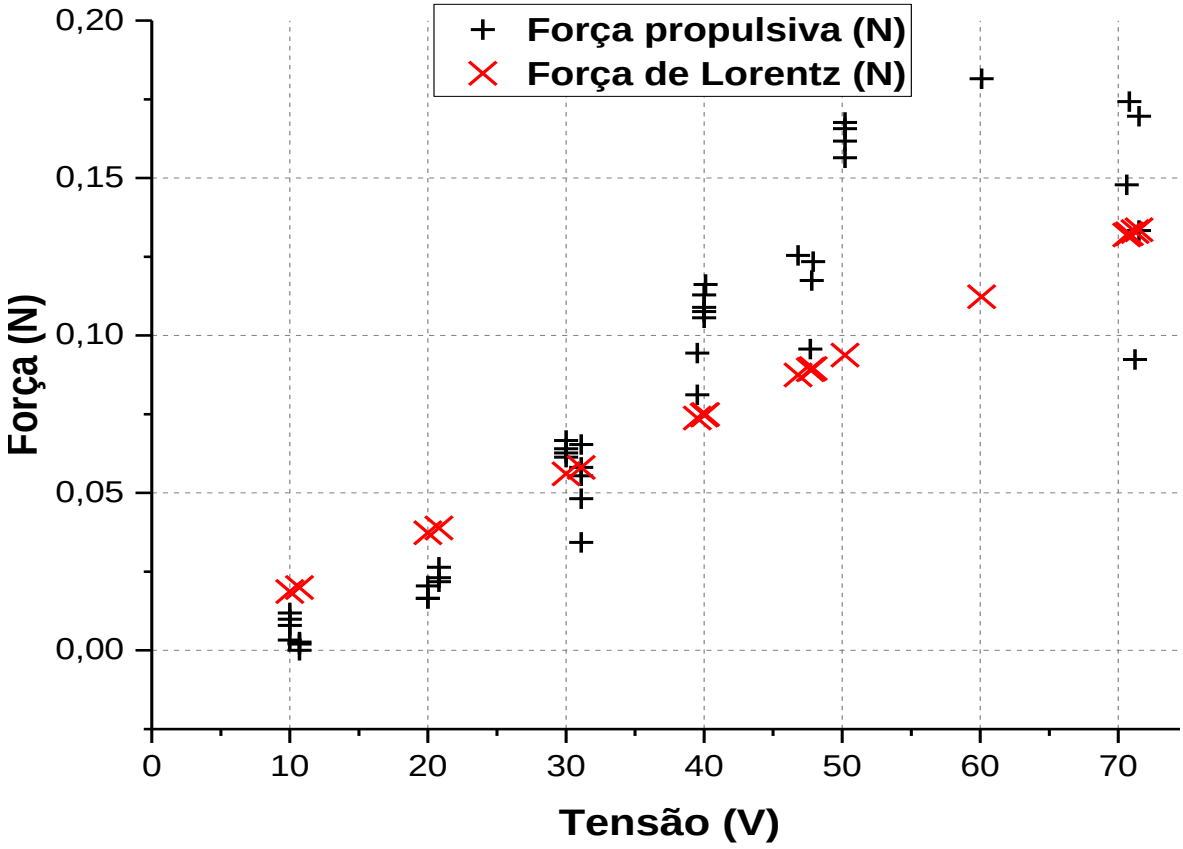




Fonte: do autor.

Na Figura 5.33 e Figura 5.35 e nas figuras seguintes do presente estudo, lê-se os gráficos da seguinte maneira: cada experimento tabelado foi realizado partindo-se da tensão mínima, no caso zero, e foi alterando seu valor até a tensão máxima (lado direito dos gráficos). A partir desse ponto diminui-se novamente a tensão até chegar ao seu valor mínimo (lado esquerdo dos gráficos). Note-se que o experimento 6 não possui dados no lado esquerdo dos gráficos, porque houve o desgaste total dos eletrodos antes que se pudesse efetuar esta parte dos procedimentos (diminuição da tensão até zero para o experimento 6).

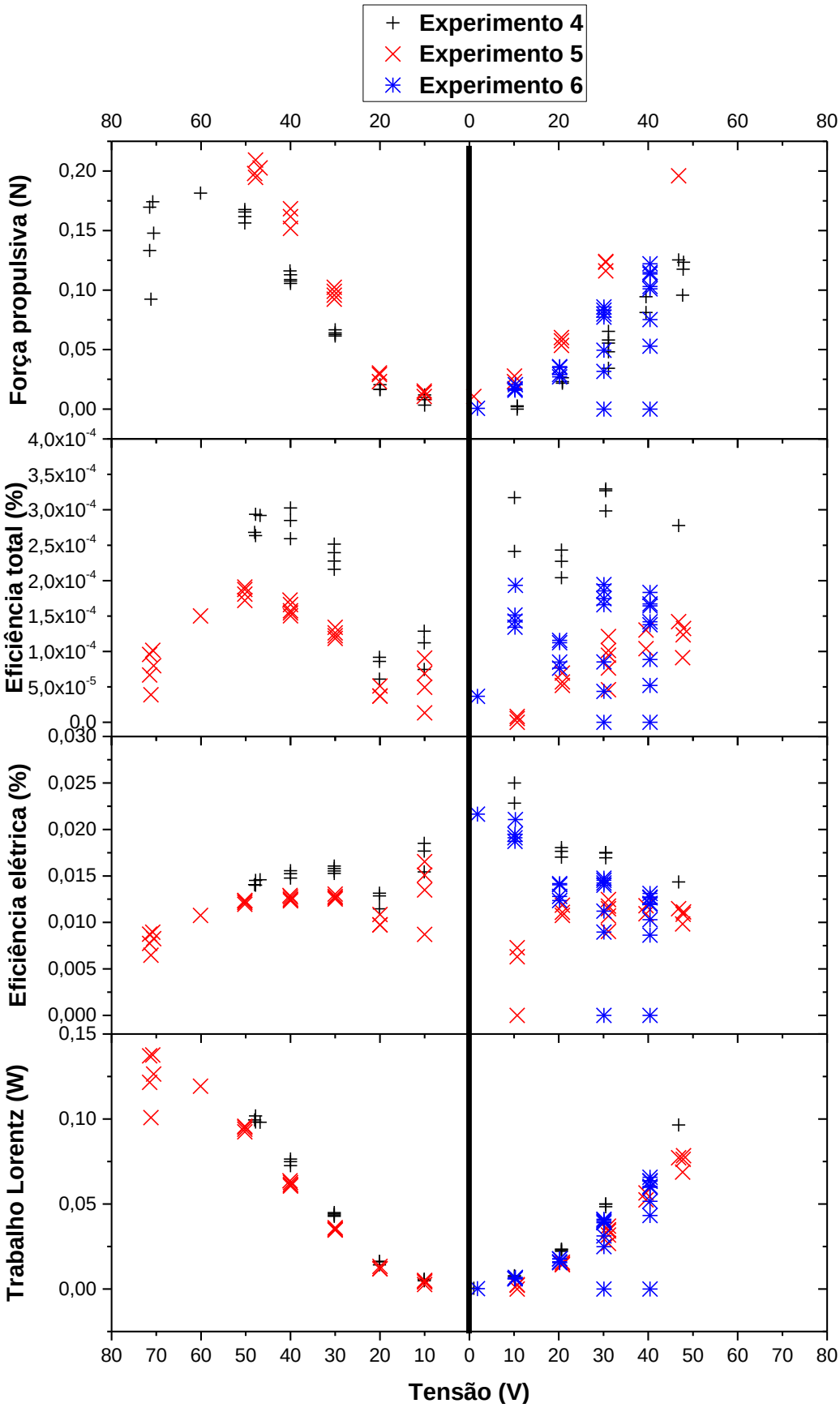
Figura 5.34 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 4



Fonte: do autor.

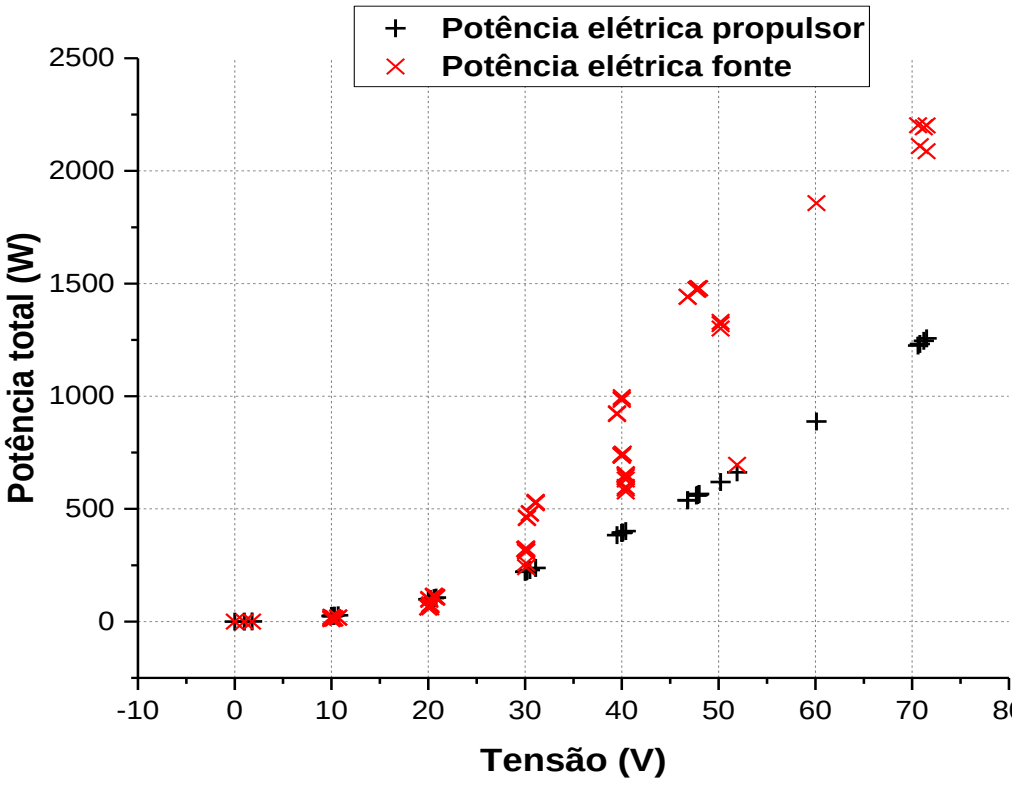
Aqui a força propulsiva para altas tensões é em torno de 1,5 maior que a força de Lorentz. No entanto ela é inferior até os 20 V.

Figura 5.35 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimentos 4, 5 e 6



Fonte: do autor.

Figura 5.36 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 4, 5 e 6



Fonte: do autor.

Novamente, agora na Figura 5.36, é possível ver que as curvas são bem similares até os 30 V, atendendo a relação $VI_{fonte} = \sigma V^2 L_e H_e / W_e$.

Tabela 5.24 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10 (Ti = 24,7 ˚C Tf=33,5)˚C. Estabilizou em -6 Pa. Valor inicial de -2 Pa (água limpa). Experimento 7

(Continua)

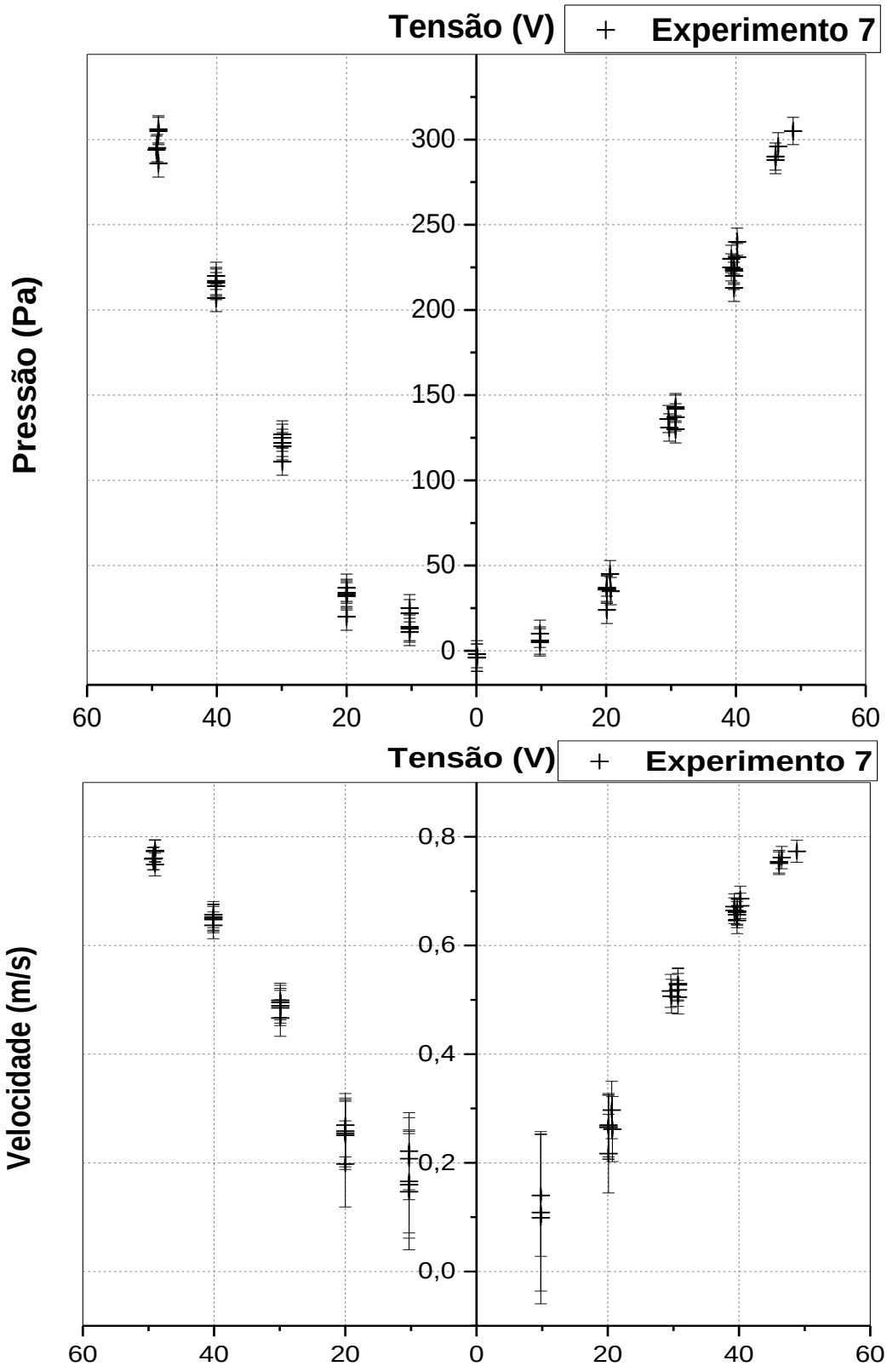
Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±8	Velocidade (m/s)
10,3	2,6	4,0	25	0,221±0,071
10,3	2,3	4,5	22	0,208±0,076
10,3	2,1	4,9	13	0,160±0,098
10,3	1,9	5,4	14	0,166±0,095
10,3	1,8	5,7	11	0,147±0,107
20,0	4,2	4,8	32	0,250±0,063
20,0	4,2	4,8	37	0,269±0,058
20,0	4,1	4,9	34	0,258±0,061
20,0	4,1	4,9	20	0,198±0,079
20,0	4,0	5,0	33	0,254±0,062
29,9	13,2	2,3	127	0,499±0,031
29,9	13,2	2,3	125	0,495±0,032
29,9	13,3	2,2	120	0,485±0,032
29,9	13,2	2,3	111	0,467±0,034
29,9	13,2	2,3	122	0,489±0,032
40,1	22,5	1,8	207	0,637±0,025
40,1	22,5	1,8	220	0,657±0,024
40,1	22,5	1,8	217	0,652±0,024
40,1	22,6	1,8	214	0,648±0,024
40,1	22,5	1,8	216	0,651±0,024
49,2	30,9	1,6	295	0,761±0,021
49,0	30,9	1,6	286	0,749±0,021
49,3	30,9	1,6	294	0,759±0,021
49,0	30,9	1,6	306	0,775±0,020
49,0	30,9	1,6	305	0,773±0,020
48,8	30,9	1,6	305	0,773±0,020
39,7	23,2	1,7	213	0,646±0,024
39,7	23,3	1,7	220	0,657±0,024
39,7	23,5	1,7	223	0,661±0,024

Tabela 5.24 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10 (Ti = 24,7 ˚C Tf=33,5)˚C. Estabilizou em -6 Pa. Valor inicial de -2 Pa (água limpa). Experimento 7

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±8	Velocidade (m/s)
39,7	23,7	1,7	224	0,663±0,024
30,7	15,4	2,0	130	0,505±0,031
30,7	15,4	2,0	142	0,528±0,030
30,7	15,5	2,0	137	0,518±0,030
30,7	15,5	2,0	143	0,530±0,030
20,1	4,7	4,3	36	0,266±0,059
20,1	4,7	4,3	24	0,217±0,072
20,1	4,6	4,4	36	0,266±0,059
20,1	4,6	4,4	37	0,269±0,058
9,8	1,4	7,0	10	0,140±0,112
9,8	1,3	7,5	5	0,099±0,158
9,8	1,3	7,5	6	0,108±0,145
0,1	0,0	9,0	-2	instável
0,1	0,0	8,0	-4	instável
29,6	14,5	2,0	136	0,516±0,030
29,7	14,6	2,0	131	0,507±0,031
40,2	24,7	1,6	240	0,686±0,023
40,2	25	1,6	231	0,673±0,023
46,1	30,8	1,5	290	0,754±0,021
46,1	30,8	1,5	288	0,751±0,021
46,5	30,8	1,5	296	0,762±0,021
39,3	25,0	1,6	225	0,664±0,024
39,3	25,0	1,6	230	0,672±0,023
20,7	5,8	3,6	35	0,262±0,060
20,6	5,7	3,6	45	0,297±0,053
0,08	0,0	8,0	-4	instável

Figura 5.37 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 7

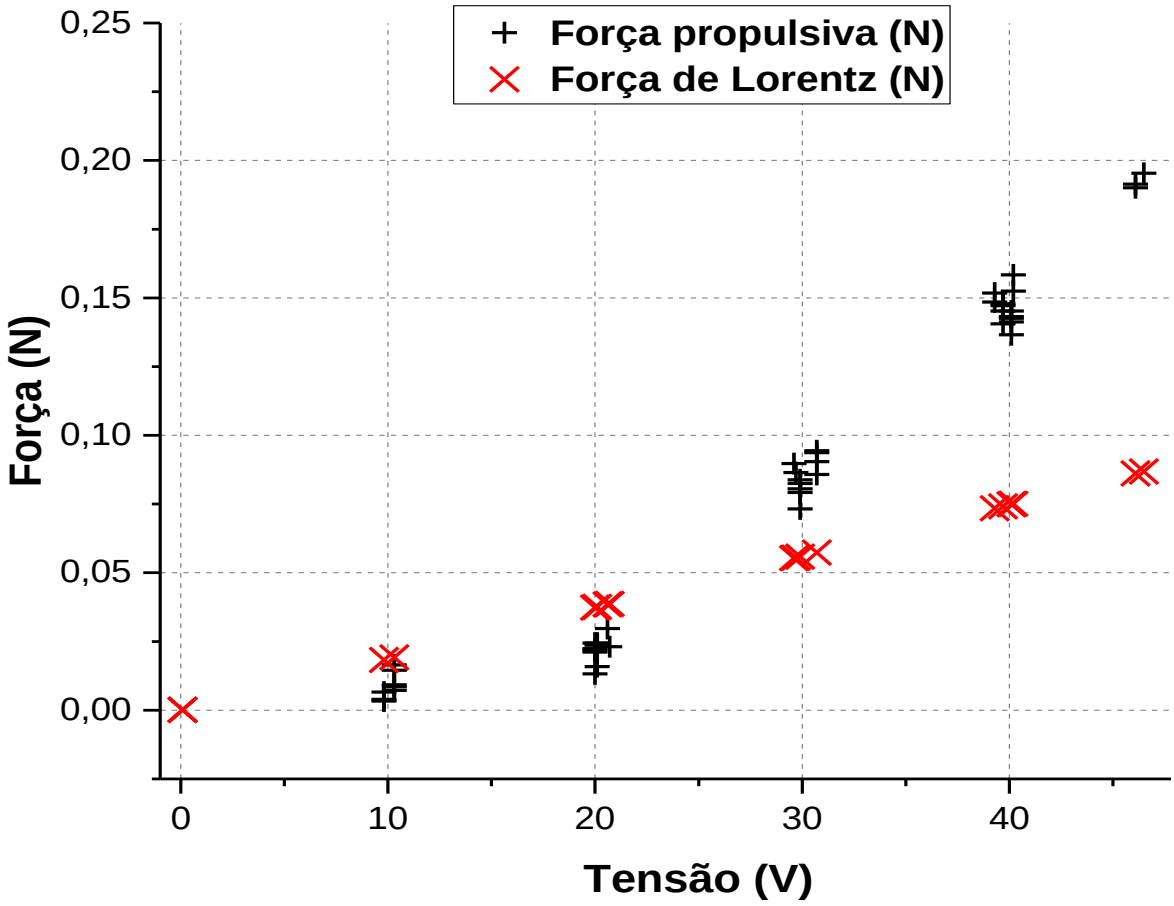


Fonte: do autor.

A Figura 5.37 mostra o experimento 7, que foi denominado de “contínuo” porque se ligou a fonte com tensão nula (zero V) e aumentou seu valor até o máximo

em torno de 50 V, diminuindo em seguida. Isto foi feito duas vezes. Ao contrário dos experimentos 6, 5 e 4 não houve um intervalo entre os testes. No presente ensaio é possível notar que os erros tendem a ser maiores com tensões baixas.

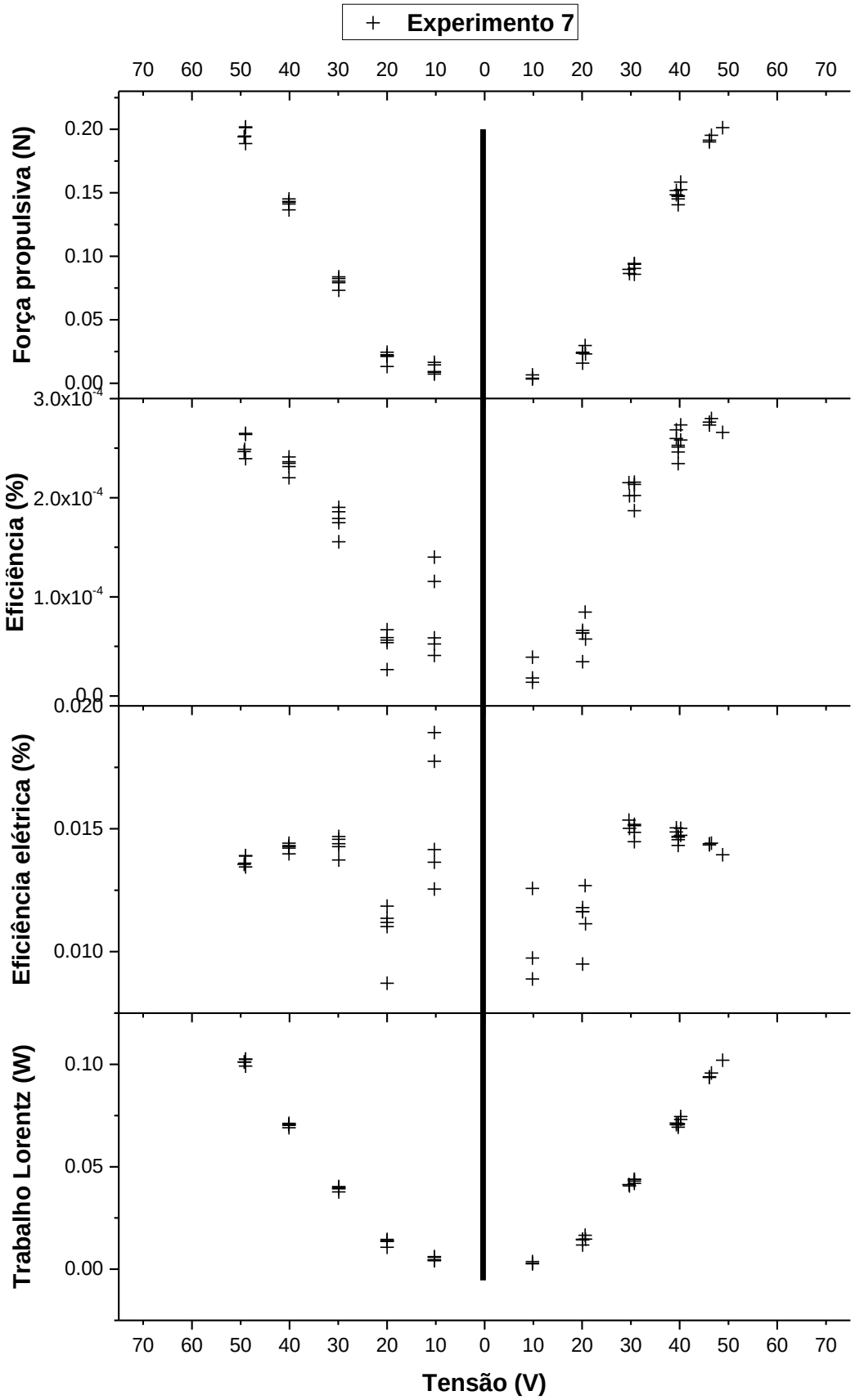
Figura 5.38 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 7



Fonte: do autor.

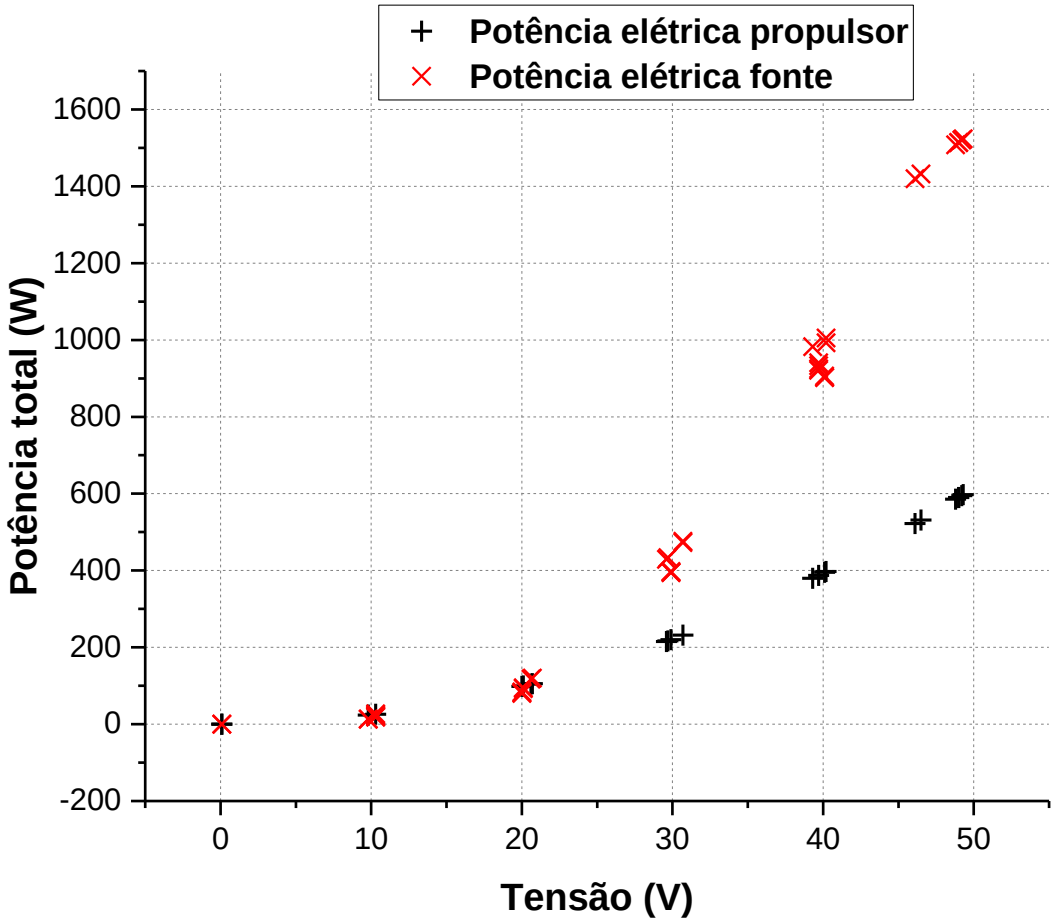
Na Figura 5.38 apesar da tensão ser próxima a zero, não há propulsão.

Figura 5.39 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimento 7



Fonte: do autor.

Figura 5.40 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimento 7



Fonte: do autor.

5.5.2. Eletrodos 15mm por 40mm. Condutividade 7,91 S/m

Tabela 5.25 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente10 (Ti = 25,5 ˚C Tf=30,7)˚C. Estabilizou em 1 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água limpa). Experimento 8

(Continua)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±1	Velocidade (m/s)
10,0	0,1	111,1	16	0,177±0,188
10,0	0,1	125,0	11	0,147±0,227
10,0	0,1	142,9	8	0,125±0,266
10,0	0,1	200,0	6	0,108±0,307
10,0	0,1	125,0	5	0,099±0,337
20,1	2,8	7,2	27	0,230±0,145
20,1	2,8	7,2	23	0,212±0,157
20,1	2,8	7,2	27	0,230±0,145
20,1	2,8	7,2	24	0,217±0,154
30,1	11,9	2,5	87	0,413±0,081
30,1	11,6	2,6	105	0,454±0,073
30,1	11,7	2,6	102	0,447±0,075
30,0	11,8	2,5	119	0,483±0,069
30,1	11,9	2,5	95	0,432±0,077
40,1	20,2	2,0	175	0,586±0,057
40,1	20,4	2,0	177	0,589±0,057
40,1	20,4	2,0	196	0,620±0,054
40,1	20,5	2,0	201	0,628±0,053
40,1	20,5	2,0	182	0,597±0,056
50,1	29,0	1,7	242	0,689±0,048
50,0	28,9	1,7	265	0,721±0,046
50,0	29,9	1,7	283	0,745±0,045
50,1	30,1	1,7	294	0,759±0,044
50,1	30,1	1,7	288	0,751±0,044
50,0	30,2	1,7	310	0,780±0,043
40,0	21,8	1,8	174	0,584±0,057
39,8	21,8	1,8	207	0,637±0,052

Tabela 5.25 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente10 (Ti = 25,5 ˚C Tf=30,7)˚C. Estabilizou em 1 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água limpa). Experimento 8

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±1	Velocidade (m/s)
39,8	21,8	1,8	200	0,626±0,053
30,0	13,1	2,3	115	0,475±0,070
30,0	13,2	2,3	111	0,467±0,071
30,0	13,2	2,3	126	0,497±0,067
20,0	3,7	5,4	30	0,243±0,137
20,0	3,5	5,7	22	0,208±0,160
10,0	0,0	250,0	1	0,044±0,753
0,0	0,0	0,0	-1	instável

Tabela 5.26 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 novamente (Ti = 29,6 ˚C Tf=34,4)˚C. Estabilizou em 1 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água suja). Continuação do experimento 8. Experimento 9

(Continua)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±1	Velocidade (m/s)
10,1	0,0	252,5	3	0,077±0,230
10,2	0,0	255,0	3	0,077±0,230
10,3	0,0	257,5	3	0,077±0,230
10,1	0,0	252,5	2	0,063±0,282
20,0	3,9	5,1	38	0,273±0,065
20,0	3,9	5,1	42	0,287±0,061
20,0	3,8	5,3	38	0,273±0,065
20,0	3,7	5,4	34	0,258±0,068
20,0	3,6	5,6	35	0,262±0,067
20,0	3,6	5,6	36	0,266±0,066
30,0	13,2	2,3	114	0,473±0,037
30,0	13,2	2,3	119	0,483±0,037
30,0	13,2	2,3	99	0,441±0,040
30,0	13,2	2,3	106	0,456±0,039
30,0	13,2	2,3	88	0,415±0,042
39,9	21,9	1,8	188	0,607±0,029
39,9	22,0	1,8	231	0,673±0,026
39,9	22,0	1,8	191	0,612±0,029
39,9	22,1	1,8	184	0,601±0,029
39,9	22,0	1,8	220	0,657±0,027
39,9	22,3	1,8	194	0,617±0,029
49,4	30,2	1,6	281	0,742±0,024
49,3	30,2	1,6	241	0,687±0,026
49,0	30,2	1,6	286	0,749±0,024
48,8	30,2	1,6	291	0,755±0,023
49,3	30,2	1,6	287	0,750±0,024
40,2	21,1	1,9	198	0,623±0,028
40,2	23,2	1,7	204	0,632±0,028
40,2	23,2	1,7	151	0,544±0,032

Tabela 5.26 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 novamente (Ti = 29,6 ˚C Tf=34,4)˚C. Estabilizou em 1 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água suja). Continuação do experimento 8. Experimento 9

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±1	Velocidade (m/s)
40,2	22,9	1,8	161	0,562±0,031
30,0	14,0	2,1	92	0,425±0,042
30,0	14,0	2,1	105	0,454±0,039
30,0	14,0	2,1	113	0,471±0,037
30,0	14,0	2,1	108	0,460±0,038
20,1	4,1	4,9	33	0,254±0,069
20,1	4,0	5,0	32	0,250±0,070
20,1	4,0	5,0	28	0,234±0,075
20,0	3,9	5,1	31	0,247±0,072
10,0	0,1	200,0	3	0,077±0,230
10,0	0,0	250,0	1	0,044±0,399

Tabela 5.27 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10volts (Ti = 33,1 ˚C Tf=37,7)˚C. Estabilizou em -3 Pa. Valor inicial de 1 Pa (água suja). Continuação do experimento 9. E Experimento 10. Desgaste total dos eletrodos

(Continua)

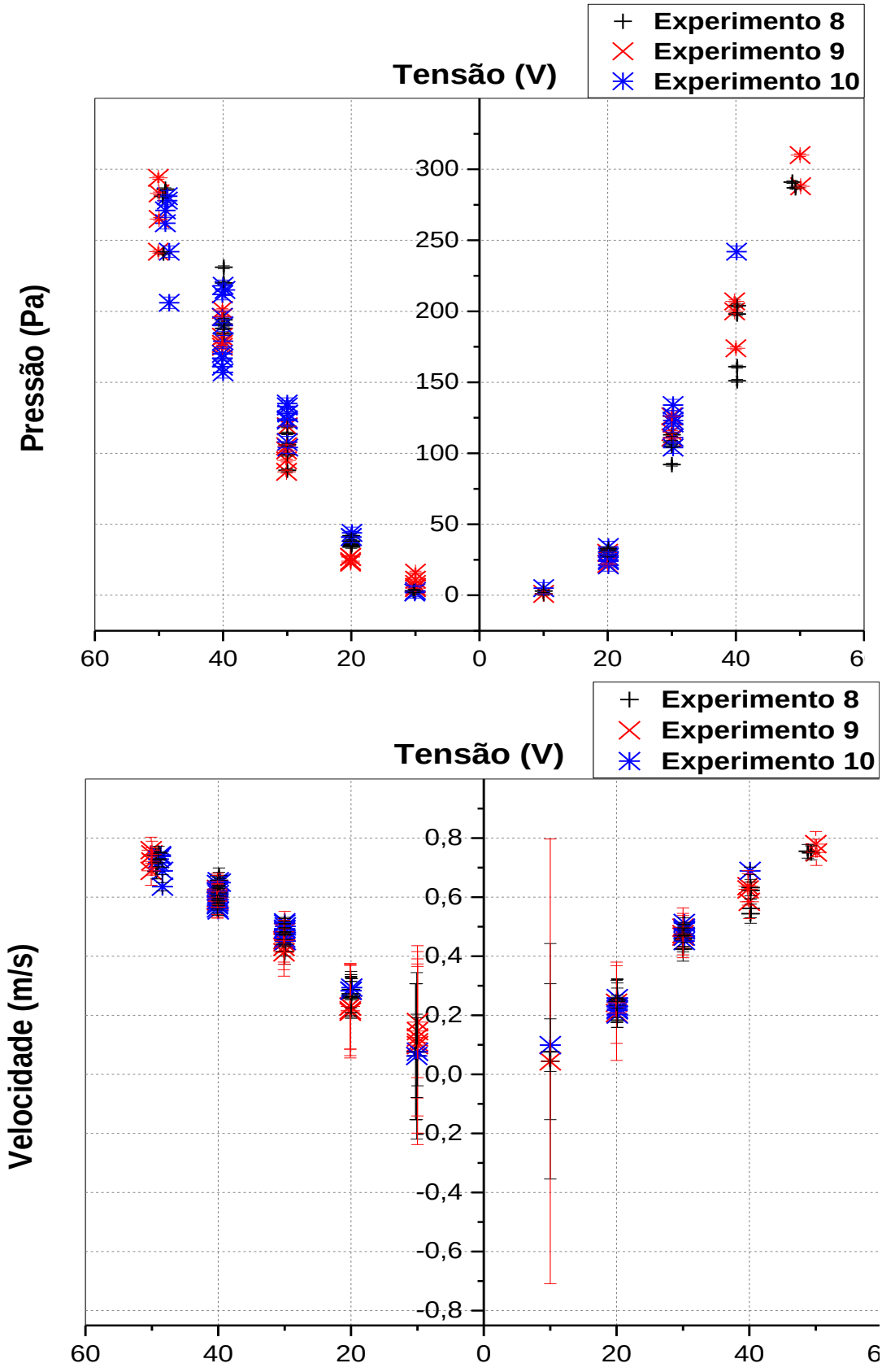
Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±4	Velocidade (m/s)
10,0	0,1	200,0	3	0,077±0,115
10,1	0,1	202,0	2	0,063±0,141
20,0	4,1	4,9	41	0,284±0,031
19,9	4,0	5,0	44	0,294±0,030
20,0	3,9	5,1	41	0,284±0,031
30,0	13,6	2,2	135	0,514±0,017
30,0	13,6	2,2	123	0,491±0,018
30,0	13,6	2,2	108	0,460±0,019
30,0	13,6	2,2	124	0,493±0,018
30,0	13,6	2,2	133	0,511±0,017
29,9	13,5	2,2	104	0,452±0,020
29,9	13,5	2,2	128	0,501±0,018
40,1	22,6	1,8	170	0,577±0,015
40,0	22,7	1,8	179	0,592±0,015
40,1	22,7	1,8	161	0,562±0,016
40,1	22,6	1,8	196	0,620±0,014
40,1	22,5	1,8	212	0,645±0,014
48,4	30,2	1,6	206	0,636±0,014
48,4	30,2	1,6	242	0,689±0,013
48,7	30,2	1,6	281	0,742±0,012
48,7	30,2	1,6	278	0,738±0,012
49,0	30,2	1,6	262	0,717±0,012
49,0	30,2	1,6	271	0,729±0,012
39,7	22,8	1,7	215	0,649±0,014
40,0	23,0	1,7	157	0,555±0,016
40,0	23,0	1,7	190	0,610±0,014
40,1	23,1	1,7	167	0,572±0,015
40,0	23,3	1,7	218	0,654±0,013
40,1	23,2	1,7	242	0,689±0,013

Tabela 5.27 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10volts (Ti = 33,1 ˚C Tf=37,7)˚C. Estabilizou em -3 Pa. Valor inicial de 1 Pa (água suja). Continuação do experimento 9. E Experimento 10. Desgaste total dos eletrodos

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±4	Velocidade (m/s)
30,2	14,2	2,1	134	0,513±0,017
30,2	14,2	2,1	126	0,497±0,018
30,2	14,2	2,1	121	0,487±0,018
30,2	14,2	2,1	104	0,452±0,020
30,2	14,2	2,1	123	0,491±0,018
30,2	14,2	2,1	111	0,467±0,019
20,1	4,2	4,8	24	0,217±0,041
20,1	4,1	4,9	34	0,258±0,034
20,1	4,0	5,0	21	0,203±0,043
20,1	4,0	5,0	27	0,230±0,038
20,1	4,1	4,9	25	0,221±0,040
10,0	0,1	200,0	5	0,099±0,089
9,9	0,1	198,0	-2	instável

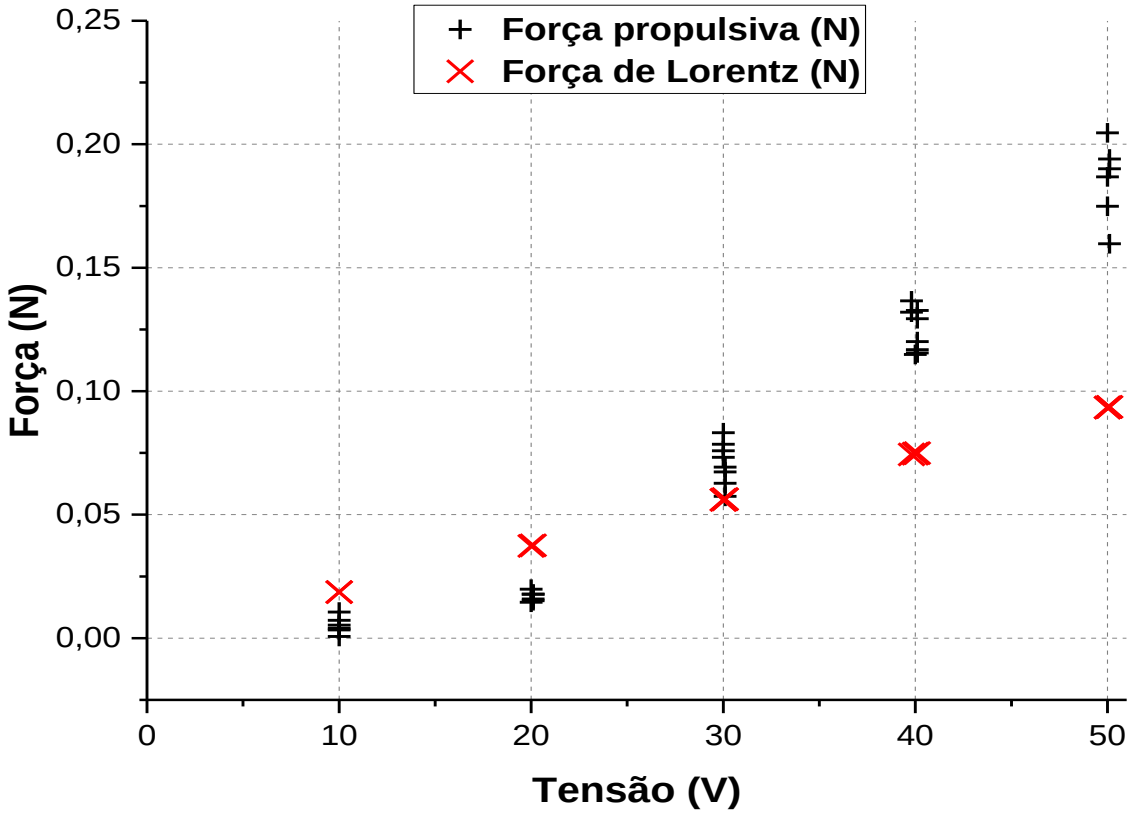
Figura 5.41 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 8,9 e 10



Fonte: do autor.

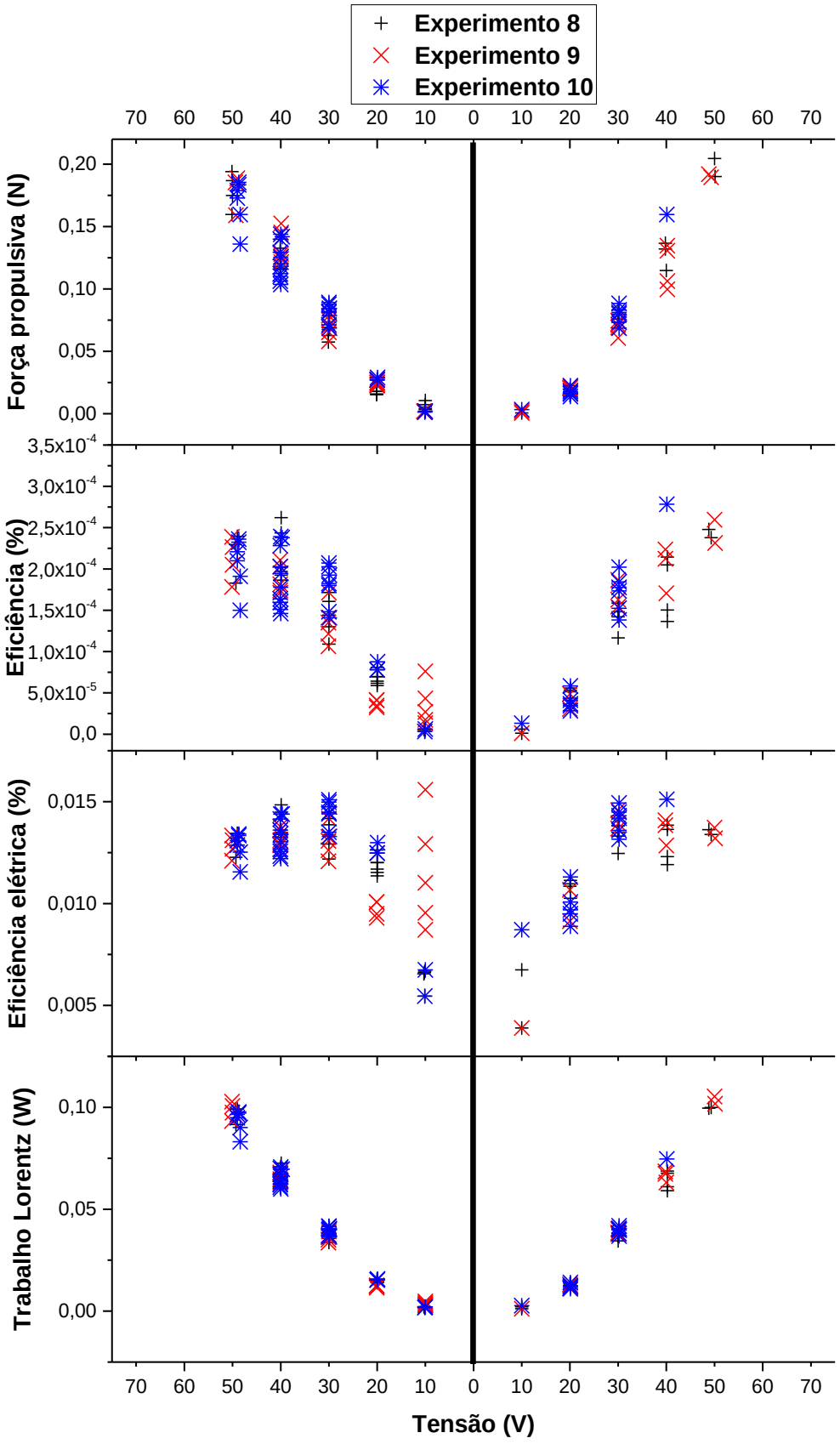
Os gráficos para os experimentos 8, 9 e 10 seguem o padrão dos gráficos anteriores. É interessante observar nas Figura 5.41 e 5.31 que um dos experimentos apresentou um erro significativo para as baixas tensões. Não se tem a causa deste erro, mas manteve-se o experimento para mostrar qual o tipo de oscilação a que tal estudo pode estar sujeito.

Figura 5.42 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 8



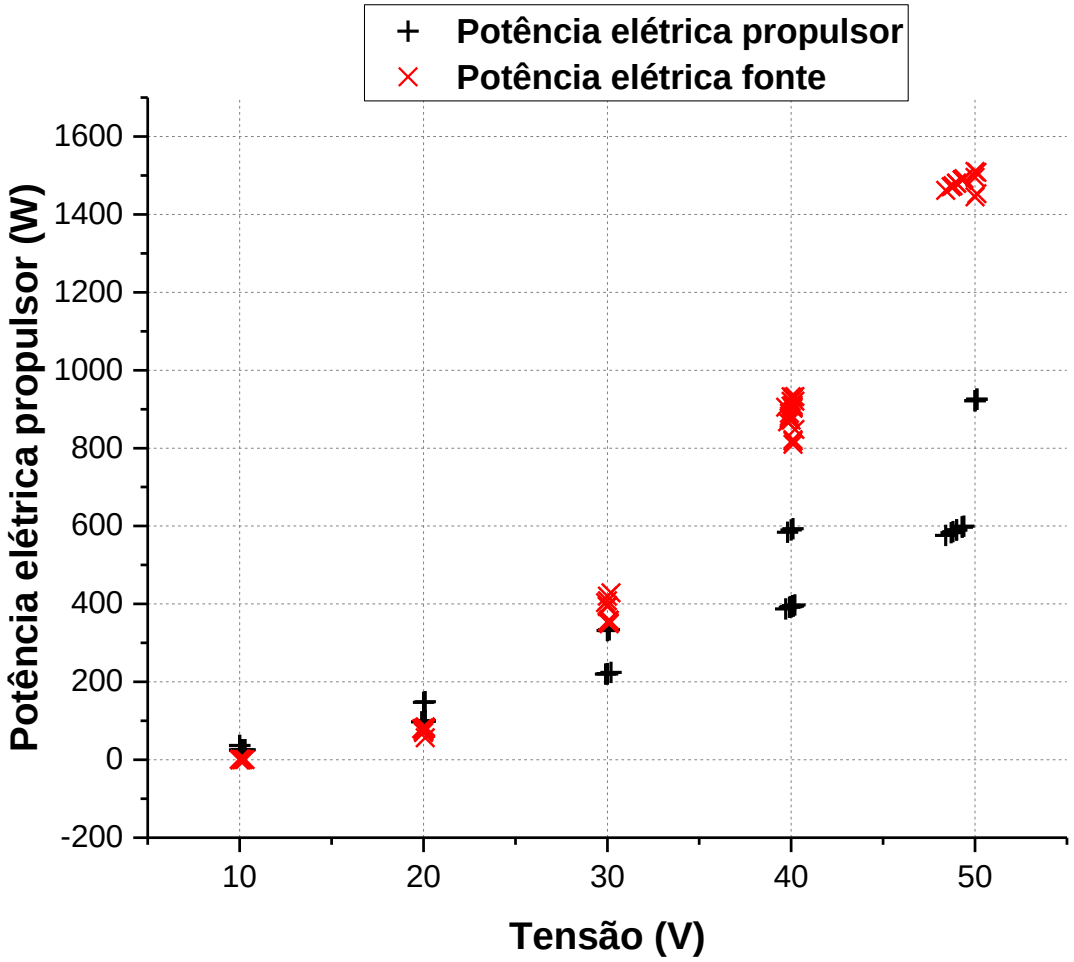
Fonte: do autor.

Figura 5.43 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimento 8, 9 e 10



Fonte: do autor.

Figura 5.44 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 8, 9 e 10



Fonte: do autor.

Tabela 5.28 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10 (Ti = 27,9 ˚C Tf=32,3)˚C. Estabilizou em -1 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água limpa). Experimento 11

(Continua)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±1	Velocidade (m/s)
10,2	2,2	4,6	15	0,171±0,194
10,2	1,8	5,7	8	0,125±0,266
10,2	1,3	7,8	8	0,125±0,266
20,1	3,4	5,9	13	0,160±0,209
20,1	3,4	5,9	23	0,212±0,157
20,1	3,2	6,3	17	0,183±0,183
20,1	3,4	5,9	33	0,254±0,131
30,2	12,3	2,5	97	0,436±0,076
30,2	12,4	2,4	106	0,456±0,073
30,2	12,3	2,5	67	0,362±0,092
30,2	12,5	2,4	84	0,406±0,082
30,2	12,5	2,4	70	0,370±0,090
40,0	21,1	1,9	145	0,533±0,063
40,0	21,2	1,9	172	0,581±0,057
40,0	21,0	1,9	125	0,495±0,067
40,0	21,2	1,9	196	0,620±0,054
50,0	29,9	1,7	262	0,717±0,047
50,0	29,9	1,7	226	0,666±0,050
50,0	29,8	1,7	216	0,651±0,051
50,1	29,9	1,7	200	0,626±0,053
49,7	30,2	1,6	235	0,679±0,049
50,1	30,1	1,7	203	0,631±0,053
39,9	21,8	1,8	100	0,443±0,075
39,9	21,8	1,8	153	0,548±0,061
39,9	22,1	1,8	145	0,533±0,063
39,9	22,1	1,8	173	0,582±0,057
30,0	13,6	2,2	94	0,429±0,078
30,0	13,6	2,2	104	0,452±0,074
30,0	13,6	2,2	96	0,434±0,077

Tabela 5.28 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10 (Ti = 27,9 ˚C Tf=32,3)˚C. Estabilizou em -1 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água limpa). Experimento 11

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±1	Velocidade (m/s)
30,0	13,6	2,2	112	0,469±0,071
30,1	13,6	2,2	104	0,452±0,074
30,1	13,7	2,2	111	0,467±0,071
19,9	3,6	5,5	35	0,262±0,127
19,9	3,4	5,9	27	0,230±0,145
19,9	3,3	6,0	18	0,188±0,177
19,9	3,3	6,0	22	0,208±0,160
10,1	0,1	168,3	6	0,108±0,307
10,0	0,1	200,0	5	0,010±0,337
0,1	0,0	8,0	2	0,063±0,532

Tabela 5.29 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10 (Ti = 31,5 ˚C Tf=37,5)˚C. Estabilizou em -6 Pa. Valor inicial de -1 Pa (água suja).continuação do experimento11. Experimento 12

(Continua)

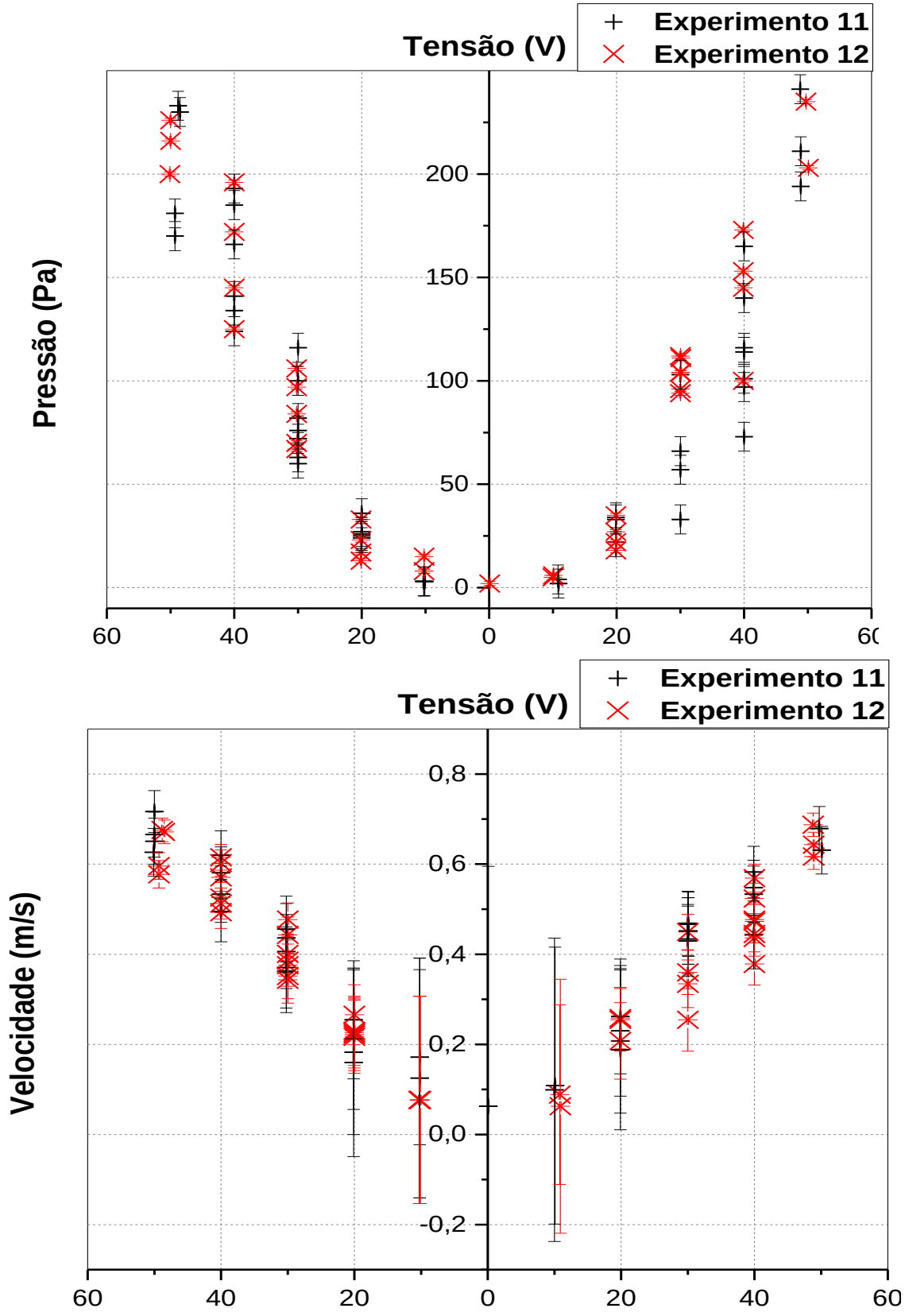
Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±7	Velocidade (m/s)
10,2	0,1	204,0	3	0,077±0,230
10,3	0,1	206,0	3	0,077±0,230
10,1	0,1	202,0	3	0,077±0,230
20,0	4,1	4,9	26	0,226±0,078
20,0	4,0	5,0	36	0,266±0,066
20,0	4,0	5,0	24	0,217±0,081
20,0	3,8	5,3	27	0,230±0,077
20,0	3,9	5,1	25	0,221±0,080
30,0	13,1	2,3	63	0,351±0,050
30,0	13,2	2,3	60	0,343±0,051
30,0	13,3	2,3	76	0,386±0,046
30,0	13,3	2,3	100	0,443±0,040
30,0	13,6	2,2	72	0,376±0,047
30,0	13,5	2,2	82	0,401±0,044
30,0	13,5	2,2	116	0,477±0,037
40,0	22,4	1,8	193	0,615±0,029
40,0	22,3	1,8	124	0,493±0,036
40,0	22,5	1,8	166	0,571±0,031
40,0	22,5	1,8	134	0,513±0,034
40,0	22,2	1,8	141	0,526±0,034
40,0	22,9	1,7	185	0,602±0,029
48,5	30,2	1,6	230	0,672±0,026
49,3	30,2	1,6	181	0,596±0,030
49,3	30,1	1,6	170	0,577±0,031
48,8	30,1	1,6	233	0,676±0,026
48,8	30,1	1,6	241	0,687±0,026
48,9	30,2	1,6	211	0,643±0,027
48,9	30,2	1,6	194	0,617±0,029
40,0	23,3	1,7	101	0,445±0,040

Tabela 5.29 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e novamente 10 (Ti = 31,5 ˚C Tf=37,5)˚C. Estabilizou em -6 Pa. Valor inicial de -1 Pa (água suja).continuação do experimento11. Experimento 12

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±7	Velocidade (m/s)
40,0	23,2	1,7	140	0,524±0,034
40,0	23,3	1,7	116	0,477±0,037
40,0	23,2	1,7	73	0,378±0,047
40,0	23,7	1,7	114	0,473±0,037
40,0	23,7	1,7	97	0,436±0,040
40,0	23,6	1,7	165	0,569±0,031
30,0	14,5	2,1	103	0,449±0,039
30,0	14,4	2,1	33	0,254±0,069
30,0	14,4	2,1	57	0,334±0,053
30,0	14,3	2,1	66	0,360±0,049
19,9	4,1	4,9	34	0,258±0,068
19,9	4,0	5,0	33	0,254±0,069
19,9	3,9	5,1	22	0,208±0,085
10,8	0,1	180,0	4	0,089±0,199
10,9	0,1	181,7	2	0,063±0,282

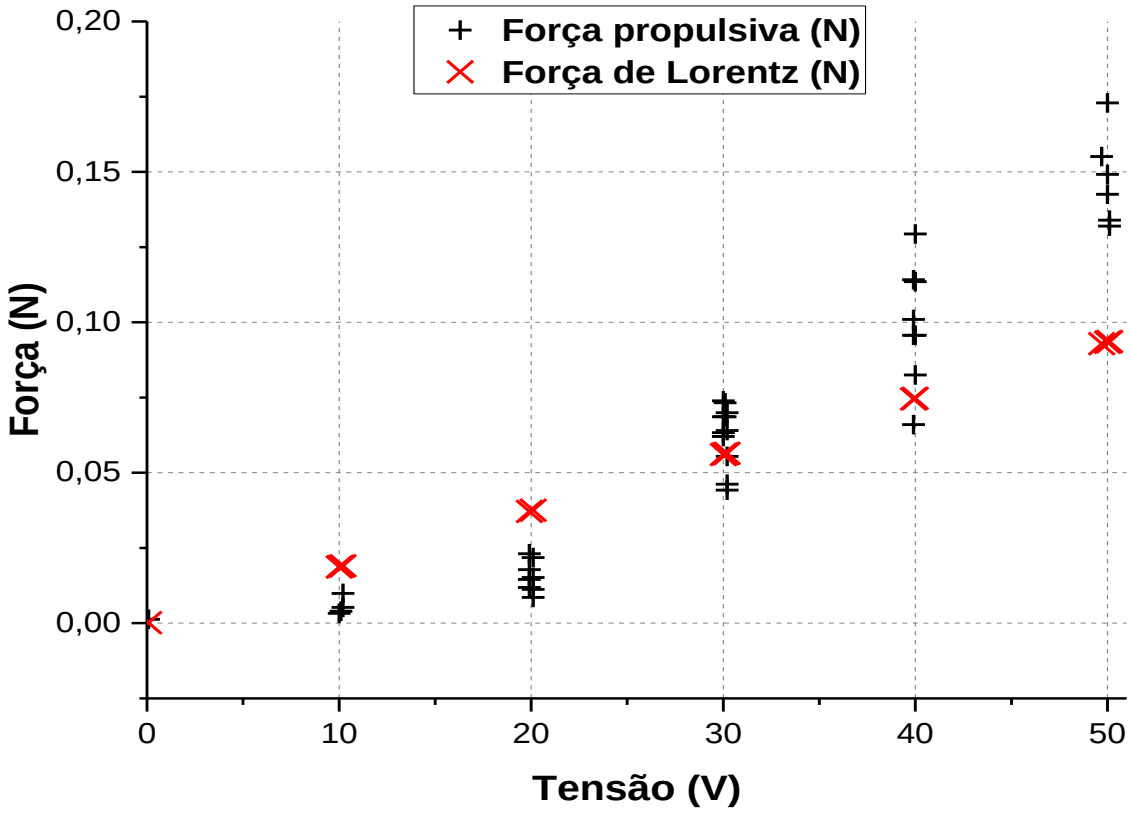
Figura 5.45 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 11 e 12



Fonte: do autor.

O presente conjunto de gráficos (Figura 5.45, Figura 5.47 e Figura 5.48) mostra apenas dois experimentos, pois houve desgaste dos eletrodos logo no final do segundo experimento, impedindo a manutenção do padrão de três experimentos para cada par de eletrodos.

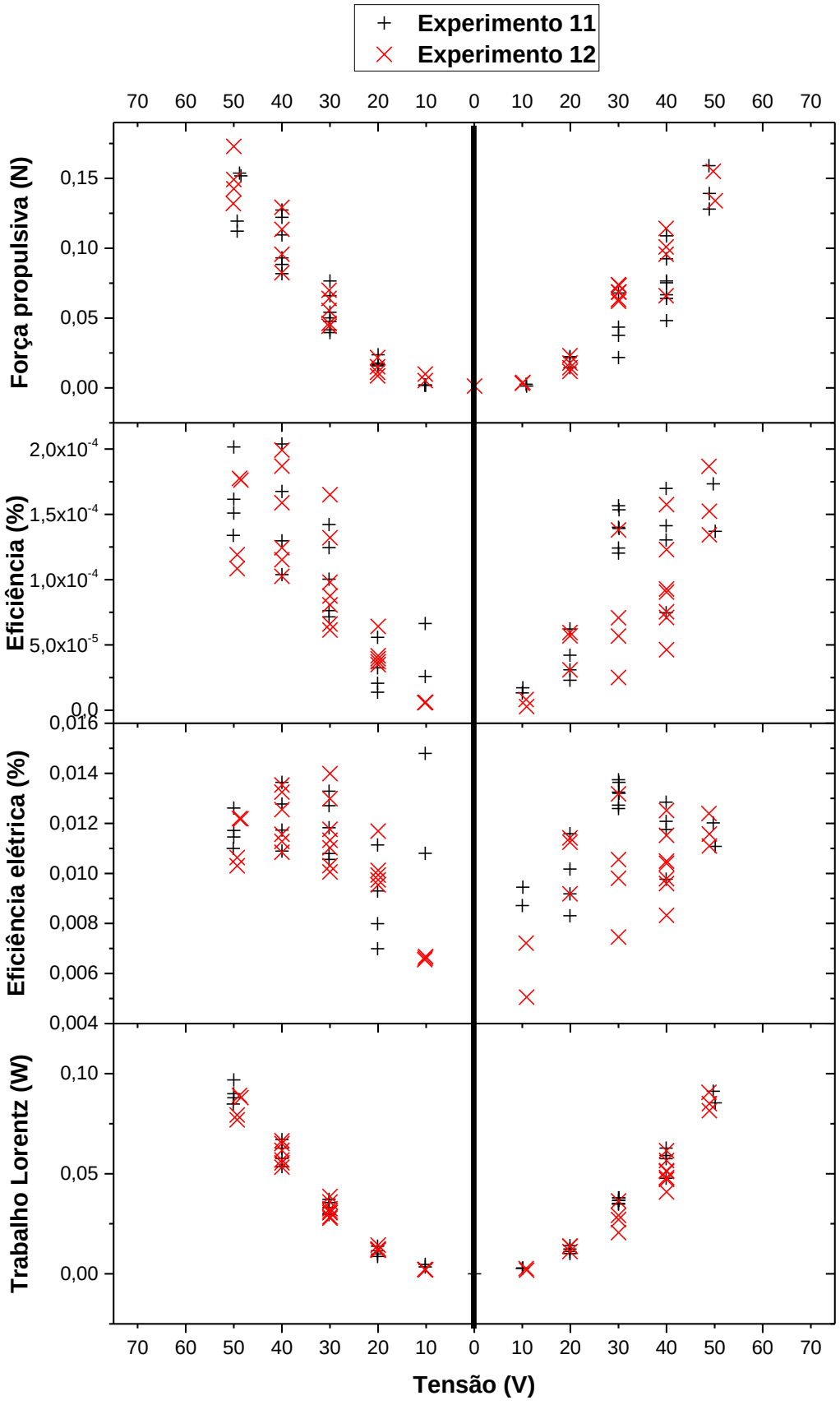
Figura 5.46 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 11



Fonte: do autor.

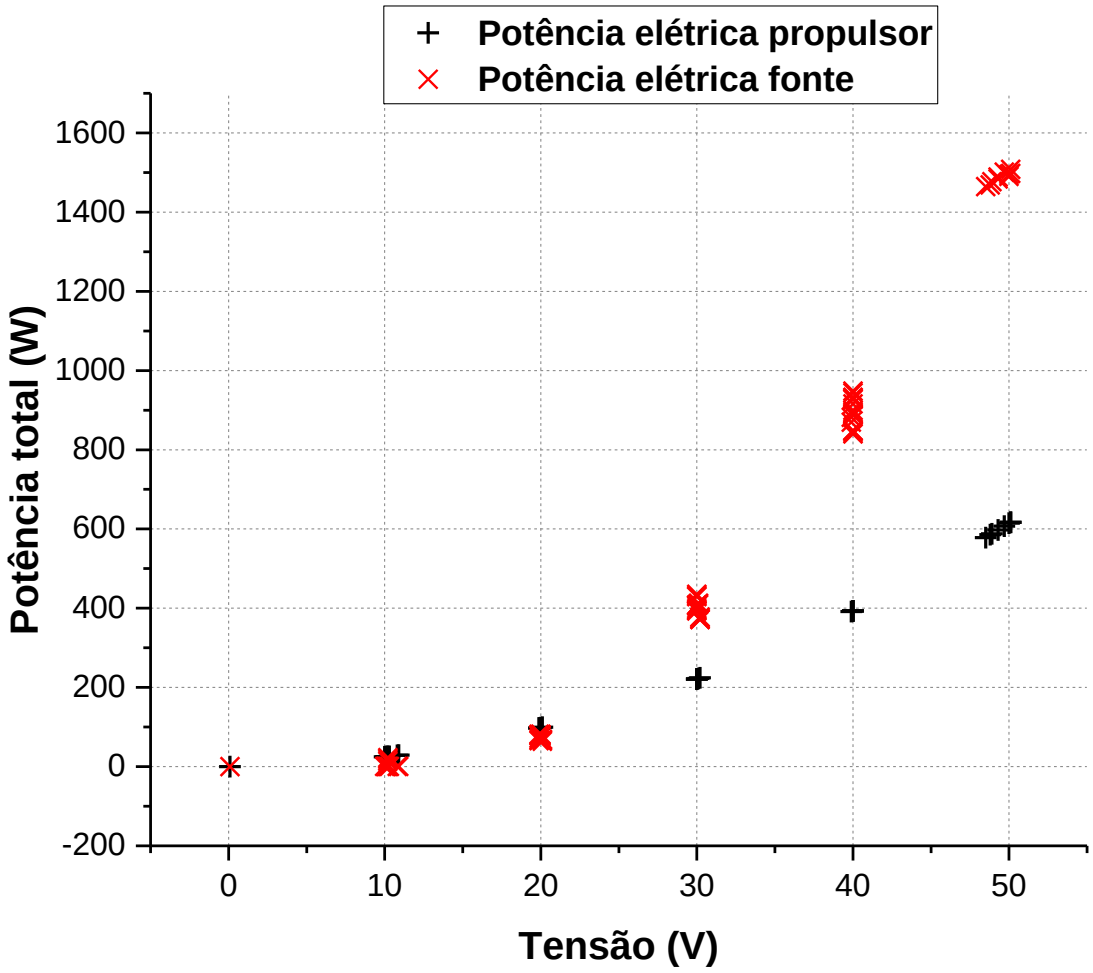
Na Figura 5.46, o comportamento da fora de Lorentz é diferente dos demais experimentos apresentados anteriormente. Note que a força eletromagnética é maior para baixas tensões e apresenta alguns valores maiores que a força propulsiva para tensões maiores (30 V e 40 V).

Figura 5.47 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimento 11 e 12



Fonte: do autor.

Figura 5.48 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 11 e 12



Fonte: do autor.

5.5.3. Eletrodos de 15mm por 40mm condutividade 7,52 S/m

Tabela 5.30 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 volts (Ti = 24,1 ˚C Tf=29,4)˚C. Estabilizou em 36 Pa. Valor inicial de -4 Pa (água limpa). Experimento13

(Continua)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±40	Velocidade (m/s)
10,1	2,3	4,4	46	0,300±0,131
10,1	2,5	4,0	42	0,287±0,137
10,1	2,1	4,8	37	0,269±0,146
10,1	1,0	10,1	21	0,203±0,193
20,2	2,3	8,8	30	0,243±0,162
20,3	2,4	8,5	27	0,230±0,170
20,2	2,3	8,8	30	0,243±0,162
30	9,7	3,1	113	0,471±0,083
29,9	9,8	3,1	109	0,462±0,085
29,9	9,8	3,1	115	0,475±0,083
29,9	9,9	3,0	108	0,460±0,085
30,0	10,0	3,0	113	0,471±0,083
30,0	9,9	3,0	117	0,479±0,082
40,0	17,3	2,3	202	0,629±0,062
40,0	17,6	2,3	213	0,646±0,061
40,0	18,5	2,2	227	0,667±0,059
40,0	18,6	2,2	222	0,660±0,059
40,0	18,5	2,2	228	0,669±0,059
40,0	18,4	2,2	223	0,661±0,059
40,0	18,6	2,2	220	0,657±0,060
50,0	26,8	1,9	319	0,791±0,050
50,0	26,5	1,9	322	0,795±0,049
50,0	26,6	1,9	321	0,793±0,049
50,0	26,6	1,9	331	0,806±0,049
54,7	31,0	1,8	383	0,867±0,045
55,1	31,0	1,8	365	0,846±0,046
55,0	31,0	1,8	370	0,852±0,046

Tabela 5.30 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 volts (Ti = 24,1 ˚C Tf=29,4)˚C. Estabilizou em 36 Pa. Valor inicial de -4 Pa (água limpa). Experimento13

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±40	Velocidade (m/s)
40,1	19,9	2,0	266	0,722±0,054
40,0	20,1	2,0	255	0,707±0,055
40,0	20,1	2,0	253	0,704±0,056
30,0	11,9	2,5	169	0,576±0,068
30,0	11,9	2,5	173	0,582±0,067
30,0	11,8	2,5	168	0,574±0,068
20,1	3,0	6,7	76	0,386±0,102
20,1	2,9	6,9	70	0,370±0,106
10,0	0,1	166,7	48	0,307±0,128

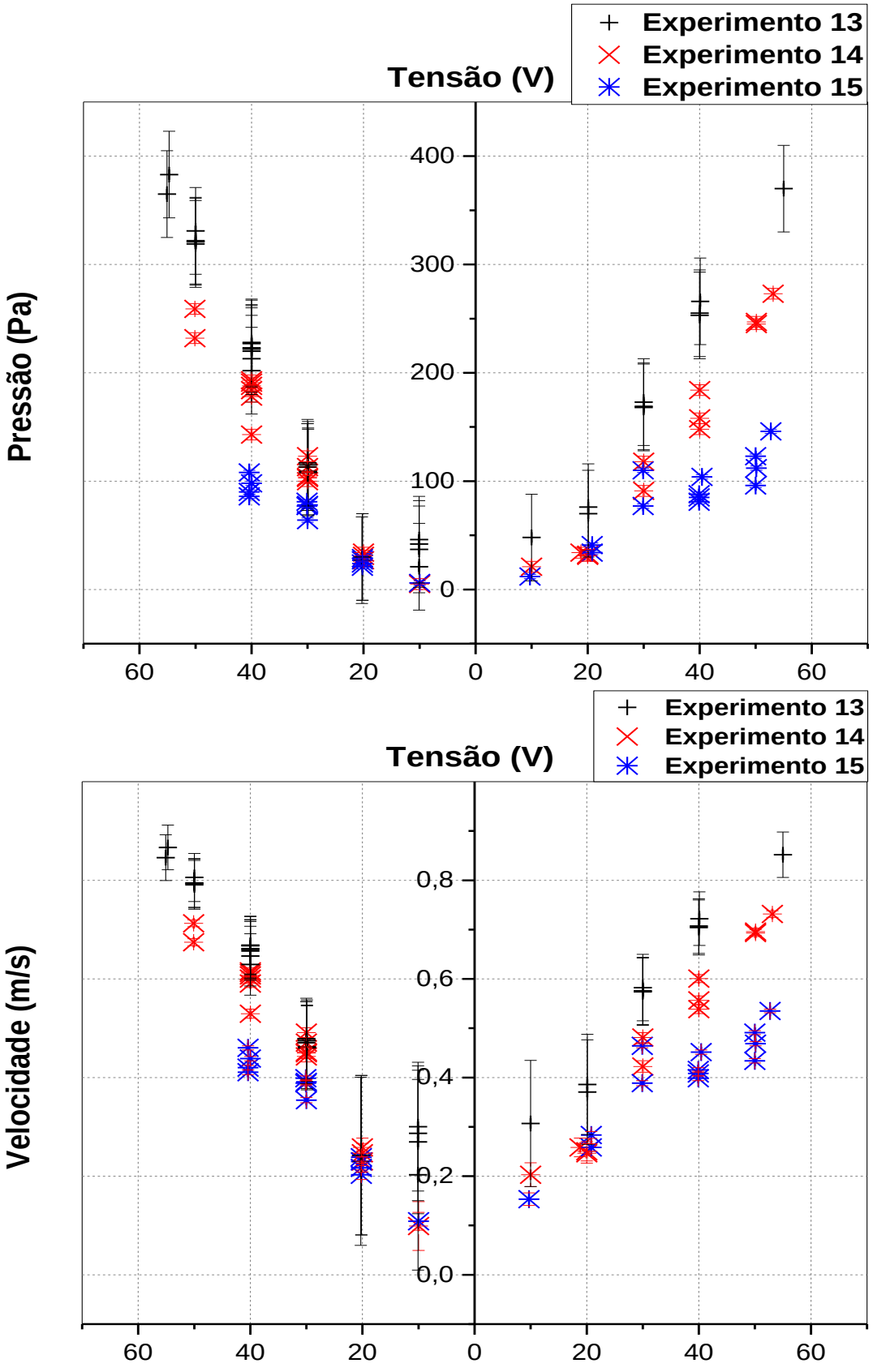
Tabela 5.31 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 volts (Ti =28,9 ˚C Tf=35,2˚C). Estabilizou em -3 Pa. Valor inicial de -2 Pa (água suja). Continuação do experimento13. Experimento14

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro ±5	Velocidade (m/s)
10,0	0,1	125,0	5	0,099±0,050
20,0	3,2	6,3	34	0,258±0,019
20,0	3,1	6,5	27	0,230±0,021
20,0	3,0	6,7	31	0,247±0,020
30,0	12,0	2,5	103	0,449±0,011
30,0	12,0	2,5	104	0,452±0,011
30,0	11,8	2,5	113	0,471±0,010
30,0	11,9	2,5	100	0,443±0,011
30,0	12,7	2,4	123	0,491±0,010
40,0	19,8	2,0	188	0,607±0,008
40,0	20,0	2,0	191	0,612±0,008
40,0	20,0	2,0	184	0,601±0,008
40,0	20,0	2,0	143	0,530±0,009
40,0	20,0	2,0	178	0,591±0,008
40,0	20,1	2,0	193	0,615±0,008
50,1	28,1	1,8	259	0,713±0,007
50,1	28,1	1,8	232	0,674±0,007
50,1	28,0	1,8	245	0,693±0,007
50,1	28,8	1,7	247	0,696±0,007
53,1	30,9	1,7	273	0,732±0,007
40,0	20,8	1,9	184	0,601±0,008
40,0	21,1	1,9	158	0,557±0,009
40,0	20,9	1,9	148	0,539±0,009
30,0	12,7	2,4	118	0,481±0,010
30,0	12,6	2,4	91	0,422±0,012
20,0	3,3	6,1	32	0,250±0,020
18,8	3,7	5,1	34	0,258±0,019
20,0	3,6	5,6	31	0,247±0,020
10,0	0,1	200,0	21	0,203±0,024

Tabela 5.32 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 (Ti = 34,8 ˚C Tf=38,7)˚C. Estabilizou em -1 Pa. Valor inicial de -1 Pa (água suja). Continuação do experimento14. Experimento15. Desgaste total dos eletrodos

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±2	Velocidade (m/s)
10	0,1	111,1	6	0,108±0,018
20,2	3,8	5,3	27	0,230±0,009
20,2	3,8	5,3	21	0,203±0,010
20,2	3,7	5,5	24	0,217±0,009
20,2	3,5	5,8	29	0,238±0,008
30,1	12,5	2,4	81	0,399±0,005
30,0	12,5	2,4	64	0,354±0,006
30,0	12,4	2,4	78	0,391±0,005
30,1	14,8	2,0	77	0,389±0,005
40,0	20,8	1,9	98	0,438±0,004
40,4	21,1	1,9	108	0,460±0,004
40,4	21,0	1,9	90	0,420±0,005
40,4	21,0	1,9	86	0,411±0,005
40,4	21,0	1,9	104	0,452±0,004
50,0	28,6	1,7	96	0,434±0,005
50,1	28,6	1,8	112	0,469±0,004
50,0	28,4	1,8	123	0,491±0,004
52,7	28,7	1,8	146	0,535±0,004
39,9	21,0	1,9	85	0,408±0,005
39,9	21,1	1,9	81	0,399±0,005
39,9	21,8	1,8	88	0,415±0,005
29,9	12,9	2,3	110	0,464±0,004
29,9	13,6	2,2	77	0,389±0,005
20,8	4,1	5,1	34	0,258±0,008
20,8	3,9	5,3	41	0,284±0,007
9,7	1,0	9,7	12	0,153±0,013

Figura 5.49 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 13, 14 e 15

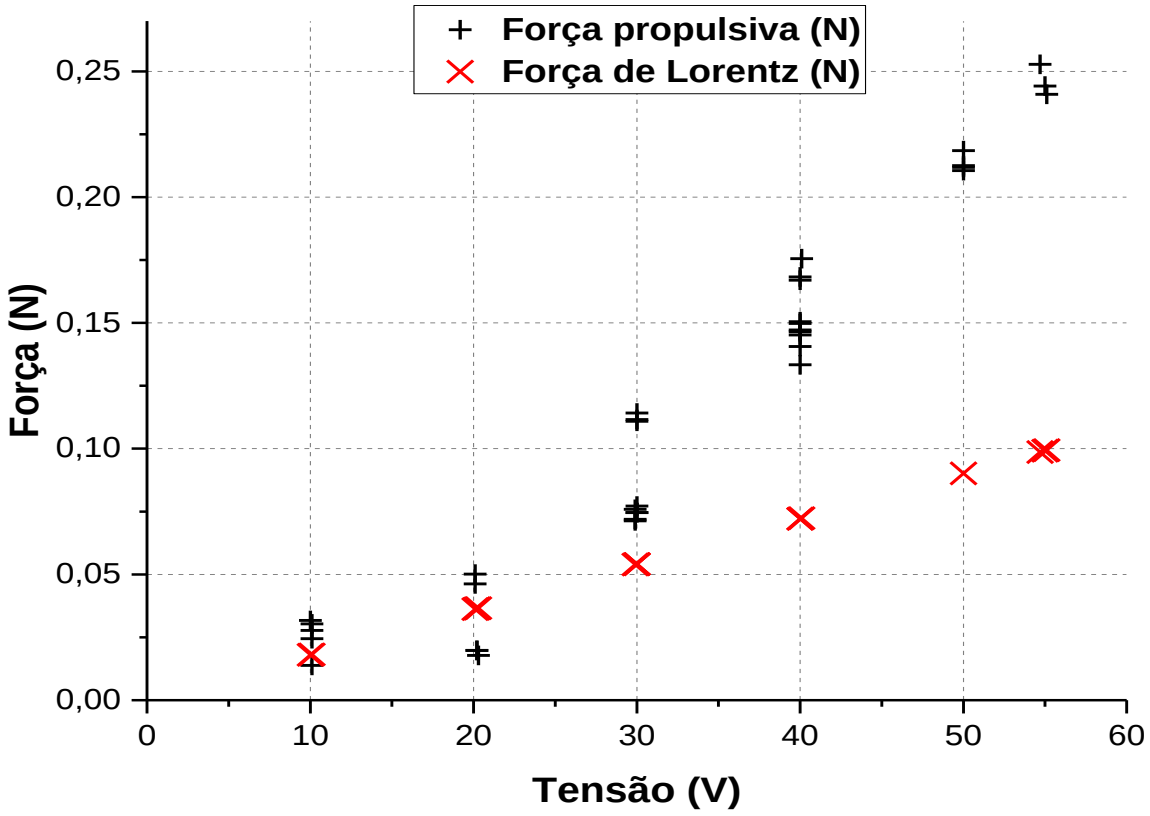


Fonte: do autor.

Vale salientar aqui que a

Figura *5.49* permite observar, no experimento 13, erros associados à pressão bem maiores que os demais experimentos. Isso se deve a erros nos procedimentos de medição (pontuais para este experimento), que foram imediatamente corrigidos para os experimentos seguintes. Os dados foram mantidos porque a tendência média não foi visualmente afetada.

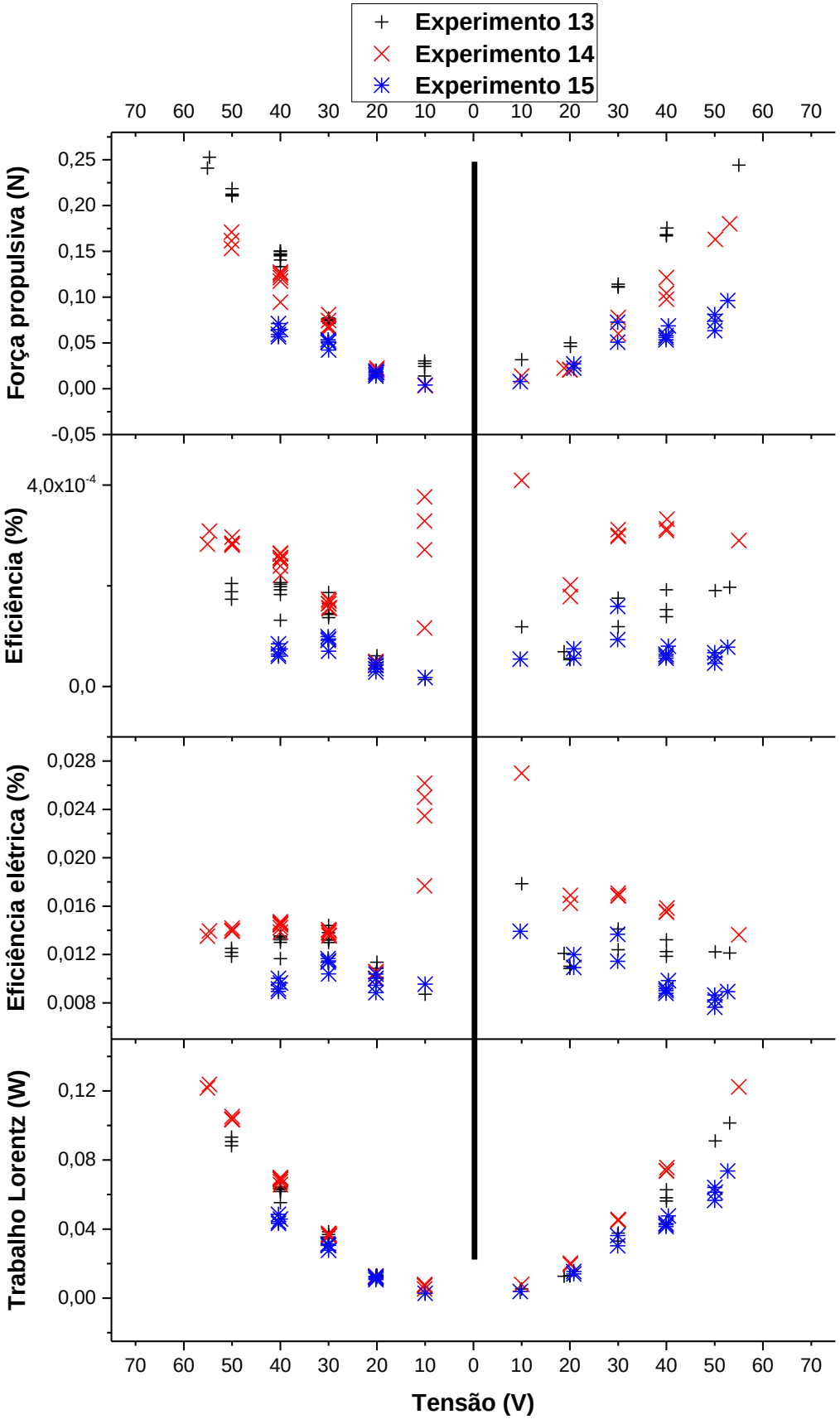
Figura 5.50 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 13



Fonte: do autor.

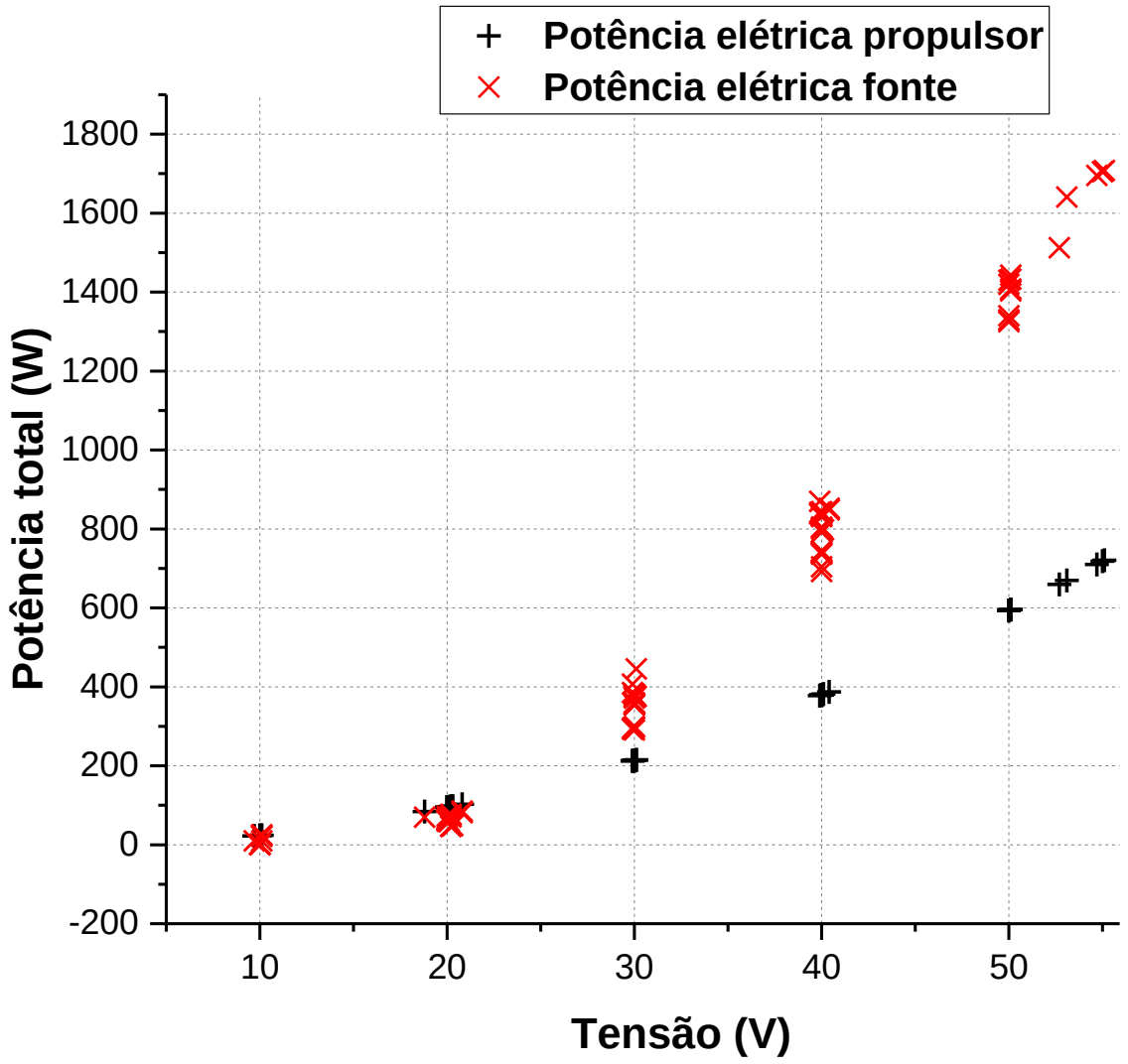
No te na Figura 5.50 que a propulsão sempre foi maior em todas as tensões inclusive nas de 10 V e 20 V. Aqui novamente a razão 2,5 prevaleceu para tensões entre 50 V e 60 V.

Figura 5.51 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimento 13, 14 e 15



Fonte: do autor.

Figura 5.52 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 13, 14 e 15



Fonte: do autor.

5.5.4. Eletrodos 20mm por 20mm. Condutividade 7,91 S/m

Nos experimentos anteriores foram utilizados eletrodos com dimensões de 15 mm por 40 mm, utilizando soluções salinas que apresentaram alguma variação na condutividade. Não se observou, entretanto, alguma tendência dos dados devido a esta variação da condutividade. No presente item estão sendo apresentados os resultados para o par de eletrodos com dimensões de 20 mm por 20 mm.

Tabela 5.33 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 volts (Ti = 25,4 ˚C Tf=31,8)˚C. Estabilizou em 29 Pa. Valor inicial de 5 Pa (água limpa). Experimento16

(Continua)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±34	Velocidade (m/s)
10,0	2,3	4,3	9	0,133±0,251
10,0	1,4	7,1	6	0,108±0,307
10,0	1	10,0	4	0,089±0,376
10,0	0,6	16,7	2	0,063±0,532
20,1	2,6	7,7	8	0,125±0,266
20,1	2,7	7,4	9	0,133±0,251
20,1	2,6	7,7	10	0,140±0,238
30,1	11,2	2,7	40	0,280±0,119
30,1	11,4	2,6	36	0,266±0,125
30,1	11,3	2,7	39	0,277±0,121
30,1	11,3	2,7	44	0,294±0,113
30,1	11,4	2,6	44	0,294±0,113
30,1	11,9	2,5	47	0,304±0,110
40,0	19,7	2,0	75	0,383±0,087
40,0	19,8	2,0	69	0,368±0,091
40,0	19,8	2,0	87	0,413±0,081
40,0	19,8	2,0	67	0,362±0,092
40,0	19,7	2,0	70	0,370±0,090
40,0	19,8	2,0	73	0,378±0,088
40,0	20,0	2,0	78	0,391±0,085
50,1	28,7	1,7	114	0,473±0,071
50,1	28,6	1,8	106	0,456±0,073
50,1	28,8	1,7	117	0,479±0,070
50,1	28,7	1,7	120	0,485±0,069
50,1	29	1,7	126	0,497±0,067
52,0	30,5	1,7	113	0,471±0,071
52,0	30,5	1,7	126	0,497±0,067
40,4	21,7	1,9	97	0,436±0,076
40,4	21,5	1,9	89	0,418±0,080

Tabela 5.33 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 volts (Ti = 25,4 ˚C Tf=31,8)˚C. Estabilizou em 29 Pa. Valor inicial de 5 Pa (água limpa). Experimento16

(Conclusão)

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±34	Velocidade (m/s)
40,4	21,5	1,9	91	0,422±0,079
30,0	12,9	2,3	75	0,383±0,087
30,0	12,8	2,3	71	0,373±0,089
30,0	12,9	2,3	62	0,349±0,096
20,0	3,6	5,6	40	0,280±0,119
20,0	3,6	5,6	39	0,277±0,121
10,0	0,0	333,3	32	0,250±0,133

Tabela 5.34 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 volts (Ti =31,4 ˚C Tf=37˚C). Estabilizou em 18 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água suja). Continuação do experimento16. Experimento17

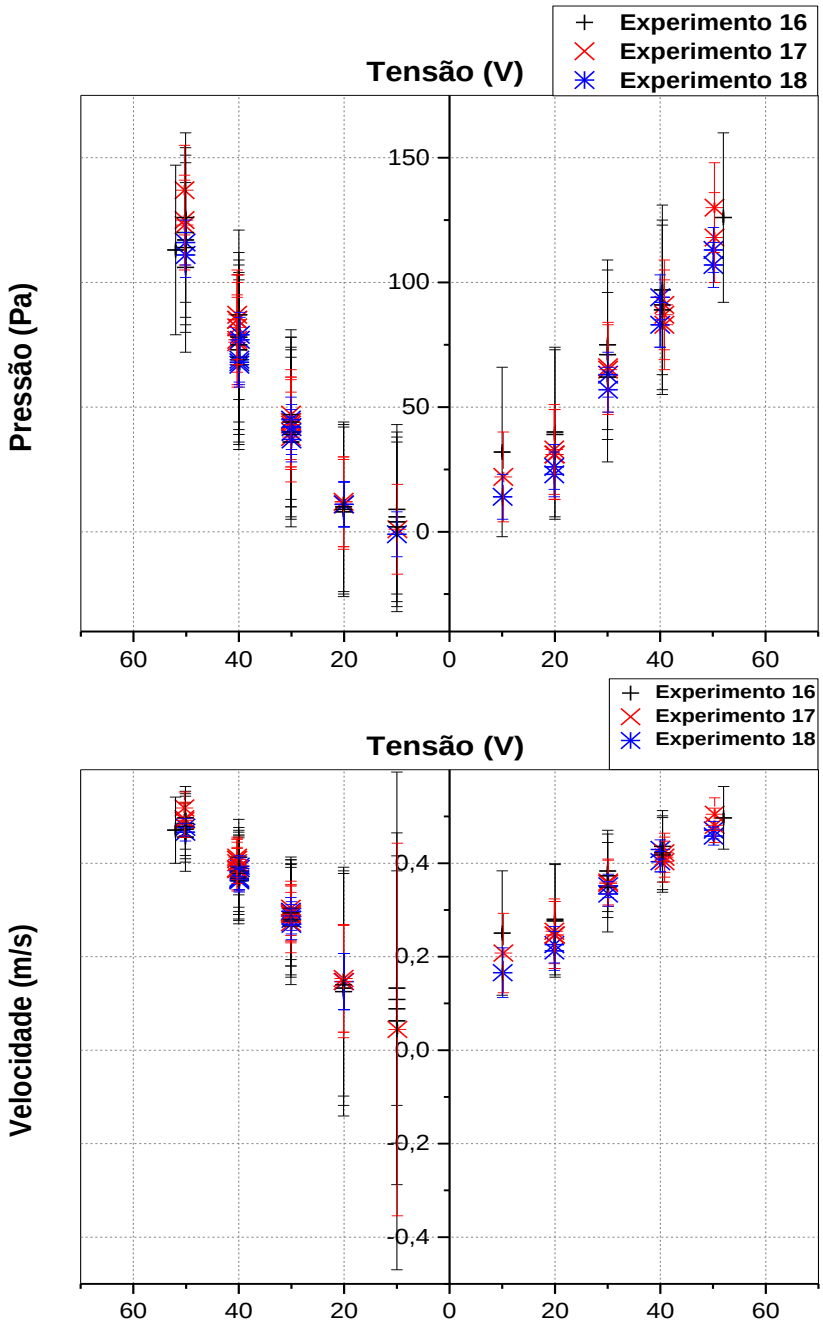
Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±18	Velocidade (m/s)
9,9	0,0	247,5	1	0,044±0,399
10,1	4,0	5,0	11	0,147±0,120
20,1	3,8	5,3	12	0,153±0,115
20,1	3,7	5,4	12	0,153±0,115
30,1	12,9	2,3	38	0,273±0,065
30,1	12,8	2,4	43	0,290±0,061
30,1	12,8	2,4	44	0,294±0,060
30,1	12,8	2,4	47	0,304±0,058
30,1	13,0	2,3	44	0,294±0,060
40,3	21,4	1,9	77	0,389±0,045
40,3	21,6	1,9	85	0,408±0,043
40,3	21,5	1,9	76	0,386±0,046
40,3	21,6	1,9	82	0,401±0,044
40,3	21,5	1,9	85	0,408±0,043
40,3	21,6	1,9	87	0,413±0,043
50,3	29,4	1,7	125	0,495±0,036
50,3	29,3	1,7	137	0,518±0,034
50,3	29,3	1,7	123	0,491±0,036
50,3	30,0	1,7	118	0,481±0,037
50,3	29,8	1,7	130	0,505±0,035
40,8	22,7	1,8	87	0,413±0,043
40,8	22,6	1,8	83	0,403±0,044
40,8	22,7	1,8	91	0,422±0,042
30,1	13,7	2,2	66	0,360±0,049
30,1	13,8	2,2	65	0,357±0,049
200,	3,8	5,3	31	0,247±0,072
19,9	3,7	5,4	31	0,247±0,072
19,9	3,6	5,5	33	0,254±0,069
10,2	0,1	204,0	22	0,208±0,085

Tabela 5.35 - Variando tensão de 10 a 50 Volts e 10 (Ti = 36,2 ˚C Tf=40)˚C. Estabilizou em 9 Pa. Valor inicial de 0 Pa (água suja). Continuação do experimento 17. Experimento18. Desgaste total dos eletrodos

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±9	Velocidade (m/s)
10,0	0,1	166,7	-1	instável
20,0	4,0	5,0	11	0,147±0,060
20,0	3,9	5,1	11	0,147±0,060
20,0	3,7	5,4	11	0,147±0,060
20,0	3,8	5,3	11	0,147±0,060
30,0	13,1	2,3	40	0,280±0,032
30,0	13,1	2,3	37	0,269±0,033
30,1	13,1	2,3	45	0,297±0,030
30,0	13,0	2,3	42	0,287±0,031
39,9	21,1	1,9	67	0,362±0,024
39,8	21,0	1,9	77	0,389±0,023
39,9	21,1	1,9	68	0,365±0,024
39,9	20,9	1,9	69	0,368±0,024
39,8	20,9	1,9	79	0,394±0,022
50,1	29,0	1,7	111	0,467±0,019
50,1	29,0	1,7	116	0,477±0,019
50,1	28,7	1,7	113	0,471±0,019
50,1	29,2	1,7	107	0,458±0,019
40,0	21,8	1,8	83	0,403±0,022
40,0	21,7	1,8	83	0,403±0,022
40,0	21,8	1,8	94	0,429±0,021
30,1	13,6	2,2	63	0,351±0,025
30,1	13,6	2,2	57	0,334±0,026
19,9	3,9	5,1	26	0,226±0,039
19,9	3,7	5,4	23	0,212±0,042
10,1	0,1	202,0	14	0,166±0,053

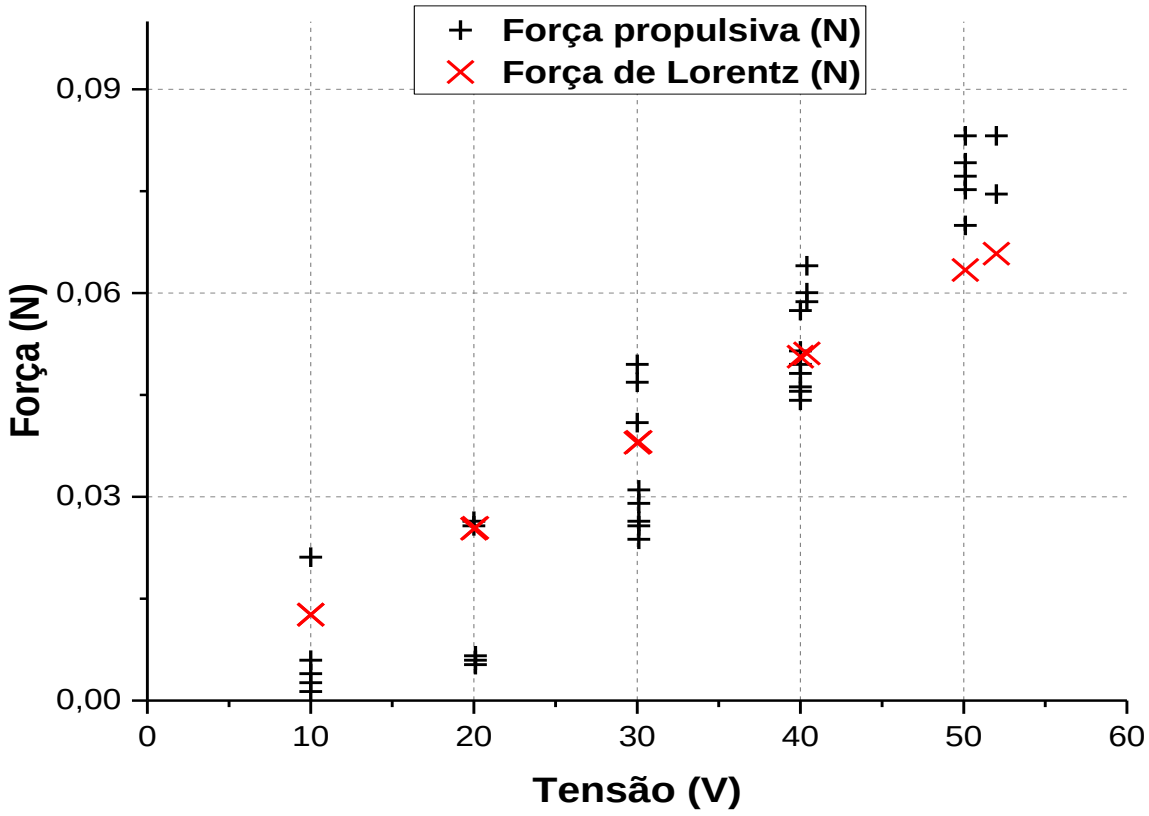
Notou-se, neste experimento, que havia uma diferença comportamental em torno das tensões de 40 V e 50 V. É possível notar que as barras de erros das velocidades próximo as tensões de 10 V e 20 V são bem altas, isso se deve ao erro da pressão e da pressão medida no experimento. Como o erro da velocidade é uma medida indireta (baseada no cálculo da pressão e do seu erro) é esperado obter esse problema.

Figura 5.53 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para os experimentos 16, 17 e 18



Fonte: do autor.

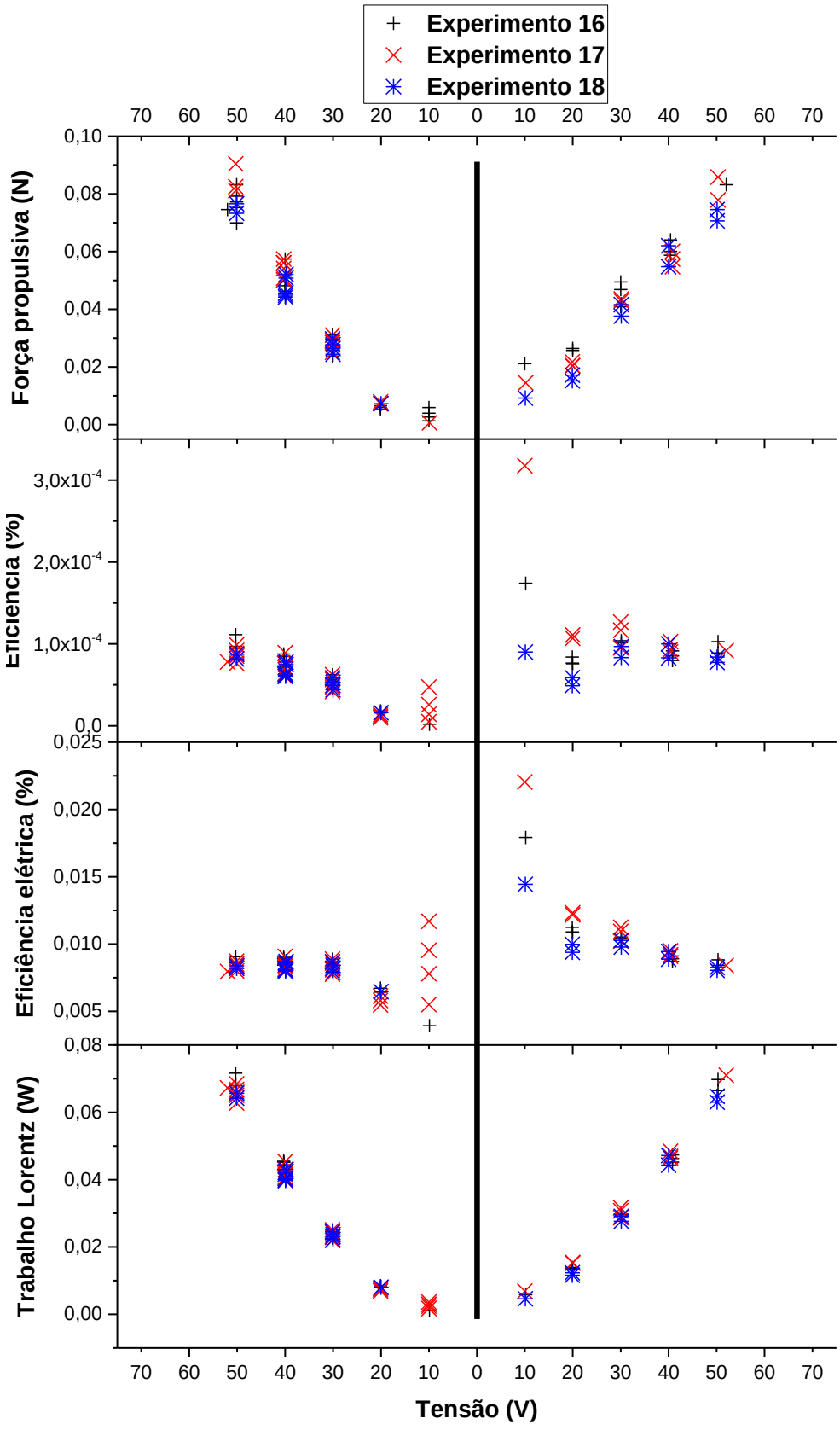
Figura 5.54 - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 16



Fonte: do autor.

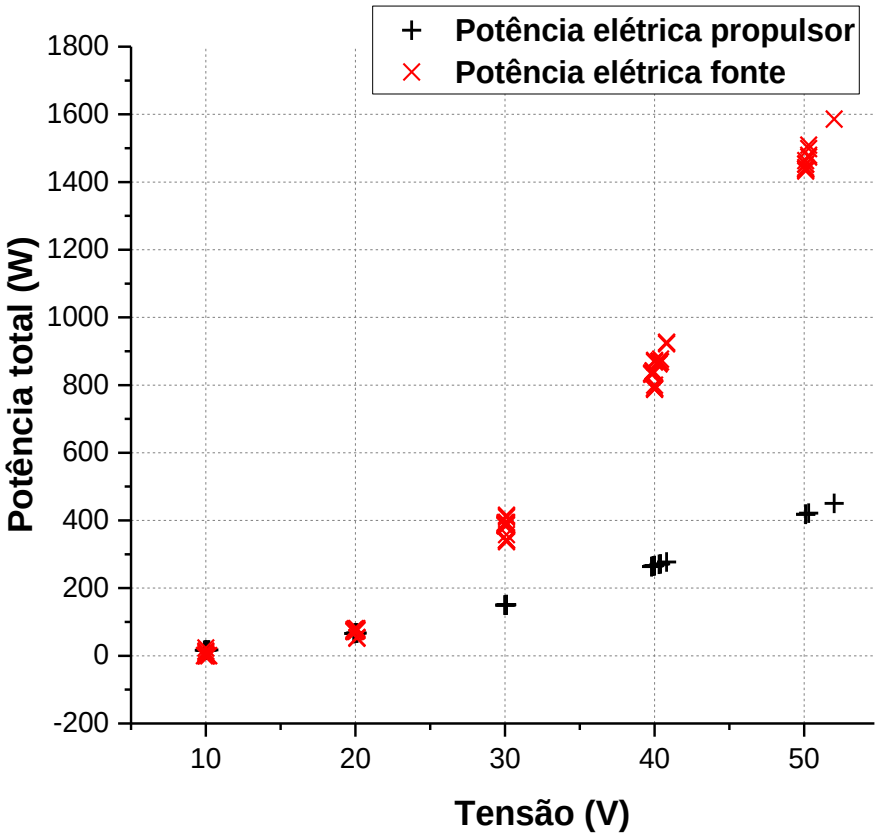
Na Figura 5.54 as forças propulsivas apresentam valores ora maiores ora menores para todas as faixas de tensão, exceto para 50 V.

Figura 5.55 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para os experimento 16, 17 e 18



Fonte: do autor.

Figura 5.56 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para os experimentos 16, 17 e 18



Fonte: do autor.

Com o presente conjunto de resultados findou-se a busca de resultados que permitissem decidir pelas condições mais adequadas dos propulsores com eletrodos de cobre a utilizar no veículo “Água Viva MHD”.

5.5.5. Teste com eletrodos de grafite

Como mencionado, o presente estudo seguiu passos que conduziram a estabelecer o foco de atenção voltado aos eletrodos de cobre. Assim, os dados principais utilizados nos testes de movimentação da Água Viva MHD são aqueles apresentados até o item 5.4.3 (imediatamente anterior). Contudo, entre os materiais testados para os eletrodos ainda consta o grafite, cujos resultados são aqui apresentados como contribuição aos estudos futuros no contexto desta linha de pesquisa, uma vez que implicaram em elaboração de testes, decisão pelos eletrodos

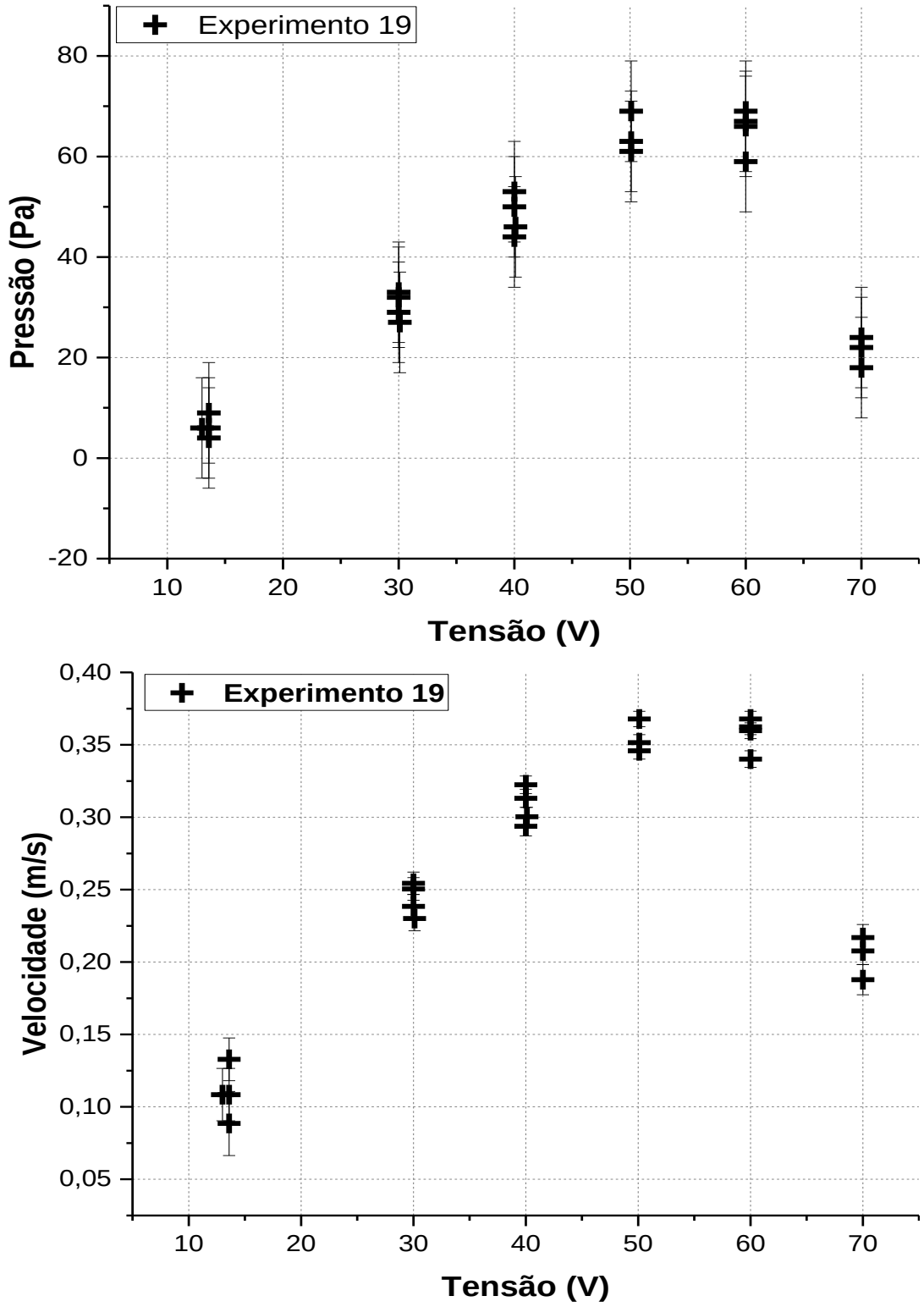
mais adequados ao presente estudo (cobre), bem como na localização de sua eventual potencialidade.

Ao contrário dos experimentos anteriores, a variação de tensão nos eletrodos de grafite foi feita apenas uma vez (do menor valor para o maior), uma vez que o grafite não era o objeto principal de estudo.

Tabela 5.36 - Condutividade da água 7,563 S/m. Área do propulsor aproximadamente 22mm x 15 mm. Utilizando eletrodo de grafite em formato de disco com diâmetro de 9,95 mm. Ti =24,9 ˚C Tf=25,2˚C. Valor inicial 2 Pa. Estabilizou em 8 Pa. Experimento 19

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±10	Velocidade (m/s)
13,6	1,0	13,6	4	0,089±0,022
13,0	1,0	13,0	6	0,108±0,018
13,6	1,0	13,6	9	0,133±0,015
13,6	1,0	13,6	6	0,108±0,018
30,1	2,7	11,1	27	0,230±0,009
30,0	2,7	11,1	29	0,238±0,008
30,0	2,6	11,5	32	0,250±0,008
30,0	2,7	11,1	33	0,254±0,008
40,1	3,2	12,5	46	0,300±0,007
40,0	3,1	12,9	44	0,294±0,007
40,0	3,3	12,1	53	0,322±0,006
40,0	3,2	12,5	50	0,313±0,006
50,1	3,7	13,5	63	0,351±0,006
50,1	3,5	14,3	61	0,346±0,006
50,1	3,6	13,9	69	0,368±0,005
60,0	4,2	14,3	66	0,360±0,005
60,0	4,2	14,3	69	0,368±0,005
60,0	4,2	14,3	59	0,340±0,006
60,0	4,2	14,3	67	0,362±0,005
70,0	2,1	33,3	22	0,208±0,009
70,0	1,0	70,0	18	0,188±0,010
70,0	1,9	36,8	24	0,217±0,009
70,0	instável	instável	instável	Instável

Figura 5.57 - Gráfico da pressão e velocidade em função da tensão para o experimento 19 com grafite

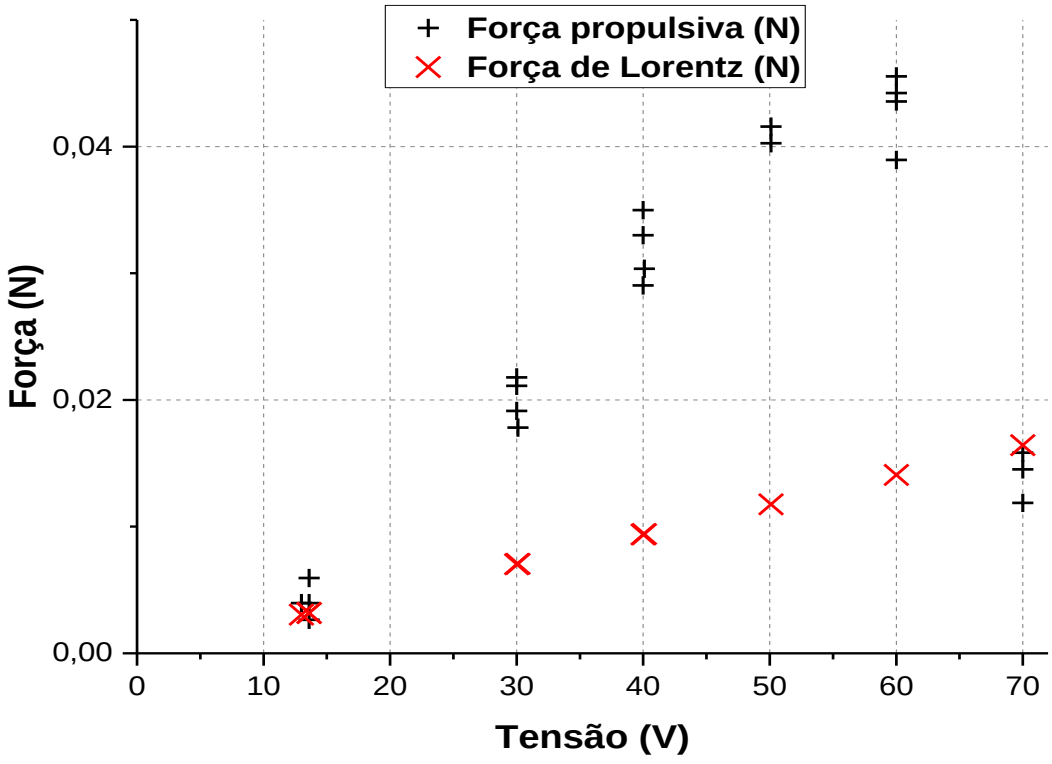


Fonte: do autor.

É possível notar na Figura 5.57 que a velocidade do fluido com o grafite é inferior à do cobre. No entanto, a corrente demandada pelo eletrodo é cerca de 10

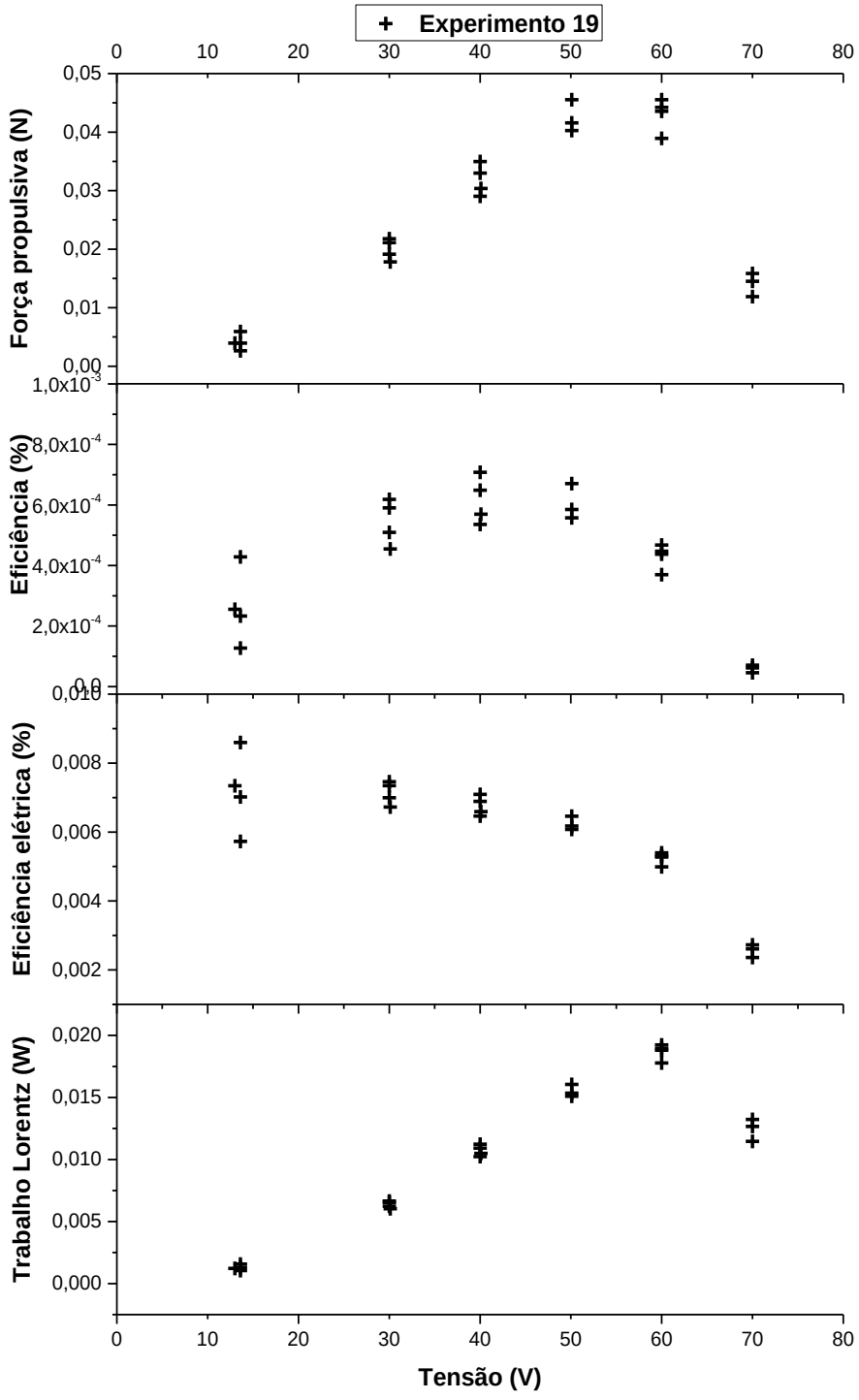
vezes menor. Isto tem uma de suas causas no valor da área do eletrodo de grafite, que era menor que a do cobre. Para a maior parte dos experimentos com eletrodos de cobre a área utilizada foi de 15 mm por 40 mm, enquanto que para o grafite utilizou-se neste primeiro experimentou disco de 9,95 mm. O menor valor da corrente utilizada representa um aspecto positivo para o eletrodo de grafite. Notou-se também que a temperatura de operação era menor que o eletrodo de cobre. Nesse caso, a menor corrente utilizada e a menor condutibilidade térmica (cerca de 3 vezes menor que a do cobre) são os aspectos que levam á menor temperatura. A durabilidade do eletrodo de grafite mostrou-se maior que a do cobre, proporcionando maior tempo de experimento. No entanto, como mencionado no item 4.2, a dificuldade em soldar o grafite com os fios para obter um bom contato representou um empecilho na fase de estabelecimento dos procedimentos de construção dos eletrodos. Esta dificuldade impossibilitou um uso do material quando se estava estabelecendo os procedimentos para o presente estudo. Analisando os parâmetros propulsivos do grafite temos, Figura 5.59:

Figura 5.58 - - Comparação da força propulsiva e de Lorentz para o experimento 19



Fonte: do autor.

Figura 5.59 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para o experimento 19

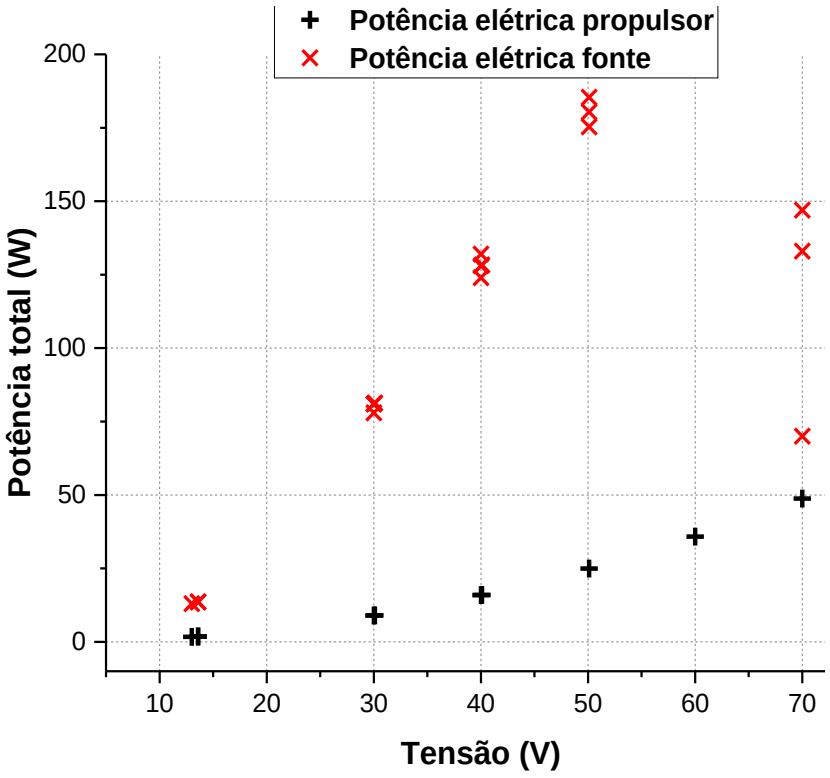


Fonte: do autor.

Assim como os experimentos anteriores com os eletrodos de cobre, a eficiência tende a diminuir com o aumento da tensão. No entanto observa-se que a força propulsiva e o trabalho de Lorentz também diminuem ao aumentar a tensão. Isso está relacionado à instabilidade observada nos dados, que ocorreu a partir dos 60 V.

Esta instabilidade é decorrente, como mencionado, devido à dificuldade de isolar e soldar o eletrodo satisfatoriamente, permitindo que o mesmo apresentasse fugas (não localizadas adequadamente). A Figura 5.60, compara a potência da fonte e do propulsor.

Figura 5.60 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para o experimento 19



Fonte: do autor.

A possibilidade do uso de eletrodos de grafite foi levantada no contexto da orientação deste estudo, na linha de pesquisa da qual faz parte. Considerando as vantagens aparentes já descritas, um segundo propulsor em grafite foi elaborado e construído pelo orientador, Prof. Harry E. Schulz, em paralelo à produção dos eletrodos de cobre já descrita, mas ainda no contexto do presente estudo. A maneira de fazer as ligações com os fios já foi mostrada na Figura 4.9 . Nesse caso, não se trata de ligações soldadas, mas de ligações por contato superficial, “amarrando” os fios ao grafite. Também o isolamento adotado, impedindo fugas de corrente, está mostrado na Figura 4.9.

A área de passagem de solução neste propulsor foi muito menor que a dos propulsores anteriores. Conforme informado pelo Prof. Harry E. Schulz, o propulsor

de grafite (denominado “compacto” aqui) teve área de passagem de água (seção transversal) de aproximadamente 0,000080 m^2 (1,0 cm por 0,80 cm, ou 0,80 cm^2). A área de contato entre o grafite e a solução salina foi determinada basicamente pelas dimensões da “escova de carvão”, com algum ajuste efetuado por desgaste com lixa, ficando em torno de 0,5 cm por 2,5 cm. A massa do propulsor, contendo os imãs, os eletrodos, os fios, o invólucro de PVC, o isolamento e demais componentes de montagem foi de 0,212 kg. Com este propulsor foram obtidos os dados da Tabela 5.37 e

Figura *5.63*:

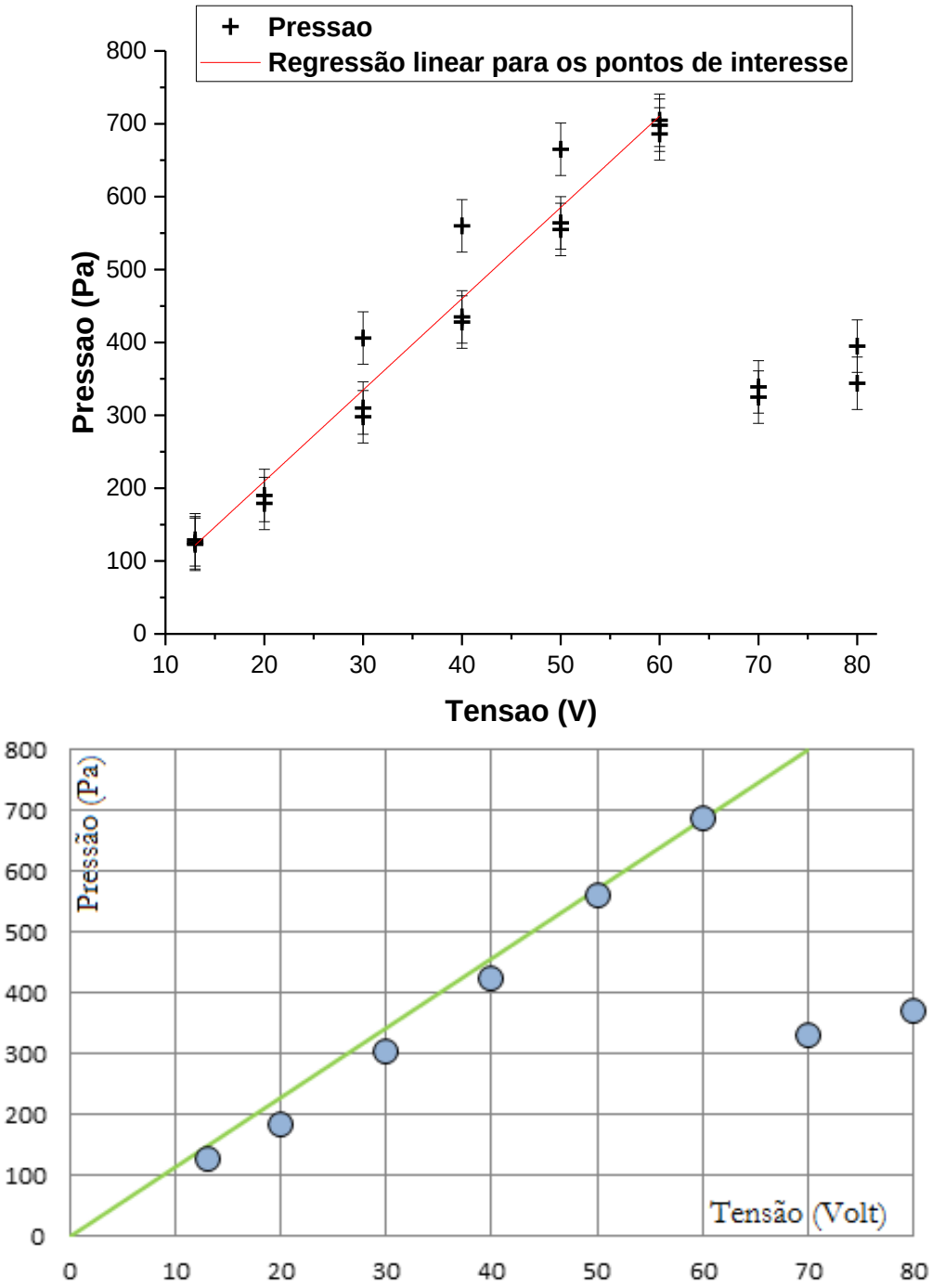
Tabela 5.37 – Propulsor compacto de grafite

Tensão (V) erro±0,1	Corrente (A) erro±0,1	Resistência (Ohm)	Pressão (Pa) erro±36	Velocidade (m/s)
13,0	2,0	6,5	123	0,491±0,004
13,0	2,0	6,5	125	0,495±0,004
13,0	2,0	6,5	129	0,503±0,004
20,0	4,0	5,0	179	0,592±0,003
20,0	4,0	5,0	190	0,610±0,003
30,0	6,0	5,0	298	0,764±0,003
30,0	6,0	5,0	310	0,780±0,003
30,0	6,0	5,0	406	0,892±0,002
40,0	8,9	4,5	435	0,924±0,002
40,0	8,9	4,5	428	0,916±0,002
40,0	8,9	4,5	560	1,048±0,002
50,0	11,0	4,5	564	1,052±0,002
50,0	11,0	4,5	555	1,043±0,002
50,0	11,0	4,5	665	1,142±0,002
60,0	14,0	4,3	698	1,170±0,002
60,0	14,0	4,3	686	1,160±0,002
60,0	14,0	4,3	705	1,176±0,002
70,0	8,7	8,0	339	0,815±0,002
70,0	8,7	8,0	325	0,798±0,002
80,0	9,2	8,7	344	0,821±0,002
80,0	9,2	8,7	395	0,880±0,002

Os gráficos de pressão versus tensão e de velocidade versus tensão (Figura 5.61 e

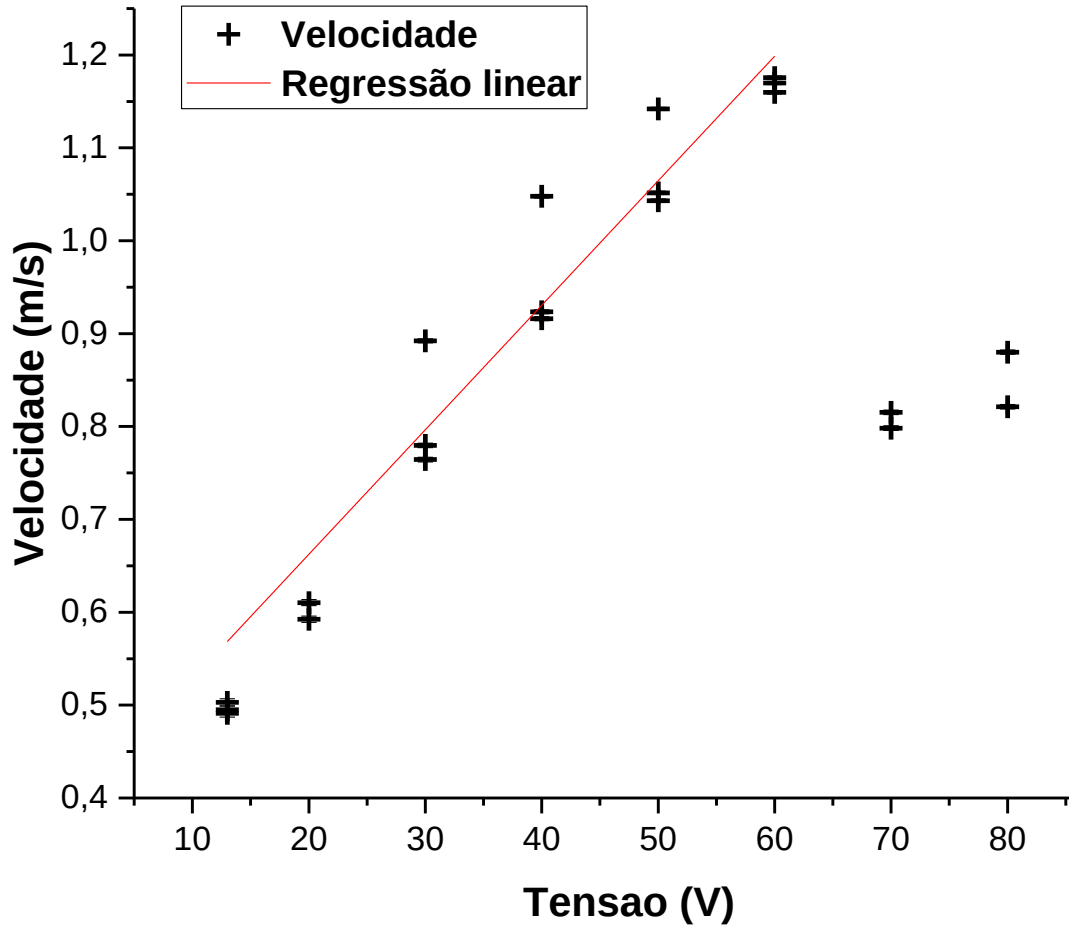
Figura 5.62) mostram um comportamento similar àquele observado nos eletrodos de cobre. Inclusive observa-se nitidamente a modificação de comportamento para uma tensão localizada entre 60 V e 70 V.

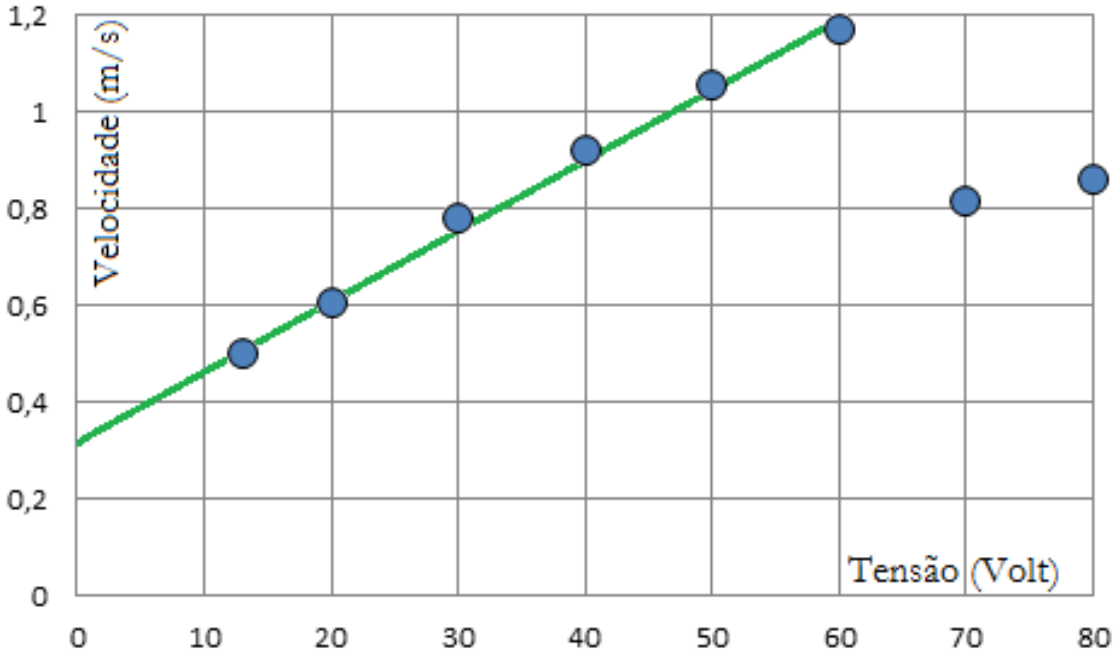
Figura 5.61 - Evolução da pressão para com a tensão aplicada ao propulsor compacto de grafite. Nota-se o comportamento basicamente linear até uma tensão entre 60 e 70 Volts. A primeira figura mostra todos os pontos e seus erros. A segunda figura a média deles para cada variação de tensão



Fonte: do autor.

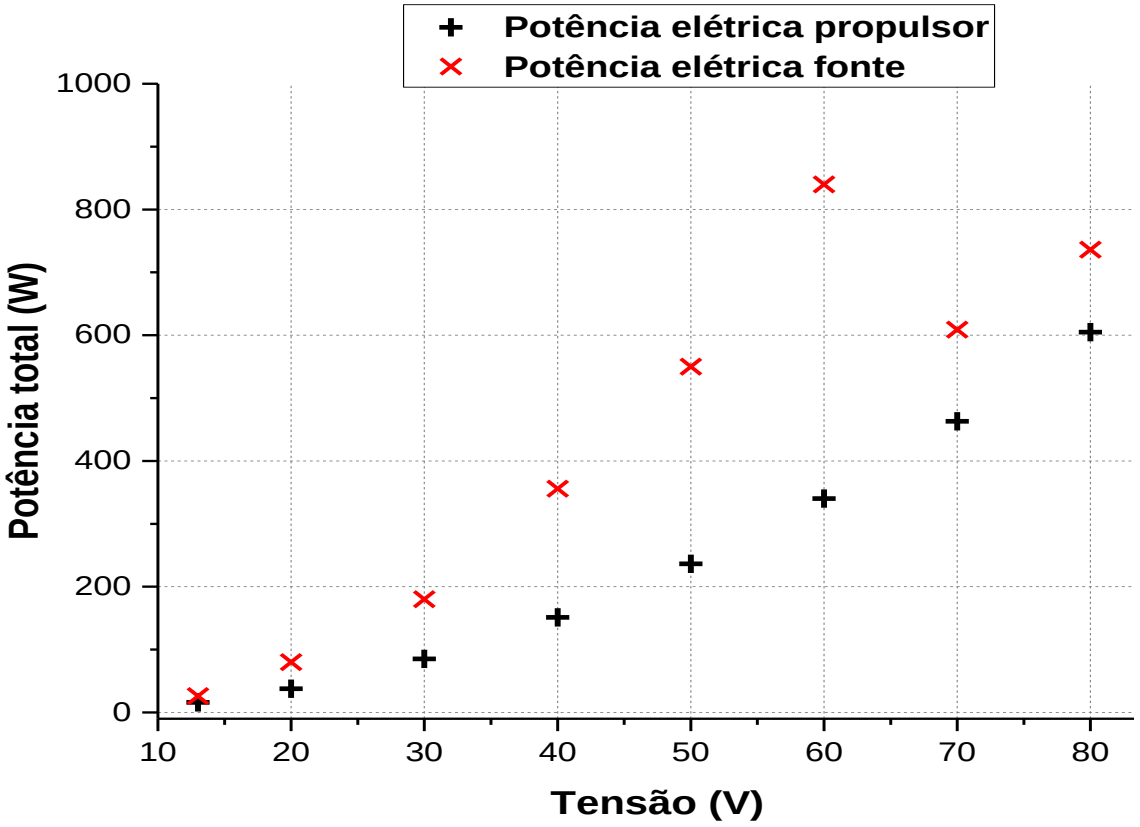
Figura 5.62 - Evolução da velocidade para com a tensão aplicada ao propulsor compacto de grafite. Mais uma vez observa-se o comportamento linear até uma tensão entre 60 e 70 Volts. A primeira figura mostra todos os pontos e o erro (que é muito baixo por isso não aparece no gráfico) e a segunda figura mostra a média dos pontos





Fonte: do autor.

Figura 5.63 - Comparação da potência fornecida pela fonte e da potência utilizada pelo propulsor para o experimento 20.

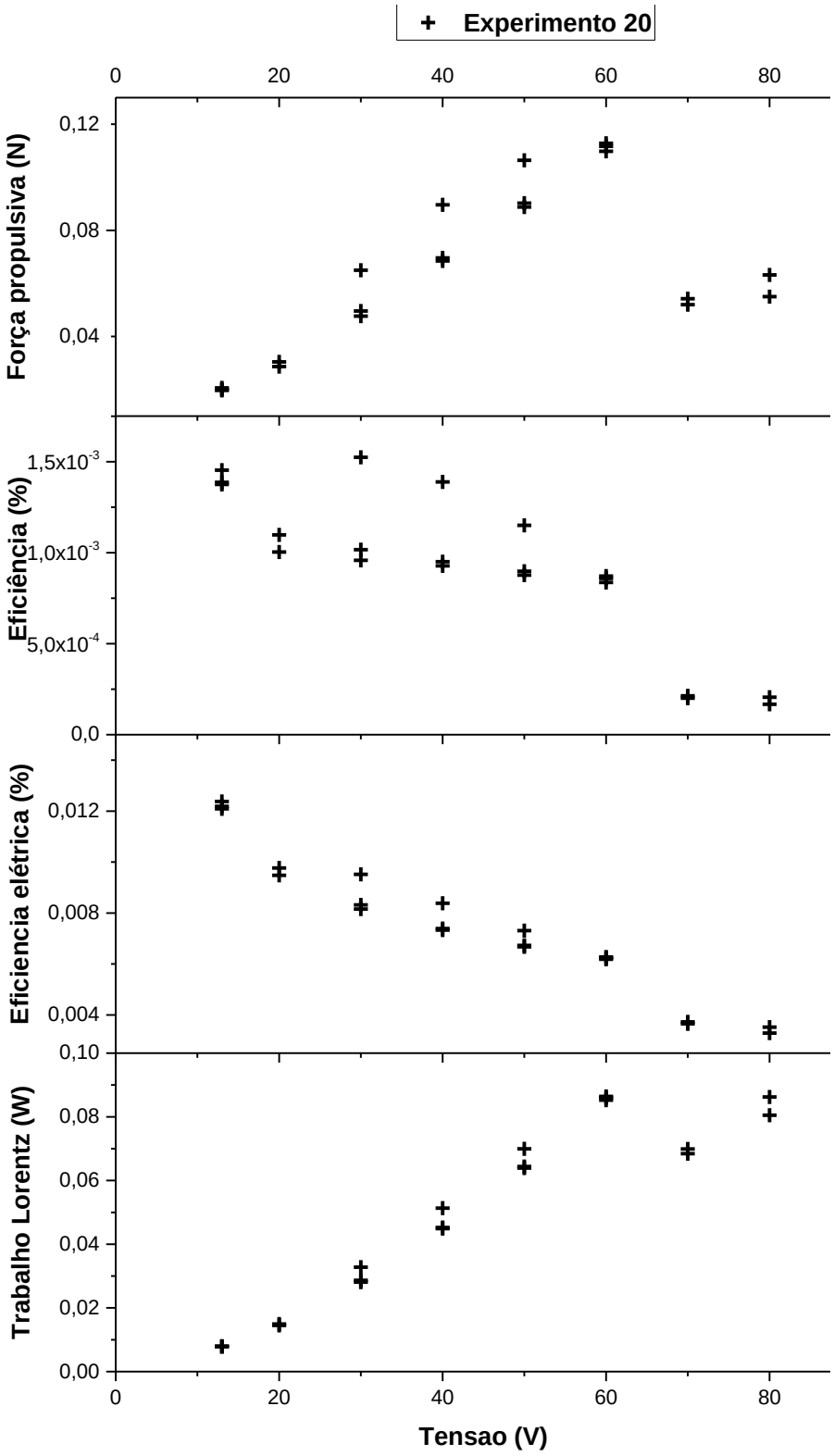


Fonte: do autor.

Ao analisar a Figura 5.60 e

Figura *5.63* nota-se que a potência da fonte é muito maior que a do propulsor, quando comparado aos demais experimentos. Isso, como definido no capítulo 3, pode estar relacionado com o aumento da resistência no propulsor (entre os eletrodos), causando uma queda na densidade de corrente e consequentemente na velocidade, outros fatores como oxidação dos eletrodos e mudança de condutividade do fluido poderiam acarretar essa diferença entre a potência fornecida pela fonte e a usada pelo propulsor.

Figura 5.64 - Parâmetros propulsivos em função da tensão para o experimento 20



Fonte: do autor.

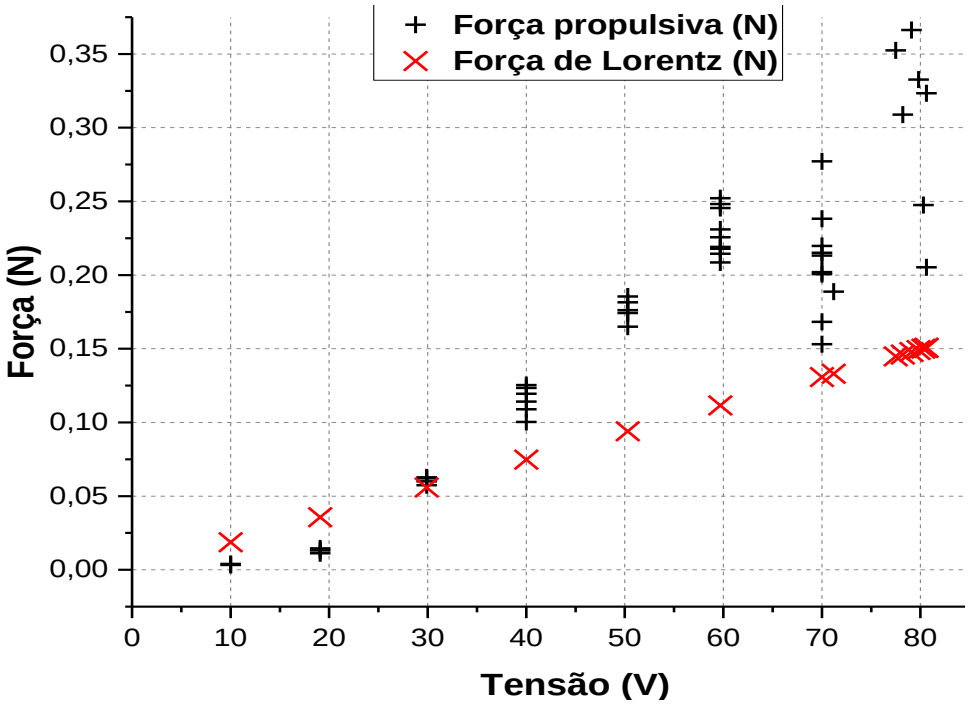
Como mencionado, o propulsor de grafite aqui testado foi elaborado no contexto da linha de pesquisa na qual se inclui o presente estudo, como uma possibilidade de uso para a Água Viva MHD. Embora os valores de velocidade

demonstrem que vale a pena investir nesse material, esses resultados foram obtidos quando já se estava produzindo e testando sistematicamente os eletrodos de cobre. É importante notar que o propulsor de grafite utilizou uma nova geometria e novos procedimentos de montagem, que, se implementados, implicariam em atrasos nos procedimentos já em curso (que já haviam estabelecido a linha do doutorado, que estava em “curso adiantado”). Note-se que a pequena seção transversal foi uma decisão o para o primeiro propulsor. A dimensão ótima (área que produz a maior propulsão) não foi ainda estudada. Como informação acerca do propulsor, a geometria construída pelo orientador tinha dimensões aproximadas de 50 mm x 18 mm x 100 mm. Embora ele não tenha sido utilizado, ambos orientador e orientado consideram interessante a análise comparativa com os propulsores de cobre aqui estudados, eventualmente induzindo mais estudos com este material (grafite). O propulsor de grafite produziu bons comportamentos para a força propulsiva e para a força de Lorentz, importantes para a movimentação de um veículo.

O que se observa, do conjunto de experimentos aqui relatado, é que a maior força propulsiva foi obtida com o propulsor com eletrodos de cobre (força em torno de 0,33N). O propulsor mais compacto de grafite produziu uma força propulsiva máxima em torno de 0,11N, portanto cerca de 1/3 do valor anterior, o que por si só justifica a manutenção dos eletrodos de cobre no presente estudo. Entretanto, considerando a pequena área de passagem de água do eletrodo de grafite na presente configuração, melhores valores são esperados em novas configurações.

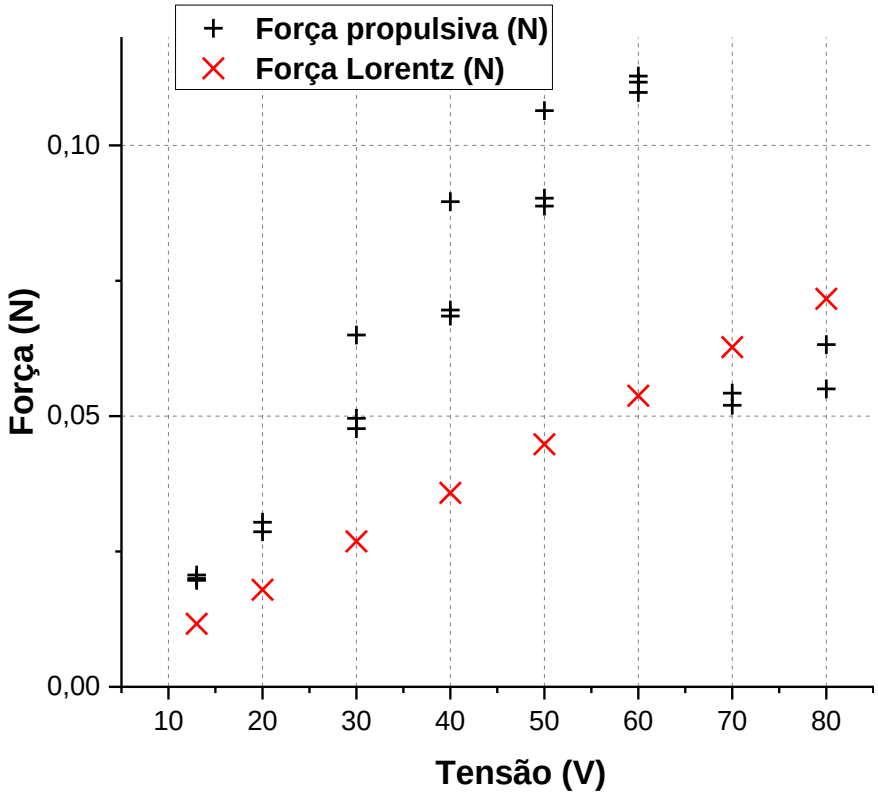
A comparação mais detalhada das forças propulsivas (N) e de Lorentz (N) foi feita para os experimentos 1 e 20, mostrados na Figura 5.65 (também vista na Figura 5.30) e Figura 5.66 (os melhores resultados para o cobre e o grafite, respectivamente). (Não confundir força de Lorentz (N) com o trabalho de Lorentz (W)). Podemos comparar a força de Lorentz com a força propulsiva e aplicar a equação 4.3 $\left(r = \text{força propulsiva}/\text{força de Lorentz}\right)$ para ambos.

Figura 5.65 - Comparação da força propulsiva e da força de Lorentz para o experimento 1



Fonte: do autor.

Figura 5.66 - Comparação da força propulsiva e da força de Lorentz para o experimento 20.



Fonte: do autor.

Nota-se que em ambos os propulsores a força propulsiva para as maiores tensões é superior a força de Lorentz, o que é altamente desejável, pois caso não ocorresse o próprio movimento não aconteceria. Para o experimento 1 (cobre) os dados sugerem que o propulsor só tem funcionalidade a partir dos 30 V onde a razão aparente é 1 (um) entre as forças.

O propulsor compacto de grafite (Figura 5.66), possui uma das melhores evoluções da força propulsiva em relação à força de Lorentz. As duas tendências (experimental para a força propulsiva e teórica para a força de Lorentz) são bastante lineares e indicam possível passagem pela origem. Assim, a força propulsiva do eletrodo de grafite pode ser considerada como sendo maior que a força de Lorentz em toda a extensão do experimento, até cerca de 60 V. A partir de 60 V o experimento muda seu comportamento, como observado também para altas tensões nos eletrodos de cobre.

Como já foi mencionado, a força propulsiva obtida com o eletrodo de cobre no experimento 1 apresentou valor máximo de cerca de 0,33 N. Isto foi obtido com área exposta de 15mm por 40 mm. Tal valor foi considerado adequado para viabilizar a próxima fase do presente estudo, voltada para a movimentação do veículo.

Com relação as eficiências notam-se que os valores são muito baixos, da ordem de 10^{-5} a 10^{-3}, o que é plausível na área de propulsão MHD. Esta ordem de grandeza está de acordo com valores relatados na literatura (ver por exemplo, Way (1967) e Doragh (1963)).

5.6. Sexta fase

Utilizando os sistemas de guias feitos à base de lego, foram efetuadas medidas de movimento do conjunto (propulsor + guia + boias). Primeiro testou-se a flutuabilidade do propulsor fixo à estrutura deslizante, colocando ou retirando peso para que sua massa especifica média ficasse similar à da água salgada. Ao atingir aproximadamente o equilíbrio, um piparote era dado no conjunto de forma a testar o seu ponto de estabilidade. Uma régua foi utilizada para ver os deslocamentos. A menor divisão da régua era de 0,5 mm, ocasionando um erro de medição de ± 0,25 mm. No entanto o presente autor resolveu considerar esse erro como ± 1,0 mm, uma

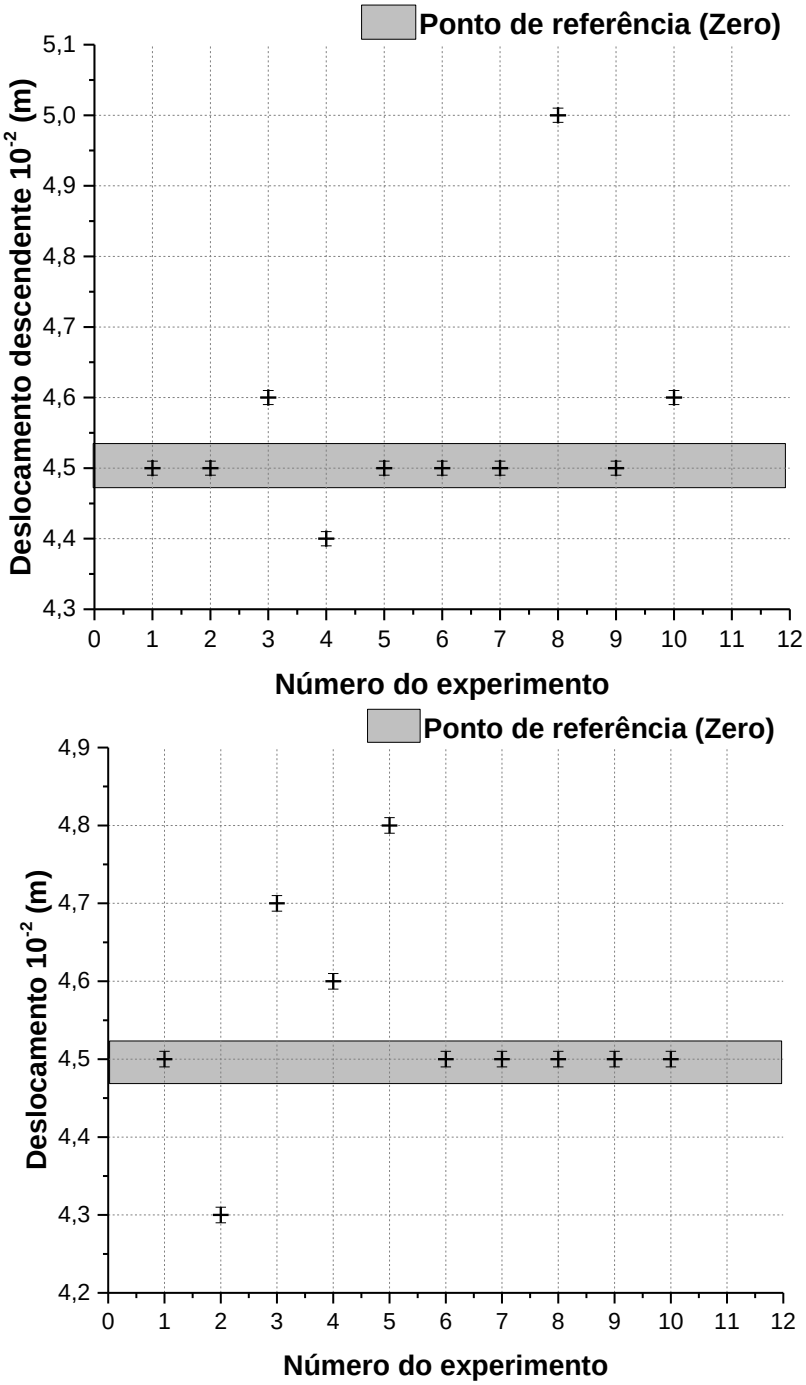
vez que ele pode estar associado a outros erros (não apenas à divisão marcada) como a visão ou o descuido do experimentador.

A Tabela 5.38 mostra o ponto de equilíbrio do veículo. O ponto inicial foi definido como coincidente com a leitura de 4,5 cm na régua.

Tabela 5.38 - Ponto de equilíbrio do conjunto. O valor inicial foi de 4,5 cm

Quando o conjunto é pressionado Deslocamento descendente 10^{-2} (m) Erro ± 1.10^{-3} (m)	Quando o conjunto é tensionado Deslocamento ascendente10^{-2} (m) Erro ± 1.10^{-3} (m)
4,5	4,5
4,5	4,3
4,6	4,7
4,4	4,6
4,5	4,8
4,5	4,5
4,5	4,5
5,0	4,5
4,5	4,5
4,6	4,5

Figura 5.67 - Pontos em que o conjunto se estabilizou, baseado no ponto (zero). Movimento descendente e ascendente.



Fonte: do autor.

Para testar o retorno à posição de equilíbrio, manualmente pressionou-se o conjunto do propulsor e do flutuador para baixo uma distância de um centímetro e soltou-se em seguida, verificando qual a posição de equilíbrio atingida. Este procedimento de “pressão” foi repetido 10 vezes. Posteriormente, tencionou-se o conjunto do propulsor e do flutuador para cima uma distância novamente de um

centímetro e soltou-se, verificando a posição de equilíbrio. Este segundo procedimento foi repetido também 10 vezes.

Entende-se que, considerando os possíveis erros de leitura efetuados pelo medidor, o equilíbrio atingido ficou bastante próximo do ponto definido como zero, o que significa que o conjunto não sofre forças externas consideráveis, que impeçam o seu movimento no retorno à posição de equilíbrio. Para uma análise inicial de forças, uma mola, definida no Apêndice F, foi usada. Como já mencionado nos procedimentos, em princípio ela seria usada como mola tensora e compressora. A constante da mola, que permite calcular a força, foi estabelecida da seguinte maneira: $F = -k\Delta x$ onde K é a constante da mola igual a (23,933 ± 0,212) N e Δx o deslocamento dela. Os valores de deslocamento foram obtidos experimentalmente, usando-se diferentes pesos acoplados a mola. O procedimento é comentado no apêndice F.Definido o retorno a posição de equilíbrio do conjunto (propulsor e molas), ligou-se o veículo, para testar sua força propulsiva e analisar seu deslocamento. A Tabela 5.39 mostra os dados obtidos

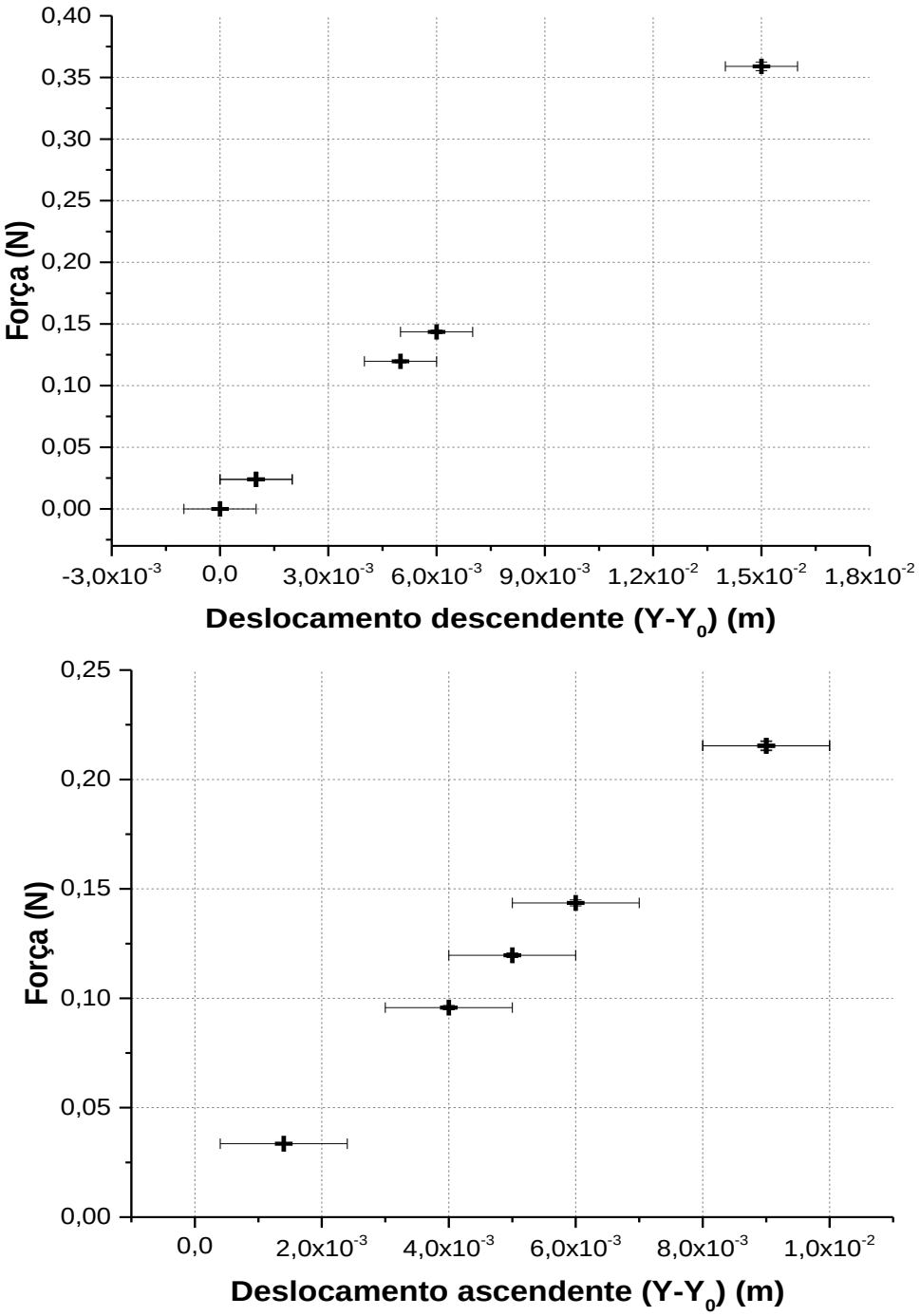
Tabela 5.39 - Deslocamento do conjunto e a força exercida na mola no movimento descendente

Deslocamento descendente $(Y-Y_0)10^{-2}$ (m) Erro ± 1.10^{-3} (m)	Força 10^{-2} (N)
0,0	0± 0
0,1	2,39± 0,03
0,6	14,36± 0,14
0,1	2,39± 0,02
0,5	11,97±0,12
1,5	35,90± 0,35

Tabela 5.40 - Deslocamento do conjunto e a força exercida na mola no movimento ascendente

Deslocamento descendente $(Y-Y_0)$ 10^{-2} (m) Erro ± 1.10^{-3} (m)	Força 10^{-2} (N)
0,9	21,54±0,19
0,14	0,03,35±0,03
0,4	0,09,57±0,09
0,5	0,11,97±0,11
0,6	0,14,36±0,14
0,9	0,21,54±0,23

Figura 5.68 - Força aplicada à mola devido ao movimento descendente e ascendente respectivamente



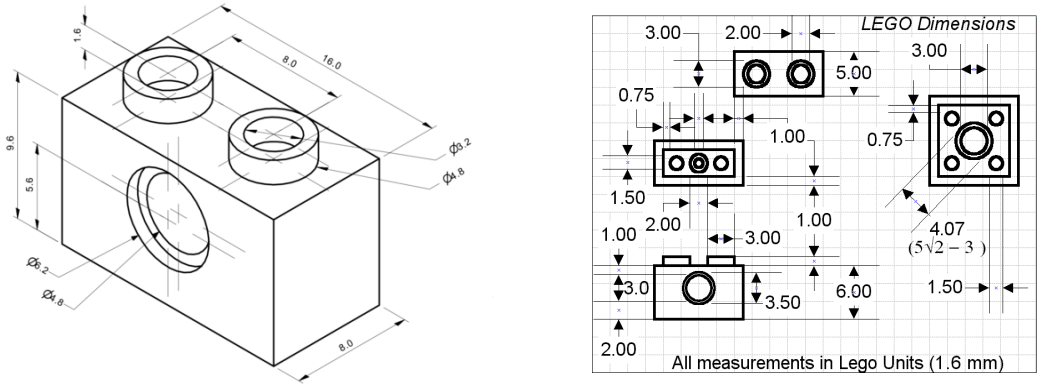
Fonte: do autor.

No entanto se considerarmos que os fios elétricos ligados ao conjunto propulsor/flutuador também atuam como molas, ver apêndice F, a força aplicada para obter o deslocamento de um centímetro é maior que aquela calculada pelo deslocamento da mola.

Entre um experimento e outro testou-se inicialmente qualitativamente o movimento do propulsor (sem dinamômetro ou régua para medição), observando um movimento significativo ao ligar a fonte. Este movimento implicava em um deslocamento que atingia um máximo e era parado pelo “efeito mola” dos fios elétricos. Como não havia equipamentos de medição e o evento mostrou um deslocamento significativo, procurou-se estimar os parâmetros característicos deste movimento repetindo várias vezes este procedimento no dia em que se efetuavam as medidas de força já descritas. Note-se que o movimento livre (sem efeito da mola) tende a ser mais intenso. Assim, havendo o registro visual do movimento pode-se obter conclusões também quantitativas do fenômeno. Embora essa forma de análise a partir do registro visual não tenha sido inicialmente planejada, ela se mostrou suficientemente efetiva para o estudo.

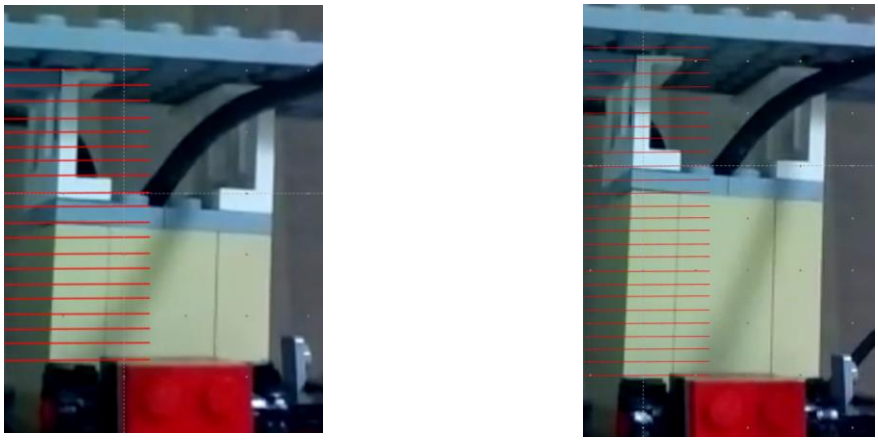
Baseando-se nas medidas oficiais das peças de lego, Figura 5.69, e ajustando essa medida pela foto com ajuda das guias do PowerPoint (configurada para 0,25 cm), pôde-se obter aproximadamente a distância percorrida pelo conjunto . A Figura 5.70 mostra o procedimento seguido.

Figura 5.69 - Dimensões das peças utilizadas no sistema.



Fonte: (https://grabcad.com/questions/lego-01-basic-dimensions-bricks-explained) e (http://bricks.stackexchange.com/questions/288/what-are-the-dimensions-of-a-lego-brick), respectivamente

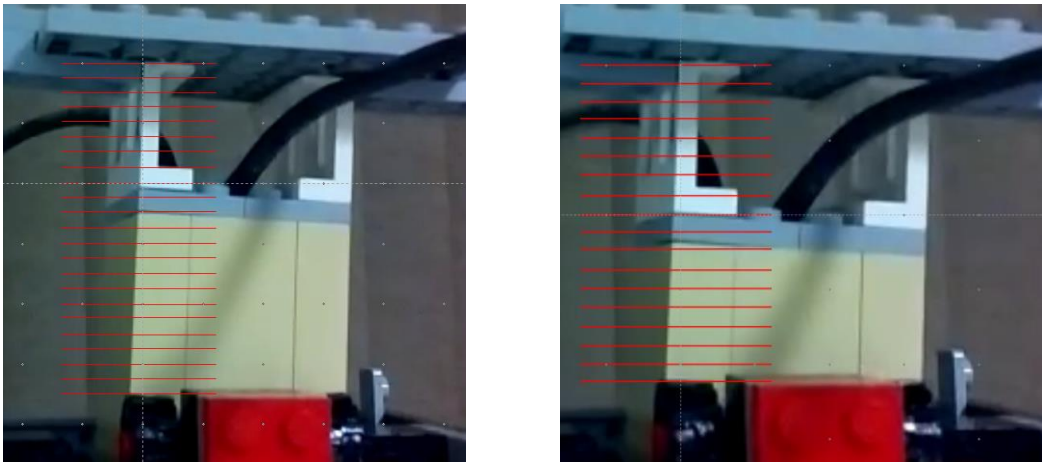
Figura 5.70 – Movimento ascendente do conjunto. Cada linha vermelha representa uma distância aproximada de 0,25 cm.



Fonte: do autor.

Na figura é possível ver que o sistema subiu aproximadamente 5 barras (1,25 cm) (há erros associados a esta metodologia, mas entende-se que a avaliação inicial é válida). O tempo registrado foi de aproximadamente 0,878 segundos (capturado no vídeo, sendo possível de determinar pela velocidade da máquina, isto é, quadros por segundo). A tensão e a corrente utilizadas nesse evento foram de 80 Volts e 31 Ampères, respectivamente, ou seja, a potência total da fonte (2400 W). O peso (ou, mais exatamente, a massa) do conjunto foi de 610 gramas. Os movimentos descendentes também foram capturados utilizando a mesma técnica, como pode ser visto na Figura 5.71.

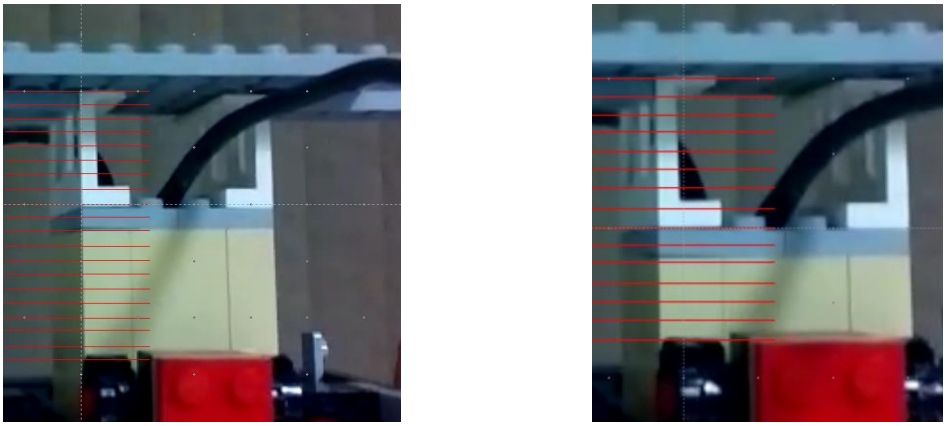
Figura 5.71 - Movimento descendente do conjunto. Cada linha vermelha representa uma distância aproximada de 0,25 cm



Fonte: do autor.

Concidentemente o conjunto também se descolou aproximadamente 1,25 cm para baixo, mas o tempo foi diferente, atingindo agora aproximadamente 1,202 segundos. Considerando que a técnica estava sendo testada pela primeira vez e que podiam haver interferências não observadas, como objetos tocando nos fios elétricos em um dos experimentos (por exemplo), uma nova medida foi feita para o movimento descendente, obtendo o mesmo deslocamento em um novo tempo de 0,712 segundos (Figura 5.72):

Figura 5.72 - Movimento descendente do conjunto, segunda tomada.. Cada linha vermelha representa uma distância aproximada de 0,25 cm



Fonte: do autor.

Para a análise quantitativa foram utilizadas as equações do movimento retilíneo uniformemente acelerado, admitindo que os valores médios calculados são indicativos do fenômeno observado.

A equação para a velocidade média do conjunto pode ser adotada como sendo simplesmente $v_v = s_v / t_v$. A equação para a aceleração média decorre da equação do movimento retilíneo uniformemente variado considerando deslocamento e velocidade iniciais nulos, ou seja, $a_v = 2s_v / t_v^2$.

Note-se que, admitindo uma aceleração média constante, a velocidade média é simplesmente $V_V = (a_V t_V^2 / 2) / t_V = a_V t_V / 2 = S_V / t_V$, conforme já apresentada.

Admitindo aceleração média constante, a força vinculada ao movimento observado pode ser calculada como $F_{va} = m_v a_v$. Essas aproximações produzem a Tabela 5.41:

Tabela 5.41 - Dados dos movimentos ascendentes e descendentes

	Tempo (s)	Deslocamento (m)	Velocidade (m/s)	Aceleração (m/s^2)	Força excedente(N)
Ascendente	0,46	0,0125	0,014	0,03	0,020
Descendente1	0,5	0,0125	0,010	0,02	0,012
Descendente2	0,4	0,0125	0,020	0,05	0,030

Note-se que a Tabela 5.41 fornece a velocidade média, a aceleração média e a "força média excedente" aplicada ao conjunto. No caso da força, é aquela que permitiu que o conjunto se deslocasse com a velocidade medida mesmo tendo a parcela resistiva associada ao "efeito mola" dos fios elétricos. Em outros termos, a tabela fornece:

$$F_{exc} = F_{impul} - F_{res} \tag{5.10}$$

Onde F_{exc} é a força excedente F_{impul} a força impulsiva e F_{res} a força resistiva dos fios elétricos. Ou seja, trata-se da força resultante média que efetivamente produziu o movimento observado. É preciso mencionar que se trata de grandezas médias, uma vez que ao final do movimento tem-se a igualdade da força impulsiva com a resistiva e velocidade nula (ou seja, a deflexão lateral dos fios foi tal que a força do efeito mola igualou a força impulsiva).

A velocidade produzida pelo propulsor, baseado nas tabelas do quinto estágio do presente estudo, apontam uma velocidade característica de aproximadamente 0,7 m/s para uma condição de tensão e corrente aplicada próxima àquela aqui utilizada, que, de acordo com a equação 3.45, fornece uma força propulsiva de 0,164 N.

Sem dúvida o movimento do conjunto propulsor mais boias teria naturalmente que considerar a resistência ao deslocamento provocada pelo fluido e pelos contatos com a guia vertical. Assim, a força útil para o movimento é forçosamente menor que a força propulsiva obtida com o propulsor parado. Os experimentos conduzidos nesta fase final permitiram obter um movimento, o qual, entretanto, teve como principal fator de resistência aquilo que se convencionou denominar aqui de "efeito mola" dos fios elétricos (e não a resistência ao movimento devido a efeitos viscosos e atrito).

Admitindo como valor característico para a força impulsiva $F_{impul} = 0{,}164$ N Tem-se, em termos médios (média para o movimento observado):

$$F_{res} = F_{impul} - F_{exc} \tag{5.11}$$

Para os três valores indicados na Tabela 5.41 ,tem-se a Tabela 5.42:

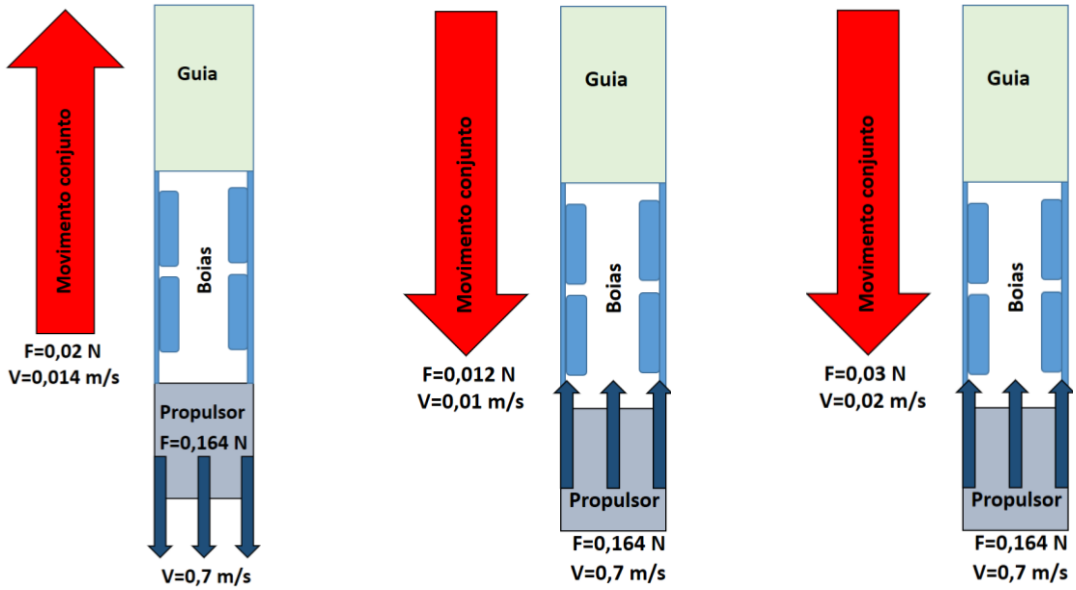
Tabela 5.42 - Força resistiva dos fios elétricos para os deslocamentos

Ascendente	$F_{res} = 0{,}144N$
Descendente1	$F_{res} = 0{,}152N$
Descendente2	$F_{res} = 0{,}134N$

A Figura 5.73 mostra como as forças atuaram no experimento considerando o deslocamento e os valores médios.

Assim, grande parte da força gerada pelo propulsor foi absorvida pelos fios no “efeito mola” ao longo do movimento. Como já foi mencionado, ao final deste há a igualdade entre a força propulsiva e a força resistiva. Entretanto, uma vez que o deslocamento ocorreu, mostra-se que o movimento vertical almejado no início dos trabalhos foi produzido, mesmo vencendo efeitos resistivos inicialmente não considerados. Tal resultado mostra que o veículo com movimento vertical é viável em escala de laboratório, sendo necessário, a partir desta constatação, estabelecer procedimentos que permitam que o movimento ocorra mais livremente.

Figura 5.73 - Velocidade e força do propulsor (seta azul escura) e do conjunto inteiro (seta vermelha) dos movimentos ascendente e descendentes



Fonte: do autor.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÃO

6.1. Conclusões específicas das diferentes fases

As conclusões são apresentadas inicialmente relativas às fases em que se dividiram os trabalhos, uma vez que procedimentos foram sendo ajustados de acordo com essas conclusões específicas.

6.1.1. Primeira fase

A fonte de 14 Volts de saída e as observações iniciais sem equipamentos de medição permitiram observar:

I. Como esperado, os parâmetros propulsivos tendem a aumentar quando aumenta a velocidade do fluido. A propulsão é maior quando se aumenta a área do propulsor (Figura 5.11). No entanto a distância dos eletrodos também aumenta, diminuindo a densidade de corrente e consequentemente exigindo mais potência da fonte.

II. Os erros de medida (incertezas) desta fase são grandes devido aos procedimentos adotados.

III. Concluiu-se adotar propulsores com menor área dos eletrodos, com eletrodos mais próximos. Concluiu-se por uma fonte com tensão aplicável maior (80 V) e por medidas de velocidade utilizando tubo de Pitot.

6.1.2. Segunda fase

A nova fonte e o tubo de Pitot permitiram realizar experimentos com precisão adequada para este estudo.

I. O manômetro inclinado inicialmente adotado mostrou-se adequado para as medidas com o tubo de Pitot, havendo um tempo de estabilização das colunas que deve ser respeitado e a necessidade de anotação das variações observadas.

II. As velocidades obtidas foram maiores que aquelas avaliadas na primeira fase, praticamente triplicando em seu valor.

III. A margem de erro dos experimentos foi sensivelmente diminuída.

IV. Observou-se queda do desempenho do propulsor para as altas tensões, decorrente provavelmente do acúmulo de precipitados (ou oxidação) dos eletrodos.

V. Considerando a maior facilidade de uso de um manômetro digital no tubo de Pitot, no tocante às leituras e anotação das variações, adotou-se o uso do manômetro digital.

6.1.3. Terceira fase

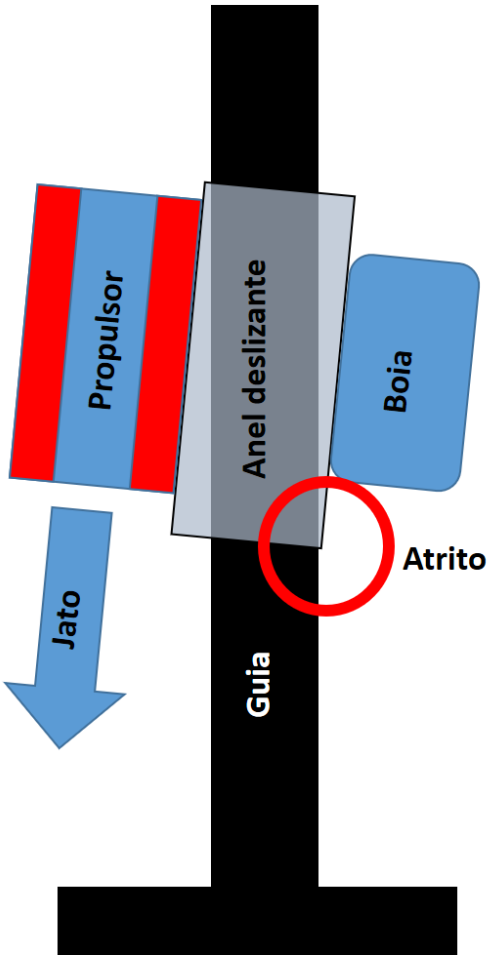
O almejado movimento vertical do veículo não foi observado utilizando os equipamentos propostos. Concluiu-se que:

I. Os cabos utilizados para os experimentos causavam interferência direta no movimento, uma vez que eles possuíam massa e resistência, e agiam como molas.

II. Insistiu-se algum tempo no uso de guias verticais com buchas para direcionar o veículo, mas o atrito devido à inclinação do sistema “propulsor+boias” impede o movimento (ver figura 6.1).

III. Partiu-se para o uso de guias com duas hastes, admitindo que possa haver uma melhor distribuição de esforços e minimização da possibilidade de inclinação.

Figura 6.1 - Atrito gerado entra a guia e o veículo



Fonte: do autor.

6.1.4 Quarta fase

O uso de duas hastes verticais como guias do movimento melhorou a estabilidade do sistema, uma vez que o propulsor e o conjunto de boias ficavam distribuídos simetricamente entre uma placa presa a dois suportes. Observou-se um movimento vertical do propulsor, pequeno (em torno de 0,5 cm a 1 cm) devido à presença dos fios elétricos, que se mostraram um empecilho difícil de superar Dois problemas adicionais foram observados:

I. O uso de hastes metálicas é desaconselhado. Os resíduos (precipitados) da eletrólise em solução salina (NaCl) interferem no movimento dos rolamentos,

impedindo que girem, e depositam em toda a estrutura metálica das guias, mostrando inadequação do seu uso para experimentos com eletrodos em MHD. Ver figura (3.4) que mostra efeitos de corrosão durante a eletrólise.

II. O pêndulo construído nesta fase para obter a força através do seu cálculo mais “direto”, obtido da deflexão da posição da massa conhecida do propulsor apresentou resultados positivos e negativos. Os valores obtidos via medida da deflexão do pêndulo foram próximos dos resultados obtidos via medida da velocidade (em torno de 0,1 N a 0,3 N), mas não foram feitas medidas simultâneas dessas variáveis

Dificuldades foram encontrada na construção do pêndulo. Os cabos de energia agiram contra o movimento pendular. O sistema de rolamentos instalado na mesma linha de ação do movimento pendular (25 cm na régua, no eixo do pêndulo) no qual os fios foram presos representou um sucesso construtivo. Entretanto, houve superaquecimento que derreteu o isolamento do eixo, bem como houve suspeição de desgaste ou dilatação excessiva dos rolamentos, impedindo o adequado movimento. O superaquecimento na versão construída representa um aspecto negativo. Mesmo sem o derretimento observado, a perda de energia é indesejável. As resistências de contato (que levam ao superaquecimento) implicam também em menor corrente passante pelo sistema, igualmente indesejável.

Os fatos conjuntos de se obter boas medidas de velocidade e de haver o aspecto descrito de superaquecimento dos componentes de contato do pêndulo levaram à conclusão de se utilizar apenas as primeiras no cômputo das forças propulsivas aqui obtidas.

6.1.5 Quinta fase

Nessa fase o propulsor definitivo foi escolhido. As técnicas de medição de pressão, velocidade e tensões foram mantidas, obtendo-se valores confiáveis para os parâmetros propulsivos inerentes ao propulsor definitivo.

Um dos fenômenos mais marcantes ao longo dos experimentos foi a diminuição dos valores medidos de pressão quando se aproximava da potência total da fonte (80 V). Em praticamente todos os experimentos a pressão medida diminuiu, assim como a eficiência elétrica e eficiência global do propulsor. Uma primeira conclusão é a de que nem sempre tensões altas obrigatoriamente geram melhores velocidades. Para as disposições construtivas dos propulsores aqui utilizados houve a queda mencionada. Também se observou que os valores de tensão e de corrente ficavam instáveis para tensões acima de 70 volts e 80 volts.

Comparações foram entre a potência calculada a partir da tensão aplicada e da corrente transmitida e a potência calculada utilizando as características do eletrodo e do meio. Nesse caso, idealmente as potências são iguais. Havendo perdas ao longo do trajeto entre a fonte e o eletrodo, as potências calculadas no eletrodo serão menores.

Os cálculos foram apresentados utilizando um valor de condutividade elétrica constante. Na maioria dos experimentos os valores obtidos pelos dois métodos foram bem próximos. Os resultados apresentados mostram curvas distintas para tensões acima de 50 a 60 volts. Nesses casos entende-se que passa a haver o aumento da resistência global à passagem de corrente, que pode envolver alterações na superfície de contato entre a solução e os eletrodos. Formação de gases e precipitados podem produzir essas interferências. De forma geral, a condutividade elétrica não é a única grandeza a considerar na resistência global a passagem de corrente.

O procedimento de aplicação da tensão foi de aumentá-la a partir do menor valor até atingir o valor máximo, para em seguida diminuí-lo gradativamente novamente para a tensão mínima. Embora se esperasse valores inferiores de pressão medida na fase de decréscimo da tensão, devido à eletrólise, aumento da temperatura, possível depósito de precipitados e oxidação, isto não ocorreu. Para um tempo médio de experimento de 2 minutos não se observou mudança significativa no comportamento dos propulsores ao longo do aumento e diminuição da tensão. Exceções ocorreram quando o eletrodo descolava do propulsor ou desgastava.

Entende-se que a causa para a diminuição das características propulsivas pode ser a alteração da condição da interface solução/eletrodo devido à presença de elementos resistivos que não aderem à superfície. Precipitados podem estar presentes, mas não aderir, bem como bolhas de gás em grande quantidade. Basta

que este efeito ocorra em um eletrodo para que haja aumento da resistência global e consequente diminuição da corrente elétrica transmitida.

Nos primeiros experimentos atingiu-se o valor máximo da tensão (80 Volts). Nos experimentos seguintes não se ultrapassou 50 ou 60 Volts. Os fatores que levaram a isto são:

I. Instabilidade observada nos valores de tensão e corrente a partir de 50 ou 60 Volts. Decidiu-se, nos casos de instabilidade observada, realizar medidas abaixo desta faixa.

II. Eventual irregularidade na confecção dos eletrodos. Apesar do cuidado para seguir padrões semelhantes, pode ter ocorrido alguma falha, como na soldagem dos fios.

III. Eventual irregularidade não detectada na sequência experimental, como a limpeza da cuba experimental, homogeneidade do eletrólito, eventuais altas temperaturas pontuais, ou geração localizada de gases.

Um propulsor com eletrodo de grafite apresentou desempenho muito promissor. Sua construção permitiu o isolamento adequado dos componentes, de maneira que apenas a superfície dos eletrodos ficou em contato com a água. A velocidade máxima atingida foi de 1,2 m/s. Aspectos positivos foram:

- Baixa demanda de corrente.
- Baixas Temperaturas.
- Desgaste de grafite muito baixo, mantendo a superfície íntegra.

Como aspecto negativo menciona-se a aparente produção intensa de gás Cloro, o que fez com que se evitasse proximidade com o experimento. Em termos de geometria de construção, as dimensões da superfície do eletrodo foram de aproximadamente 2,5 cm por 0,5 cm, enquanto que a seção transversal foi de 0,8 cm por 1,0 cm (distância entre eletrodos de 1,0 cm). Essas menores dimensões implicaram em menores forças propulsivas, bem como menores eficiências global e elétrica.

Em termos de evolução da corrente elétrica com o aumento da tensão, houve queda de valores e instabilidade da corrente elétrica para tensões de 70 e 80 Volts.

Entende-se que os aspectos positivos arrolados sugerem mais estudos com eletrodos de grafite.

6.1.6 Sexta fase

O equipamento elaborado para transmitir energia através de cubas contendo água e sal mostrou-se ineficiente para a geometria adotada. Não foram adotadas medidas de aumento da superfície de contato entre os fios condutores e a solução salina. Apenas os fios originais não desencampados foram usados.

O sistema de cubas para o contato móvel do fio, resolveu o problema de resistência ao movimento.

Contudo, as presentes disposições construtivas implicaram em perda de potência por efeito Joule. Também a resistência global proporcionada pelas cubas e pelos fios implicou em uma corrente elétrica transmitida cerca de 85% menor que nos casos anteriores.

Não foram tomadas medidas de aumento da área de contato. Os tempos disponíveis para o presente estudo limitaram as possibilidades de novas geometrias.

O ajuste do volume de ar (volume vazio) para que o peso do conjunto a movimentar igualasse o empuxo proporcionado mostrou-se moroso. O ajuste foi feito utilizando água nos frascos das boias e foi visual (não gravimétrico), o que limitou a precisão do ajuste passo a passo. Em termos de constância das propriedades físicas da solução salina, pode–se mencionar que:

I. A massa especifica da solução salina podia sofrer mudanças, tendo-se observado depósitos de sais no fundo da cuba.

II. Eventualmente os resíduos e precipitados gerados com a eletrólise podem contribuir para alterações de massa específica.

III. O aumento de temperatura pode produzir alterações de solubilidade e causar as modificações de massa específica mencionadas.

Embora haja a expectativa de os efeitos dos fatores mencionados serem pequenos, o contexto de realização primeira, isto é, sem experiência anterior do

experimentador, fez com que houvesse constantes ajustes dos volumes de água nos frascos.

O movimento vertical observado, sem usar as cubas para proporcionar contato sem resistência, ficou sujeito ao efeito mola dos fios elétricos. Portanto, o movimento ocorreu até se atingir o equilíbrio entre a força propulsiva e a força resistiva do “efeito mola”

Utilizou-se método ótico, através de registro de imagens em filmes, para quantificar o movimento. Este método apresentou-se como melhor solução, permitindo o registro de todo o deslocamento e seu tempo e a avaliação das grandezas médias velocidade, aceleração e força.

O deslocamento vertical foi observado tanto como movimento ascendente quanto como movimento descendente, permitindo o cálculo dos parâmetros médios em ambos os casos.

6.2. Conclusões Gerais

O objetivo inicialmente descrito foi o de construir e testar um veículo MHD que permitisse o movimento vertical tanto ascendente como descente, em escala laboratorial, dentro de uma cuba contendo solução salina. Para atingir este objetivo diferentes passos tiveram que ser seguidos, desde o início com pouco conhecimento de fato acerca de uma possível solução, passando pela geração de material original que propiciou o estudo mais detalhado dos propulsores propostos (como os procedimentos para obtenção da velocidade e potência, por exemplo), e chegando ao teste que mostrou que o movimento proposto é possível.

Como conclusões imediatas deste estudo tem-se:

- O movimento vertical é viável em escala de laboratório. Relatos de estudos com movimentos verticais em MHD não foram encontrados na literatura.
- Eletrodos de cobre para os propulsores são os de mais fácil confecção.
- A solução salina concentrada mostrou-se viável para os estudos em escala de laboratório.

- O uso do tubo de Pitot possibilita a determinação das velocidades que quantificam a força propulsiva.

- A fonte de 80 V mostrou-se viável para os experimentos na escala estudada.

Como conclusões quantificáveis deste estudo tem-se:

- A área dos eletrodos de cobre mais viável foi de 0,15 cm por 0,40 cm

- A distância entre os eletrodos de cobre mais viável foi de 2 cm.

- A área da seção transversal atravessa da pela solução salina mais viável foi de 2,2 cm por 1,5 cm.

- A maior velocidade alcançada com os eletrodos de cobre foi de 1,043 m/s.

- A maior força propulsiva alcançada com os eletrodos de cobre foi de 0,37 N.

- Há desgaste rápido dos eletrodos de cobre, o que limita o seu uso para grandes tempos de deslocamento.

- Foram quantificados parâmetros propulsivos e registrados para comparações futuras.

Como conclusões que induzem mais estudos diretos a partir deste trabalho tem-se:

- As características geométricas e propulsivas obtidas com um propulsor de grafite foram promissoras e indicam este material como adequado para o tipo de veículo proposto.

- As características de desgaste (mínimas) observadas no propulsor de grafite indicam este material como adequado para a confecção de propulsores.

- As características aparentes de liberação de gás Cloro com o eletrodo de grafite sugerem a busca de soluções para destino deste gás.

- O uso de pêndulo para a obtenção da força propulsiva a partir de um segundo conjunto de variáveis (deslocamento, braço de pêndulo, massa do propulsor) surge como um procedimento adequado para medidas comparativas.

- O uso de guias com cubas com soluções salinas e novas geometrias para os fios elétricos que nelas se deslocam possui características ainda promissoras para bancadas de laboratório.

- O registro detalhado dos procedimentos seguidos, com passos positivos e negativos, ainda é importante para o banco de dados desta área. Tal registro de procedimentos deve ser mantido em trabalhos futuros, uma vez que tal banco de dados é escasso ou inexistente.

Como sugestões tem-se:

- Realizar trabalhos comparativos com grafite e cobre, verificando principalmente a sua durabilidade. Veículos para percursos mais longos e para tempo de operação maiores necessitam de eletrodos com características de durabilidade adequadas.

- Efetuar a montagem de uma bancada com liberdade de movimentos verticais.

- Verificar a possibilidade de usar baixas potências, de maneira que se possa trabalhar com unidades de potência embarcadas, em escala de laboratório.

- Testar novos materiais para os eletrodos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOLLAHZADEH, M. Y.; JAMALABADIA, B.; PARK, J. H. Electro-Magnetic Ship Propulsion Stability under Gust**s**. **International Journal of Sciences: Basic and Applied Research**, v. 14, n. 1, p. 421-427,2014.

AKAGI, S.; FUJITA, K.; KAZUO S. Optimal design of thruster system for superconducting electromagnetic propulsion ship. Proceedings of the 5th international marine design conference, 1994, Delft. **Proceedings**… Netherlands: IMDC, 1994. p. 561 – 574.

AOKI, L. P. **Estudo do efeito magnetohidrodinâmico em um eletrólito a partir do uso de um dispositivo ejetor eletromagnético**. 2011. 225 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

ARJMAND, F.; ADRIAENS, A. Influence of pH and Chloride Concentration on the Corrosion Behavior of Unalloyed Copper in NaCl Solution: A Comparative Study Between the Micro and Macro Scales. **Materials**, v. 5, p. 2439 – 2464, 2012.

BASHKATOV, V. Reactive forces in magneto-hydrodynamics and their application for MHD-jet propulsive ocean ships. International Symposium on Superconducting Magnetohydrodynamic Ship Propulsion,1991, Kobe. **Proceedings**…Kobe: Ship and Ocean Foundation,1991. 411 p.

BERRY, G. (1992). Magnetohydrodynamic sea water propulsion. International symposium on superconducting magneto-hydrodynamics propulsion ships, Kobe. **Conference**… Kobe, 1992. n.52.

BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of plasma physics**. New York: Springer, 2004.

BEDNARCZYK, A. A. **Nuclear electric magnetohydrodynamic propulsion for submarine**. 1989. 392 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1989.

BELLAN, P. M. **Fundamentals of Plasma Physics**. New York: Cambridge University Press, 2006.

CENTER FOR AUTONOMOUS VEHICLE RESEARCH. Disponível em: <http://my.nps.edu/de/web/cavr/rov>. Acesso em: 10 de nov. 2016.

DAVIDSON, P. A. **An introduction to magnetohydrodynamics.** New York: Cambridge University Press, 2001.

DIMITRIADIS, P. A. Prospects for superconducting systems in military submarines. **Journal of Hydronautics**, v. 6, n. 1, p. 16-20,1972.

DORAGH, L. R. A. Magnetohydrodynamic ship propulsion using superconducting magnet. SNAME Annual Meeting, 1963, New York. **Proceedings**… New York: SNAME meeting, 1963. 14 p.

DOSS, E. D.; SIKES W. C. **Feasibility of MHD submarine propulsion. Phase II – MHD propulsion: Testing in a two tesla facility**. Joint research program. Illinois: Argonne national laboratory, 1992. 174 p.

DOSS, E. D.; GEYER, H. K. MHD seawater propulsion. **Journal of ship research**, v. 37, n. 1, p. 49-57, 1993.

ENSINO, PESQUISA E POESIA. Diponível em <http://www.edulourenco.com.br>. Acesso em: 26 set. 2016.

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA DE VISEU. Disponível em: <http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/jqomarcelo/>. Acesso em: 26 set. 2016.

FELLS, I. Rocket technology generates more power. **New Scientist**. v. 112, n. 1528, p. 39-42,1986.

FITZPATRICK, R. **Plasma physics: an introduction**. New York: CRC press, Taylor & Francis group, 2014.

FRIAUF, J. B. Electromagnetic ship propulsion. **Journal of American Society of Naval Engineers**, p. 139-142,1961.

GOEDBLOED, J. P.; POEDTS, S. **Principles of magnetohydrodynamics: with applications to laboratory and astrophysical plasmas**. New York: Cambridge University Press, 2004.

GOLDSTON, R. J.; RUTHERFORD, P. H. **Introduction to plasma physics**. New York: Taylor & Francis Group, 1995.

GRABCAD COMMUNITY. Disponível em: <https://grabcad.com/questions/lego-01-basic-dimensions-bricks-explained>. Acesso em: 26 set. 2016.

HARTMANN, J. Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field. **Mathematisk-fysiske meddelelser**, v. 15, n. 6, 1937.

HUMMERT, G. T. **An Evaluation of direct current electromagnetic propulsion in seawater**. Pittsburg: Office of Naval Research Report,1979. 83 p.

Gavriel J. Iddan. Self-propelled device having a magnetohydrodynamic propulsion system. US 6939290 B2, 11 fev. 2002, 6 set. 2005. Disponível em: <http://www.google.ch/patents/US6939290>. Acesso em: 08 mar. 2017.

IWATA, A.; SAJI, Y.; SATO, S. Construction of model ship ST-500 with superconducting electromagnetic thrust system. Proceedings of the 8th International Cryogenic Engineering Conference, 1979, Genova. **Proceedings**… Genova, 1979.

IWATA, A.; TADA, E.; SAJI, Y. (1983). Experimental and theoretical study of superconducting electro-magnetic ship propulsion. Japan ship centre conference, 1983, London. **Proceedings**... London 20 p.

IWATA, A.; SAJl, Y. Study of superconducting electromagnetic thrust ship. **Fune on Kagaku**, v.1, p. 37-38, 1984.

JAPAN AGENCY FOR MARINE-EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY. Disponível em: <http://www.jamstec.go.jp/e/>. Acesso em: 26 set. 2016.

JIANG, H. Three-dimensional numerical simulation on helical channel MHD thruster. **Electrical Machines and Systems**, Wuhan, p. 4150 – 4154, 2008. Supplement. Program and abstract Electrical Machines and Systems, 2008.

JIANG, H. Three dimensional numerical simulation on helical channel MHD thruster. In: Electrical machines and systems ICEMS, 2008, Wuhan. **Proceedings**… Wuhan: ICEMS Conference, 2008.

KHALED, K. F. Studies of the corrosion inhibition of copper in sodium chloride solutions using chemical and electrochemical measurements. **Materials Chemistry and Physics**, v. 125, p. 427 – 433, 2011.

KHONICHEV, V.; YAKOVLEV, V. Theory of a free-field conduction propulsion unit. **J Appl Mech Techn Phys**, v. 21, p. 666–673, 1980.

James F. King Jr. Magnetohydrodynamic propulsion apparatus. US 3322374A, 30 set. 1964, 30 may. 1967. Disponível em: <https://www.google.com/patents/US3322374>. Acesso em: 08 mar. 2017.

KLUIJVEN, V. et al. (2012). **Report magneto hydrodynamics**. Netherlands: Maritime University of Applied Sciences, 2012. p. 25.

KUBOTA, S.; SHIMAOKA, Y. Development of power supply suitable for electromagnetic propulsion system using high frequency AC. **Journal of the JIME**, v. 46, n. 1, 2011.

LARMOR, J. How could a rotating body such as the Sun become a magnet? **Reports of the british association**, v. 87, p. 159–160, 1919.

LEGO ANSWERS. Disponível em: <http://bricks.stackexchange.com>. Acesso em: 26 set. 2016.

LI, Z.; JIN, L.; WANG, W.; WANG, S. Inhibition of the Corrosion of Copper in a Sodium Chloride Solution Using 4-((4-dodecylphenylimino)methyl)phenol. **Int. J. Electrochem. Sci**., v. 8, p. 6513 – 6523, 2013.

LIMA, C. R. A. Teoria de erros medidas e gráficos. Material de estudo. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas, 2010. Disponível em : <http://www.fisica.ufjf.br/~cralima/index_arquivos/Erros/erros.pdf>.

LIN, T. F.; GILBERT J. B.; KOSSOWSKY, R. (1990). **Sea-water magnetohydrodynamic propulsion for next-generation undersea vehicles**. Pennsylvania: Laboratory and The Nuclear Engineering Department - PennState, 1990. 49 p. Report.

LUQUE, J. C. C. **Identificação e controle de veículo submersível autônomo sub-atuado**. 2012. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MENG, C. The optimization research of MHD propulsion pipeline of the ship based on the MHD model. 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT), 2016, Hangzhou. **Proceedings**… Hangzhou, 2016. p. 852 – 855.

MEREGE, F. **Desenvolvimento de um sistema propulsivo marítimo utilizando magnetofluidodinâmica (MHD)**. 2003. 61 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MISSIATO, O. **Movimento de fluidos condutores submetidos à influência de campos eletromagnéticos externos: criação de um vórtice magnetohidrodinâmico na água do mar**. 1998. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

MITCHELL, D. L.; GUBSER, D. U. Magnetohydrodynamic ship propulsion with superconducting magnets. **Journal of Superconductivity**, v. 1, I. 4, p. 349–364, 1988.

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION (NOAA). Disponível em: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html>. Acesso em: 26 de set. 2016.

O MUNDO DAS BAIXAS TEMPERATURAS. Material de estudo, disponível em: <http://www.if.ufrj.br/~sandra/Topicos/palestras/BaixasTemp_LG.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2016.

OLIVEIRA JR, R. P.; MARTINS, D. E. A.; OLIVEIRA, M. A. S. (2006). Produção eletroquímica de cloro ativo, uma alternativa viável para processo de desinfecção. Anais do 12° encontro de iniciação científica e pós-graduação do ITA, 2006, São José dos Campos. **Anais**… São José dos Campos: ITA, 2006. 7 p.

OLIVEIRA, M.; Robôs aquáticos. **Pesquisa Fapesp**, n. 141, 2017.

PENG, Y. et al. Performance analyses of helical MHD thruster in 14 Tesla. 33rd plasmadynamics and lasers conference fluid dynamics and co-located conferences, 2002, Hawaii. **Proceedings**… Hawaii: IAAA, 2002.

PETRICK, M. et al. Feasibility study of an electromagnetic thruster for ship propulsion. **IEEE Transactions on magnetics**, v. 27, p. 3735–3742, 1991.

PHILLIPS, O.M. The prospects for magnetohydrodynanlic ship propulsion. **Journal of Ship Res**, p.43, 1962.

REMOTELY OPERATED VEHICLE ROV MINERVA. Disponível em: <https://www.ntnu.edu/oceans/minerva>. Acesso em: 10 nov. 2016.

Warren A RICE, A. (1961). Propulsion systems. US2997013, 18 jul. 1958, 22 ago. 1961. Disponível em : <https://www.google.com/patents/US2997013>. Acesso em: 8 mar. 2017.

RITCHIE, W. Experimental researches in voltaic electricity and electromagnetism. **Philosophical transactions of the royal society of London**, v. 122, p. 279 – 298, 1832.

ROV LUMA DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ SUBMARINO NACIONAL. Disponível em: <http://www.cembra.org.br/seminario/?q=node/182>. Acesso em: 27 set. 2016.

SAJI, Y.; KITANO, M.; IWATA, A. Basic study of superconducting electromagnetic thrust device for propulsion in sea-water. **Adv. Cryo. Eng.,** v. 23, p. 159-169, 1978.

SAJI, Y. et al. **Fundamental study of superconducting electromagnetic ship thruster driven by the alternating magnetic fields**. Kobe: Bulletin of Kobe University of Mercantile Marine, 1988, n. 36, p. 205.

SASAKAWA, Y. et al. The superconducting MHD-propelled ship YAMATO-1. Proceedings of the 4th International Conference and Exhibition: World Congress on Superconductivity,1996, Orlando. **Proceedings**… Orlando: NASA Conference, 1996 v. 1, p. 167-17.

SERRANO, R. **Geração de um vórtice em anel em fluidos condutores por meio de indução magnetohidrodinâmica**. 2000. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

SHERCLIFF, J. A. **Magnetohydrodynamics**. Coventry: Warwick University, 1965.

SCHULZ, H.E. **Magnetohidrodinâmica de potência baixa – MPB**. São Carlos: EESC – USP, 2003, 20p. Relatório apresentado ao Departamento de Hidráulica e Saneamento.

SCHULZ, H. E. et al. One dimensional turbulent transfer using random square waves – scalar/velocity and velocity/velocity interactions. In: **Hydrodynamics - Advanced topics**. 2011, cap.1, p. 3 - 33.

SUTCLIFFE, W.; NEISTER, T. MHD propulsion. HEPP14 Project Report, 2009. Disponível em: <https://www.physicsforums.com/attachments/mhd-propulsion-2009-1-4-pdf.72737>.

TAKEZAWA, S. et al. Operation of the thruster for superconducting electromagnetohydrodynamic propulsion ship “YAMATO 1”. **Bulletin of the M.E.S.J**, Japan, v. 23, n.1, p. 46 – 55, 1995.

TEMPELMEYER, K. E. (1990). **Electrical characteristics of a seawater MHD thruster**. Bethesda: David Taylor research center, 1990. 43 p. Propulsion and auxiliary systems department research & development report.

TEMPELMEYER, K. E.; NORFOLK, J.; NESBITT, S.; GORDON, J. Noise in small MHD-type seawater thruster in real and simulated ocean waters. OCEANS '91. Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's, 1991, Hawaii. **Proceedings**… Hawaii: IEEE meeting, 1991.

TREPANESE, M.; RAIMONDI, F. M.; CURTO, D.; VIOLA, A. A computational magnetohydrodynamic model of a marine propulsion system. OCEANS Conference, 2016. Shanghai. **Proceedings**… Shanghai: IEEE meeting, 2016.

VASIL'EV, P. I.; KIRKO, M. Optimization of a marine MHD propeller. **Journal of Applied Mechanics and Technical Physics**, v. 22, I.3, p. 364-371, 1981.

VITTUCCI, R. V. Exploratory development: ships, submarines, and boats. **Naval Engineers Journal,** v. 89, n. 4, p. 33-41(9), 1977.

WAY, S. Propulsion of submarines by Lorentz forces in the surrounding sea. American Society of Mechanical Engineers,1964, New York. **Proceedings**… New York: ASME meeting, 1964. p. 64.

WAY, S. **Design and construction of a model electromagnetic submarine**. Engineering case library. Pittsburg: Westinghouse Electric Corporation, 1964. 71 p.

WAY, S.; DEVLIN, C. Prospects for the electromagnetic submarine. 3rd Propulsion Joint Specialist Conference, 1967, Washington. **Conference**… Washington: AIAA meeting, 1967. p. 67-432.

WAY, S. Electromagnetic propulsion for cargo submarines. **Journal of Hydronautics**, v. 2, n. 2, p. 49-57, 1968.

WEN, Q. X. Ship propulsion by underwater pulsed high-voltage streamer discharge. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 41, I. 2, p. 330 – 333, 2013.

WILLIAMS, E. J. The induction of electromotive forces in a moving liquid by a magnetic field, and its application to an investigation of the flow of liquids. **Proceedings of the physical society**, v. 45, n. 5, p. 466 – 478, 1930.

WU, C. Direct energy conversion devices and their potential naval applications. **Naval Engineers Journal,** v. 91, n. 1, p. 87- 6(10),1979.

XISTO, C. M. C. **Métodos numéricos para a dinâmica de gases e escoamentos magnetohidrodinâmicos a números de Mach arbitrários. Aplicações em tubeiras magnetoplasmadinãmicas**. 2014. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2014.

YAKOVLEV, V. Theory of an induction MHD propeller with a free field. **J. Appl Mech Techn Phys**, v. 21, n.3, p. 376–384, 1980.

YAN, L. et al. Results from a 14 T superconducting MHD propulsion experiment. 33rd plasmadynamics and lasers conference fluid dynamics and co-located conferences, 2002, Hawaii. **Proceedings**… Hawai: AIAA meeting, 2002.

ZHAO, L. Z. et al. Numerical analysis on a helical-channel seawater MHD generator. In: Innovative smart grid technologies conference, 2012, Asia. **Conference**… Asia: IEEE meeting, 2012. 5 p.

APÊNDICE A

A.1 Procedimentos de segurança

Em quase todas as bibliografias e trabalhos analisados sobre magnetohidrodinâmica, não foi encontrada qualquer referência sobre normas de segurança ou como proceder em experimentos desse porte, uma vez que essa área utiliza fontes de alimentação com corrente continua entre baixa e média tensões, geralmente em ambientes molhados. Diante da ausência desse tipo de procedimento, e considerando sugestões do colega Dr. Dawson Tadeu Izola, com ampla experiência em procedimentos de segurança laboratoriais, o candidato criou uma cartilha de procedimentos baseada na norma de regulamentação referentes a extra baixa tensão (EBT) e baixa tensão (BT). O texto gerado para a cartilha é apresentado a seguir.

A.1.2. Procedimentos de segurança para trabalhos com baixa tensão (BT) e extra baixa tensões (EBT)

- **Objetivo e campo de aplicação:**

Este procedimento visa assegurar a integridade física dos estudantes de pós-graduação que realizam atividades com baixa e extra baixa tensões. Ela está baseada na norma regulamentadora NR-10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade - Portaria GM n. º 3.214, de 08 de junho de 1978.

Esta norma NR estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços de eletricidade.

O campo de aplicação resume-se a escala laboratorial, o que reduz drasticamente o espaço de trabalho.

- Itens abordados

1. Responsabilidades
2. Procedimentos
3. Permissão de trabalho
4. Checagem do laboratório
5. Medidas de proteção coletiva
6. Equipamentos de proteção individual (EPI´s)
7. Utilização da fonte de alimentação
8. Manutenção de cabos e eletrodos
9. Retirada dos eletrodos, cabos, fonte de alimentação e limpeza do ambiente de trabalho

1. Responsabilidades

Todos os níveis de chefia são responsáveis pela implementação e manutenção desta norma em suas áreas de atuação, bem como, pela aplicação das medidas disciplinares necessárias ao seu cumprimento.

Os estudantes de pós-graduação executantes das atividades de manutenção são responsáveis pelo cumprimento das ações de segurança descritas neste procedimento.

2. Procedimentos

Procedimento Operacional Padrão (POP) é uma descrição detalhada de todas as medidas necessárias para a realização de uma tarefa.

O POP de segurança deve ser aplicado para que todos trabalhadores executem suas tarefas com segurança.

O objetivo principal é o de diminuir os riscos de acidentes de trabalho e/ou doenças ocupacionais.

O POP é um instrumento destinado a quem realmente vai executar a tarefa, e deverá ser simples, completo e objetivo para que possa ser de fácil entendimento a todos os colaboradores.

3. Permissão de trabalho

O formulário “Permissão de Trabalho”, Figura A.1, tem como objetivo principal a realização de trabalhos apenas após a constatação de condições seguras de trabalho e da autorização através de assinatura do chefe imediato.

O preenchimento da permissão de trabalhos é feito pelo executante e/ou chefe imediato do executante.

Caso o serviço seja realizado em área de ensino e pesquisa deverá ter anuência do chefe do setor que será feito o serviço, que também deve assinar a ordem de serviço, autorizando a realização dos trabalhos de manutenção.

Figura A.1 – Permissão de trabalho

PERMISSÃO DE TRABALHO

Data de execução do serviço:			
Local onde será realizado o serviço:			
Atividade a ser executada			
Nome e função dos funcionários que realizarão os serviços			
Medidas preventivas a serem tomadas			
Proteção Individual (EPI)		Proteção coletiva	
( ) Calçado de segurança	( ) Protetor facial	( ) Biombos	
( ) Óculos de segurança	( ) Perneira e mangote	( ) Sistema de exaustão	
( ) Luvas de segurança	( ) Outros_____	( ) Sinalização de segurança	
( )Cinto de segurança		( ) Bloqueio de equipamentos	
		( ) Outros _____	
Outras medidas a serem tomadas:			
OBSERVAÇÃO: Sempre que o trabalho for desenvolvido em áreas de ensino e pesquisa deverá ter anuência escrita (assinatura da Permissão de Trabalho) do chefe do setor que será feito o serviço			
Nome dos funcionários executantes	**Assinatura**	**Data**	
Nome do chefe responsável pelos funcionários executantes	**Assinatura**	**Data**	
Nome do chefe do setor em que será executado o serviço	**Assinatura**	**Data**	

Fonte: do autor.

4. Checagem do laboratório

O laboratório consiste de fontes de alimentação (geradores de tensão) que serão aplicados em cargas resistivas de alto valor, nesse caso uma cuba de vidro contendo água salgada. Apesar de envolver tensões relativamente baixas o ambiente úmido e condutor necessita de cuidados especiais.

Ao entrar no laboratório certos procedimentos deverão ser adotados:

- O espaço reservado às atividades laboratoriais deverá ser checado pelo responsável encarregado da pesquisa (nesse caso inclui-se o orientador, ou, na ausência dele, do próprio pesquisador ou orientado).
- A princípio o espaço deverá estar seco e desenergizado, evitando assim o contato ou uso indevido da eletricidade por terceiros.
- Certificar que nenhum equipamento adicional de terceiros esteja ligado em conjunto com os equipamentos utilizados nos experimentos pelo pesquisador.
- Deve-se informar imediatamente ao técnico do laboratório ou o responsável, que o mesmo será utilizado para experiências de baixa e extra baixa tensões.

5. Medidas de proteção coletiva

As medidas de proteção seguem os padrões da NR-10:

- 10.2.8.1. Em todos os serviços executados em instalações elétricas devem ser previstas e adotadas, prioritariamente, medidas de proteção coletiva aplicáveis, mediante procedimentos, às atividades a serem desenvolvidas, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores
- 10.2.8.2. As medidas de proteção coletiva compreendem, prioritariamente, a desenergização elétrica conforme estabelece esta NR e, na sua impossibilidade, o emprego de tensão de segurança.
- 10.2.8.2.1. Na impossibilidade de implementação do estabelecido no subitem 10.2.8.2, devem ser utilizadas outras medidas de proteção coletiva, tais como: isolação das partes vivas, obstáculos, barreiras, sinalização, sistema de seccionamento automático de alimentação, bloqueio do religamento automático.

6. Equipamentos de proteção individual

As vestimentas devem se aplicar de acordo com as normas NR-10 e com as condições de trabalho no laboratório. As tensões aplicadas no ambiente giram em torno de 13,5 a 110 volts podendo eventualmente atingir 220 volts o que coloca os experimentos em uma região de extra – baixa (EBT) tensão e baixa tensão (BT).

Extra-Baixa Tensão (EBT): tensão não superior a 50 volts em corrente alternada ou 120 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra.

Região de Baixa tensão (BT): tensão superior a 50 volts em corrente alternada ou 120 volts em corrente contínua e igual ou inferior a 1000 volts em corrente alternada e 1500 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra.

Os procedimentos seguem abaixo:

- Dada as condições de EBT e BT do laboratório verificar se os EPI´s se aplicam a esse trabalho
- Checar as luvas de proteção para alta tensão. Nesse caso luvas de classe 00 para 2,5Kv para uso de até 500 volts. Figura A.2
- Usar luvas de cobertura isolante em conjunto com as luvas de alta tensão.

Fonte: do autor.

- Figura A.*3*
- Usar botina para eletricista com solado em PU bi densidade com resistência de choque elétrico até 600 volts. Figura A.4
- Certificar que o estrado isolante ou estrado de borracha esteja posicionado corretamente debaixo do ambiente de trabalho; nesse caso 1 estrado para o usuário e 1 estrado para o equipamento

Os EPI´s seguem abaixo. Todos atendendo as normas de segurança.

Figura A.2 - Luva de alta tensão. Classe 00 2,5KV uso até 500 Volts

Fonte: do autor.

Figura A.3 - Luva de cobertura em couro

Fonte: do autor.

Figura A.4 - Bota isolante

Fonte: do autor.

7. Utilização da fonte de alimentação

A fonte de alimentação utilizada no experimento possui uma saída de 13,5 volts e uma corrente de 100 ampères o que a coloca na zona de (EBT). A corrente fornecida pela fonte será muito baixa, uma vez que a carga resistiva utilizada no experimento será muito alta. No entanto certas precauções devem ser tomadas.

- Certificar que a fonte esteja desligada ou desconectada da rede antes de realizar qualquer teste
- Verificar se a fonte se encontra perto de outros dispositivos que possam interferir o desempenho da mesma
- Verificar se a fonte não se encontra perto de condutores como metais ou em ambiente úmido que possa conduzir corrente
- Alterar a tensão da fonte para 220 volts. Isso impede que a mesma seja ligada por descuido em uma rede de 220 volts ou 110 volts e se queime
- Isolar os cabos ligados a saída da fonte
- Garantir uma distância segura de terceiros do ambiente de trabalho, e principalmente da fonte de alimentação. Recomenda-se que apenas o usuário dotado de EPI´s permaneça no laboratório

8. Manutenção de cabos e eletrodos

Os cabos e os eletrodos serão ligados diretamente a fonte de alimentação o que exige certos procedimentos de segurança, pois ambos são condutores de corrente.

- Verificar se a fonte de alimentação está desligada ou desconectada da rede antes de ligar os cabos aos eletrodos
- Verificar se os cabos estão úmidos ou descascados
- Certificar que os eletrodos estejam em boas condições de uso. Desgaste nas pontas, furos ou mau contato podem interferir e causar acidentes ao usuário
- Certificar se os fios e cabos utilizados no experimento suportam as correntes fornecidas pela fonte e demandadas pelas cargas da água salgada
- Ligar a fonte de alimentação apenas quando os eletrodos e os cabos estiverem imersos no aquário contendo água salgada

Tabela A.1 - Normas e especificações para o uso de cabos de acordo com a corrente utilizada

FIOS E CABOS PADRÃO AWG / MCM *American Wire Gauge e 1000 Circular Mils (1 mil = .0254 mm)*					FIOS E CABOS PADRÃO MÉTRICO	
Bitola	**Diâmetro** aproximado (mm)	**Seção** aproximada (mm^2)	**Resistência linear** aproximada[1] (ohm/m)	**Corrente** máxima[2] (A)	**Seção** nominal (mm^2)	**Corrente** máxima[2] (A)
40 AWG	0,08	0,005	3,4	-	-	-
39 AWG	0,09	0,006	2,7	-	-	-
38 AWG	0,10	0,008	2,2	-	-	-
37 AWG	0,11	0,010	1,7	-	-	-
36 AWG	0,13	0,013	1,4	-	-	-
35 AWG	0,14	0,016	1,1	1	-	-
34 AWG	0,16	0,020	0,86	-	-	-
33 AWG	0,18	0,025	0,68	-	-	-
32 AWG	0,20	0,032	0,54	-	-	-
31 AWG	0,23	0,040	0,43	-	-	-
30 AWG	0,26	0,051	0,34	2	0,05	2
29 AWG	0,29	0,064	0,27	-	-	-
28 AWG	0,32	0,081	0,21	-	-	-
27 AWG	0,36	0,10	0,17	-	-	-
26 AWG	0,41	0,13	0,13	-	-	-
25 AWG	0,46	0,16	0,11	-	-	-
24 AWG	0,51	0,21	0,084	4	0,20	4
23 AWG	0,57	0,26	0,067	-	-	-
22 AWG	0,64	0,33	0,053	6	0,30	6
21 AWG	0,72	0,41	0,042	-	-	-
20 AWG	0,81	0,52	0,033	9	0,50	9
19 AWG	0,91	0,65	0,026	-	-	-
18 AWG	1,0	0,82	0,021	11	0,75	10
17 AWG	1,2	1,0	0,017	-	-	-
16 AWG	1,3	1,3	0,013	13	1,0	12
15 AWG	1,5	1,7	0,010	-	-	-
14 AWG	1,6	2,1	0,0083	16	1,5	15
13 AWG	1,8	2,6	0,0066	-	-	-
12 AWG	2,0	3,3	0,0052	22	2,5	21
11 AWG	2,3	4,2	0,0041	-	-	-
10 AWG	2,6	5,3	0,0033	35	4	28
9 AWG	2,9	6,6	0,0026	-	-	-
8 AWG	3,3	8,4	0,0021	50	6	36
7 AWG	3,7	10	0,0016	-	-	-
6 AWG	4,1	13	0,0013	62	10	50
5 AWG	4,6	17	0,0010	-	-	-
4 AWG	5,2	21	0,00082	70	16	68
3 AWG	5,8	27	0,00065	-	-	-
2 AWG	6,5	34	0,00051	90	25	89
1 AWG	7,4	42	0,00041	110	35	111

9. Procedimentos de retirada dos eletrodos, cabos, fonte de alimentação e limpeza do ambiente de trabalho

Após o uso dos equipamentos deve-se seguir o seguinte protocolo:

- Certificar que os eletrodos e os cabos de energia estejam dentro do aquário
- Certificar que a fonte de alimentação não esteja próxima a condutores e a ambientes molhados

- Com as luvas de alta tensão, desligar a fonte de alimentação
- Desconectar o cabo da fonte da rede de tensão
- Desconectar os fios da saída da fonte
- Retirar os eletrodos juntamente com a fiação do aquário
- Verificar se existem resíduos no tanque (fios desencapados, eletrodos, etc.)
- Esvaziar o tanque e limpá-lo para usá-lo novamente
- Secar a região próxima ao experimento
- Guardar todo o equipamento em um local seguro e de acesso restrito aos mantenedores
- Verificar novamente se o ambiente de trabalho está desenergizado
- Retirar os EPI´s limpá-los e verificar periodicamente se os mesmos não possuem algum tipo de falha, como furos ou desgastes
- Avisar ao técnico responsável da finalização do experimento para que esse possa liberar com segurança a passagens de terceiros no local

APÊNDICE B

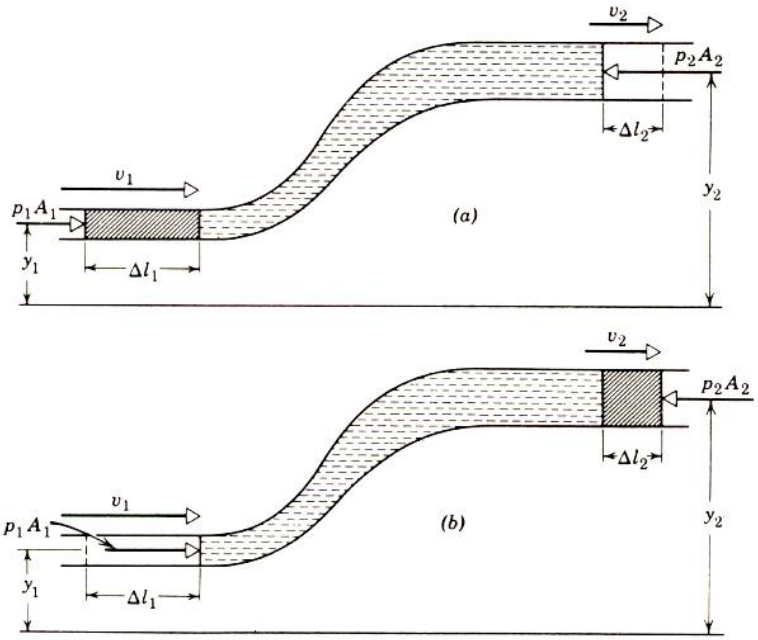
B.1. Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli é deduzida a partir do teorema do trabalho – energia: o trabalho realizado pela resultante das forças que atuam num sistema é igual a variação da energia cinética do sistema:

$$W = \Delta K + \Delta U = \Delta E_c + \Delta E_p \qquad \text{(B.1)}$$

Onde ΔE_c e ΔK é a variação da energia cinética e ΔE_p e ΔU é a variação da energia potencial.

Figura B.1 - Fluido se move ao longo de um duto, da posição (a) até (b)



Fonte: http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/jqomarcelo, (2016)

Pela Figura B.1, pode-se determinar o trabalho realizado pela força resultante sobre o sistema:

$$W = p_1 A_1 - p_2 A_2 = (p_1 - p_2)\Delta V \tag{B.2}$$

Em um dado tempo um volume do fluido $\Delta V = A_1 \Delta l_1$, com massa $\Delta m = \rho \Delta V$ entra no duto com energia cinética $1/2\, m v_1^2 = 1/2\, \rho \Delta V v_1^2$ e sai com energia cinética $1/2\, \rho \Delta V v_2^2$. Logo a variação de energia cinética seria de:

$$-v\Delta E_c = \frac{1}{2}\rho \Delta V \left(v_2^2 - v_1^2\right) \tag{B.3}$$

Assim como a variação da energia potencial:

$$-v\Delta E_p = \rho \Delta V g \left(y_2 - y_1\right) \tag{B.4}$$

Combinado as equações B.1 – B.4 obtém-se:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 \tag{B.5}$$

Ou

$$p + \frac{1}{2}\rho v + \rho g y = H = const. \tag{B.6}$$

A equação de Bernoulli para um fluido não viscoso, incompressível e no estado estacionário:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2 \tag{B.7}$$

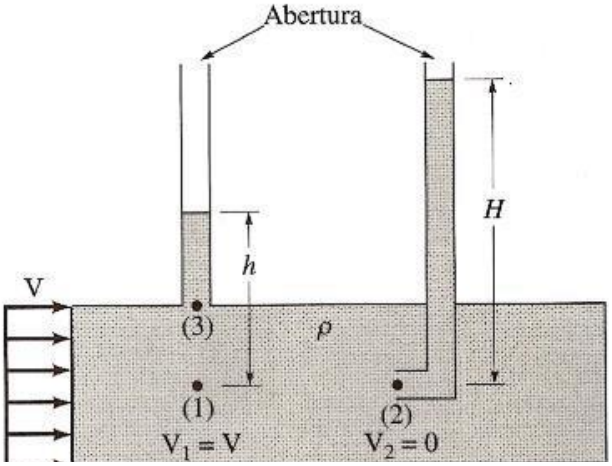
A soma da pressão da energia cinética por unidade de volume e da energia potencial por unidade de volume tem o mesmo valor em todos os pontos de uma linha de corrente, logo o termo $\rho g z$ é retirado. Dividindo a equação B.7 por ρ :

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \qquad \text{(B.8)}$$

Ou

$$p + \frac{1}{2}\rho v + \rho g z = H = const. \qquad \text{(B.9)}$$

Figura B.2 - Medidas com o Pitot



Fonte: http://www.edultoureiro.com.br/index_arquivos/mfaula6.pdf

Para o experimento realizado com o Pitot, a velocidade v_2 será zero ou seja é um ponto de estagnação. Essa pressão no ponto 2 excede a pressão estática p_1, de uma quantidade que é a pressão dinâmica. Logo a pressão dinâmica é a diferença entra a pressão de estagnação e a pressão estática.

$$V = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} \qquad \text{(B.10)}$$

Desprezando o termo da altura de carga devido a pressão estática local (energia de pressão por unidade de peso do fluido) na (B.8) chega-se a equação:

$$V = \sqrt{2gH} \qquad \text{(B.11)}$$

APÊNDICE C

C.1. Medidas e erros

Por mais criteriosa que seja uma medição ou por mais preciso que seja o equipamento que você está usando, nunca se pode obter uma medida exata do fenômeno. Existe sempre uma incerteza quando se compara uma medida de uma grandeza física com sua unidade. Basicamente os erros são classificados como: sistemáticos, grosseiros e acidentais. Lima (2010).

- Erros sistemáticos: geralmente estão associadas a instrumentação ou o método de medida que as vezes podem ser compensados. Por exemplo a medida das tomadas de pressão que mediram um valor, mas depois notou-se que ela estabilizou em um certo valor acima do valor estipulado (zero da escala), ocasionando um erro sistemático em todas as medidas.
- Erros grosseiros: geralmente causados pelo experimentador, medidas erradas ou cálculos errados.
- Erros acidentais: erros que ocorrem por diversas causas e geralmente são imprevisíveis, por exemplo fatores ambientais, temperatura, vibrações no local, umidade e etc.

Além desses erros relacionados as medidas diretas, existem também os erros associados a medidas indiretas, ou seja, aquelas que não podem ser tomadas com algum equipamento. Aqui podemos citar, por exemplo a velocidade, que é uma medida indireta da pressão (obtida com equipamento). Normalmente devem-se utilizar valores medidos e afetados por erros para se fazer cálculos e encontrar os valores de outras grandezas indiretas. De forma geral se uma quantidade f for calculada como função de quantidades $x, y, z\ldots$, de forma que $f = f\left(x, y, z, \ldots\right)$, então:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2 + \ldots} \qquad \text{(C.1)}$$

Onde, Δx , Δy e Δz, estão associados ao erro da medida. Para os casos em que a quantidade $V = V(x,y)$, quando se sabe as quantidades, como é o caso desse trabalho tem-se:

Função	Média	Erro padrão	
$f = f(x)$	$\bar{f} = f(\bar{x})$	$\Delta f = \left\lvert \frac{df}{dx} \right\rvert \Delta x$	(C.2)
$f = f(x,y)$	$\bar{f} = f(\bar{x},\bar{y})$	$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2}$	(C.3)

E as operações:

Adição $$(x \pm \Delta x) + (y \pm \Delta y) = (x + y) \pm (\Delta x + \Delta y) \qquad \text{(C.4)}$$

Subtração $$(x \pm \Delta x) - (y \pm \Delta y) = (x - y) \pm (\Delta x + \Delta y) \qquad \text{(C.5)}$$

Multiplicação $$(x \pm \Delta x) \times (y \pm \Delta y) = (x \times y) \pm (x \times \Delta y + y \times \Delta x) \qquad \text{(C.6)}$$

Divisão $$\frac{(x \pm \Delta x)}{(y \pm \Delta y)} = \frac{x}{y} \pm \frac{1}{y^2} \times (x \times \Delta y + y \times \Delta x) \qquad \text{(C.7)}$$

APÊNDICE D

D.1 Regressão linear, intervalo de confiança e intervalo de predição

Para um conjunto de dados $(x_i, y_i), i = 1,2,...n$ onde x é uma variável independente e y uma variável dependente, β_0 e β_1 são parâmetros e ε_i é termo randômico de erro com média $E\{\varepsilon_i\} = 0$ e variância $Var\{\varepsilon_i\} = \sigma^2$ o modelo de regressão linear segue como:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \tag{D.1}$$

Cálculo de α e β :

$$\hat{\beta}_1 = \frac{SXY}{SXX} \tag{D.2}$$

$$\hat{\beta}_0 = \overline{y} - \hat{\beta}_1 \overline{x} \tag{D.3}$$

Onde:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \overline{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \tag{D.4}$$

$$SXY = \sum_{i=1}^{n} x_i, y_i = \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \overline{x}\right)\left(y_i - \overline{y}\right) \tag{D.5}$$

$$SXX = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \overline{x}\right)^2 \tag{D.6}$$

e, temos que $\hat{\beta}_0$ e $\hat{\beta}_1$ se relacionam por:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x \tag{D.7}$$

E o resíduo é dado por:

$$res_i = y_i - \hat{y}_i \tag{D.8}$$

A soma dos quadrados dos resíduos fica:

$$RSS = \sum_{i=1}^{n} res_i^2 \tag{D.9}$$

A variância é dada por:

$$s_\varepsilon^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \overline{y}_i \right)^2}{n^* - 1} \tag{D.10}$$

Onde é $n-1$ graus de liberdade para o modelo que incluí a intersecção. Caso contrário $n^* = n$.

D.2 Intervalos de confiança e predição

Para um dado valor x_p, o intervalo de confiança $100(1-\alpha)\%$, para um dado valor médio de y em $x = x_p$ será:

$$\hat{y} \pm t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n^*-1\right)} s_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\left(x_p - \overline{x} \right)^2}{SXX}} \tag{D.11}$$

Onde α assume geralmente o valor 0,05. Para o intervalo de predição $100(1-\alpha)\%$ o valor médio de y em $X = X_p$ será:

$$\hat{y} \pm t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n^*-1\right)} s_\varepsilon \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{\left(x_p - \overline{x}\right)^2}{SXX}} \qquad \text{(D.12)}$$

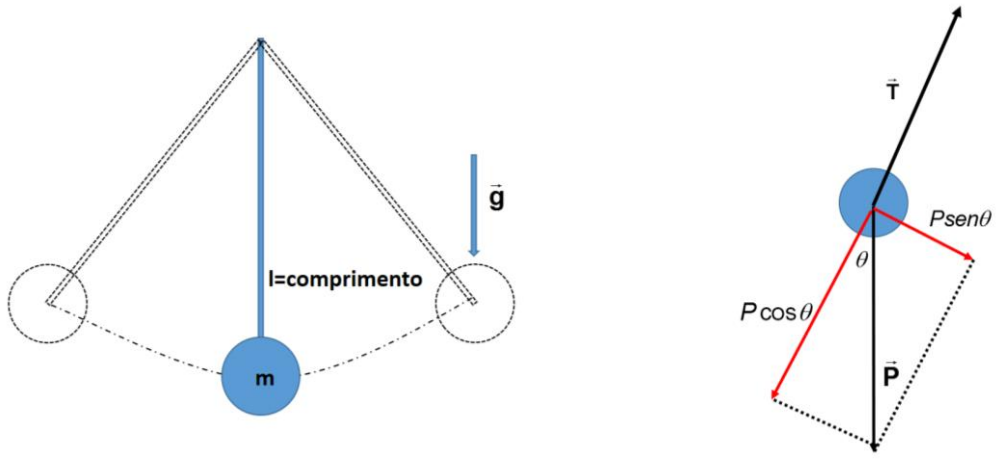
APÊNDICE E

E.1. Pêndulo simples

O pêndulo estudado consiste em um propulsor com massa acoplado a um pivô, que permite sua movimentação livremente. A massa fica sujeita à força restauradora causada pela gravidade. Aqui podemos considerar que a massa da régua está concentrada no propulsor, para facilitar as contas.

Considere que a massa está ligada a régua e em repouso. Ao ligar o propulsor uma força surgirá e moverá o conjunto causando o movimento do balançar, ver Figura E.1

Figura E.1 - Pêndulo simples



Fonte: do autor.

A componente peso anulará a força de tensão do fio, logo a força será:

$$F = Psen\theta \qquad \text{(E.1)}$$

O ângulo theta, é dado pelo arco descrito pelo ângulo, que no movimento é x dividido pelo raio de aplicação do mesmo, no caso o comprimento da régua, assim:

$$\theta = \frac{x}{l} \tag{E.2}$$

Logo:

$$F = Psen\frac{x}{l} \tag{E.3}$$

No entanto notou-se que os experimentos apresentavam um ângulo muito pequeno logo pode-se aproximar o valor do seno a este ângulo, para pequenas oscilações:

$$F = \frac{P}{l}x \tag{E.4}$$

Como a gravidade, o comprimento da régua e a massa do conjunto são constantes e considera-se que:

$$k = \frac{mg}{l} \tag{E.5}$$

E, reescrevendo a força restauradora do sistema como $F = kx$ e substituindo na E.5 tem-se:

$$F = \frac{mg}{l}x \tag{E.6}$$

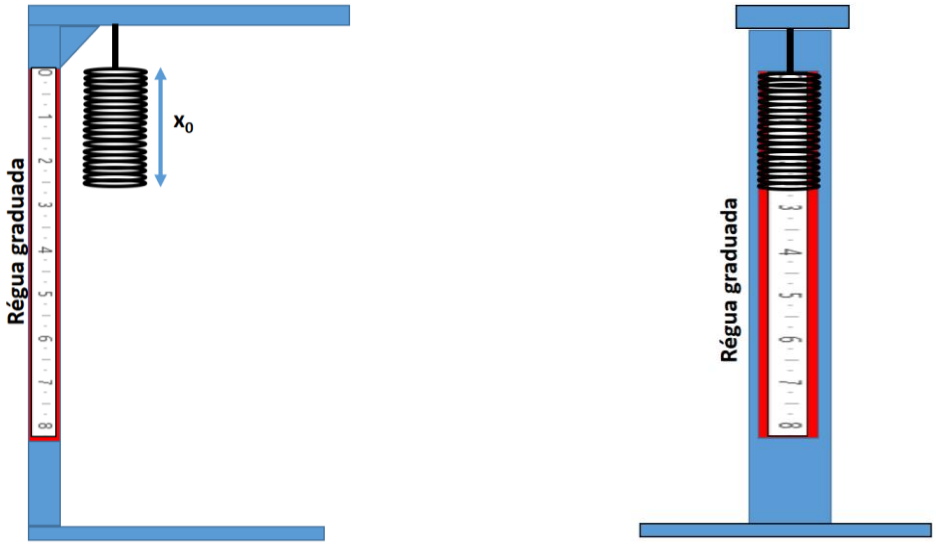
Que é força propulsiva do conjunto.

APÊNDICE F

F.1. CÁLCULO DA CONSTANTE DA MOLA

Cálculo da constante elástica da mola: a lei de Hooke descreve a força restauradora que existe em diversos sistemas quando comprimidos ou distendidos. Qualquer material sobre o qual exercermos uma força sofrerá uma deformação, que pode ou não ser observada. Para a determinação da constante elástica da mola, foi montado um aparato para facilitar o cálculo. A Figura F.1, mostra o esquema.

Figura F.1 - Esquema de montagem da mola com o suporte



Fonte: do autor.

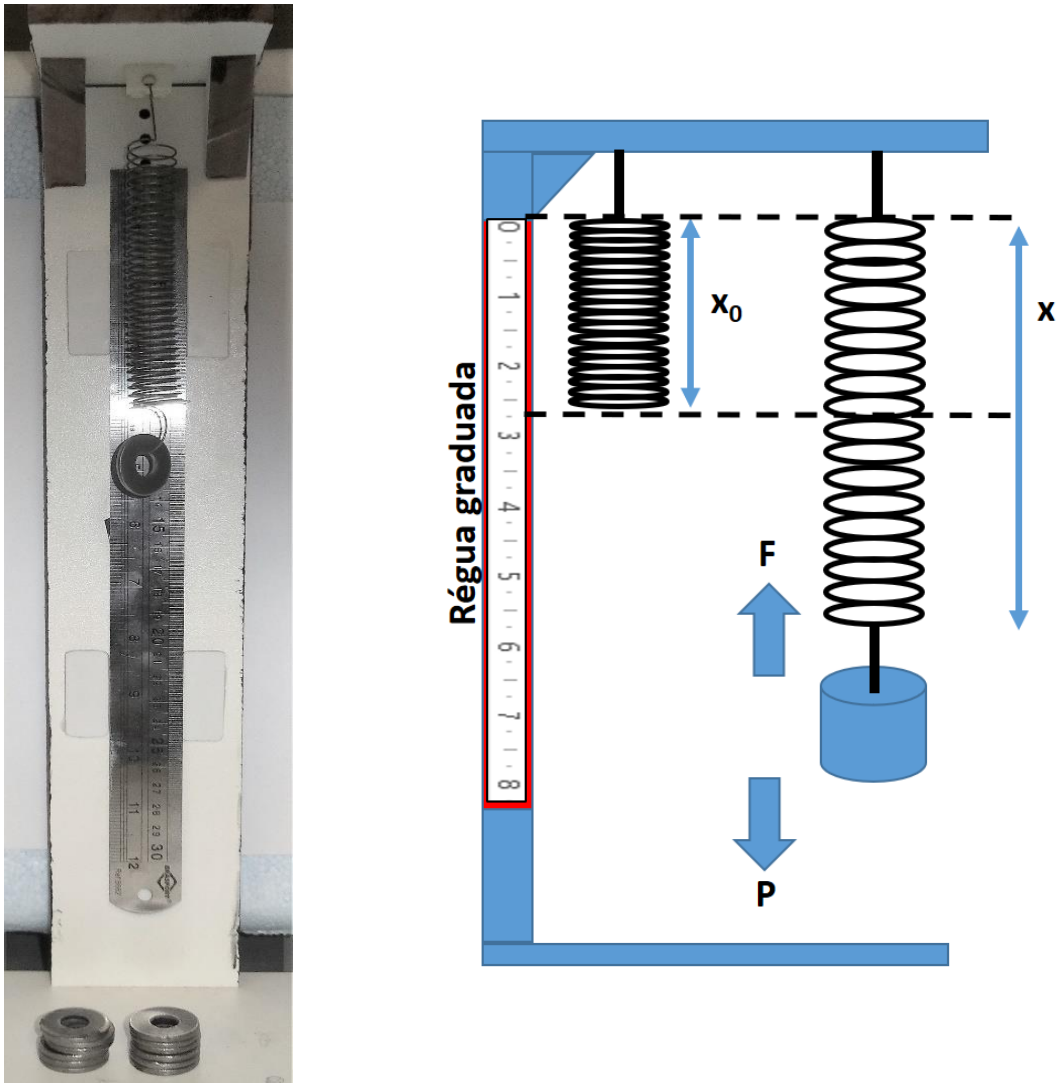
A mola foi fixada no topo do suporte horizontal e no suporte vertical, uma régua graduada de 0,5 mm (menor divisão de 0,025 mm), foi inserida para medição do deslocamento da mola. Apesar do erro da régua ser 0,5 mm o autor resolveu considerar a margem de 1 mm como erro, supondo que existam também os erros do experimentador.

No regime elástico há uma dependência linear entre F e a deformação Δx. Este é o comportamento descrito pela lei de Hooke: $F = -k\Delta x$, onde k é a constante de proporcionalidade chamada de constante elástica da mola, e é uma grandeza

característica da mola. O sinal negativo indica o fato de que a força F tem sentido contrário a Δx. Se k é muito grande significa que devemos realizar forças muito grandes para esticar ou comprimir a mola, portanto seria o caso de uma mola ”dura”. Se k é pequeno quer dizer que a força necessária para realizar uma deformação é pequena, o que corresponde a uma mola ”macia”.

A força que distende a mola é devido ao peso P de um corpo com massa m pendurado na ponta da mola. Na situação de equilíbrio, figura F.1, tem-se duas forças de módulos iguais e sentidos contrários F e P agindo sobre o corpo. Uma é devido ao peso $P = mg$ e a outra devido a força restauradora da mola. Figura F.2 mostra o equipamento e o procedimento para o cálculo da constante elástica.

Figura F.2 - Procedimento para o cálculo da constante da mola



Fonte: do autor.

Montado o aparato, arruelas de diferentes pesos foram colocadas em suspensão com a mola aonde foram medidos os deslocamentos. Ao todo 18 arruelas pesando em média 8,4 g foram usadas .Com os dados dos deslocamentos da mola e das forças peso P , foram traçados gráficos para achar a constante da mola. O valor é encontrado fazendo-se a tangente da força e do deslocamento.

Tabela F.1 - Dados da mola, primeiro experimento

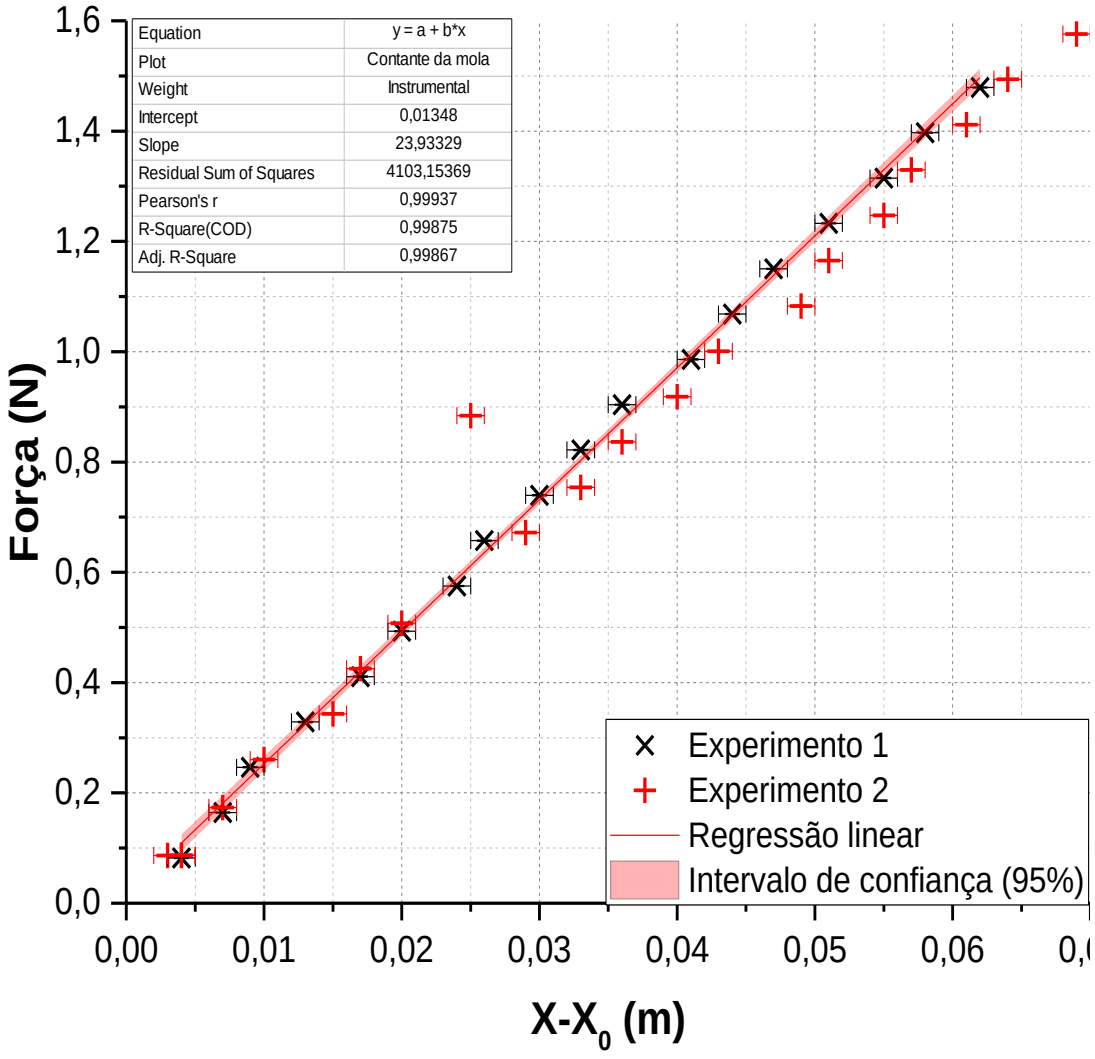
Massa das arruelas 10^{-3}(kg) erro±0,01	Deslocamento $X-X_0$ 10^{-3}(m) erro±1	Força peso 10^{-3}(N) erro±1	Constante da mola (N/m)
8,37	4	82	20,545±2,813
16,75	7	164	23,474±1,817
25,13	9	247	27,392±1,631
33,50	13	329	25,280±1,048
41,89	17	411	24,173±0,769
50,26	20	493	24,653±0,665
58,63	24	575	23,965±0,540
67,01	26	657	25,283±0,524
75,40	30	739	24,656±0,444
83,77	33	822	24,903±0,407
92,15	36	904	25,111±0,376
100,52	41	986	24,051±0,317
108,90	44	1.061	24,280±0,298
117,27	47	1.151	24,477±0,281
125,65	51	1.231	24,169±0,256
134,03	55	1.311	23,906±0,235
142,41	58	1.391	24,087±0,225
150,78	62	1.471	23,857±0,208
Média			24,348

Tabela F.2 - Dados da mola, segundo experimento

Massa das arruelas 10^{-3}(kg) erro±0,01	Deslocamento X-X_0 10^{-3}(m) erro±1	Força peso 10^{-3}(N) erro±1	Constante da mola (N/m)
8,83	3	87	28,874±5,139
8,81	4	86	21,607±2,946
8,86	4	87	21,729±2,961
8,85	4	87	21,705±2,958
17,69	7	174	24,791±1,911
26,54	10	260	26,036±1,400
35,00	15	343	22,890±0,828
43,37	17	425	25,027±0,794
51,75	20	508	25,383±0,684
90,13	25	884	35,367±0,747
68,50	29	672	23,172±0,433
76,88	33	754	22,854±0,376
85,26	36	836	23,233±0,350
93,64	40	919	22,965±0,312
102,02	43	1001	23,275±0,293
110,40	49	1083	22,103±0,246
118,77	51	1165	22,846±0,243
127,15	55	1247	22,679±0,224
135,52	57	1329	23,324±0,222
143,90	61	1412	23,142±0,206
152,28	64	1494	23,342±0,198
160,65	69	1576	22,840±0,180
Média			24,054

Aqui podemos achar a constante da mola de duas formas. Obtendo a média das constantes de todas as medidas ou achando a tangente no gráfico.

Figura F.3 - Dados da mola dos dois experimentos e o coeficiente da reta e a constante (slope)

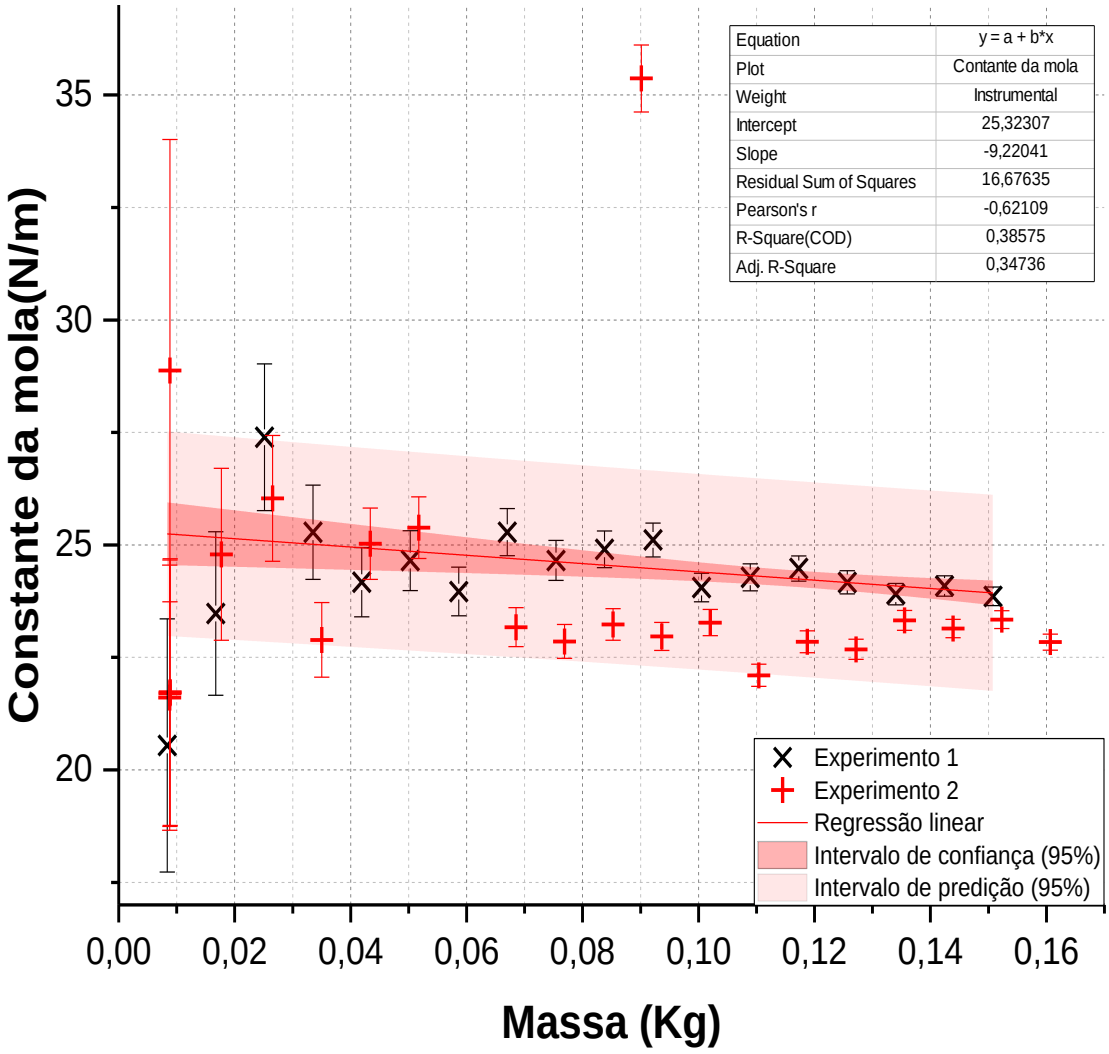


Fonte: do autor.

Logo a constante da mola foi calculada usando os gráficos e não as medias das tabelas, pois se nota que alguns valores fogem da média geral e isso interferiria na média final.

Logo a constante da mola será a tangente da curva que é de aproximadamente (23,933 ± 0,212) N. Podemos analisar também a constante da mola com seus erros para cada tipo de massa usada:

Figura F.4 - Constante da mola para diferentes pesos e seus erros associados



Fonte: do autor.

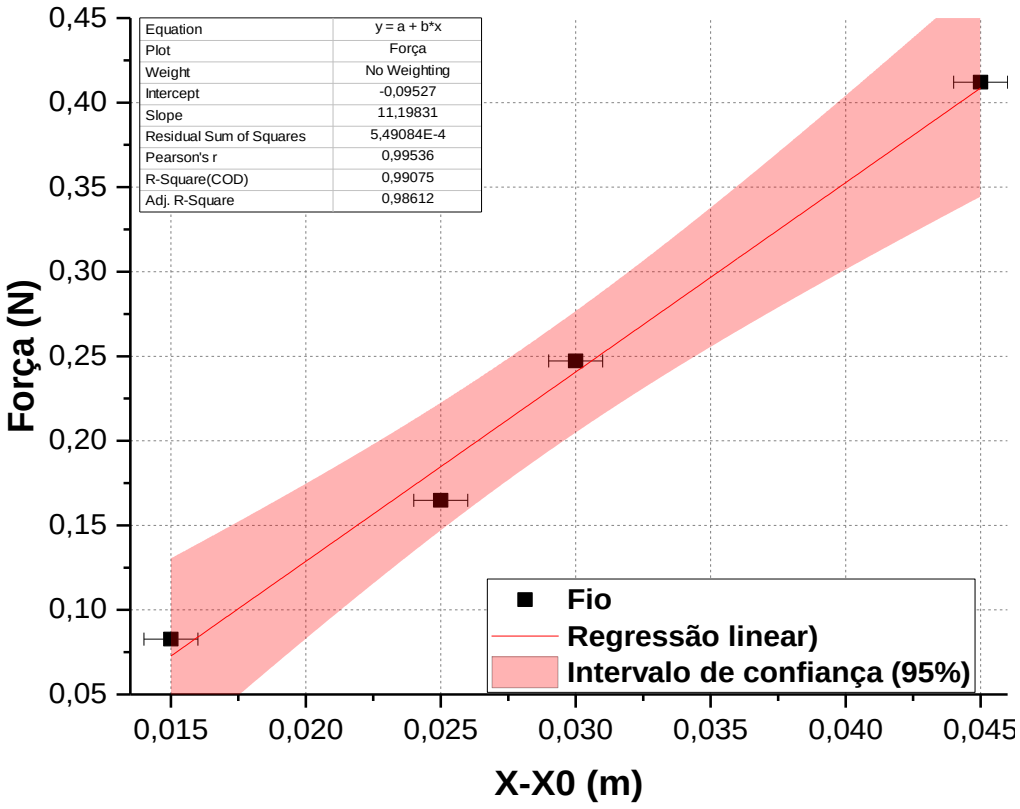
Note que os erros tendem a diminuir com o aumento de massa, logo para essa mola utilizada não se recomendar fazer experimentos que ofereçam pouca força peso a ela.

Para título de curiosidade, a constante do fio de energia também foi calculada. Como os fios distendem com o tempo sua constante acaba mudando. No entanto esses valores servem para estimativas e podem entrar nos dados como um erro a mais. A Tabela F.3 e Figura F.5 mostram as características do fio.

Tabela F.3 - Dados do fio

Massa das arruelas 10^{-3}(kg) erro±0,01	Deslocamento X-X_0 10^{-3}(m) erro±1	Força peso 10^{-3}(N) erro±1	Constante da mola (N/m)
8,43	15	82	5,513±5,139
16,80	25	165	6,592±2,946
25,20	30	247	8,240±2,961
42,00	45	412	9,156±2,958
Média			8,126

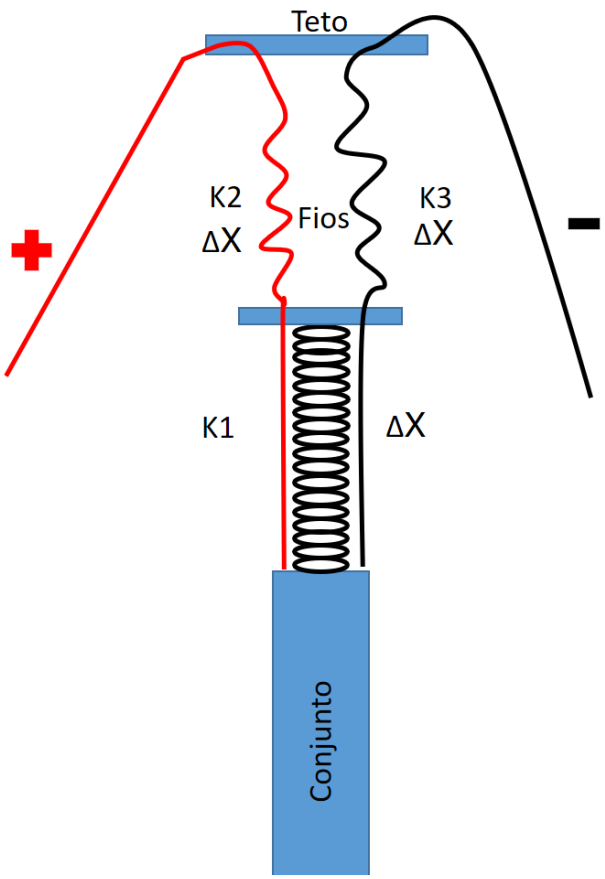
Figura F.5 - Constante do fio



Fonte: do autor.

E média da constante da mola é de 8,126 N, no entanto considerando os erros associados e a tangente da reta na Figura F.5 o valor será de aproximadamente 11,198 ± 0,810 N. Considerando uma aproximação ingênua em que o fio sofre o mesmo deslocamento que a mola, apesar de possuírem constantes diferentes, ver Figura F.6, teremos:

Figura F.6 - Constante equivalente de molas



Fonte: do autor.

É sabido que para esse tipo de condição (em que as molas sofrem o mesmo deslocamento), que a constante elástica resultante será equivalente a uma associação paralela $K_{eq}=K_1+K_2+K_3$. Logo a constante equivalente da mola seguida dos fios será de 46, 329 ± 0,617.