

**FELIPE LOPES DE SOUZA
TADEU FERREIRA DE SOUSA JÚNIOR**

**Desenvolvimento de software de identificação de parâmetros hidrodinâmicos
usando DGPS**

São Paulo
2013

FELIPE LOPES DE SOUZA
TADEU FERREIRA DE SOUSA JÚNIOR

**Desenvolvimento de software de identificação de parâmetros hidrodinâmicos
usando DGPS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Engenheiro
Mecatrônico.

Orientador:

Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri

São Paulo

2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Felipe Lopes de
Desenvolvimento de software de identificação de parâ-
metros hidrodinâmicos usando DGPS / F.L. de Souza, T.F.de Sousa
Junior. -- São Paulo, 2013.
128 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.

1.Identificação de parâmetros 2.Manobrabilidade I.Souza
Junior, Tadeu Ferreira de II.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos III.t.

RESUMO

O projeto consiste no desenvolvimento de um software para a identificação de parâmetros hidrodinâmicos lineares de manobra de uma embarcação fluvial ou marítima, baseando-se na medição de sua trajetória. Para tanto, há o desenvolvimento da infraestrutura de aquisição de sinais e comando para a realização dos ensaios em modelo reduzido. Há também o desenvolvimento de uma plataforma em Matlab/Simulink chamada MARINE (Maneuverability Assessment Routine Implemented with Numerical Estimation). Esta plataforma é usada para realizar a aquisição das posições (surge, sway e yaw) de uma embarcação flutuante utilizando, para isso, um receptor DGPS (Differential Global Positioning System) através de um protocolo de comunicação serial NMEA (National Marine Electronics Association). É responsável por enviar sinais de comando para a movimentação da embarcação e por realizar o algoritmo de identificação para obter os parâmetros hidrodinâmicos lineares do modelo matemático. Este algoritmo é influenciado pelo ruído de medida, portanto desenvolveu-se um filtro spline iterativo que permite a derivação do sinal da posição sem amplificar componentes de alta frequência do ruído. Os ensaios para validar as funcionalidades do software são realizados na Raia Olímpica da USP. Destaca-se a utilização de um laboratório móvel e um modelo de uma embarcação fluvial em escala reduzida.

Palavras-Chave: Identificação de Parâmetros. Manobrabilidade. DGPS.

ABSTRACT

The project consists of the development of software for identification of linear hydrodynamic maneuver's parameters of a marine vessel or a riverboat, based on the measurement of its trajectory. Therefore, there is the development of the acquisition infrastructure and command signals to the tests of the reduced model. There is also the development of a platform in Matlab / Simulink called MARINE (Maneuverability Assessment Routine Implemented with Numerical Estimation). This platform is used to carry out the position acquisition (surge, sway and yaw) of a floating vessel using, for this, a DGPS (Differential Global Positioning System) via a serial communication protocol NMEA (National Marine Electronics Association). It is responsible for sending control signals to the movement of the vessel and carry out the identification algorithm to obtain the linear hydrodynamic parameters of the mathematical model. This algorithm is influenced by measurement noise, therefore it was developed an iterative spline filter that allows the differentiation of the position signal without amplifying high frequency components of the noise. The tests to evaluate the features of the software are made in USP Olympic lane. It is noteworthy that is available a mobile laboratory and a reduced scale riverboat model.

Keywords: Parameters Identification. Maneuverability. DGPS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Sistema DGPS Trimble®. Base fixa em destaque (R4 mais rádio) e antenas móveis ao fundo	6
Figura 2. Barcaça acoplada à embarcação propulsora	7
Figura 3. Sistema de propulsão	7
Figura 4. Laboratório móvel para ensaios em campo	8
Figura 5. Docas flutuantes (à esquerda) e sistema para transporte de embarcações (à direita)	8
Figura 6. Fluxograma do método de projeto	9
Figura 7. Variáveis de movimento, extraída de (FOSSEN, 2002)	13
Figura 8 - Variação dos versores. Reproduzido de (ABKOWITZ, 1964)	15
Figura 9. Modelo para simulação computacional	21
Figura 10. Simulação do ruído do DGPS	21
Figura 11. Dinâmica interna	21
Figura 12. Diagrama de blocos	23
Figura 13. Ensaio com força <i>surge</i> constante, evolução dos estados	29
Figura 14. Ensaio com força <i>surge</i> constante, trajetória	29
Figura 15. Ensaio com força <i>sway</i> constante, evolução dos estados	31
Figura 16. Ensaio com força <i>sway</i> constante, trajetória	31
Figura 17. Exemplo de propulsor principal, extraído de (PRECIADO, 2012)	33
Figura 18. Exemplo de propulsor em túnel, extraído de (PRECIADO, 2012)	34
Figura 19. Propulsores azimutais, extraída de (PowerService, 2013)	34
Figura 20. Explicação visual do processo de triangulação, extraída de (JOHNSON, 2013)	38
Figura 21. Erros de trajetórias dos sinais, extraída de (KOWOMA, 2009)	39
Figura 22. Funcionamento do DGPS, retirado de (WHAT-WHEN-HOW, 2013)	40
Figura 23. Aproximação esférica da terra, retirada de (CLYNCH, 2006a)	41
Figura 24. Aproximação da terra por elipsoide, retirada de (CLYNCH, 2006a)	41
Figura 25. Latitude geodésica, retirada de (CLYNCH, 2006b)	42
Figura 26. Cálculo da altura em relação ao elipsoide, extraída de (FRACZEK, 2003)	42
Figura 27. Eixos de referência terrestres, extraída de (FOSSEN, 2002)	43

Figura 28. Transformação de coordenadas: P1, P2 e P3 para calibração, Pv para validação. A validação é feita comparando ds1 com ds2.	44
Figura 29. Correção do método Vincenty's formulae, figura modificada extraída de (CLYNCH, 2006b)	45
Figura 30. Posição aproximada dos pontos de medição	46
Figura 31. Posição na direção norte, dia 1	48
Figura 32. Posição na direção norte, dia 2	48
Figura 33. Posição na direção leste, dia 1.....	49
Figura 34. Posição na direção leste, dia 2.....	49
Figura 35. Orientação, dia 1.....	50
Figura 36. Orientação, dia 2.....	50
Figura 37. Espectro de frequências da posição N, sobreposição dos dias 1 e 2	51
Figura 38. Espectro de frequências da posição E, sobreposição dos dias 1 e 2	51
Figura 39. Espectro de frequência da posição D, sobreposição dos dias 1 e 2	52
Figura 40. Modelo computacional do ruído	52
Figura 41. Espectros simulados sobrepostos aos reais.....	54
Figura 42. Ruídos simulados sobrepostos aos reais	55
Figura 43. Resultado do filtro média móvel	56
Figura 44. Derivação numérica para obtenção de velocidade com e sem filtro	57
Figura 45. Comparação entre as velocidades ideal e a obtida numericamente	57
Figura 46. Comparação entre as acelerações ideal e a obtida numericamente	58
Figura 47. Recorte do espectro original e do espectro modificado, com frequência de corte 0,2Hz	58
Figura 48. Comparação entre o sinal filtrado por FFT e o sinal ideal, destaque para as harmônicas de baixa frequência que são enfatizadas com o filtro	59
Figura 49. Desempenho do filtro spline	60
Figura 50. Diferença entre velocidade e aceleração ideais e velocidade e aceleração derivadas numericamente utilizando filtro spline	60
Figura 51. Comparação entre a velocidade ideal e a velocidade numérica por filtro spline	61
Figura 52. Comparação entre as acelerações ideais e numéricas usando filtro spline	61
Figura 53. Algoritmo do filtro spline iterativo.....	63
Figura 54. Resultado do filtro spline iterativo.....	65

Figura 55. Diferentes tipos de modo de execução de um objeto <i>timer</i> , retirada de (MATHWORKS, 2010)	67
Figura 56. Janela Principal.....	71
Figura 57. Módulo de planejamento e aquisição de manobra	72
Figura 58. Painel de mensagens.....	73
Figura 59. Opções do usuário, destaque para a trava de segurança	73
Figura 60. Acompanhamento do movimento da embarcação em imagem de satélite (destaque para a embarcação)	74
Figura 61. Diálogo para manobra livre, orientações e forças comandadas em preto e vermelho e orientação e forças atuais em rosa e azul.....	75
Figura 62. Forças geradas para o ensaio em malha aberta	76
Figura 63. Vedação na região da tampa da embarcação com fita adesiva de neoprene de 6mm.....	78
Figura 64. Desenho simplificado dos componentes para o cálculo de calado e lastro do sistema de barcas	78
Figura 65. Ensaio dos sistemas de comunicação e validação do procedimento para o cálculo de lastro e calado da embarcação, realizado no tanque de provas do laboratório.....	79
Figura 66. Curva calibrada de RPM versus empuxo do motor (levantada experimentalmente com uma célula de carga e aproximada pela função teórica através de mínimos quadrados).....	79
Figura 67. Fixação de estacas para o levantamento de um ponto preciso para a base fixa (procedimento experimental de cerca de 4 a 5 horas)	80
Figura 68. Instalação do laboratório móvel (gerador à esquerda e antena de rádio à frente)	80
Figura 69. Configuração 2x1 do modelo de barcas	81
Figura 70. Sistemas atuando em paralelo, embarcação com acionamento à esquerda e aquisição do DGPS à direita.....	81
Figura 71. Imagem do programa de aquisição durante o experimento	82
Figura 72. Derivação numérica do sinal obtido, evidenciando ruído de alta frequência	83
Figura 73: Evolução da estimativa dos parâmetros de acordo com a evolução do sistema	87
Figura 74. Definição de shortcut.....	94

Figura 75. Janela principal	95
Figura 76. Módulo de aquisição e execução de manobra planejada	96
Figura 77. Menu	97
Figura 78. Sub-Menu de File	97
Figura 79. Sub-menu de configurations.....	97
Figura 80. Diálogo de configuração serial	98
Figura 81. Diálogo de configuração de BackPlot.....	98
Figura 82. Sub-Menu de Update	99
Figura 83. Backplot, destaque para a embarcação	99
Figura 84. BackPlotMark	100
Figura 85. Painel de mensagens.....	101
Figura 86. Painel de execução	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Notação para embarcações. Reproduzido de (FOSSEN, 2002).	14
Tabela 2. Diferentes tipos de modelos. Reproduzido parcialmente de Isermann e Münchhof, 2011.	24
Tabela 3. Resultados do algoritmo <i>curve-fitting</i> para força <i>surge</i> constante.....	30
Tabela 4. Comparação qualitativa entre sistemas de aquisição	37
Tabela 5. Comparação entre distâncias medidas e calculadas pelo algoritmo proposto (em metros).....	46
Tabela 6. Identificação de parâmetros após etapa 1 do filtro spline iterativo	77
Tabela 7. Identificação de parâmetros após otimização do filtro	77

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
DGPS	Differential Global Positioning System
ECEF	Earth-Centered Earth-Fixed reference
ECI	Earth-Centered Inertial frame
FKE	Filtro de Kalman Estendido
GPS	Global Positioning System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
IMO	International Maritime Organization
MARINE	Maneuverability Assessment Routine Implemented with Numerical Estimation
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MSL	Mean Sea Level
NMEA	National Maritime Electronics Association
NED	North-East-Down reference
PMBOK	Project Management Body of Knowledge
PMI	Project Management Institute
PMM	Planar Motion Mechanism
PPP	Precise Point Positioning
ROV	Remotely Operated Vehicle
SMC	Sliding Mode Control
SMO	Sliding Mode Observer
TMA	Teorema do Momento Angular
TMB	Teorema do Movimento Baricêntrico
TPN	Tanque de Provas Numérico
UUV	Unmanned Underwater Vehicle
WGS84	World Geodetic System 1984

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS	1
1.2	JUSTIFICATIVA	2
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	3
3	MATERIAIS E MÉTODOS	5
3.1	RECURSOS	5
3.2	METODOLOGIA.....	8
4	DINÂMICA DE EMBARCAÇÕES.....	11
4.1	DINÂMICA GERAL.....	11
4.2	COORDENADAS HIDRODINÂMICAS	13
4.3	MODELAGEM DE EMBARCAÇÕES.....	14
4.4	DINÂMICA LINEAR DE NAVEGAÇÃO NO PLANO.....	18
5	IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS	22
5.1	CURVE-FITTING PARA SISTEMAS PARAMÉTRICOS	25
5.2	MÍNIMOS QUADRADOS PARA SISTEMAS PARAMÉTRICOS	26
5.3	ANÁLISE DOS ALGORITMOS DE IDENTIFICAÇÃO	28
5.3.1	Manobra com força constante em surge	29
5.3.2	Manobra com forças constantes simultâneas.....	30
6	ACIONAMENTO E AQUISIÇÃO	33
6.1	ACIONAMENTO DE EMBARCAÇÕES	33
6.2	AQUISIÇÃO DE POSIÇÃO E TRAJETÓRIA	35
6.2.1	Comparação entre sistemas de aquisição	35
6.2.2	Aquisição via DGPS	38
7	TRATAMENTO DE RUÍDO.....	47
7.1	LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL DO RUÍDO DO DGPS	47
7.2	ANÁLISE DOS FILTROS.....	56
7.3	FILTRO SPLINE ITERATIVO	62
8	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	66
8.1	ALGORITMO PRINCIPAL	66
8.2	DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE COM USUÁRIO	69
9	RESULTADOS	71
9.1	PLATAFORMA MARINE	71

9.2 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ...	76
9.3 VALIDAÇÃO PARCIAL ATRAVÉS DE ENSAIO EM CAMPO	77
9.4 DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR EM HARDWARE PARA FUTUROS APRIMORAMENTOS.....	83
10DISCUSSÃO.....	84
10.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	84
10.2 PROPOSTA PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	85
10.2.1 Utilização de mais sensores	85
10.2.2 Outros algoritmos de identificação	86
11CONCLUSÕES.....	89
REFERÊNCIAS	90
APÊNDICE A: MARINE – Manual do usuário	93
APÊNDICE B: Derivação – controle adaptativo.....	103
ANEXO A: Relatórios PPP emitidos pelo IBGE	112

1 INTRODUÇÃO

A representação de fenômenos da natureza tornou-se, há muito tempo, etapa vital para o desenvolvimento da ciência. Tal representação, que é uma idealização da realidade, é denominada modelo.

Dentre os mais variados tipos de modelos, o mais comum é o modelo matemático, denotado, geralmente, por equações diferenciais. Isso posto, emergem tanto a complexidade de descrever matematicamente os fenômenos quanto a complexidade de avaliar o quão precisa tal descrição é frente ao comportamento real do sistema físico. Dessa forma, soluções de engenharia, como análise de desempenho, projeto de estruturas ou projeto de controle podem ficar comprometidas.

Para contornar eventuais problemas, a identificação de sistemas surge com o intuito de calibrar, através de experimentos, um modelo previamente idealizado, maximizando a concordância entre a idealização e o comportamento real.

No caso específico de embarcações, é necessário o conhecimento preciso do comportamento do sistema para a determinação de desempenho e manobra. Essa área tem sido estudada cada vez mais frente aos crescentes desafios na área de transportes marítimos, com portos mais movimentados; e fluviais, em que o próprio contorno do rio torna-se uma restrição.

1.1 OBJETIVOS

Tendo em vista os desafios apresentados e a recente aquisição de um sistema DGPS (*Differential Global Positioning System*) pelo Tanque de Provas Numérico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (TPN), este trabalho tem como intento o desenvolvimento de um *software* para identificação de coeficientes hidrodinâmicos de uma embarcação utilizando DGPS, buscando-se uma solução suficientemente genérica e robusta que possa ser empregada em aplicações reais e que possua uma interface de fácil utilização.

Dentre o escopo do projeto estão as análises de métodos eficientes para filtragem dos sinais provenientes do DGPS e de diferentes algoritmos de identificação de sistemas, sendo que, nesse trabalho, focou-se em algoritmos envolvendo acionamento em malha aberta.

Fora as simulações numéricas, objetiva-se ensaios experimentais com modelos de embarcações e com o equipamento de aquisição DGPS para a certificação final do *software*. Como complemento, realizam-se os mesmos ensaios na Raia Olímpica, assim se avalia a facilidade de utilização em aplicações reais.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os parâmetros hidrodinâmicos são importantes para a manobrabilidade, *design*, controle, segurança, entre outros. A identificação desses parâmetros possibilita obter um modelo confiável e representativo da embarcação que pode ser usado, por exemplo, em um simulador. Esse contribui para:

- Treinamento de comandantes
- Análise de comportamento durante atracação
- Simulação de manobras livres em portos existentes ou que ainda estão em obra
- Simulação de manobras padrão (zig-zag, diâmetro tático) para avaliação do cumprimento dos critérios de sociedades classificadoras e da IMO (*International Maritime Organization*)

Para identificar parâmetros hidrodinâmicos, são comuns experimentos em tanques de prova. Todavia, há problemas como a interferência das paredes do tanque, que levam à necessidade de modelos em escala que nem sempre conseguem representar de forma fiel o comportamento de uma embarcação real.

Além disso, muitas vezes a intenção é conhecer os parâmetros de um navio real específico, de forma a levar em conta eventuais imprecisões construtivas ou nos modelos matemáticos usados durante o projeto, obtendo estimativas mais confiáveis.

O sistema proposto tem como vantagens realizar o ensaio num ambiente de operação mais realístico e com a própria embarcação a ser avaliada. A desvantagem é o experimento estar sujeito a distúrbios, forças externas e outros efeitos que seriam mais bem controlados em laboratório. Os efeitos externos, entretanto, podem vir a ser compensados em futuras implementações do *software*.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Estudos a respeito de identificação de parâmetros hidrodinâmicos vêm sendo realizados por diversos pesquisadores do mundo. (KIM, et al., 2002a) abordam o problema de determinação dos coeficientes de um AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), ou seja, um veículo autônomo subaquático, pelo método de observadores, em especial o Filtro de Kalman Estendido (FKE). Os pesquisadores focaram nos parâmetros lineares de amortecimento, pois são os que mais afetam a manobrabilidade de um AUV. Os ensaios foram realizados em tanque de provas e o sistema de aquisição foi feito por sensores inerciais. Para obter os parâmetros de forças inerciais lineares, é utilizado um método de distribuição de singularidade (*singularity distribution method*). Esses valores são usados para obter os parâmetros hidrodinâmicos da embarcação. Desta forma, apresenta a vantagem de considerar a interação do casco e do propulsor com o fluido. O método do FKE convergiu e valores para os parâmetros foram encontrados, porém a validação do modelo obtido ficou para futuros trabalhos.

(KIM, et al., 2002b) novamente realizam experimentos para identificação de sistemas de um AUV, mas, desta vez, além de usar o FKE, utilizam também o SMO (*Sliding Mode Observer*), observador em modo deslizante, dois observadores não lineares. O resultado foi comparado ao PMM (*Planar-Motion-Mechanism*), a técnica de obtenção de parâmetros mais comum. Os coeficientes estimados foram usados em controlador, também feito em modos deslizantes, SMC (*Sliding Mode Control*) e manobras planejadas foram conduzidas (espiral e zig-zag). O resultado dos coeficientes foi comparado com o resultado do PMM, evidenciando que a técnica de FKE é mais precisa do que SMO. Porém, alguns parâmetros ainda apresentaram divergências. Apesar disso, o controle em modos deslizantes foi satisfatório, pois seguiu a trajetória do modelo com os parâmetros corretos. A diferença dos parâmetros pode ser devido ao sistema de aquisição (acelerômetros). Além disso, a validação por SMC é inadequada, já que este controle é robusto, portanto insensível, em certo nível, a erros de modelagem e também a incertezas desses coeficientes. O acionamento e posterior validação dos resultados obtidos em malha aberta não apresenta tal problema.

(CONTE, et al., 2004) realizaram a identificação de parâmetros de um UUV (*Unmanned Underwater Vehicle*), ou seja, veículo submerso não tripulado. O sistema de aquisição também é por sensores inerciais. O método utilizado foi o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Este método mostrou-se bastante simples de ser implementado, todavia o resultado não foi satisfatório. Os autores argumentam que o problema estava nas hipóteses simplificadoras, em que desconsidera a resposta transiente do comportamento dos propulsores e o acoplamento que houve entre o movimento de surge (em x) e heave (em z). Uma proposta formulada pelos autores para melhorar o resultado é melhorar a filtragem dos sinais lidos.

(CHEN, et al., 2007) propõem um procedimento para estimar parâmetros de um ROV (*Remotely Operated Vehicle*), ou seja, veículo operado remotamente. O sistema de aquisição utilizado foi o de câmeras. Os autores afirmam que sistemas de captura por câmeras é extremamente restrito pelas condições ambientais. Apesar disso, os estudos conduzidos com esse sistema têm demonstrado bons resultados. O método dos Mínimos Quadrados mostrou bons resultados. Este trabalho mostra como é importante obter dados confiáveis do experimento para a identificação dos parâmetros. No caso do trabalho, o experimento foi conduzido em uma piscina (sem efeitos ambientais) e o campo de visão não precisava ser extenso devido às dimensões do ROV, o que não seria o caso para embarcações reais.

(MALAMAS & PETRAKIS, 2010) desenvolveram uma plataforma dedicada a avaliar a manobrabilidade de unidades navais. A plataforma possui processamento em tempo real da posição da embarcação, utilização de DGPS para aquisição destes dados e apresentação gráfica da manobra. O objetivo do presente projeto é desenvolver uma plataforma semelhante, portanto este trabalho nos serviu de base para saber o que já existe e que obteve bons resultados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para que o projeto pudesse ser executado, foi realizado um levantamento dos materiais e recursos necessários, ou seja, os equipamentos, *softwares* e infraestrutura de trabalho; assim como o método a ser empregado em seu desenvolvimento, ou seja, o conjunto de práticas para planejar, organizar, executar e gerenciar o projeto.

Nesta seção, os materiais, recursos e métodos utilizados são apresentados, assim como uma breve justificativa da importância da adoção dos mesmos para a conclusão do trabalho.

3.1 RECURSOS

Como já mencionado, os recursos são os *softwares*, equipamentos e infraestrutura utilizados no projeto.

Definiu-se que o projeto seria implementado em MATLAB®, uma ferramenta matemática iterativa com funcionalidades de cálculo numérico, interação com *hardware* e criação de interfaces gráficas, todas fundamentais para o projeto. Além disso, é um *software* com o qual os integrantes têm familiaridade.

Embora a estratégia de adotar um programa de base, ao invés de desenvolver uma aplicação *stand-alone*, acabe por limitar a ferramenta proposta no trabalho, é importante observar que o MATLAB® é muito difundido entre engenheiros, servindo, inclusive, na avaliação dos sistemas a serem identificados pelo *software*.

De forma a minimizar as limitações, o desenvolvimento do programa se restringiu a utilizar funções do core do MATLAB®, sem depender de nenhum *toolbox* (conjunto de algoritmos específicos que são comprados separadamente).

Dentre os equipamentos utilizados, pode-se citar um *laptop*, um *joystick* para acionamento e o DGPS Trimble®, adquirido em 2013 pelo TPN (Tanque de Provas Numérico).

O sistema, a ser utilizado na aquisição de posição e trajetória de embarcações, consiste em uma antena para servir de base (GPS R4), um módulo DGPS de aquisição e correção com rádio interno receptor (SPS461), duas antenas, para registrar posição e orientação, a serem instaladas nas embarcações (ambas

GA530) e três rádios externos para realizar as comunicações base-embarcação e embarcação-usuário (TDL450H).

O funcionamento do DGPS é explicado na seção 6.2.2. O sistema completo pode ser visualizado na Figura 1, registrada durante ensaios em campo para determinação da precisão das medidas.



Figura 1. Sistema DGPS Trimble®. Base fixa em destaque (R4 mais rádio) e antenas móveis ao fundo

Para os ensaios experimentais, o laboratório disponibilizou um conjunto de barcas, embarcações que podem ser conectadas umas as outras para transporte hidroviário de minérios ou madeira, com um empurrador de apoio guiando-as. Fora isso, um motor de proa foi instalado para melhorar a manobrabilidade.

A Figura 2 mostra uma barcaça acoplada à embarcação propulsora e a Figura 3 o propulsor em detalhes.



Figura 2. Barcaça acoplada à embarcação propulsora

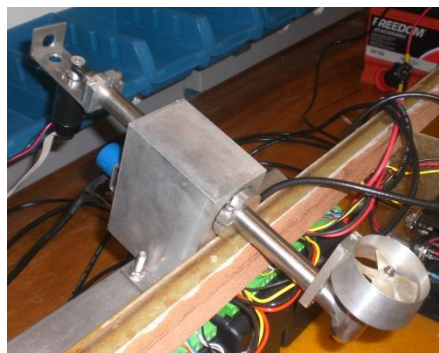


Figura 3. Sistema de propulsão

A infraestrutura disponibilizada para os ensaios consiste em um laboratório móvel, equipado com ferramentas diversas, que servirá para transporte dos equipamentos e centro de operações durante os ensaios.

O sistema de energia é baseado em baterias recarregadas tanto por energia solar como por um gerador a gasolina. A Figura 4 apresenta o laboratório.



Figura 4. Laboratório móvel para ensaios em campo

Como complementos, na raia olímpica foram instaladas docas flutuantes e um sistema automático para colocar as embarcações na água, visualizados na Figura 5.



Figura 5. Docas flutuantes (à esquerda) e sistema para transporte de embarcações (à direita)

3.2 METODOLOGIA

A metodologia adotada no projeto foi elaborada com base em dois guias muito utilizados pela indústria: PMBOK® e SCRUM.

PMBOK® foi, inicialmente, desenvolvido como uma compilação de boas práticas de gerenciamento de projeto, em 1983 pelo Instituto de Gerenciamento de Projetos, PMI®, posteriormente convertido em livro, atualmente na quinta edição. Sua principal referência é (PMI, 2008).

SCRUM, por sua vez, é um método criado por Ken Schwaber e Jeff Sutherland, por volta de 1991, cuja ideia geral é, através da formação de um time

colaborativo com autogestão, organizar o projeto em atividades que são continuamente implementadas em iterações que alternam desenvolvimento e validação. Sua referência é (SCHWABER & SUTHERLAND, 2008).

De forma similar ao proposto em PMBOK®, o projeto foi dividido em grupos de processos: definição geral, cronograma de entregas, planejamento de atividades, execução e controle, e finalização das entregas, como pode ser acompanhado na Figura 6.

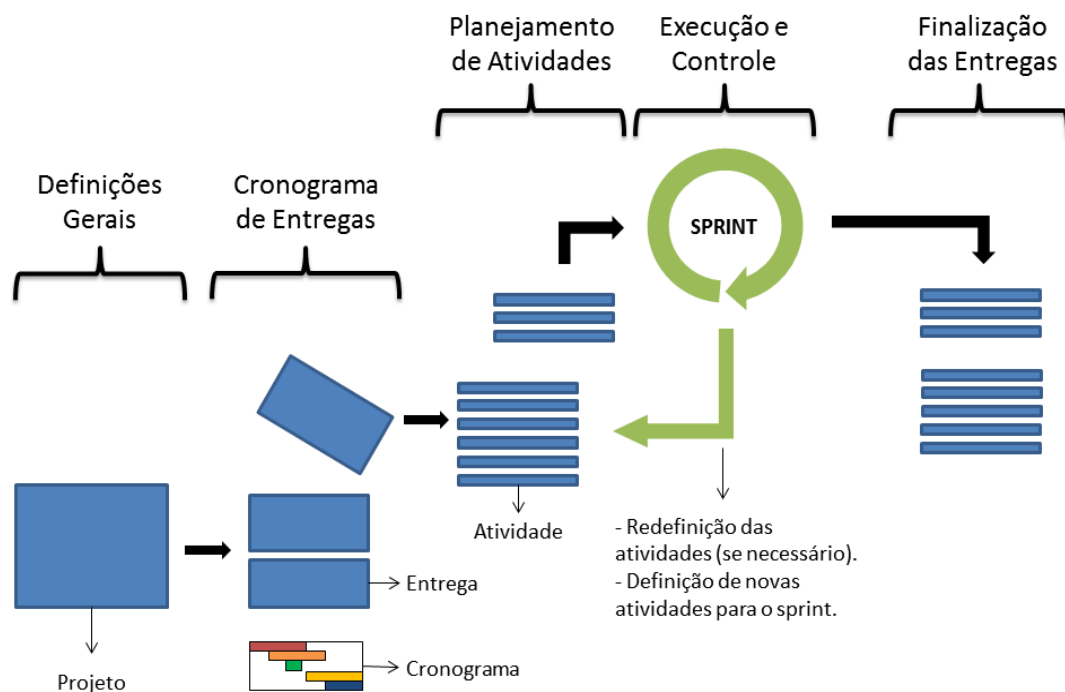


Figura 6. Fluxograma do método de projeto

Na etapa de definições gerais, ainda baseadas em PMBOK®, o escopo do projeto foi definido: objetivos, premissas, restrições e recursos; de modo que o mesmo pôde ser segmentado em entregas independentes.

A etapa de planejamento de atividades, baseada no método SCRUM, subdividiu cada entrega em diversas atividades ou funcionalidades, denominadas de *product backlog*.

Essas atividades foram executadas em iterações denominadas *sprints*, cujas etapas são: seleção de atividades (*sprint backlog*), implementação e aprovação, sendo que atividades não aprovadas retornam ao *product backlog*.

É importante ressaltar que, a todo o momento, novas atividades ou funcionalidades puderam ser propostas, assim como a revisão das antigas, conferindo um caráter adaptativo e evolutivo ao projeto.

O método adotado permitiu grande flexibilidade, já que o projeto foi orientado a entrega de funcionalidades, assim como um paralelismo na execução das tarefas, já que as mesmas haviam sido definidas previamente.

Apesar da flexibilidade, problemas não previstos no sistema de barcas (faltavam instalações elétricas, suportes de fixação, vedação e informações adequadas sobre sua capacidade e operação, conferindo pouca segurança para embarcar o DGPS) acabaram por comprometer o cronograma de ensaios, prejudicando o experimento final.

4 DINÂMICA DE EMBARCAÇÕES

Nessa seção, o modelo matemático usado como base para o algoritmo é apresentado, assim como sua dedução teórica.

Inicia-se com uma revisão de dinâmica, em seguida as coordenadas hidrodinâmicas são definidas para a aplicação da dinâmica em embarcações e um modelo de movimento plano é apresentado.

4.1 DINÂMICA GERAL

As deduções subsequentes (equações de (1) a (11)) foram extraídas de (FRANÇA & MATSUMURA, 2011).

Considera-se s um sistema de pontos P_i movimentando-se em relação a um referencial inercial, em que as Leis de Newton são aplicáveis. Seja $\vec{F}_i$ a resultante das forças externas ao sistema s e $\vec{f}_i$ a resultante das forças internas, ambas atuantes em P_i . A equação do movimento pode ser escrita.

$$m_i \vec{a}_i = \vec{F}_i + \vec{f}_i \quad (1)$$

Em que m_i é a massa e $\vec{a}_i$ a aceleração de P_i . Efetuando a soma para todos os pontos P_i , resulta:

$$\sum_i m_i \vec{a}_i = \sum_i \vec{F}_i + \sum_i \vec{f}_i \quad (2)$$

Pela Terceira Lei de Newton ou Princípio da Ação e Reação, a resultante e momentos das forças internas será nulo, ou seja, $\sum_i \vec{f}_i = 0$. De outra forma, partindo da definição de baricentro (representado por G):

$$\sum m_i (P_i - G) = \vec{0} \rightarrow \sum m_i (\vec{v}_i - \vec{v}_G) = \vec{0} \rightarrow \sum m_i (\vec{a}_i - \vec{a}_G) = \vec{0} \quad (3)$$

Onde m é a massa total do sistema s .

$$\sum_i m_i \vec{a}_i = \sum_i m_i \vec{a}_G = m \vec{a}_G \quad (4)$$

Substituindo na equação (2):

$$m\vec{a}_G = \sum_i \vec{F}_i \text{ ou } m\vec{a}_G = \vec{F} \quad (5)$$

“Portanto o baricentro G de qualquer sistema material move-se como se fosse um ponto material, de massa igual à massa total, m , do sistema, sujeito à resultante, $\vec{F}$, das forças externas ao sistema (Teorema do Movimento do Baricentro ou Teorema da Resultante)”. (FRANÇA & MATSUMURA, 2011).

Agora, seja m_i a massa de um ponto P_i com velocidade $\vec{v}_i$ num certo instante. Sendo este ponto P_i pertencente a um sistema S , define-se sobre esse sistema o momento angular em relação um ponto O :

$$\vec{H}_O = \sum_i (P_i - O) \wedge m_i \vec{v}_i \quad (6)$$

A derivada do momento angular é então calculada. O ponto O é qualquer e não necessariamente pertencente ao sistema S .

$$\begin{aligned} \dot{\vec{H}}_O &= \sum_i (\vec{v}_i - \vec{v}_O) \wedge m_i \vec{v}_i + \sum_i (P_i - O) \wedge m_i \vec{a}_i = \sum_i (P_i - O) \wedge m_i \vec{a}_i - \vec{v}_O \wedge \sum_i m_i \vec{v}_i \\ &= \sum_i (P_i - O) \wedge m_i \vec{a}_i + m \vec{v}_G \wedge \vec{v}_O \end{aligned} \quad (7)$$

Considerando que $m_i \vec{a}_i = \vec{F}_i + \vec{f}_i$ e que o sistema de forças internas de S atuantes nos pontos P_i é nulo, ou seja, $\sum_i (P_i - O) \wedge \vec{f}_i = 0$, decorre:

$$\dot{\vec{H}}_O = \vec{M}_O^{ext} + m \vec{v}_G \wedge \vec{v}_O \quad (8)$$

Em que $\vec{M}_O^{ext}$ representa o momento das forças externas a S em relação ao ponto O . O resultado obtido exprime o Teorema do Momento Angular.

Se S for um corpo rígido e apresentar um movimento qualquer, toma-se a hipótese que O pertence ao sólido. Assim, o momento angular pode ser escrito:

$$\begin{aligned} \vec{H}_O &= \sum_i (P_i - O) \wedge m_i \vec{v}_O + \sum_i (P_i - O) \wedge m_i \cdot \vec{\omega} \wedge (P_i - O) \\ \vec{H}_O &= m(G - O) \wedge \vec{v}_O + I_O \vec{\omega} \end{aligned} \quad (9)$$

Onde I_O é a matriz de inércia de S em relação a O .

Derivando:

$$\dot{\vec{H}}_O = m(\vec{v}_G \wedge \vec{v}_O) + m(G - O) \wedge \vec{a}_O + \left(\frac{d}{dt} \right) (I_O \vec{\omega}) \quad (10)$$

Aplicando o Teorema do Momento Angular:

$$\left(\frac{d}{dt}\right)(I_o \vec{\omega}) + m(\vec{G} - \vec{O}) \wedge \vec{a}_O = \vec{M}_O^{ext} \quad (11)$$

4.2 COORDENADAS HIDRODINÂMICAS

De acordo com (FOSSEN, 2002), para embarcações movendo-se nos 6 graus de liberdade, 6 coordenadas independentes são necessárias para determinar a posição e a orientação. Essas coordenadas são definidas por *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* e *yaw*, ilustradas na Figura 7.

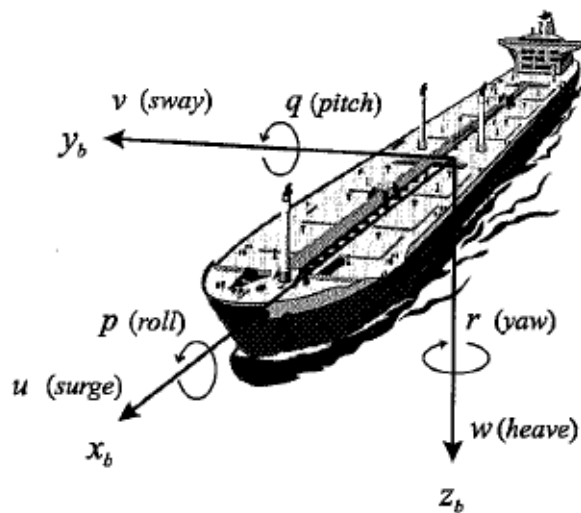


Figura 7. Variáveis de movimento, extraída de (FOSSEN, 2002)

Para analisar a dinâmica da embarcação, dois sistemas de referência são utilizados:

- Absoluto - NED (*North-East-Down*). É um sistema definido em relação ao Elipsoide de referência da Terra. Ele é definido por um plano tangente à Terra. Para operações marítimas locais, esse plano tangente é fixo e assumido inercial. Para esse sistema, o eixo x é direcionado para o Norte, o eixo y para o Leste e o z aponta para o centro da Terra.
- Relativo. É o sistema de referência solidário à embarcação. Sua posição e orientação são relativas à referência absoluta. A origem o desse sistema é geralmente escolhida para coincidir com o centro de gravidade do sólido. O sistema é denotado por (x_b, y_b, z_b) , em que:
 - x_b é o eixo longitudinal (popa para a proa).

- y_b é o eixo transversal (bombordo para boreste (ou estibordo))
- z_b eixo normal (cima para baixo)

A notação usada para as coordenadas está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Notação para embarcações. Reproduzido de (FOSSEN, 2002).

Grau de Liberdade	Descrição	Forças e Momentos	Velocidades lineares e angulares	Posições e ângulos de Euler
1	Movimento na direção x (surge)	X	u	x
2	Movimento na direção y (sway)	Y	v	y
3	Movimento na direção z (heave)	Z	w	z
4	Rotação em torno de x (roll)	K	p	ϕ
5	Rotação em torno de y (pitch)	M	q	θ
6	Rotação em torno de z (yaw)	N	r	ψ

4.3 MODELAGEM DE EMBARCAÇÕES

Segundo (ABKOWITZ, 1964), “praticamente todos os veículos marítimos tem plano de simetria. Um sistema de eixos que toma vantagem dessa simetria é escolhido”. Dois dos três eixos do sistema estão no plano de simetria, i.e., plano $x_b - z_b$. O motivo de escolher eixos no plano de simetria é a simplificação da expressão das forças hidrodinâmicas, bem como simplificação das equações do movimento já que os eixos escolhidos são, geralmente, paralelos aos eixos principais de inércia.

A origem do centro de coordenadas, como já dito, é posta no centro de gravidade do corpo, pois possibilita escrever as Leis de Newton na forma de forças e momentos em equações separadas. Adicionalmente, os eixos são assumidos serem os principais de inércia, simplificando a expressão do momento. O eixo é fixo para também favorecer a descrição das forças hidrodinâmicas e hidrostáticas. Como o sistema é fixo na embarcação e esta se move no espaço, os eixos também se movem. A implicação disso é um aumento na complexidade das equações do momento. Porém esse aumento de complexidade é superado pelo ganho de

simplificação na expressão da força, devido às considerações de simetria, justificando o sistema ser fixo.

As equações do movimento de um corpo movendo-se nos seis graus de liberdade foram deduzidas de (ABKOWITZ, 1964).

Partindo das Leis de Newton, a força e o momento podem ser escritos:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(\text{MomentoLinear}) = \hat{i}X + \hat{j}Y + \hat{k}Z \quad (12)$$

$$\vec{M} = \frac{d}{dt}(\text{MomentoAngular}) = \hat{i}K + \hat{j}M + \hat{k}N \quad (13)$$

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{U}) = m \frac{d\vec{U}}{dt} + \vec{U} \frac{dm}{dt} = m\dot{\vec{U}} + \vec{U} \frac{dm}{dt} \quad (14)$$

Em que $\vec{U}$ é o vetor velocidade linear, $\vec{U} = \hat{i}u + \hat{j}v + \hat{k}w$; e m é a massa do corpo. Um ponto importante a destacar é que apesar dos veículos marítimos terem massa variável devido ao consumo de combustível, essa variação será desprezada.

Desta maneira, tem-se:

$$\vec{F} = m\dot{\vec{U}} = m \left[\hat{i} \frac{du}{dt} + u \frac{d\hat{i}}{dt} + \hat{j} \frac{dv}{dt} + v \frac{d\hat{j}}{dt} + \hat{k} \frac{dw}{dt} + w \frac{d\hat{k}}{dt} \right] \quad (15)$$

Apesar de os versores $(\hat{i}, \hat{j}, \hat{k})$ não variarem de comprimento, suas direções variam de acordo com o movimento do corpo. Assim, as variações descritas pela diferenciação não são nulas e independem da translação do corpo, mas de suas rotações. O fenômeno que ocorre pode ser visualizado na Figura 8.

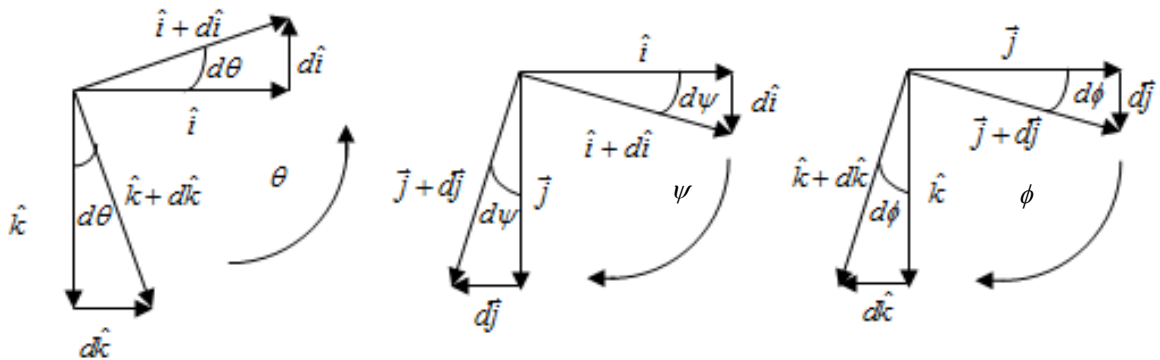


Figura 8 - Variação dos versores. Reproduzido de (ABKOWITZ, 1964)

O comprimento dos vetores $d\hat{i}$, $d\hat{j}$ e $d\hat{k}$ é dado multiplicando o raio unitário pelo ângulo de rotação diferencial (medido em radianos). Para pequenas rotações nos três eixos, as três variações são descritas:

$$d\hat{i} = \hat{i}0 + \hat{j}d\psi - \hat{k}d\theta \quad (16)$$

$$d\hat{j} = -\hat{i}d\psi + \hat{j}0 + \hat{k}d\phi \quad (17)$$

$$d\hat{k} = \hat{i}d\theta - \hat{j}d\phi + \hat{k}0 \quad (18)$$

O vetor velocidade angular é definido por $\vec{\Omega} = \hat{i}p + \hat{j}q + \hat{k}r$. Sabe-se que

$$\frac{d\phi}{dt} = p, \frac{d\theta}{dt} = q, \text{ e } \frac{d\psi}{dt} = r.$$

Assim,

$$\frac{d\hat{i}}{dt} = \hat{i}0 + \hat{j}r - \hat{k}q \text{ ou } \frac{d\hat{i}}{dt} = \vec{\Omega} \times \hat{i} = \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ p & q & r \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\frac{d\hat{j}}{dt} = -\hat{i}r + \hat{j}0 + \hat{k}p \text{ ou } \frac{d\hat{j}}{dt} = \vec{\Omega} \times \hat{j} = \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ p & q & r \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\frac{d\hat{k}}{dt} = \hat{i}q - \hat{j}p + \hat{k}0 \text{ ou } \frac{d\hat{k}}{dt} = \vec{\Omega} \times \hat{k} = \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ p & q & r \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Retornando agora para equação da força, tem-se:

$$\vec{F} = m[\hat{i}\dot{u} + u(\hat{j}\dot{r} - \hat{k}\dot{q}) + \hat{j}\dot{v} + v(\hat{k}\dot{p} - \hat{i}\dot{r}) + \hat{k}\dot{w} + w(\hat{i}\dot{q} - \hat{j}\dot{p})] \quad (22)$$

As quantidades encontradas estão separadas de acordo com as orientações dos eixos. Com isso, pode-se avaliar a componente da força nas três direções:

$$\hat{i}X + \hat{j}Y + \hat{k}Z = m[\hat{i}(\dot{u} + qw - rv) + \hat{j}(\dot{v} + ru - pw) + \hat{k}(\dot{w} + pv - qu)] \quad (23)$$

$$X = m(\dot{u} + qw - rv) \quad (24)$$

$$Y = m(\dot{v} + ru - pw) \quad (25)$$

$$Z = m(\dot{w} + pv - qu) \quad (26)$$

Os termos $(\dot{u}, \dot{v}, \dot{w})$ são os componentes da aceleração e os termos $(qw - rv), (ru - pw)$ e $(pv - qu)$ são componentes da aceleração centrípeta.

O momento angular de um corpo com eixos fixos é expresso por:

$$\text{Momento Angular} = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (27)$$

Sendo os eixos escolhidos sendo eixos principais de inércia, os produtos de inércia são nulos. Desta forma,

$$\text{Momento Angular} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \hat{i}I_x p + \hat{j}I_y q + \hat{k}I_z r \quad (28)$$

O momento, então, é descrito:

$$\begin{aligned} \vec{M} = \frac{d}{dt}(\text{Momento Angular}) &= \frac{d}{dt}(\hat{i}I_x p + \hat{j}I_y q + \hat{k}I_z r) = \hat{i} \frac{d}{dt}(I_x p) + I_x p \frac{d\hat{i}}{dt} + \hat{j} \frac{d}{dt}(I_y q) + \\ &I_y q \frac{d\hat{j}}{dt} + \hat{k} \frac{d}{dt}(I_z r) + I_z r \frac{d\hat{k}}{dt} \end{aligned} \quad (29)$$

A massa da embarcação é considerada constante, bem como sua massa distribuída, inércia. O que resulta em:

$$\vec{M} = \hat{i}I_x \dot{p} + I_x p(\hat{j}\dot{r} - \hat{k}\dot{q}) + \hat{j}I_y \dot{q} + I_y q(\hat{k}\dot{p} - \hat{i}\dot{r}) + \hat{k}I_z \dot{r} + I_z r(\hat{i}\dot{q} - \hat{j}\dot{p}) \quad (30)$$

$$\vec{M} = \hat{i}K + \hat{j}M + \hat{k}N \quad (31)$$

Desta maneira, separam-se os componentes em suas respectivas direções:

$$K = I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr \quad (32)$$

$$M = I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp \quad (33)$$

$$N = I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq \quad (34)$$

Os termos $(\dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$ são os componentes da aceleração angular aparente e os termos $(I_z - I_y)qr, (I_x - I_z)rp$ e $(I_y - I_x)pq$ são componentes do momento giroscópico.

As equações foram desenvolvidas considerando que a origem do sistema está no centro de gravidade. Todavia, o centro de gravidade não é necessariamente o mesmo que o centro de geometria ou de flutuabilidade do corpo. Considerando que as forças hidrostáticas e hidrodinâmicas dependem significativamente da

geometria da embarcação, torna-se conveniente ter as equações para origens arbitrárias. Assim, há flexibilidade para a escolha da origem. Segue as equações prontas (sem o desenvolvimento) para qualquer origem. Essas equações foram desenvolvidas considerando que os eixos ainda são paralelos aos eixos principais de inércia, apenas a origem difere de G.

O vetor que une a origem escolhida ao centro de gravidade G é definido por

$$\vec{R}_G = \hat{i}x_G + \hat{j}y_G + \hat{k}z_G.$$

As equações são:

- Força

$$\vec{F} = \vec{i}X + \vec{j}Y + \vec{k}Z \quad (35)$$

$$X = m[\dot{u} + qw - rv - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \quad (36)$$

$$Y = m[\dot{v} + ru - pw - y_G(r^2 + \dot{p}^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \quad (37)$$

$$Z = m[\dot{w} + pv - qu - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \quad (38)$$

- Momento

$$\vec{M} = \hat{i}K + \hat{j}M + \hat{k}N \quad (39)$$

$$K = I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} + pv - qu) - z_G(\dot{v} + ru - pw) + x_G y_G(pr - \dot{q}) - x_G z_G(pq + \dot{r}) + y_G z_G(p^2 - r^2)] \quad (40)$$

$$M = I_y \dot{q} + (I_x + I_z)rp + m[z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv - qu) + y_G z_G(qp - \dot{r}) - y_G x_G(qr + \dot{p}) + x_G z_G(p^2 - r^2)] \quad (41)$$

$$N = I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} + ru - pw) - y_G(\dot{u} + qw - rv) + z_G x_G(rq - \dot{p}) - z_G y_G(rp + \dot{q}) + y_G x_G(q^2 - p^2)] \quad (42)$$

4.4 DINÂMICA LINEAR DE NAVEGAÇÃO NO PLANO

De acordo com (FOSSEN, 2011), modelos em 3 graus de liberdade são modelos para planos horizontais (*surge*, *sway* e *yaw*) para navios, semissubmersíveis e veículos subaquáticos usados em sistemas de posicionamento dinâmico, entre outras aplicações. Será o modelo adotado, haja vista grande volume da embarcação ficar submersa, não havendo movimento significativo em *heave* e *roll*, ademais um longo comprimento, reduzindo movimentos em *pitch*.

Além disso, será usada a Teoria de Manobra. Trata-se do estudo da embarcação movendo-se a velocidade constante U , em águas calmas, baseado na suposição de inexistência de ondas de tal forma que massa adicional e amortecimento podem ser representados usando derivadas hidrodinâmicas (parâmetros constantes). Essa suposição é somente válida para *surge*, *sway* e *yaw*. O modelo em sua representação mais simples será linear (FOSSEN, 2011).

As equações linearizadas em *surge*, *sway* e *yaw* são casos especiais das equações não lineares, onde forças elásticas são desconsideradas, forças não lineares de Coriolis e centrípetas são linearizadas em torno da velocidade de navegação U e o amortecimento não linear é aproximado por uma matriz linear de amortecimento. Para o caso de embarcações, é comum desacoplar o modo em *surge* devido à simetria do plano xz , implicando mudanças nas matrizes de massa adicional. Em águas calmas, a velocidade de corrente da água pode ser desconsiderada, deste modo o modelo de (FOSSEN,2011) é descrito por:

$$(\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A)\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{C}_{RB}^* + \mathbf{C}_A^* + \mathbf{D})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (43)$$

Em que:

- $\mathbf{M}_{RB}$ - matriz de inércia do corpo rígido
- $\mathbf{M}_A$ - matriz de inércia da massa adicional.
- $\mathbf{C}_{RB}^*$ - matriz de Coriolis e centrípeta do corpo rígido
- $\mathbf{C}_A^*$ - matriz de forças linearizadas devido à rotação do corpo.
- $\mathbf{D}$ - matriz de amortecimento.
- $\mathbf{v}$ - vetor de velocidades.
- $\dot{\mathbf{v}}$ - vetor de acelerações.
- $\boldsymbol{\tau}$ - vetor de forças dos propulsores.

Definidos por:

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & -m \cdot y_g \\ 0 & m & m \cdot x_g \\ -m \cdot y_g & m \cdot x_g & I_z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{RB}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & mU \\ 0 & 0 & mX_G U \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & Y_{\dot{r}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_A^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}U \\ 0 & 0 & -Y_{\dot{r}}U \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{v} = [u, v, r]^T$$

Definindo:

$$\mathbf{M} = (\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A) \quad (44)$$

$$\mathbf{N} = (\mathbf{C}_{RB}^* + \mathbf{C}_A^* + \mathbf{D}) \quad (45)$$

$$(\mathbf{M})\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{N})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & m \cdot X_G - Y_r \\ 0 & m \cdot X_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & (m - Y_{\dot{v}})U - Y_r \\ 0 & -N_v & (m \cdot X_G - Y_r)U - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Sendo:

- m = massa da embarcação.
- I_z = momento de inércia em relação ao eixo Z em relação ao sistema de referência do corpo.

É importante observar que o espaço de estados linearizado é definido em relação às velocidades e acelerações relativas da embarcação, nas coordenadas hidrodinâmicas. Para que tais coordenadas possam ser convertidas para coordenadas absolutas, é necessária uma matriz de rotação com ângulo de yaw para as velocidades e a derivada dessa transformação linear para o cálculo das acelerações, ou seja, o sistema é não linear para coordenadas absolutas:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{NED} \\ \dot{y}_{NED} \\ \dot{\psi}_{NED} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{V}_{NED} = \mathbf{R}(\psi) \times \mathbf{U}_{Vessel} \quad (48)$$

$$\mathbf{A}_{NED} = \dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi) \times \mathbf{U}_{Vessel} + \mathbf{R}(\psi) \times \dot{\mathbf{U}}_{Vessel} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{NED} \\ \ddot{y}_{NED} \\ \ddot{\psi}_{NED} \end{bmatrix} \quad (49)$$

Definido o modelo matemático, um modelo computacional foi implementado em Simulink para as futuras simulações dos algoritmos, Figura 9-Figura 11:

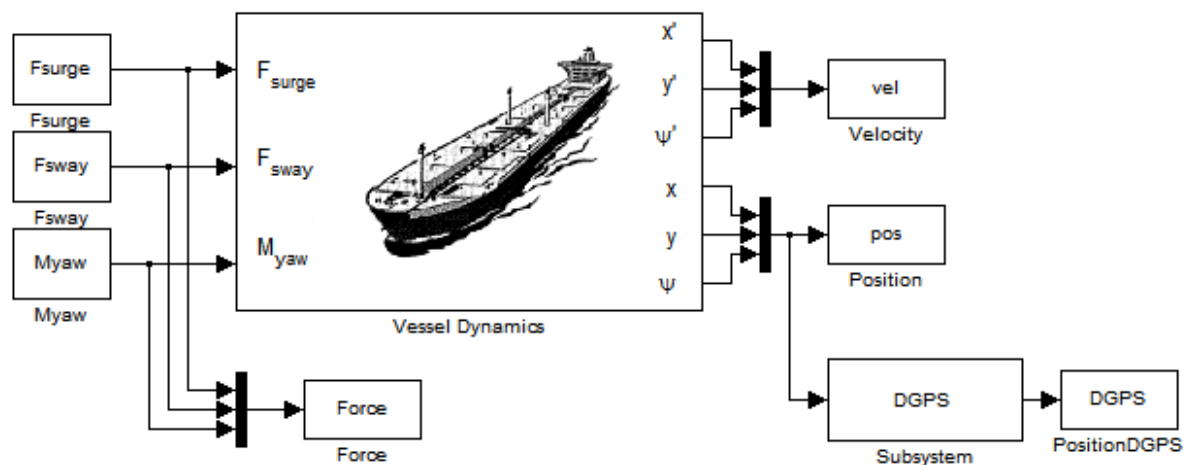


Figura 9. Modelo para simulação computacional

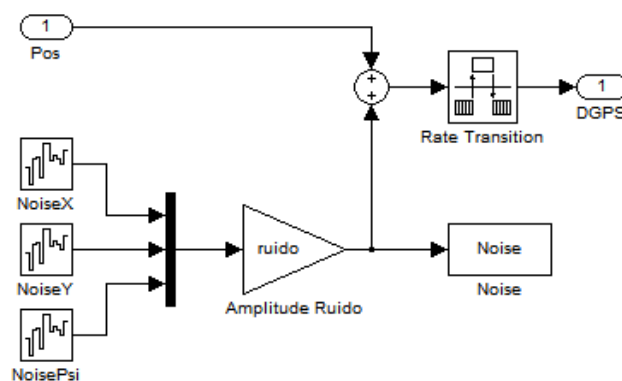


Figura 10. Simulação do ruído do DGPS

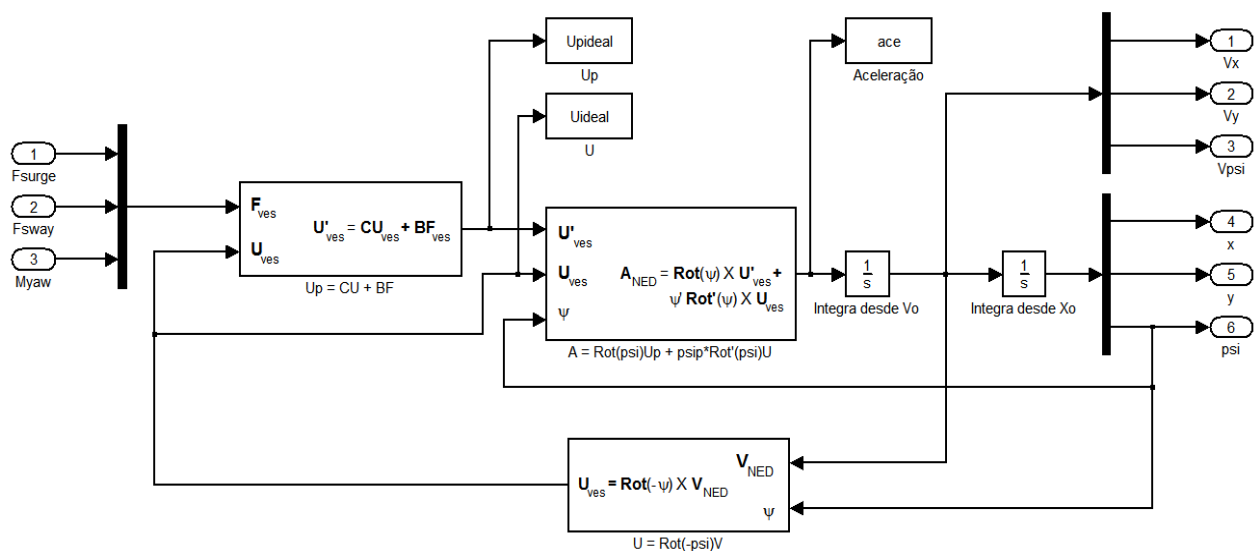


Figura 11. Dinâmica interna

5 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

(LJUNG & GLAD, 1994) definem sistema como “objeto ou coleção de objetos cujas propriedades deseja-se estudar”, sendo que o mesmo pode ser representado por diversos tipos de modelos:

- Modelo mental: baseados na intuição e experiência.
- Modelo verbal: o comportamento do sistema é descrito em palavras.
- Modelo matemático: as relações entre as quantidades do sistema são descritas por relações matemáticas.

O modelo matemático é uma ferramenta para responder questões sobre o sistema sem ter de fazer experimentos. Ele será útil para prever o comportamento do sistema analiticamente, resolvendo-se as equações que o descrevem e analisando as respostas, análises que podem ser numericamente realizadas com computador nas chamadas simulações (LJUNG & GLAD, 1994).

Comprovar a confiabilidade do modelo, entretanto, torna-se uma grande dificuldade. Feita através da validação, comprova-se a precisão do modelo comparando-se a resposta do mesmo com o sistema real, averiguando se o erro obtido é aceitável, o que pode variar de acordo com o projeto em questão.

Dentre os modelos matemáticos, ainda são feitas as seguintes classificações:

- Determinístico e Estocástico: o modelo determinístico é aquele em que apresenta exata relação entre as variáveis. O modelo estocástico é aquele que trabalha com conceitos probabilísticos.
- Dinâmico e Estático: um sistema é normalmente caracterizado por variáveis dependentes do tempo. Se essa variação ocorrer de forma instantânea, o sistema é dito estático. Se as variáveis dependerem de sinais aplicados no passado e não variarem instantaneamente, o sistema é dito dinâmico.
- Tempo contínuo e tempo discreto: sistemas em tempo contínuo são aqueles cujos sinais estão em tempo contínuo. Se os sinais estiverem

baseados em amostras de tempo, o que é feito na prática, o sistema é dito de tempo discreto.

Outra característica importante do modelo é que o mesmo pode ser analisado de forma simplificada através de seus sinais de interesse. O primeiro sinal é a influência externa sobre o sistema, denominada entrada, denotada aqui por $u(t)$. Dada a entrada, o sistema irá evoluir retornando o segundo sinal, a saída, denominada por $y(t)$. A relação entre entrada, sistema e saída pode ser representada visualmente por um diagrama de blocos (Figura 12).

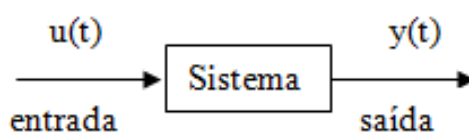


Figura 12. Diagrama de blocos

“O comportamento estático e dinâmico de um sistema pode ser obtido através de um modelo teórico quando as leis físicas que atuam no sistema são conhecidas na forma analítica. Se, no entanto, essas leis não são conhecidas ou são parcialmente conhecidas, deve-se aplicar modelagem experimental, conhecido como identificação de sistemas” (ISERMAN & MUNCHHOF, 2011).

A modelagem de um sistema é apenas o primeiro passo. A identificação de sistemas torna-se necessária já que não se conhece os parâmetros presentes no modelo dinâmico.

O modelo teórico apresenta dependência funcional entre propriedades físicas do sistema e seus parâmetros. Desta maneira, realizam-se experimentos para determinar os parâmetros e manobras livres para validá-los (ISERMAN & MUNCHHOF, 2011).

Ainda de acordo com (ISERMAN & MUNCHHOF, 2011), para a derivação dos modelos matemáticos dos sistemas dinâmicos pode-se utilizar duas abordagens: modelagem teórica e modelagem experimental.

Para a modelagem teórica, o modelo é obtido aplicando-se métodos de Cálculo, geralmente em leis da física. Tipicamente se assume hipóteses simplificadoras para tornar possível o tratamento matemático. O resultado é um conjunto de equações diferenciais ordinárias ou parciais, que conduz a um modelo

teórico com certa estrutura e parâmetros definidos, se todas as equações puderem ser resolvidas explicitamente. Em muitos casos, o modelo é complexo e complicado, por isso precisa ser simplificado.

No caso da modelagem experimental, o modelo matemático é obtido por medições. As entradas e saídas são usadas em algum método de identificação a fim de descobrir um modelo matemático que descreva suas relações.

Modelos teóricos e experimentais são complementares. Para obter benefícios das duas abordagens não se usará apenas o modelo teórico (conduzindo ao chamado modelo *white-box*) ou apenas o modelo experimental (conduzindo ao chamado modelo *black-box*), mas uma mistura dos dois, o chamado modelo *gray-box*. Os diferentes modelos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Diferentes tipos de modelos. Reproduzido parcialmente de Isermann e Münchhof, 2011.

Modelo White-box	Modelo Light-Gray-box	Modelo Dark-Gray-box	Modelo Black-box
Equações Diferenciais lineares / não-lineares	Equações Diferenciais com estimação de parâmetros	Modelos Neuro/Fuzzy com estimação de parâmetros	Resposta a impulso e redes neurais

(ISERMAN & MUNCHHOF, 2011) descrevem modelos paramétricos como equações que contem os parâmetros do processo. Exemplos disso são equações diferenciais. Modelos não paramétricos fornecem a relação entre entrada e saída por meio de tabelas ou curvas características. Exemplos disso são respostas a impulso ou a entrada degrau. Modelos paramétricos possuem número finito de parâmetros, enquanto não paramétricos possuem infinito.

Baseado nesses conceitos, nos estudos realizados em trabalhos da área e na simplicidade do modelo obtido, foram escolhidos métodos de identificação baseados em modelos paramétricos, sendo eles *curve-fitting* e o método dos mínimos quadrados.

5.1 CURVE-FITTING PARA SISTEMAS PARAMÉTRICOS

A abordagem do *curve-fitting* é traduzir diretamente o problema de identificação como um problema de otimização.

No estudo específico, o DGPS fornecerá, após um ensaio com forças de entrada conhecidas, a trajetória e orientação absolutas da embarcação no tempo, o que pode ser encarado como uma curva paramétrica tridimensional.

$$\gamma_{experimental}(t) = (x(t), y(t), \psi(t))_{NED}$$

O problema de otimização passa, então, a ser:

$$\begin{cases} \min Err^2(\text{parâmetros}) \\ Err^2 = \int_0^{t_{final}} [\gamma_{experimental}(t) - \gamma_{simulado}(\text{parâmetros}, \text{forças de entrada}, t)]^2 dt \end{cases}$$

Definida a função a ser minimizada, o próximo passo é definir o algoritmo de otimização mais indicado para o problema. Frente ao elevado número de parâmetros, a não-linearidade do sistema e a presença (observada em testes) de vários mínimos locais, o ideal seria um algoritmo de otimização global como algoritmos probabilísticos (*simulated-annealing*, algoritmo genético) ou algoritmos que aliam busca randômica com otimização numérica (*randomized search*, *tabu search*). Como a implementação de tais algoritmos foge ao escopo do projeto, optou-se, portanto, por utilizar a função *fminsearch* do próprio MATLAB®, sem as opções mais avançadas que exigiriam uma *toolbox* extra. Como será mostrado mais adiante, a abordagem adotada exige uma palpite preliminar próximo à solução final.

5.2 MÍNIMOS QUADRADOS PARA SISTEMAS PARAMÉTRICOS

A abordagem de mínimos quadrados, por sua vez, parte de uma relação linear entre entrada e saída descrita por uma equação diferencial:

$$a_n y_u^{(n)}(t) + a_{n-1} y_u^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y_u^{(1)}(t) + y_u(t) = b_m u^{(m)}(t) + b_{m-1} u^{(m-1)}(t) + \dots + b_1 u^{(1)}(t) + b_0 u(t) \quad (48)$$

Onde $m < n$.

As variáveis $u(t)$ e $y(t)$ são entrada e saída, respectivamente. O sinal da saída contém um sinal adicional de ruído.

$$y(t) = y_u(t) + n(t) \quad (49)$$

Onde $y_u(t)$ é a medida da saída real, sem distúrbios. Substitui-se então na equação diferencial. Como o sinal de saída medido $y(t)$ difere do real por causa do ruído, surge uma equação erro desconhecida $e(t)$, o que resulta:

$$y(t) = \psi^T(t) \theta + e(t) \quad (50)$$

Sendo,

$$\psi^T(t) = (-y^{(1)}(t) \dots -y^{(n)}(t) | u(t) \dots u^{(m)}(t)) \quad (51)$$

$$\theta = (a_1 \dots a_n | b_0 \dots b_m)^T \quad (52)$$

Os sinais de entrada e saída são medidos em amostras de tempo discreto $t = kT_0$ com $k = 0, 1, 2, \dots, N$. Baseado nesses dados, $N+1$ equações podem ser escritas:

$$y(k) = \psi^T(k) \theta + e(k) \quad (53)$$

Onde $k = 1, 2, \dots, N$. Esse sistema de equações pode ser escrito na notação matricial:

$$\mathbf{y} = \Psi \theta + \mathbf{e} \quad (54)$$

$$\mathbf{y}^T = (y(0) y(1) \dots y(N)) \quad (55)$$

$$\Psi = \begin{pmatrix} -y^{(1)}(0) & \dots & -y^{(n)}(0) & u(0) & \dots & u^{(m)}(0) \\ -y^{(1)}(1) & \dots & -y^{(n)}(1) & u(1) & \dots & u^{(m)}(1) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -y^{(1)}(N) & \dots & -y^{(n)}(N) & u(N) & \dots & u^{(m)}(N) \end{pmatrix} \quad (56)$$

O vetor de parâmetros estimados é definido por

$$\hat{\theta}^T(k) = (\hat{a}_1 \dots \hat{a}_m | \hat{b}_1 \dots \hat{b}_m) \quad (57)$$

Minimizando a função custo:

$$V = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = \sum_{k=0}^N \mathbf{e}^2(k) \quad (58)$$

$$\frac{dV}{d\theta} \Big|_{\theta=\hat{\theta}} = -2\boldsymbol{\Psi}^T (\mathbf{y} - \boldsymbol{\Psi}\hat{\boldsymbol{\theta}}) = 0 \quad (59)$$

O vetor dos parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados é:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\boldsymbol{\Psi}^T \boldsymbol{\Psi})^{-1} \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{y} \quad (60)$$

A matriz acima é denominada matriz pseudoinversa.

Para o caso de embarcações bidimensionais, percebe-se que a relação entrada-saída não é bem definida, já que existem duas saídas desconhecidas no sistema (velocidade e aceleração nas coordenadas hidrodinâmicas).

Para sistemas dessa forma, normalmente se propõe que a saída seja a parte mais ruidosa do sistema, no caso a aceleração, já que ela envolve uma segunda derivação do sinal.

É importante observar, também, que o DGPS fornece apenas informações absolutas, sendo que uma transformação deve ser realizada para obter os dados em coordenadas hidrodinâmicas.

Aplica-se, então, o método ao sistema dinâmico linear considerado $(\mathbf{M})\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{N})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}$. Entretanto, manipula-se a equação para que a aceleração, sinal com maior nível de ruído, seja a saída.

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{A}\mathbf{v} + \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} \quad (61)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \quad (62)$$

Nota-se que:

$$\boldsymbol{\theta}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$\mathbf{y}(t) = \dot{\mathbf{v}} \quad (64)$$

$$\boldsymbol{\Psi}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \quad (65)$$

Desde modo, $\mathbf{M} = \mathbf{B}^{-1}$, $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N} = -\mathbf{A}$, portanto $\mathbf{N} = -\mathbf{M}\mathbf{A}$, assumindo $\det(\mathbf{M}) \neq 0$.

Então, a identificação deve ser disposta como:

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{v}_i \\ \dot{r}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i & 0 & 0 & 0 & 0 & Fx_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_i & r_i & 0 & 0 & 0 & Fy_i & M_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_i & r_i & 0 & 0 & 0 & Fy_i & M_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{32} \\ a_{33} \\ b_{11} \\ b_{22} \\ b_{23} \\ b_{32} \\ b_{33} \end{bmatrix} \quad (66)$$

Com três linhas da matriz para cada amostra do sistema.

5.3 ANÁLISE DOS ALGORITMOS DE IDENTIFICAÇÃO

Definidos os algoritmos, iniciou-se uma bateria de testes para verificar a capacidade de identificação dos mesmos em relação a um sistema com resposta ideal, ou seja, desconsiderando-se a presença de ruídos e imprecisões nos modelos, de modo a levantar os pontos fortes e fracos de cada abordagem.

Limitações inerentes do sistema de acionamento de embarcações, descritos em 6.1, também foram desconsiderados, supõe-se que se pode aplicar uma força arbitrária no corpo.

Os parâmetros utilizados foram retirados de (Melgaard, 2003), que levantou experimentalmente as derivadas de uma barça em escala, sendo eles:

- $m = 753,57kg$
- $I_z = 4337000 kg \cdot m^2 (estimado)$
- $x_g = 7,86kg$
- $U_m = 7,974m/s$

Parâmetros $\times 10^5$:

- $X_u = -52,7$
- $X_u = -169,4$
- $Y_v = -582$
- $Y_r = 2,6$
- $Y_v = -653,9$
- $Y_r = 269$
- $N_v = 47,2$
- $N_r = -31,5$
- $N_v = -217,9$
- $N_r = -164,4$

5.3.1 Manobra com força constante em surge

O ensaio inicial de comparação entre os algoritmos foi proceder a identificação após uma força constante na direção *surge* de 100N.

A evolução do sistema pode ser visualizada na Figura 13 e na Figura 14:

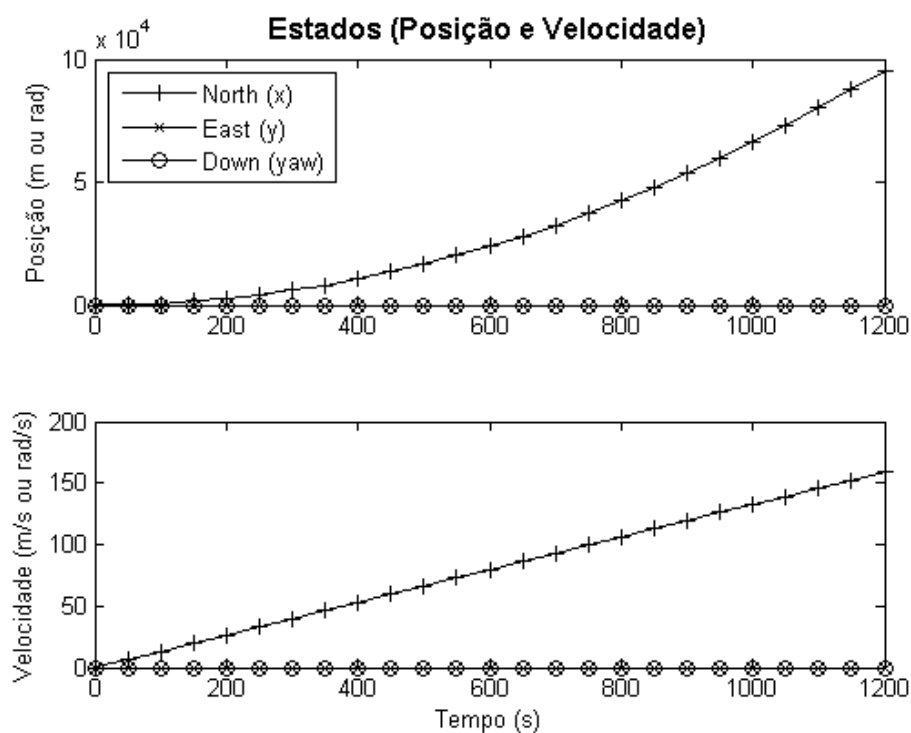


Figura 13. Ensaio com força *surge* constante, evolução dos estados

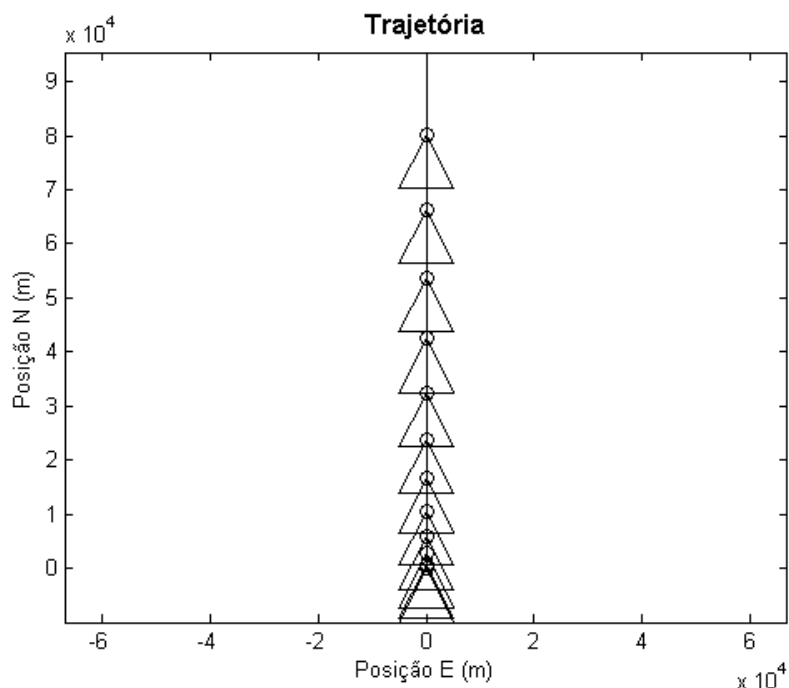


Figura 14. Ensaio com força *surge* constante, trajetória

A identificação por mínimos quadrados retornou resultados para os parâmetros de *surge* após um tempo de execução de cerca de 0.3s, com erros percentuais inferiores a 0,0001% (ou seja, erros devidos apenas ao truncamento da máquina).

O algoritmo *curve-fitting* foi simplificado para ser função apenas dos dois parâmetros da direção de aplicação da força, já que o sistema matemático supõe desacoplamento entre *surge* e as outras direções. A identificação foi realizada com quatro palpites iniciais diferentes: todos os parâmetros em zero, os parâmetros com 50% de erro, os parâmetros com 10% de erro e os parâmetros com 1% de erro. Os resultados estão sumarizados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados do algoritmo *curve-fitting* para força *surge* constante

Palpite Inicial	Tempo de Execução	Erro percentual X_u	Erro percentual $X_{\dot{u}}$
0	~587s	<0,0001%	0,0001%
Diferença de 50%	~700s	<0,0001%	0,0002%
Diferença de 10%	~745s	<0,0001%	-0,0002%
Diferença de 1%	~460s	<0,0001%	<0,0001%

Como pode se observar, o algoritmo *curve-fitting*, embora dispense o uso de filtros, já que o objetivo é minimizar o erro quadrado em relação à própria trajetória obtida pelo DGPS, exige um tempo de processamento maior para obter resultados equivalentes ou piores que o MMQ. Dessa forma, optou-se somente pelo MMQ para a implementação no *software*. Mais uma vez, é importante observar que um algoritmo de otimização mais adequado que o *fminsearch* poderia reduzir o tempo de busca consideravelmente.

5.3.2 Manobra com forças constantes simultâneas

De forma similar ao ensaio anterior, uma força constante de 100N foi aplicada durante um determinado período de tempo em *sway*, sendo que o resultado pode ser visualizado na Figura 15 e na Figura 16, os estados referentes à orientação foram escalonados para serem mais bem visualizados.

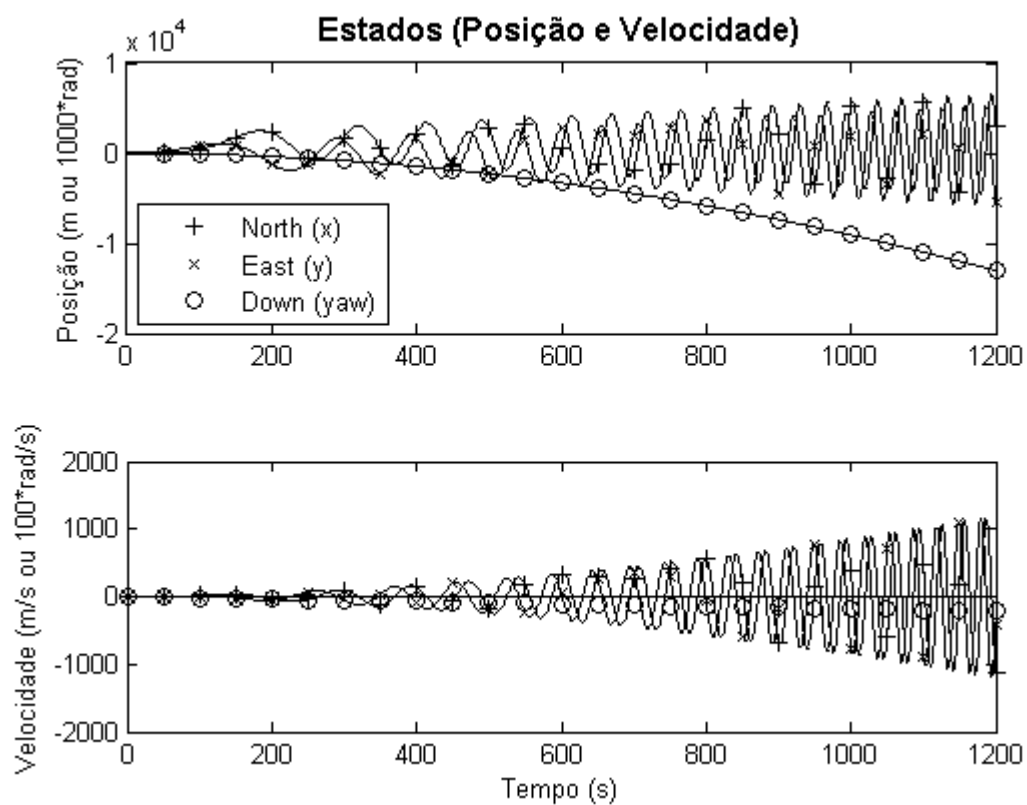


Figura 15. Ensaio com força sway constante, evolução dos estados

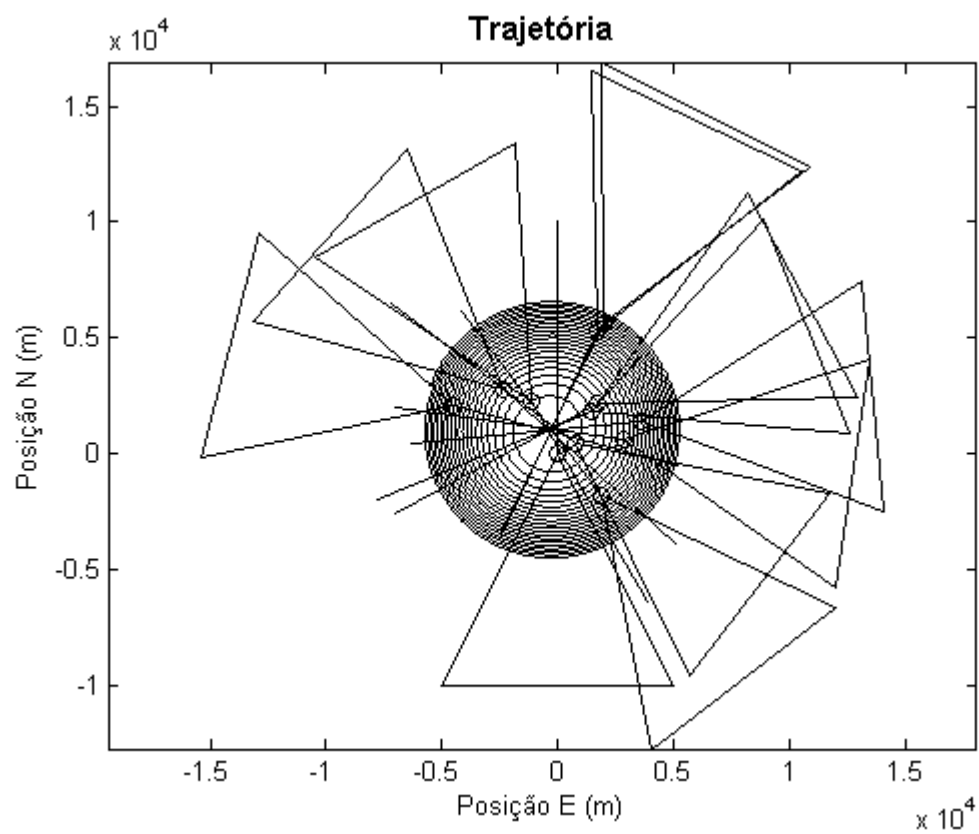


Figura 16. Ensaio com força sway constante, trajetória

A aplicação de força em *sway* permite observar o efeito do acoplamento entre os estados e a não linearidade do modelo em relação às coordenadas absolutas, de forma que, para retornar ao modelo linear para a identificação com MMQ, é necessário que se efetue uma transformação inversa que é função de *yaw* e da velocidade angular do navio, mais um fator de propagação de erro quando com a presença de ruído.

Com um tempo estimado na ordem de 0,2s, os parâmetros relativos à *sway* e os parâmetros relativos à $\dot{\psi} = r$ foram estimados com erro inferior a 0,0001%.

Seguindo a linha de forças constantes, uma força constante de 100N em *surge* e outra de mesma magnitude em *sway* foram aplicadas simultaneamente. Nesse caso, os parâmetros relativos a *surge* e *sway*, assim como o parâmetro Y_r , foram estimados com erro inferior a 0,0001%, enquanto o parâmetro N_r foi determinado com 0,0084%.

Um terceiro ensaio, com forças constantes iguais a 100N mais um momento constante de 100Nm foi realizado. Nesse caso, erros de até 56% foram observados em parâmetros relativos à *sway* e erros entre 36661% e 196% nos parâmetros em *yaw*, evidenciando que a sobreposição de forças subdetermina a pseudoinversa, que retorna um resultado que resolve o sistema, porém não necessariamente é a solução real, apenas uma das soluções (no caso, a pseudoinversa retorna a solução com menor norma).

Observa-se, portanto, que mesmo com um sistema ideal, a escolha da excitação em malha aberta deve ser tal que permita que os parâmetros tenham uma atuação distinta o suficiente para que os mesmos possam ser identificados.

Uma última consideração a respeito do algoritmo de identificação é que a avaliação de quão boa foi a identificação deve ser feita através da comparação entre o resultado experimental e o simulado de outra curva arbitrária. Esse procedimento, denominado validação, será contemplado no software através de um módulo de manobra livre, que permitirá que o usuário, através de um *joystick*, execute uma manobra arbitrária.

6 ACIONAMENTO E AQUISIÇÃO

Como evidenciado na seção anterior, para que a identificação do sistema possa ser efetuada é necessário conhecimento dos *inputs* e *outputs* do mesmo.

Esclarecida a necessidade, essa seção propõe-se a fazer um breve estudo sobre o acionamento de embarcações, *input*, e sobre os principais modos de aquisição utilizados no rastreamento de veículos marinhos, *output*, comparando as tendências atuais com as abordagens adotadas.

6.1 ACIONAMENTO DE EMBARCAÇÕES

Embarcações de grande porte normalmente utilizam três tipos de propulsores: propulsores principais, em túnel e azimutais, cada um com uma forma própria de atuação.

Os propulsores principais, Figura 18, são, como o nome sugere, a principal forma de acionamento adotada. São caracterizados por gerarem força apenas na direção *surge*, sendo que a orientação da embarcação é controlada por um leme.

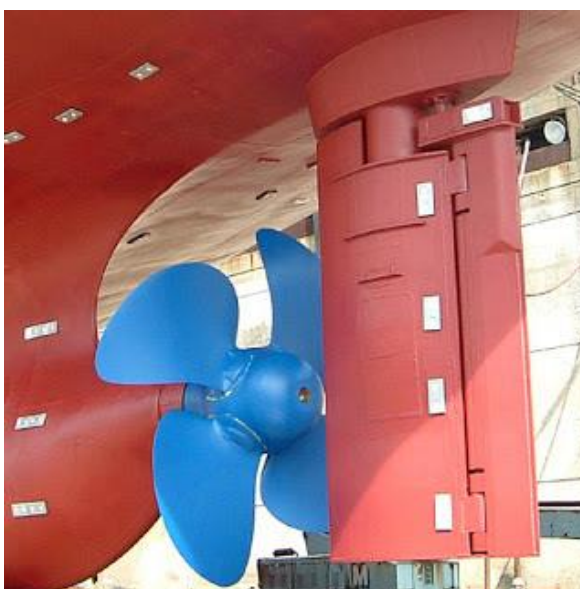


Figura 17. Exemplo de propulsor principal, extraído de (PRECIADO, 2012)

Os propulsores em túnel, por sua vez, foram concebidos para aumentar a manobrabilidade das embarcações permitindo a geração de força em *sway* e *yaw* (a

independência entre as forças pode ser obtida posicionando dois propulsores, um na proa e um na popa). Um exemplo deste propulsor pode ser visualizado na Figura 18.



Figura 18. Exemplo de propulsor em túnel, extraído de (PRECIADO, 2012)

Por fim, os propulsores azimutais, Figura 19, são os que conferem a maior capacidade de manobra por permitirem orientar a força em qualquer direção através da rotação de seus eixos.

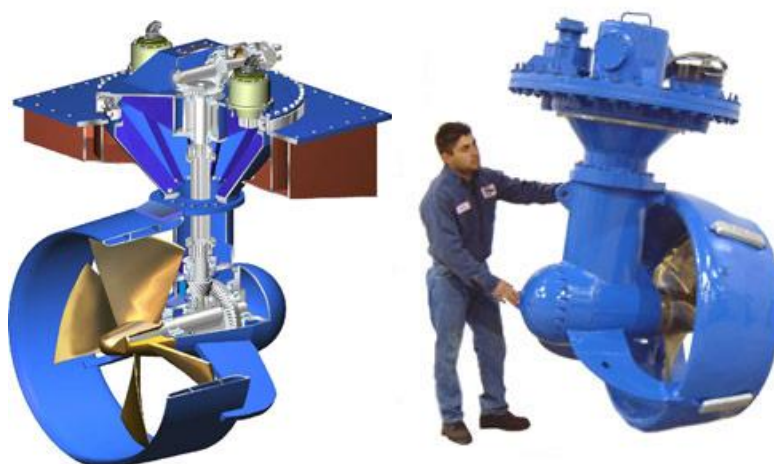


Figura 19. Propulsores azimutais, extraída de (PowerService, 2013)

É importante observar que as embarcações normalmente possuem uma combinação desses propulsores em quantidade superior ou inferior ao necessário, ou seja, são sistemas sobre atuados ou sub atuados; de modo que a simples determinação de componentes *surge*, *sway* e *yaw* pode ser obtida por múltiplas configurações ou, até mesmo, não ser obtida.

De forma a manter uma abordagem suficientemente generalista, o *input* padrão foi definido como a força e orientação de cada um dos propulsores da embarcação, sendo que a orientação do propulsor principal se refere à orientação do leme e a orientação do propulsor em túnel é simplesmente desconsiderada.

Adotou-se, também, a hipótese de que o acionamento poderia ser feito por uma mensagem serial, por ser uma das comunicações mais utilizadas em sistemas embarcados. Dessa forma, cabe ao usuário definir o protocolo que, dado a orientação e força de cada propulsor, monta a mensagem serial, e cabe ao *software* enviar a mensagem no tempo solicitado.

Na etapa de identificação, cabe ao usuário definir as relações entre força e orientação e as forças e momentos atuando na embarcação. É importante ressaltar que, dessa forma, as interações propulsor-propulsor, propulsor-casco, propulsor-velocidade podem ser levadas em conta, garantindo dados mais confiáveis de *input*.

6.2 AQUISIÇÃO DE POSIÇÃO E TRAJETÓRIA

Nessa seção, são apresentados um estudo qualitativo dos sistemas de aquisição empregados em veículos marítimos e uma explicação mais detalhada do funcionamento do DGPS, adotado no trabalho.

6.2.1 Comparação entre sistemas de aquisição

Dentre as principais características a serem consideradas para a escolha de um sistema de aquisição, três podem ser enfatizadas:

- Erro controlado: é interessante que o erro do valor medido seja pequeno, frente à medição, e possa ser mensurado para avaliar a qualidade da identificação do sistema.
- Pouca interferência com o sistema a ser medido: toda a medição interfere com o sistema medido, entretanto a ordem de grandeza da interferência deve ser consideravelmente menor que a ordem de grandeza da medição.
- Campo de visão adequado para o ensaio: algumas manobras de embarcações de grande porte podem se estender por quilômetros, sendo necessário um sistema de aquisição compatível.

Com base nessas características, quatro sistemas de medição utilizados em veículos marítimos foram comparados de forma qualitativa: medição inercial, medição por câmera, GPS e DGPS.

A medição inercial, empregada no trabalho de (LAVIERI, 2011) para reconstruir a trajetória de estacas-torpedo (forma de ancoragem que fixa uma estaca no solo submarino), consiste em integrar informações provenientes de acelerômetros e giroscópios para obter as velocidades e posições de um corpo.

Embora possua excelentes características de campo de visão, já que o sistema é colocado junto ao corpo acompanhando-o por toda a trajetória, e interferência, já que os sensores atuais são leves e pequenos, o erro de tal sistema tende a aumentar com o tempo de ensaio devido ao procedimento de integração, não sendo interessante para ensaios de longa duração que exijam precisão de velocidade linear e posição. Para resultados de aceleração e velocidade angular, entretanto, esse sistema é o mais indicado.

A medição por câmera, utilizada no trabalho de (PRADO, 2009) para a obtenção experimental de parâmetros hidrodinâmicos de um veículo submarino, apresenta excelentes características de interferência, já que a interferência de um sistema de aquisição de imagens é desprezível em relação a um sistema mecânico, e ótimas características de erro nos valores de posição, já que os mesmos são obtidos diretamente pelo tratamento da imagem. Os valores de velocidade e aceleração, por sua vez, são obtidos através da derivação no tempo da posição, procedimento que tende a amplificar o ruído da posição.

O campo de visão, entretanto, é restrito pela posição fixa da câmera, que consegue registrar uma amplitude limitada do espaço.

Embora a câmera possa ser posicionada de forma a aumentar sua capacidade, ou mesmo possa ser movimentada, esses procedimentos implicam no aumento do erro de medição. O primeiro implicando em um aumento do erro absoluto e o segundo implicando na introdução do erro de posicionamento da câmera.

O sistema GPS (*Global Positioning System*), por sua vez, utiliza a medição do tempo de viagem de uma mensagem entre uma antena e satélites geoestacionários,

de forma a, através do procedimento de triangulação, obter a posição absoluta da antena na superfície terrestre.

Nesse caso específico, as características ótimas são o campo de visão, sendo toda a superfície terrestre, e a interferência, já que o tamanho e peso das antenas são desprezíveis quando comparadas ao das embarcações.

O erro absoluto, entretanto, possui alta sensibilidade a condições ambientais e reflexão ou obstrução de sinal por obstáculos próximos a antenas, apresentando um erro absoluto de cerca de 4 metros em condições ideais (valor estimado através de ensaios em campo aberto), tornando o sistema impraticável, por exemplo, para veículos submarinos, como os utilizados nos trabalhos citados acima, devido à obstrução do sinal pela água.

No caso de embarcações de grande porte, um erro de 4 metros não representa uma ordem de grandeza considerável em vista à amplitude necessária para as manobras padrões, o que torna o sistema de medição aplicável.

O sistema DGPS (*Differential Global Positioning System*) visa amenizar os erros do GPS ao introduzir uma antena fixa de posição determinada próxima ao corpo (não mais que algumas dezenas de quilômetros, para precisão de centímetros, segundo (MONTEIRO, et al., 2005)). Como a antena fixa conhece sua posição, ela consegue identificar e corrigir os erros dos sinais de cada satélite, transmitindo a correção para as antenas do GPS, atingindo um erro de cerca centímetros (valor estimado através de ensaios em campo aberto).

A comparação pode ser sumarizada na tabela abaixo, Tabela 4:

Tabela 4. Comparação qualitativa entre sistemas de aquisição

Sistema de aquisição	Erro de Posição	Erro de Velocidade	Erro de Aceleração	Interferência	Campo de Visão
Medição inercial	Ruim	Ruim (linear) e Ótimo (angular)	Ótimo	Bom	Ótimo
Medição por imagem	Bom	Médio	Ruim	Ótimo	Ruim
GPS	Aceitável	Ruim	Ruim	Bom	Ótimo
DGPS	Ótimo	Médio	Ruim	Bom	Ótimo

A plataforma ideal de aquisição, portanto, seria uma junção do DGPS com o sistema de medição inercial, já que ambos se mostram complementares.

6.2.2 Aquisição via DGPS

Como explicado anteriormente, o sistema GPS utiliza o tempo de viagem de mensagens entre uma antena e satélites geoestacionários, determinando a posição através do processo de triangulação que, basicamente, consiste em encontrar a intersecção entre três esferas (lugar geométrico de distância constante), Figura 20.

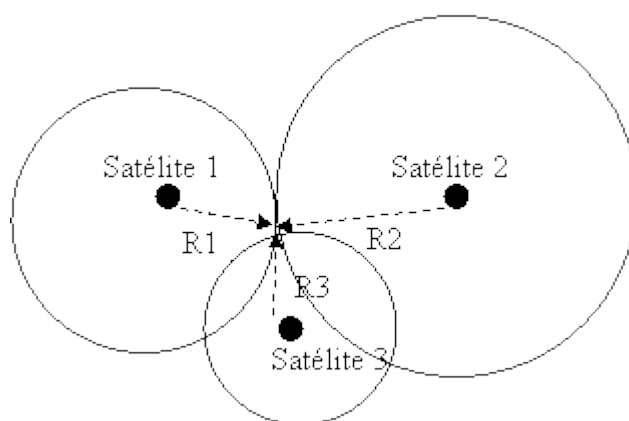


Figura 20. Explicação visual do processo de triangulação, extraída de (JOHNSON, 2013)

A determinação do tempo de viagem, entretanto, exige que a medição de tempo entre os satélites e a antena seja sincronizada, evidenciando que, na verdade, o problema envolve quatro parâmetros (posições x , y e z e tempo t), demandando um quarto satélite para que um ponto possa ser determinado.

As informações das posições relativas entre os satélites, assim como as posições dos mesmos em relação à terra, por sua vez, são definidas pela trajetória geoestacionária e corrigidas por estações de monitoramento que enviam, constantemente, essas informações para que os satélites repassem às antenas.

Mesmo com as correções, o erro de estimativa de posição ainda permanece alto devido a interferências atmosféricas e obstáculos aos quais todos os satélites estão submetidos, que aumentam o tempo de viagem da mensagem através de sucessivas reflexões dos sinais. O efeito da interferência pode ser observado na Figura 21.

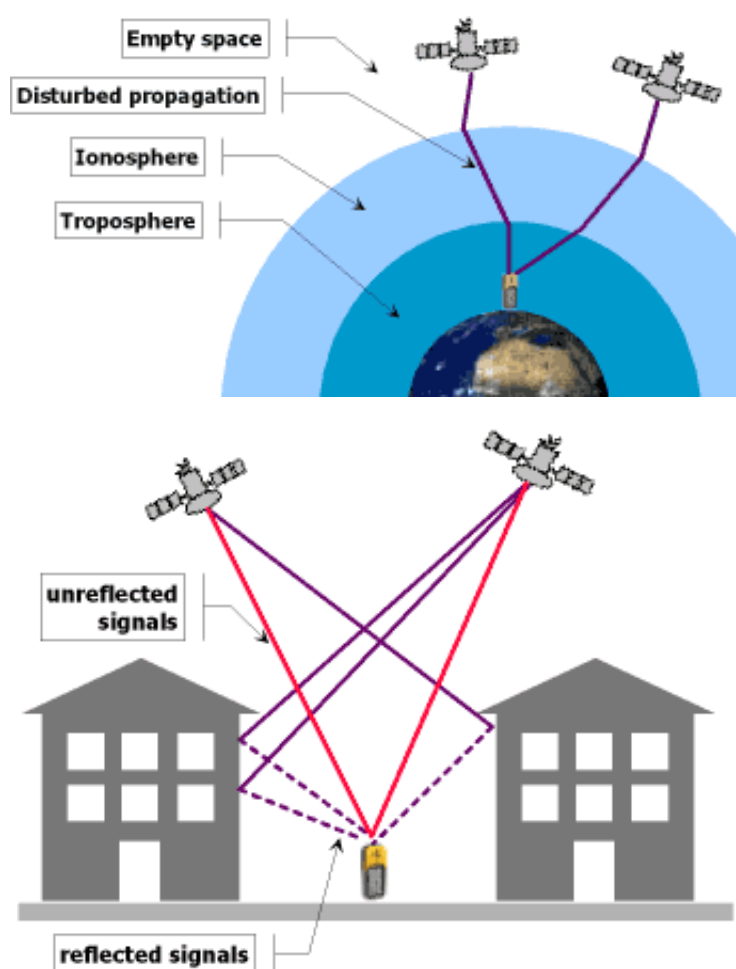


Figura 21. Erros de trajetórias dos sinais, extraída de (KOWOMA, 2009)

Para corrigir os erros de reflexão, uma base fixa pode ser utilizada, já que , como esta tem sua posição determinada, é capaz de identificar os erros de tempo de viagem de cada satélite.

Inicialmente, a base fixa, que é essencialmente outra antena GPS, tem sua posição determinada pelo método PPP (*Precise Point Positioning*).

O método consiste em fixar a base e adquirir, por algumas horas, sua posição. A seguir, os dados obtidos são enviados para serem processados por sistemas especializados, que armazenam as informações atmosféricas e o posicionamento preciso dos satélites ao longo do tempo, acessíveis após cerca de 48 horas da realização do ensaio. Dessa forma, a posição da base fixa é determinada com precisão, podendo servir de referência para o DGPS.

No caso específico da América do sul, o sistema é mantido pelo IBGE, podendo ser acessado em (IBGE, 2013).

Com a base fixa determinada, o GPS móvel automaticamente corrige sua posição de acordo com as informações transmitidas pela primeira, como pode ser visualizado na Figura 22.

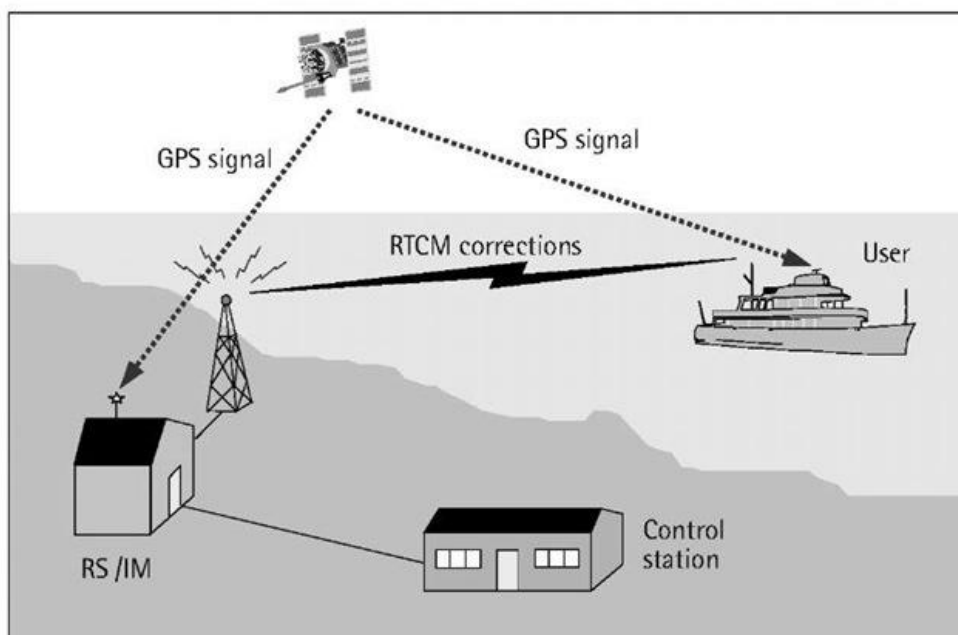


Figura 22. Funcionamento do DGPS, retirado de (WHAT-WHEN-HOW, 2013)

As principais informações adquiridas pelo GPS são:

- Longitude geodética.
- Latitude geodética.
- Altura ortométrica em relação ao MSL (*Mean Sea Level*).
- Separação da geóide de referência.

A longitude geodética é equivalente à longitude esférica da terra, Figura 23, ou seja, é o valor em graus ou radianos do arco entre o meridiano de Greenwich e o meridiano em que a antena do DGPS se localiza, sendo o centro do arco equivalente ao centro da terra.

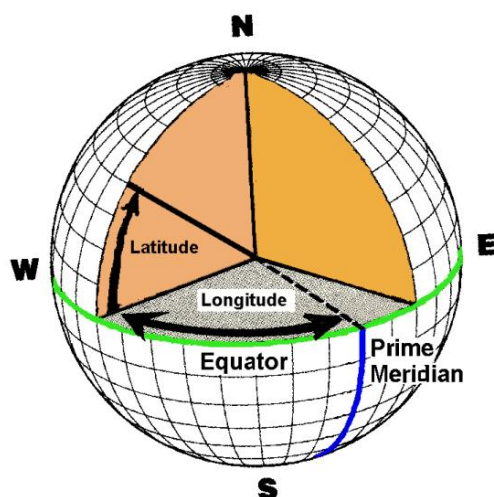


Figura 23. Aproximação esférica da terra, retirada de (CLYNCH, 2006a)

A latitude geodética, entretanto, difere da latitude esférica por não ser centrada no centro da terra, mantendo apenas a propriedade de ortogonalidade em relação à superfície, Figura 24. Sendo definida como o ângulo em que a reta ortogonal à superfície intercepta o plano definido pelo equador, como pode ser visualizado na Figura 25.

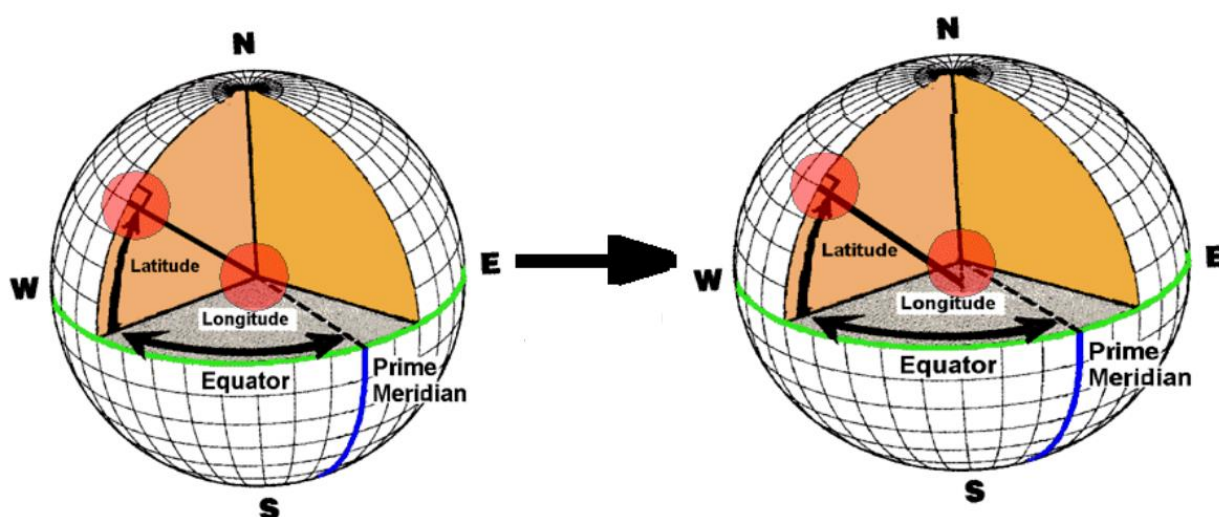


Figura 24. Aproximação da terra por elipsoide, retirada de (CLYNCH, 2006a)

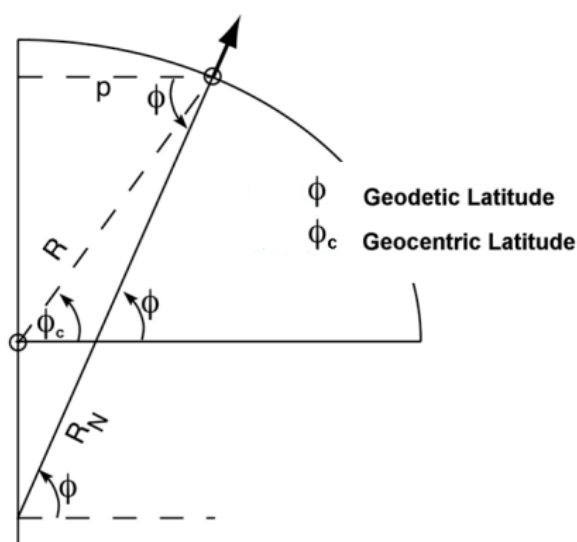


Figura 25. Latitude geodésica, retirada de (CLYNCH, 2006b)

É importante observar que a geoide de referência utilizada pela maioria dos GPSs para representar a longitude e a latitude é a elipsoide WGS84. Entretanto, a altura ortométrica em relação ao MSL define a altura da antena em relação à geoide de referência do nível do mar, que, diferentemente do WGS84, não é uma curva matemática, mas sim uma curva experimental.

Para que se possa determinar a altura de um ponto em relação ao WGS84, usa-se o valor da separação da geoide, que representa a diferença entre o elipsoide de referência e a superfície MSL, como pode ser visto na Figura 26.

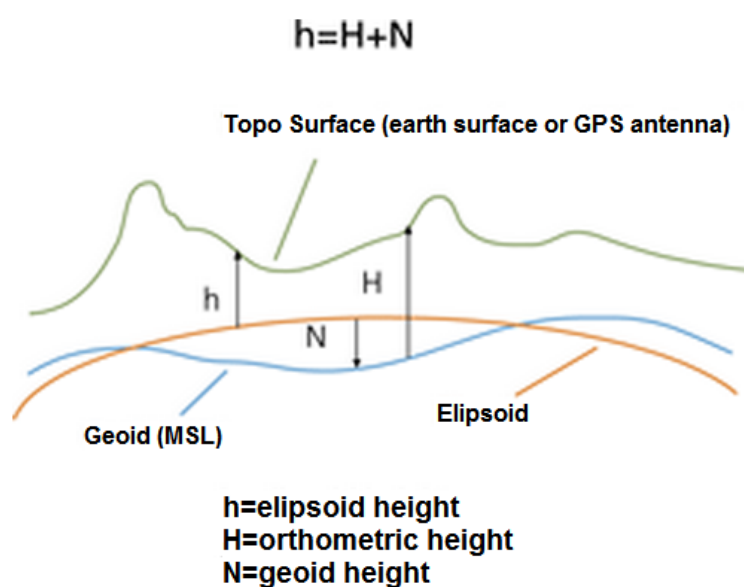


Figura 26. Cálculo da altura em relação ao elipsoide, extraída de (FRACZEK, 2003)

Definidas a longitude, latitude e altura, diversas aproximações podem ser feitas para calcular o movimento da embarcação no espaço.

A mais completa transforma as coordenadas geodésicas em coordenadas centradas na terra e solidárias à mesma, denominadas de ECEF– *Earth-centered Earth-fixed reference*, e, em seguida, corrige a rotação da terra para coordenadas centradas na terra, mas com orientação fixa no espaço, consideradas como um referencial inercial, denominadas de ECI – *Earth-centered inertial frame*, ambos na Figura 27.

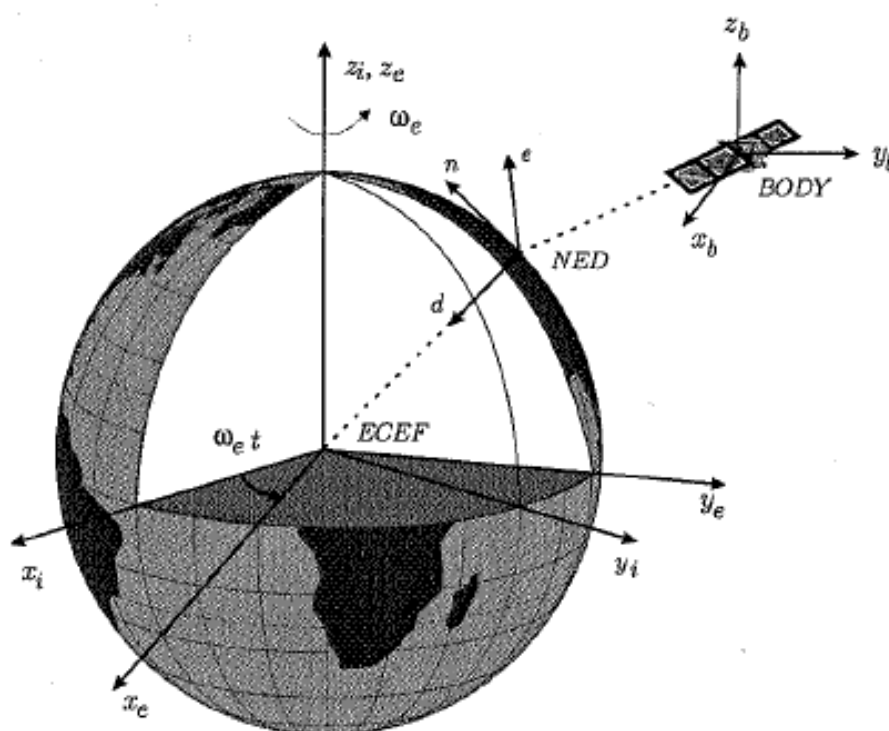


Figura 27. Eixos de referência terrestres, extraída de (FOSSEN, 2002)

Para ensaios localizados com amplitude de cerca de centenas de quilômetros, entretanto, a superfície da terra pode ser aproximada para um plano, sendo que, mesmo constituindo um referencial não inercial, as forças de Coriolis e centrífuga, na maioria das vezes, podem ser desprezadas frente às forças atuantes na embarcação. A aproximação pode ser feita alinhando-se o eixo das abscissas com a longitude e os eixos das ordenadas com a latitude, referência denominada de NED– *North-East-Down*, que, também, podem ser visualizadas na figura acima, Figura 27.

Para que a conversão Geoide-NED possa ser feita, convém definir uma região de trabalho e, a partir dela, calcular uma matriz de transformação homogênea

entre longitude-latitude e *east-north*, como pode ser visualizada na Figura 28. A validade da aproximação da calota por um plano pode ser verificada pela diferença entre a distância de dois pontos extremos por um método (distância geodésica) e por outro (distância euclidiana).

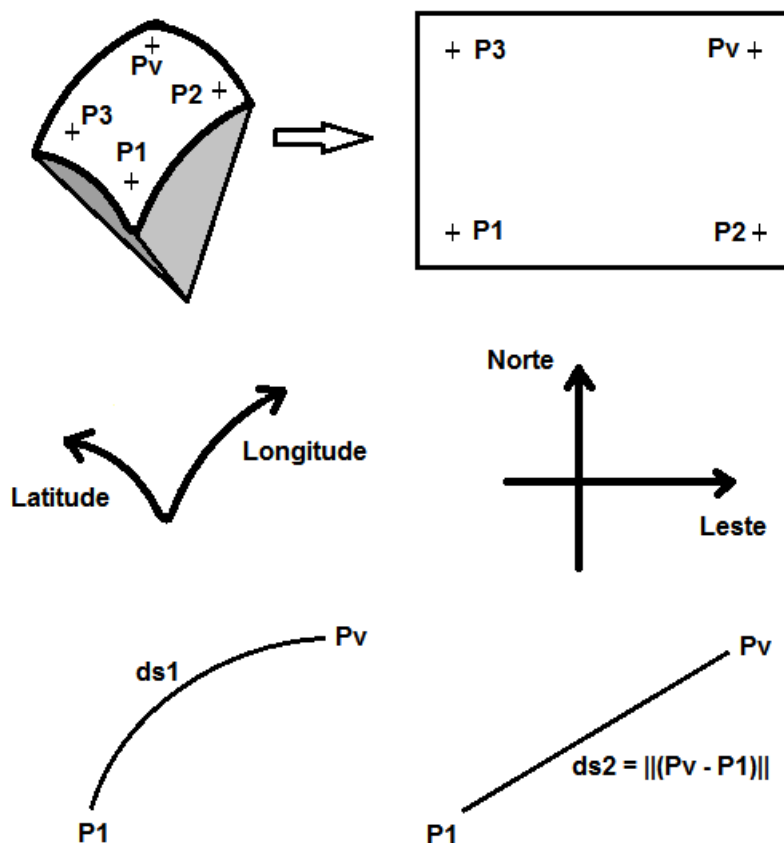


Figura 28. Transformação de coordenadas: P_1 , P_2 e P_3 para calibração, P_v para validação. A validação é feita comparando ds_1 com ds_2 .

O cálculo da distância entre dois pontos da superfície de uma elipse é feito pelo método iterativo Vincenty's formulae, para resolver o chamado problema inverso: dadas as coordenadas geodésicas de dois pontos, calcular a distância elipsoidal. O método possui uma precisão de cerca de um décimo de milímetro.

Ao introduzirmos a altura, o método deve ser corrigido. Para isso, pode-se considerar que dois pontos próximos possuem a latitude geodésica aproximadamente esférica, porém com um raio esférico diferente do raio da terra. Dessa forma, pode-se corrigir a distância aplicando-se uma regra de três. A Figura 29 ilustra a correção.

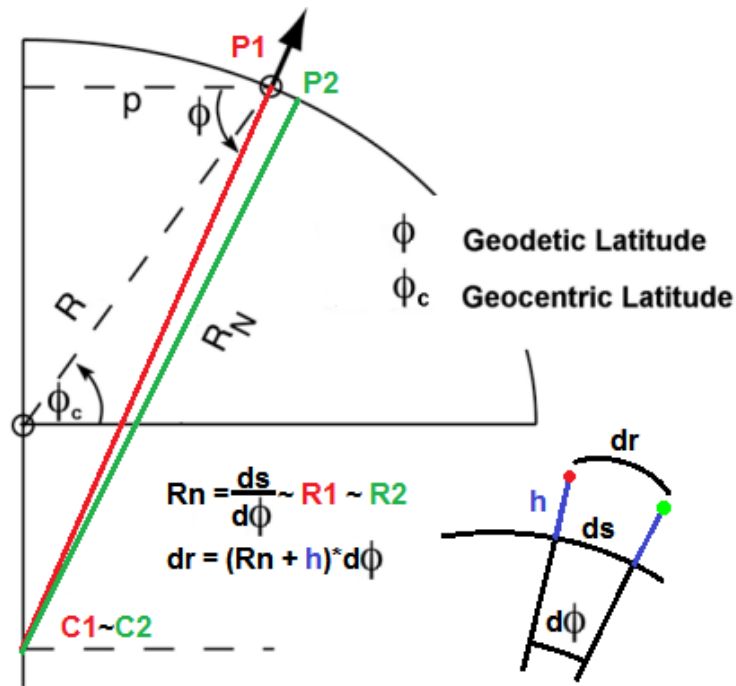


Figura 29. Correção do método Vincenty's formulae, figura modificada extraída de (CLYNCH, 2006b)

A validação da aproximação da matriz homogênea é feita comparando-se os valores:

$$ds_1 = \text{Vincenty's formulae corrigido}(\phi_{P1}, \lambda_{P1}, \phi_{PV}, \lambda_{PV}) \quad (67)$$

$$\begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ 1 \end{bmatrix} = T \times G_{PV} \quad (68)$$

$$ds_2 = \sqrt{(x_v - x_1)^2 + (y_v - y_1)^2} \quad (69)$$

Sendo ds_1 a distância geodésica corrigida entre o ponto 1 e o ponto de validação, $T \times G_{PV}$ a transformação homogênea das coordenadas geodésicas do ponto de validação em coordenadas euclidianas e ds_2 a distância euclidiana entre o ponto 1 e o ponto de validação.

No caso da extensão da raia olímpica, a diferença entre os valores foi inferior a 1 milímetro, indicando uma aproximação plana válida, relativamente a calota geodésica.

Para validar a precisão absoluta do algoritmo, ou seja, o quão preciso ele é para determinar a distância entre dois pontos levantados pelo DGPS, foi conduzido um ensaio de levantamento de três pontos pelo método PPP em um terreno ao lado do prédio da administração da Escola Politécnica da USP. As distâncias entre os

pontos foram obtidas pelo algoritmo (cuja altura de correção e pontos de aproximação foram calibrados com informações do *Google-Earth*) e por uma medição com trena, atingindo-se um erro máximo de 3 cm, Tabela 5:

Tabela 5. Comparação entre distâncias medidas e calculadas pelo algoritmo proposto (em metros)

	P1-P2	P1-P3	P2-P3
Trena	7,228	6,636	1,997
Algoritmo	7,2283	6,6664	1,9764



Figura 30. Posição aproximada dos pontos de medição

A posição aproximada onde foi realizado o experimento pode ser observada na Figura 30 e os relatórios PPP emitidos pelo IBGE se encontram no ANEXO A.

7 TRATAMENTO DE RUÍDO

Como explicado em 6.2.1, a aquisição via DGPS necessita de derivação numérica para que os valores de velocidade e aceleração possam ser determinados. Os ruídos nas medidas, entretanto, são amplificados no processo de derivação, já que os mesmos normalmente possuem harmônicas com maior frequência do que as do sinal original.

Nessa seção, são apresentados o procedimento experimental para o levantamento do ruído do DGPS assim como a análise de alguns filtros aplicados ao problema em questão.

Devido à abordagem de identificar o sistema off-line, os filtros estudados englobam filtros não lineares aplicados ao sinal completo.

7.1 LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL DO RUÍDO DO DGPS

O levantamento do ruído do DGPS foi feito aproveitando-se o experimento para a validação do algoritmo de cálculo de distância, explicado em 6.2.2. Após o levantamento de três pontos conhecidos, a base fixa foi posicionada no mais afastado e as duas antenas foram posicionadas nos outros dois, sendo que o sinal proveniente das mesmas foi registrado durante uma hora.

O experimento foi repetido em dois dias seguidos, alternando-se a posição das antenas (ou seja, alternando qual antena seria responsável pela posição e qual seria responsável pela orientação). O resultado, após a conversão para coordenadas NED, pode ser visualizado na Figura 31 até Figura 36.

Em seguida, o espectro de frequências foi retirado para cada direção, na Figura 37 até Figura 39. O objetivo é sobrepor os espectros de forma a visualizar a região na qual o ruído se manifesta, sem se preocupar em acompanhar exatamente cada uma das curvas, já que existe uma aleatoriedade no fenômeno.

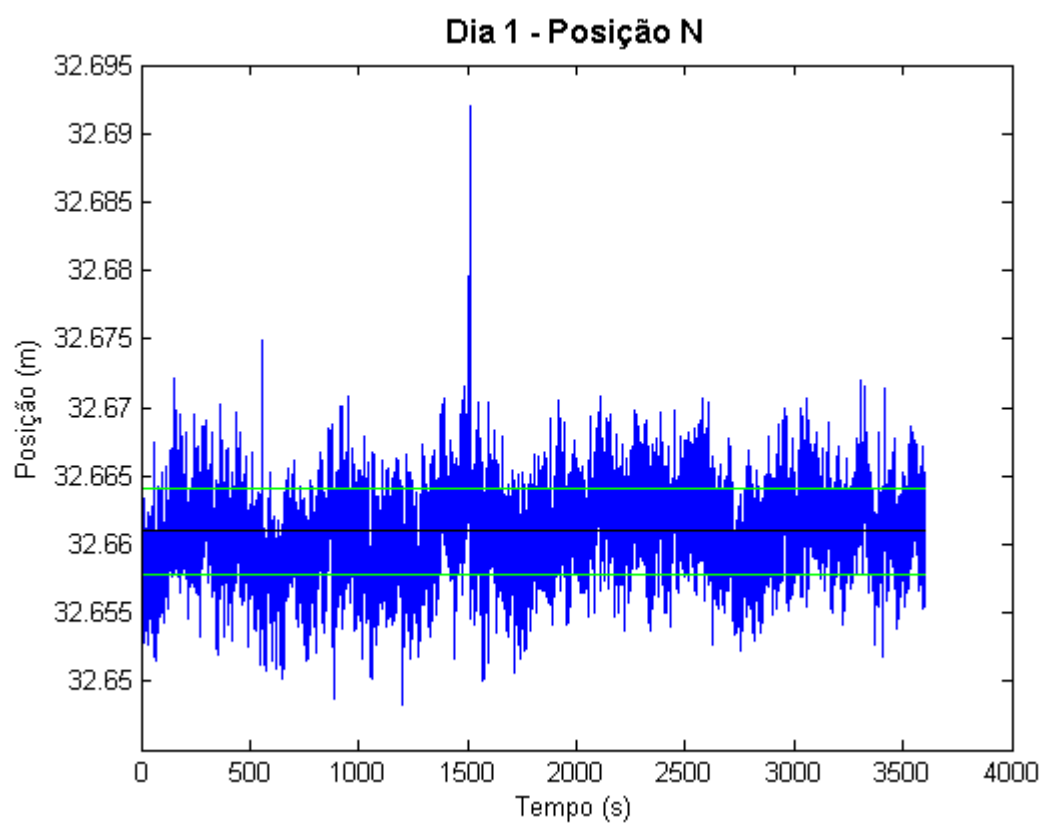


Figura 31. Posição na direção norte, dia 1

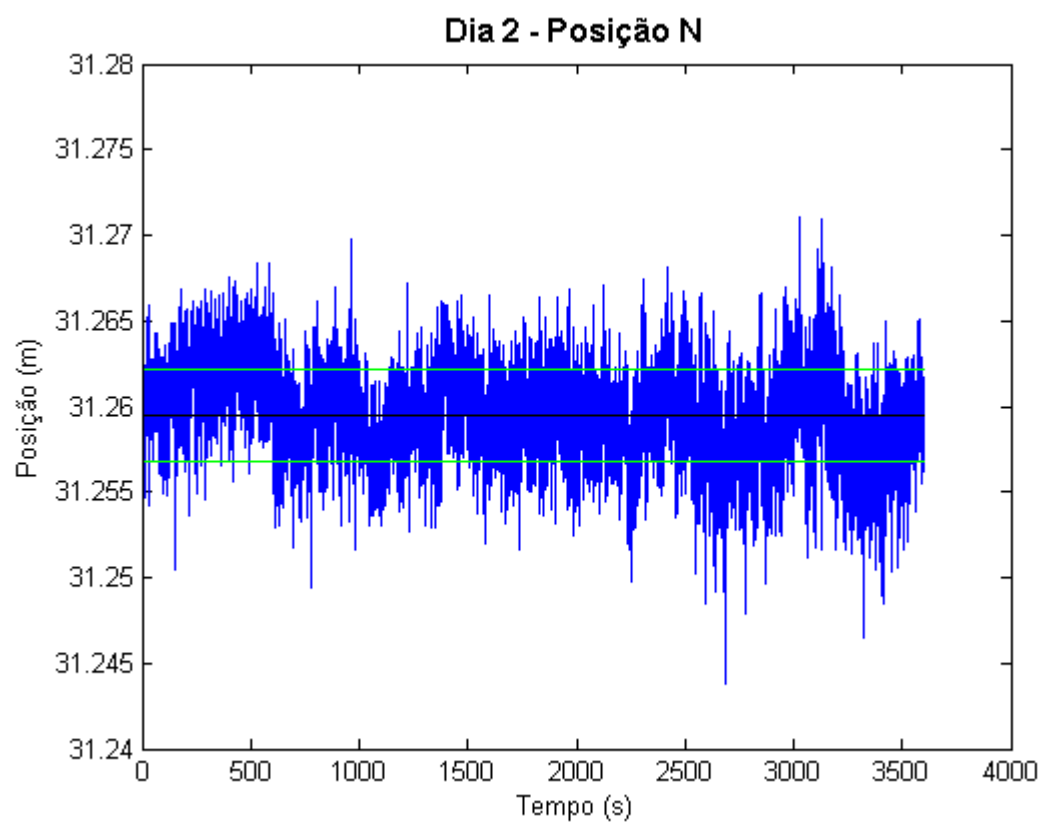


Figura 32. Posição na direção norte, dia 2

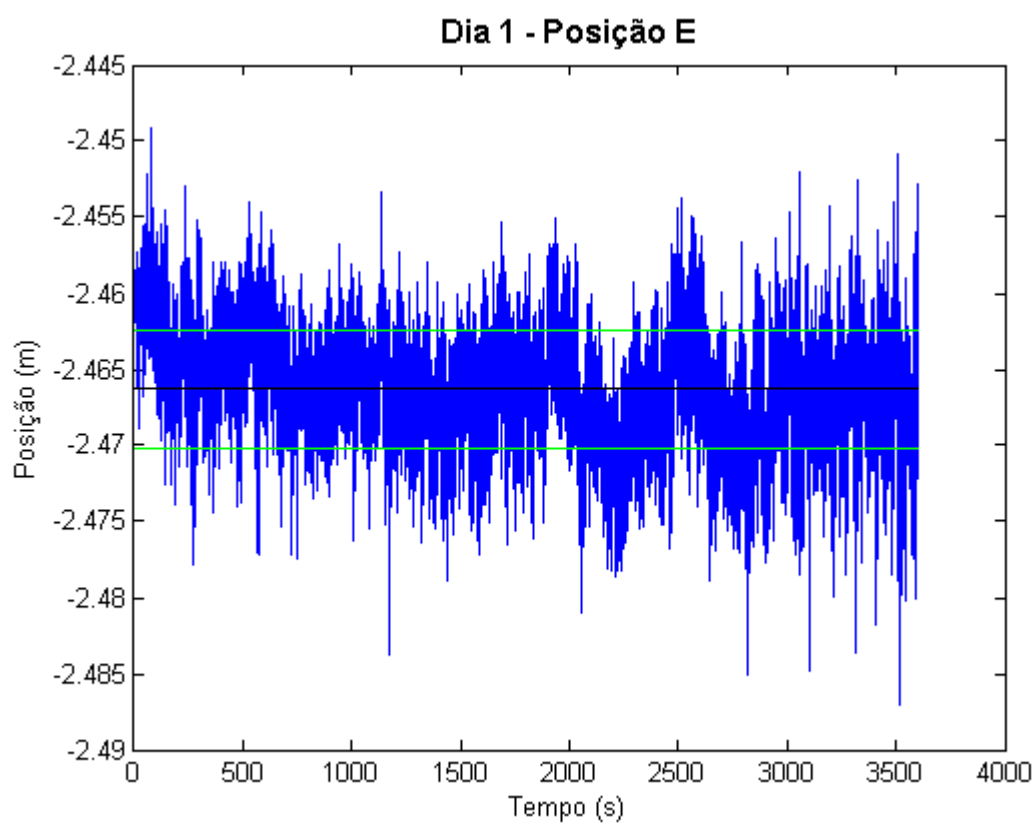


Figura 33. Posição na direção leste, dia 1

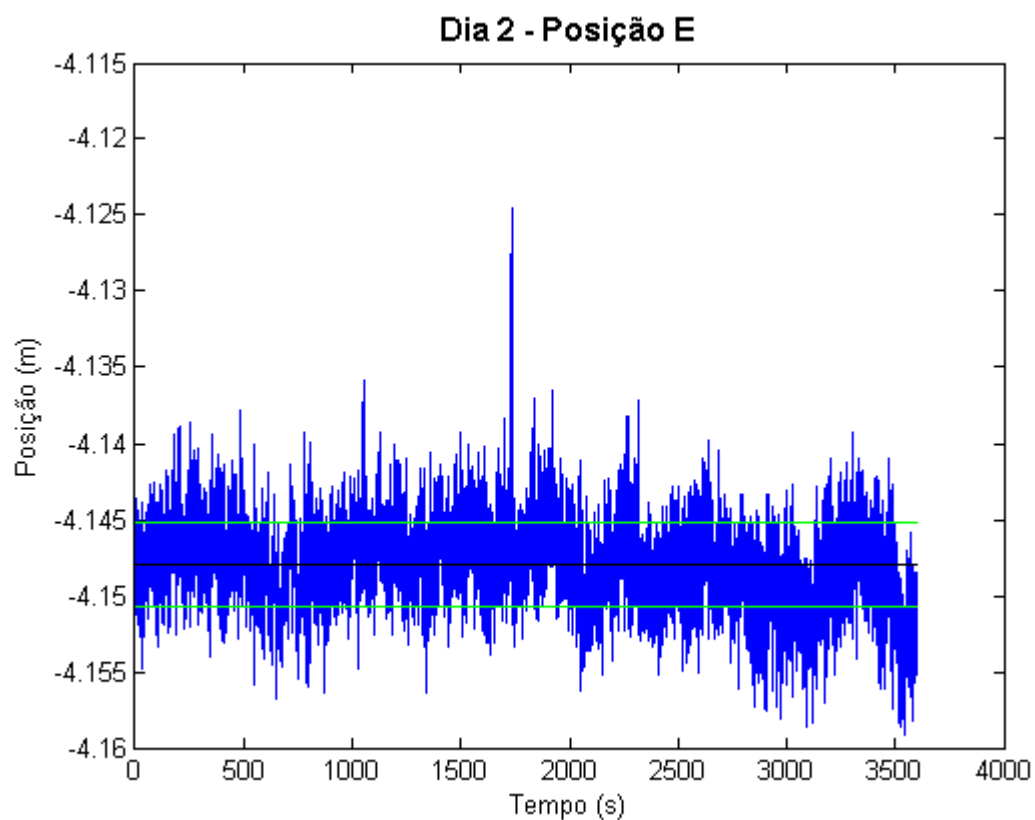


Figura 34. Posição na direção leste, dia 2

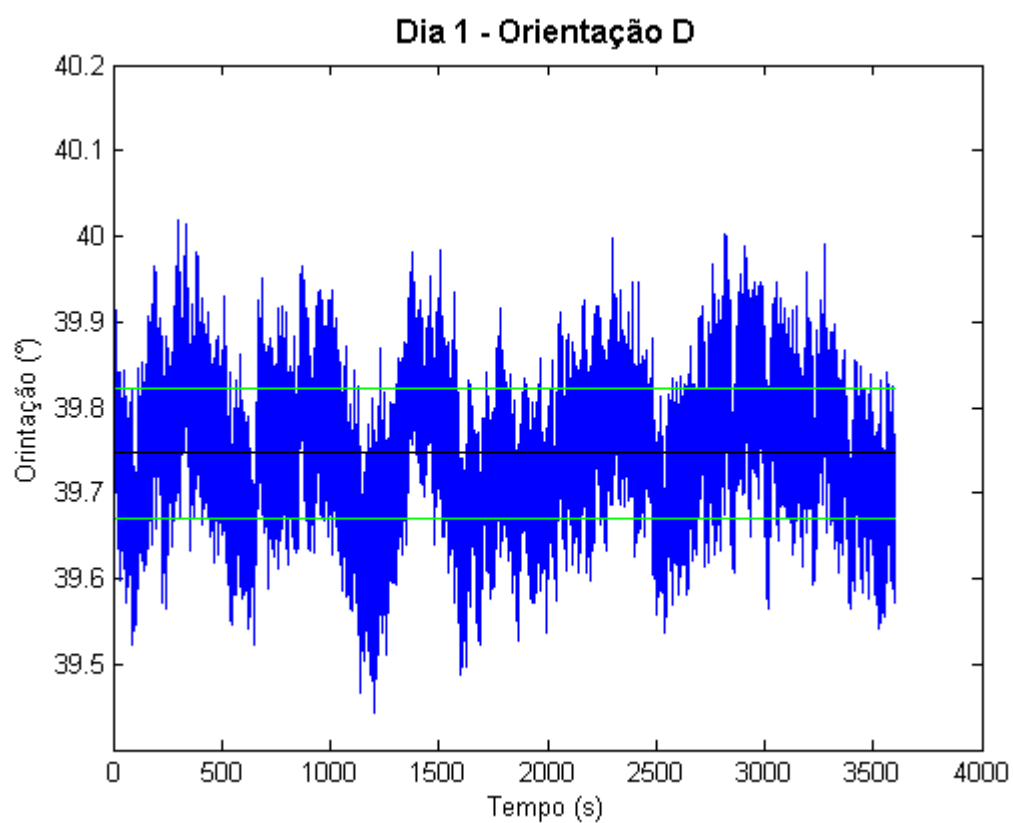


Figura 35. Orientação, dia 1

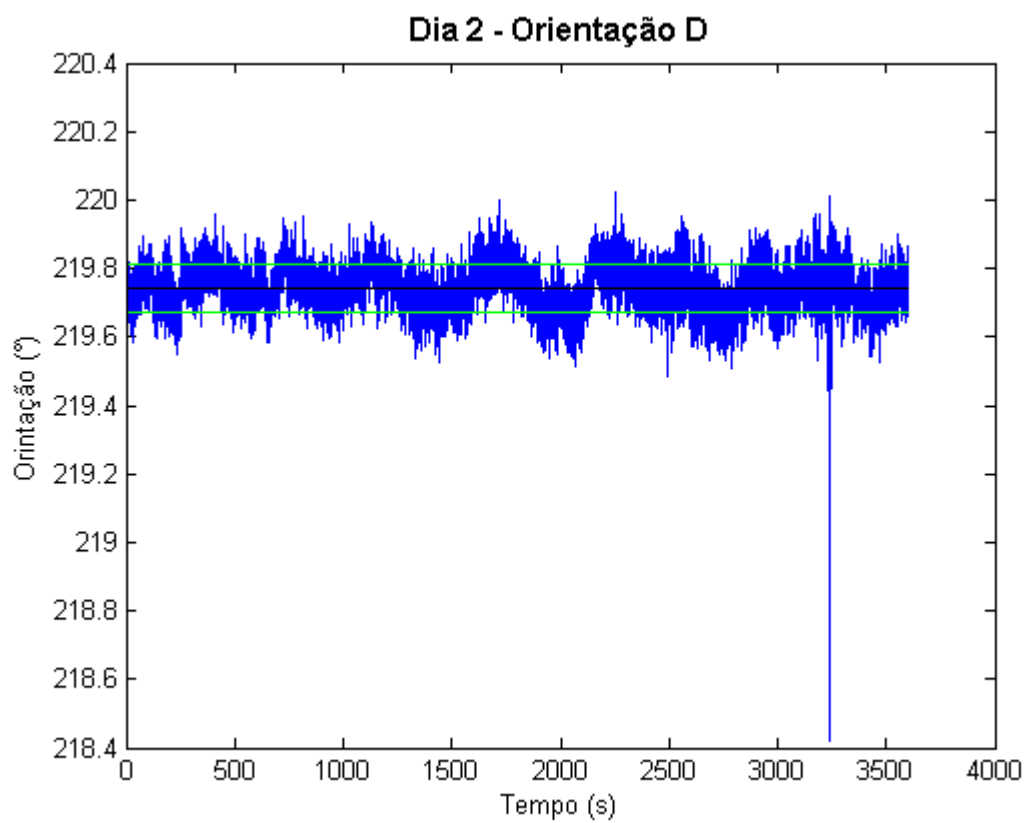


Figura 36. Orientação, dia 2

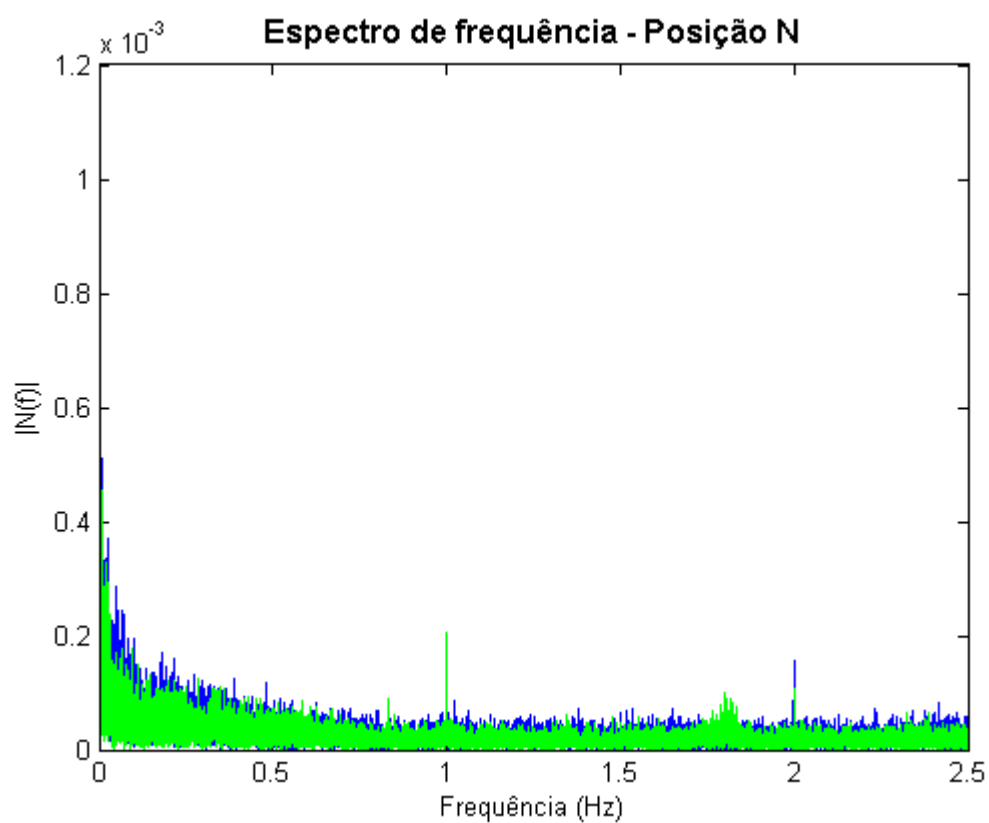


Figura 37. Espectro de frequências da posição N, sobreposição dos dias 1 e 2

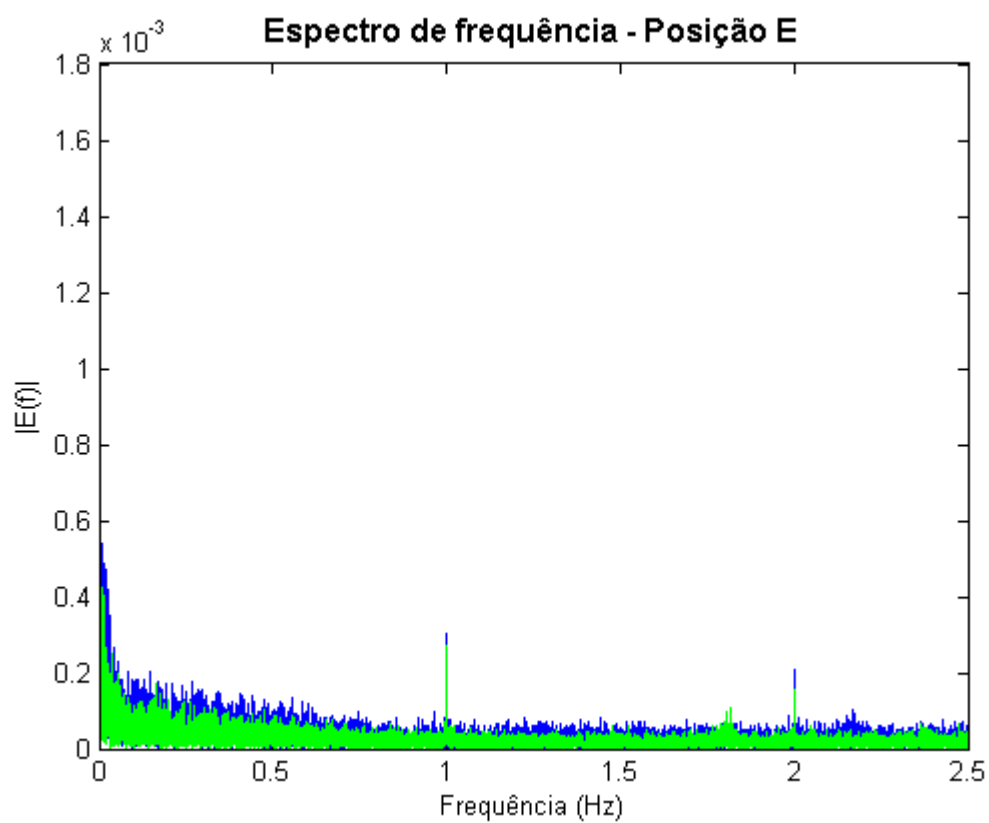


Figura 38. Espectro de frequências da posição E, sobreposição dos dias 1 e 2

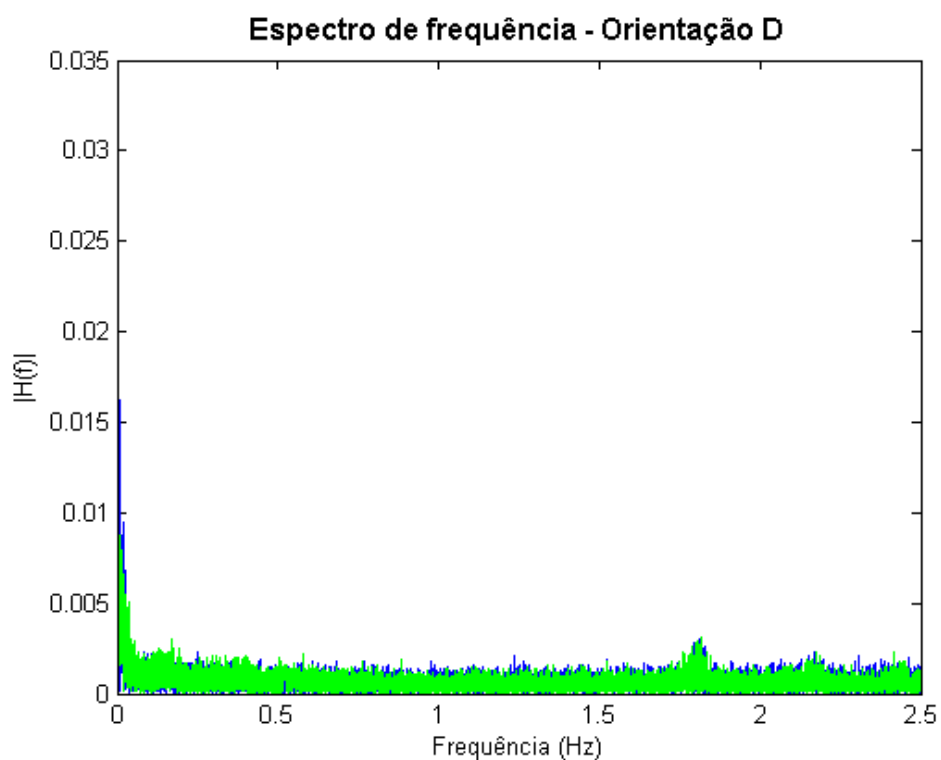


Figura 39. Espectro de frequência da posição D, sobreposição dos dias 1 e 2

O seguinte modelo computacional foi calibrado através de tentativa e erro:

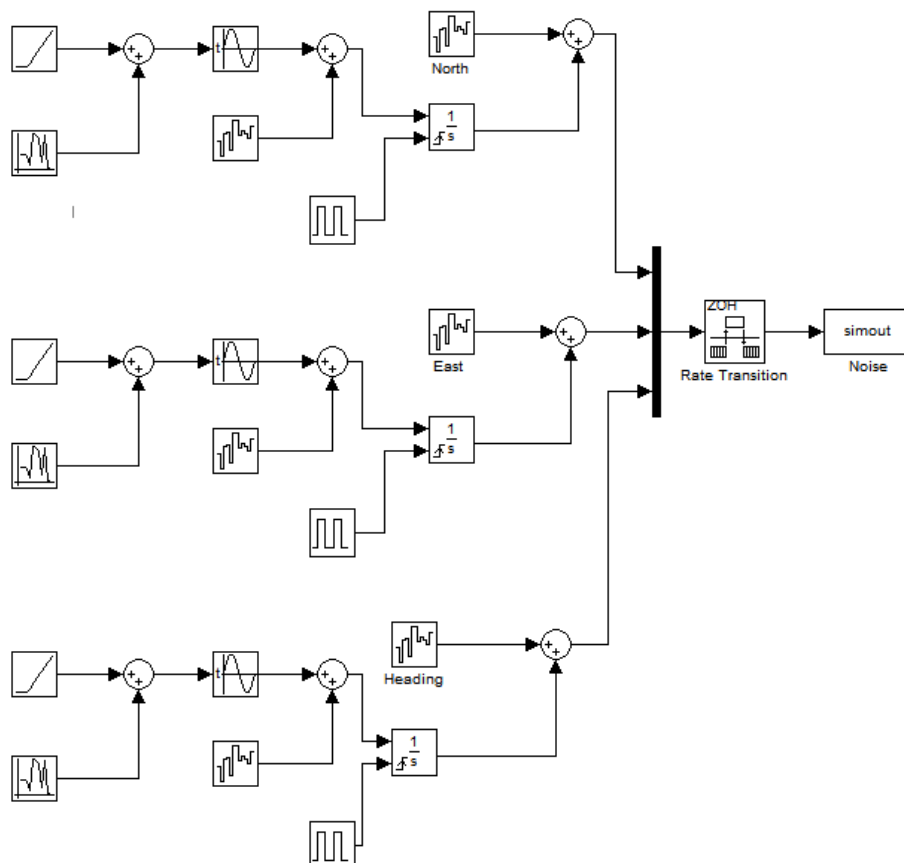
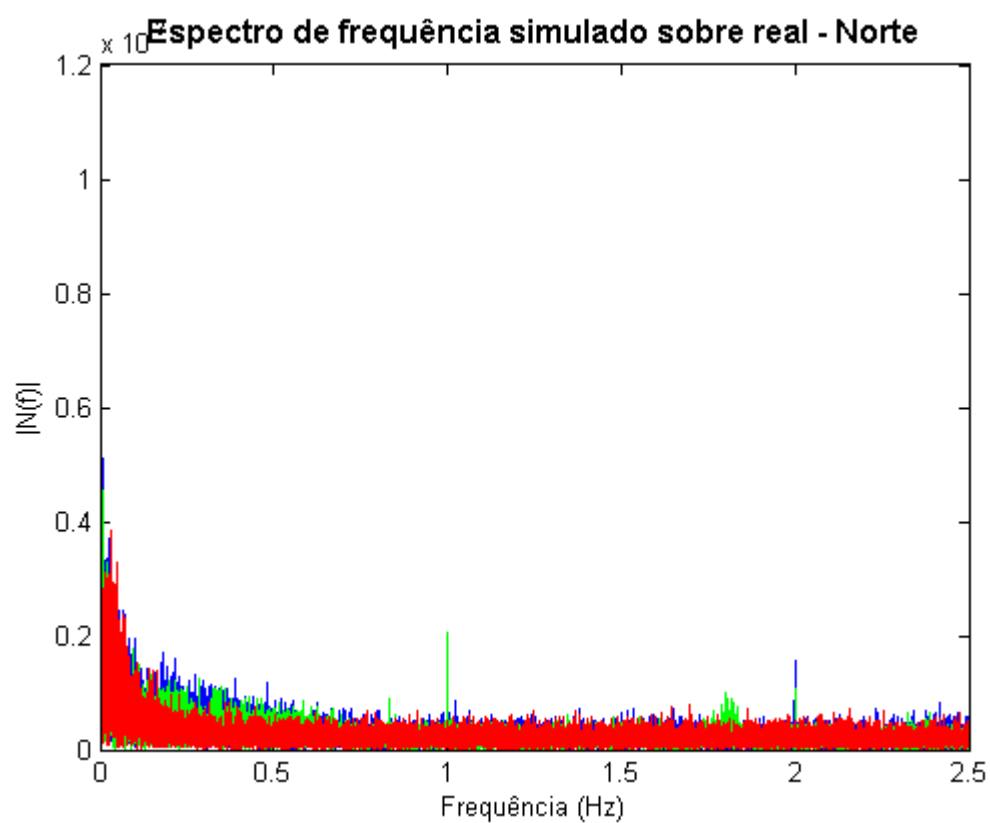
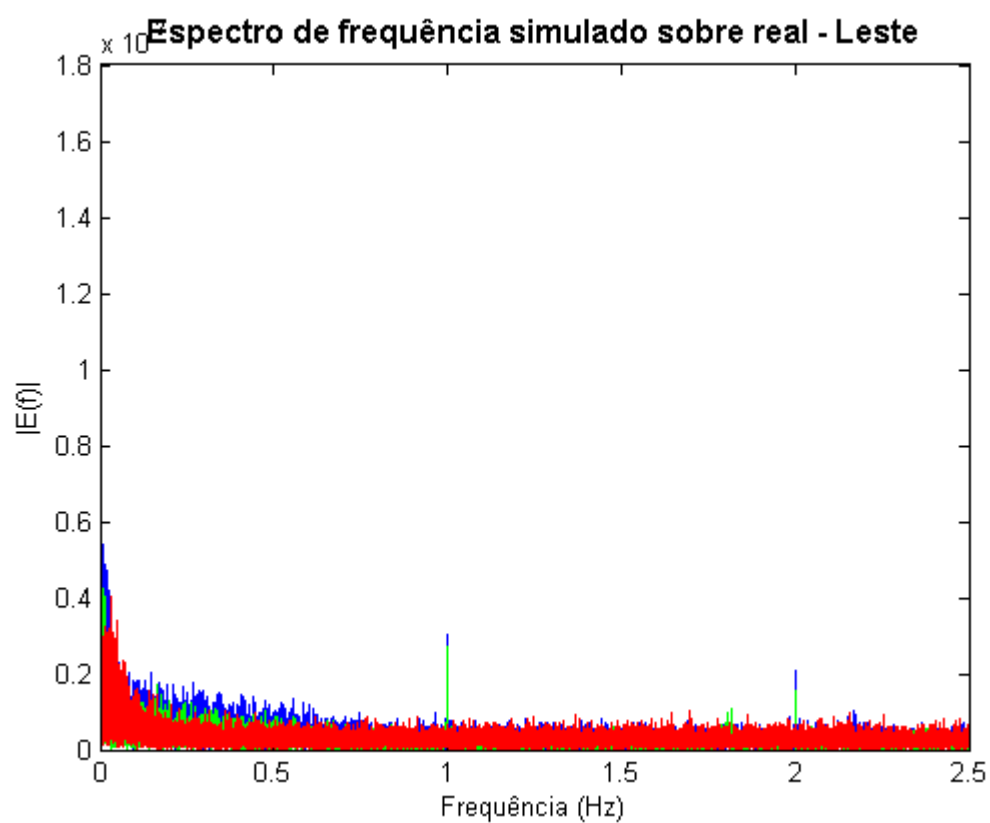


Figura 40. Modelo computacional do ruído



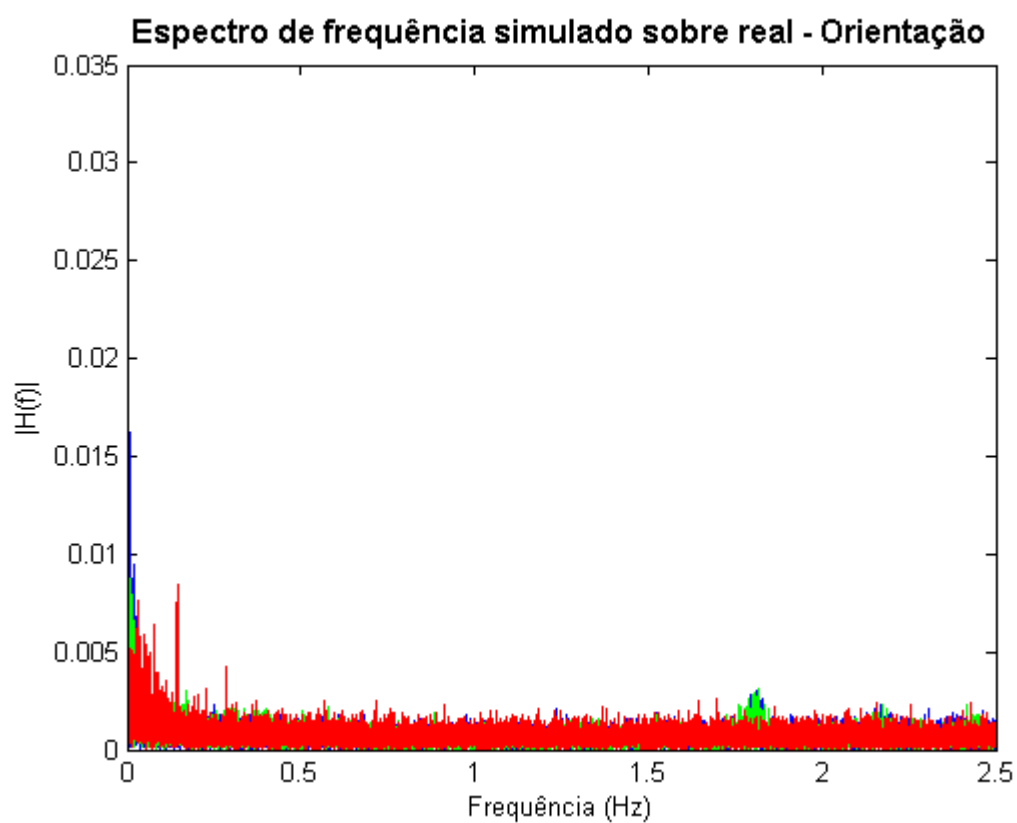
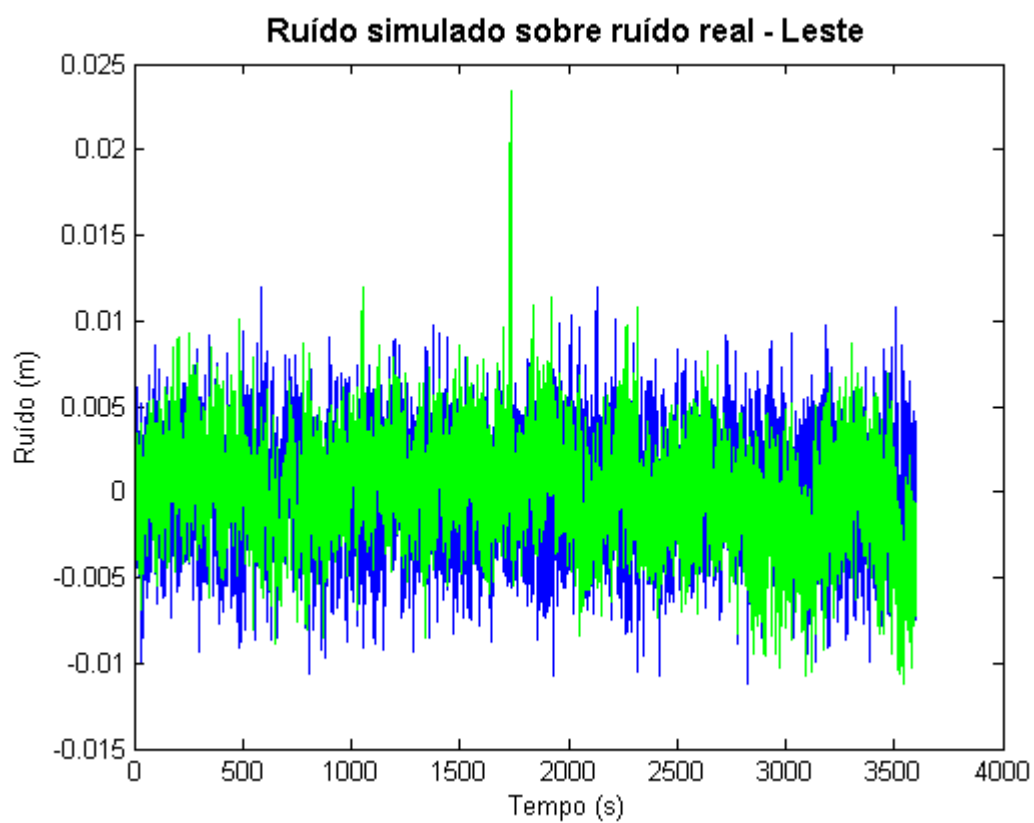


Figura 41. Espectros simulados sobrepostos aos reais



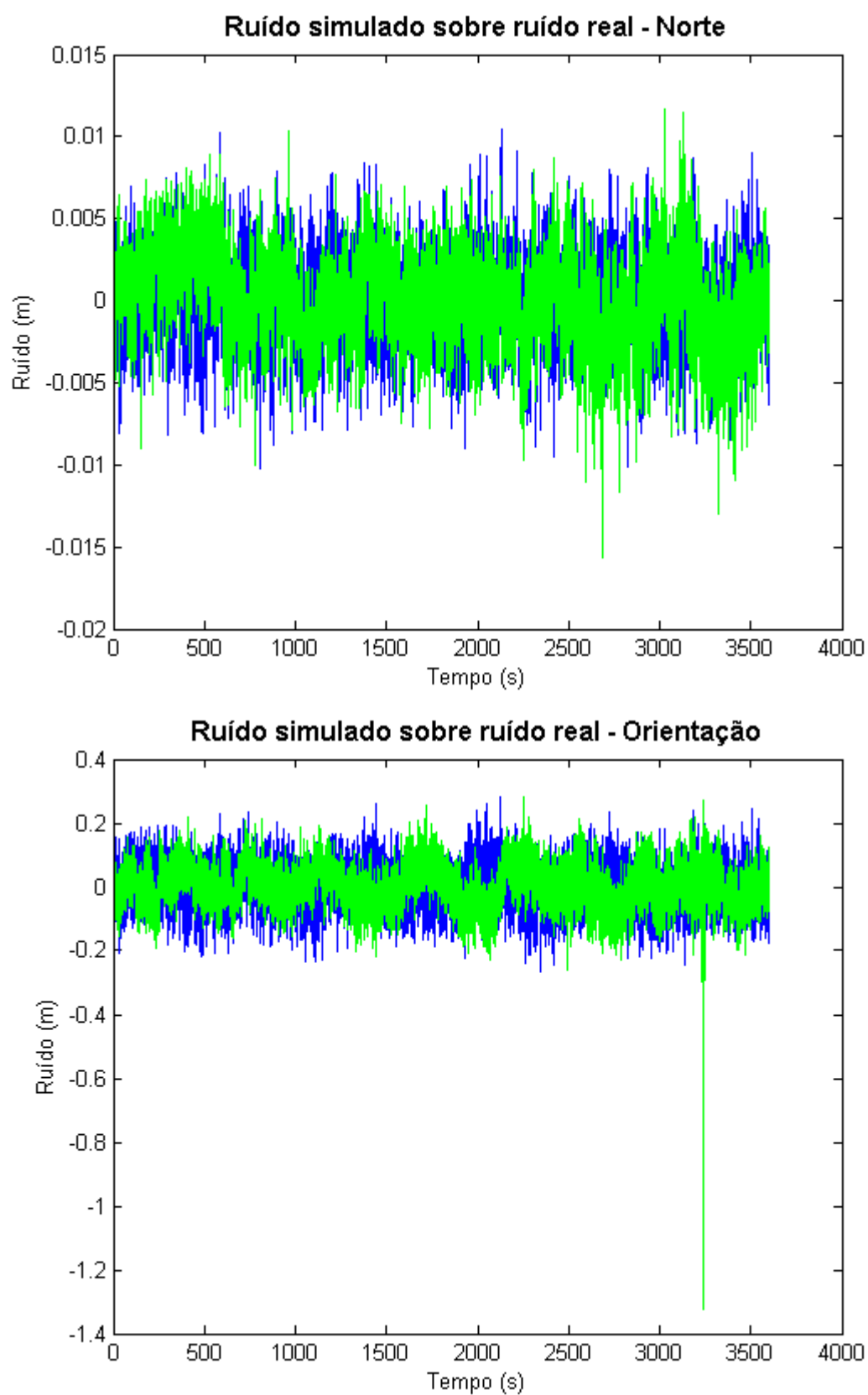


Figura 42. Ruídos simulados sobrepostos aos reais

A simulação do ruído, por mais que não seja exata, é importante, pois permite que uma aleatoriedade seja incluída na simulação, evitando que a análise dos filtros seja viciada pela utilização de um sinal com formato constante (o que aconteceria se, ao invés de um ruído simulado, fosse usado o próprio ruído obtido experimentalmente). Para que tal propriedade seja válida, é importante observar que vários experimentos devem ser executados e a avaliação deve ser feita em relação ao desempenho global de cada algoritmo.

7.2 ANÁLISE DOS FILTROS

Dentre os filtros disponíveis, a análise foi restrita a três:

- Filtro média-móvel (linear, online).
- Filtro FFT rejeita banda (não linear, off-line).
- Filtro spline (não linear, off-line).

O filtro média móvel foi escolhido pois permite filtrar os espectros de alta frequência de forma simples e rápida, como pode ser visualizado na Figura 43, após um ensaio em *surge* com força constante 100N.

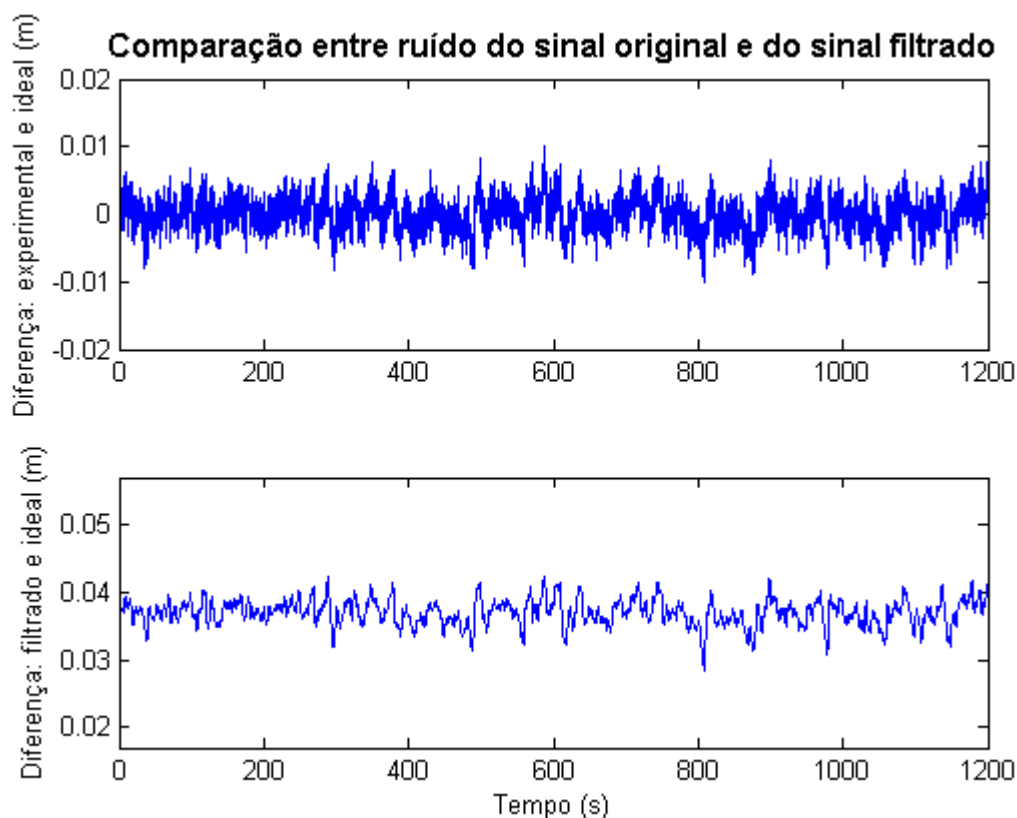


Figura 43. Resultado do filtro média móvel

Como pode ser observado, o filtro tende a introduzir um erro na posição do sistema, apesar de diminuir a oscilação de alta frequência, o que possibilita um sinal mais adequado para a derivação numérica, Figura 44 e Figura 45. Apesar disso, a segunda derivada para obter a aceleração permanece impraticável, Figura 46:

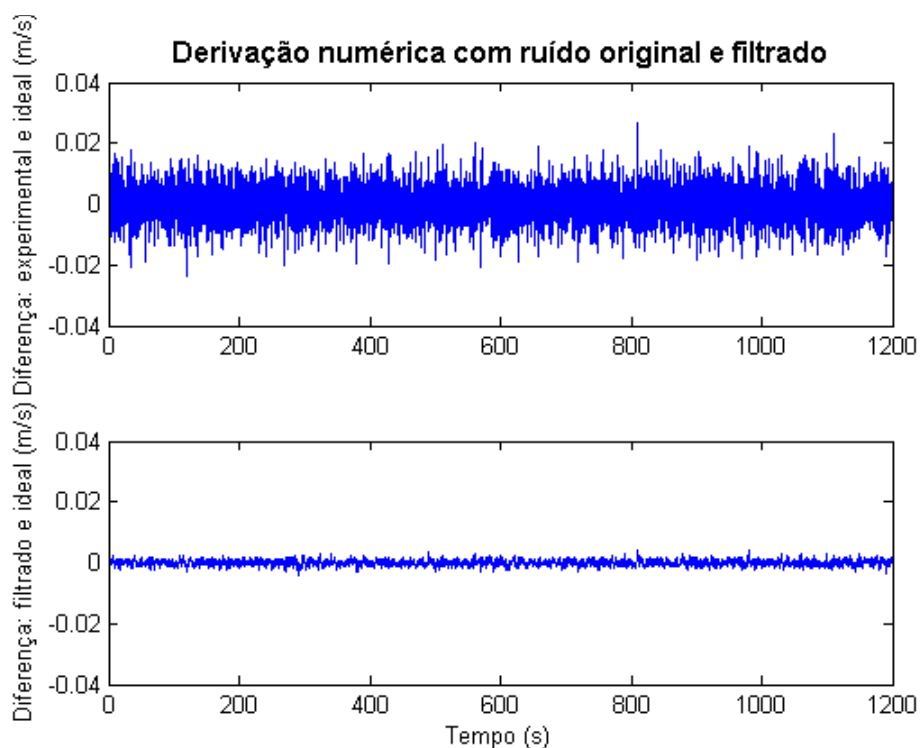


Figura 44. Derivação numérica para obtenção de velocidade com e sem filtro

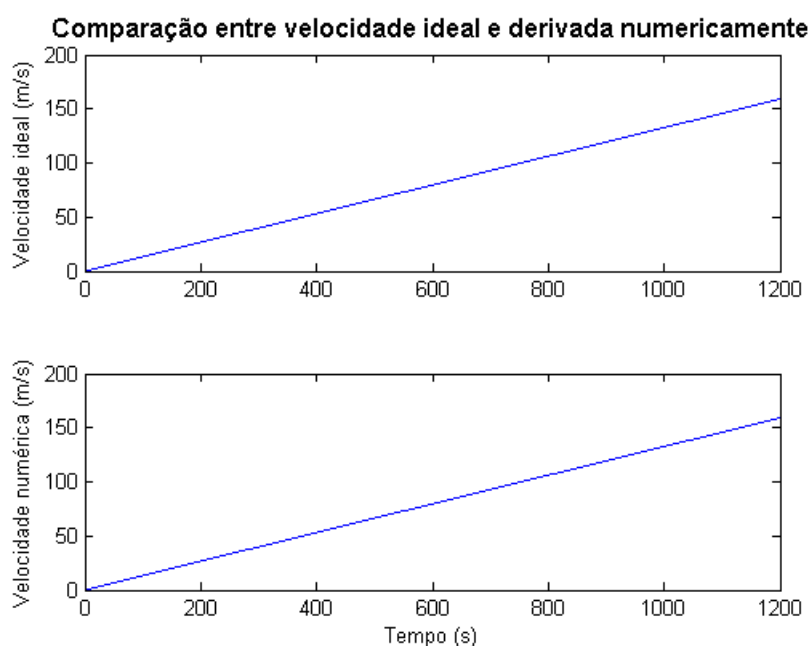


Figura 45. Comparação entre as velocidades ideal e a obtida numericamente

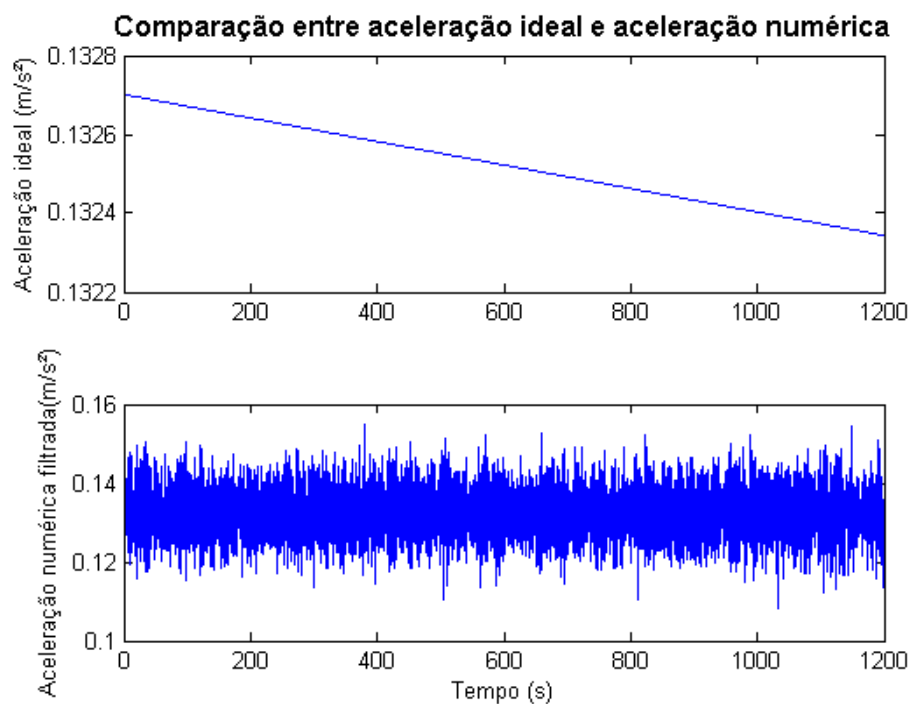


Figura 46. Comparação entre as acelerações ideal e a obtida numericamente

O filtro FFT rejeita banda, por sua vez, realiza a transformada de Fourier de um sinal, zera uma região do espectro, e remonta o sinal com a transformada inversa. A Figura 47 ilustra o processo:

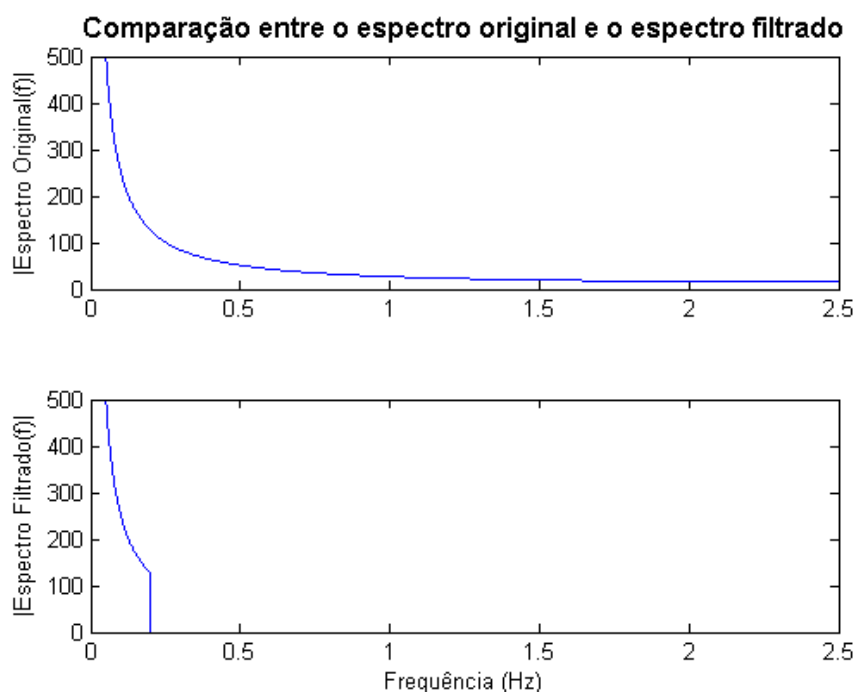


Figura 47. Recorte do espectro original e do espectro modificado, com frequência de corte 0,2Hz

O problema do filtro FFT é que ele tende a deturpar o sinal ideal, pois acaba por anular componentes harmônicas do sinal ideal junto com as do ruído. No caso de ruído branco, o problema intensifica-se, pois não existe uma harmônica predominante que possa ser cancelada sem deturpar o sinal, Figura 48.

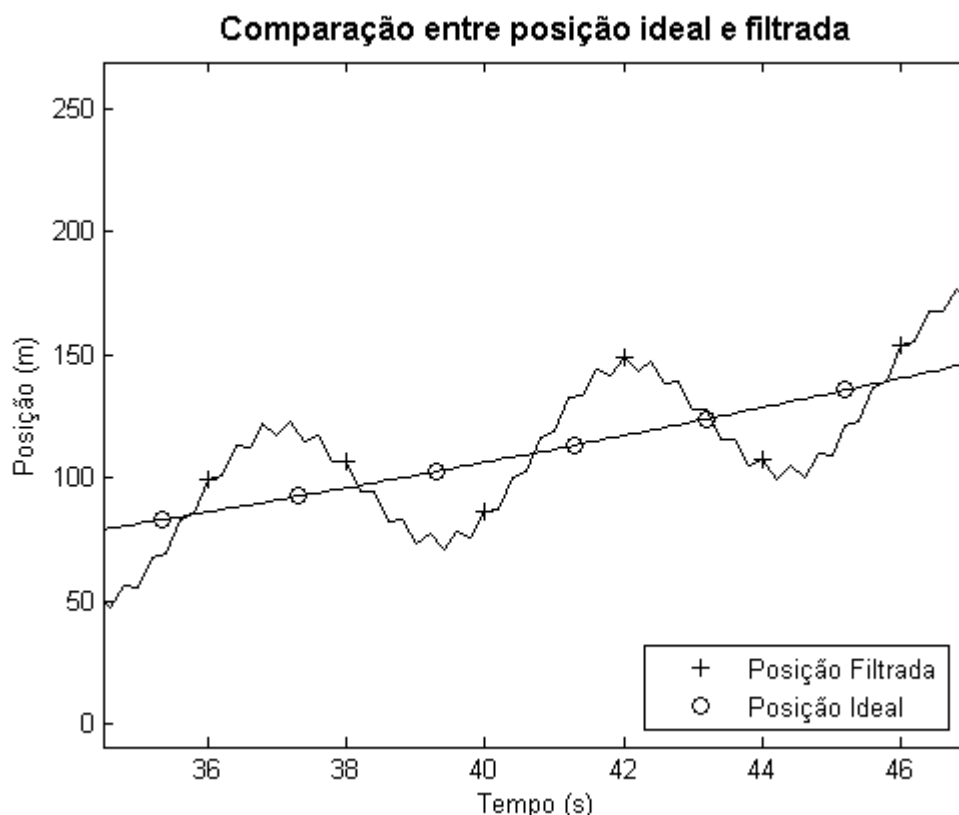


Figura 48. Comparação entre o sinal filtrado por FFT e o sinal ideal, destaque para as harmônicas de baixa frequência que são enfatizadas com o filtro

O filtro spline, por sua vez, consiste em aproximar o sinal por um conjunto de polinômios, minimizando o erro quadrado. A ideia por trás desse filtro é que ele tende a suavizar altas frequências sem, contudo, ter uma atuação específica para cada região do espectro. Um exemplo para ilustrar essa questão é filtrar uma reta por um spline de primeiro grau, o sinal filtrado será exatamente igual ao original, mesmo as harmônicas mais elevadas.

Uma das vantagens do filtro spline é que o mesmo tende a ignorar ruído branco quando o sinal ideal é aproximado exatamente pelo filtro, já que o mesmo minimiza o erro quadrado, tendo que se tomar o cuidado para que o grau do filtro não seja mais elevado que o do sinal ideal, se não o filtro tenderá a oscilar para acompanhar o ruído. A Figura 49 demonstra o resultado do filtro.

Outra vantagem importante é que a derivação analítica do filtro spline é simples de ser executada, facilitando a obtenção dos sinais de velocidade e aceleração, Figura 50 até Figura 52.

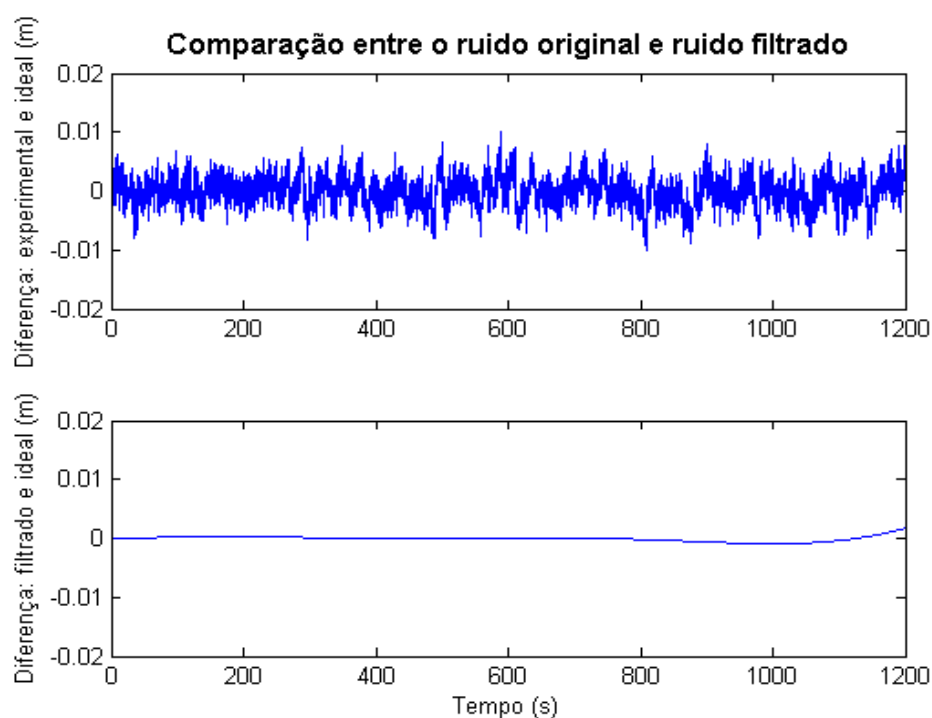


Figura 49. Desempenho do filtro spline

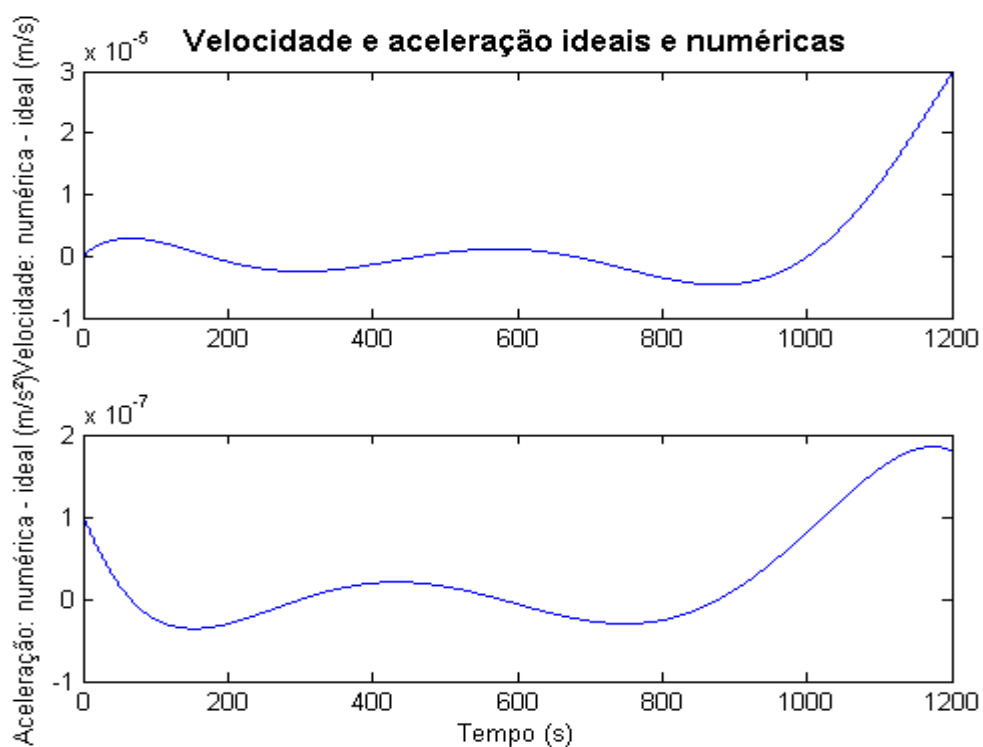


Figura 50. Diferença entre velocidade e aceleração ideais e velocidade e aceleração derivadas numericamente utilizando filtro spline

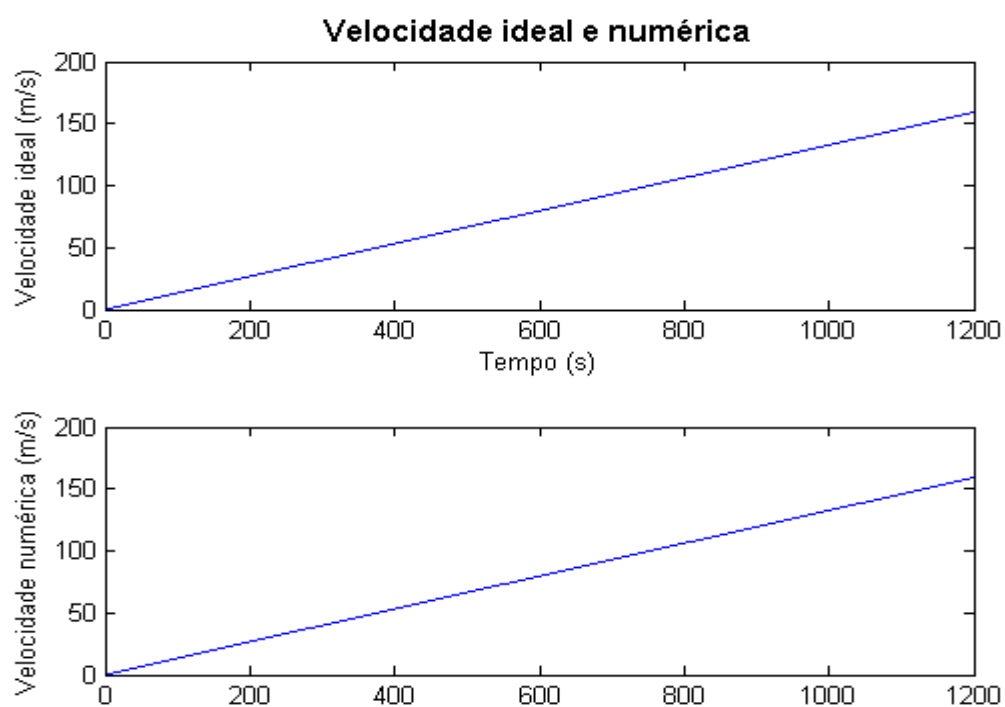


Figura 51. Comparação entre a velocidade ideal e a velocidade numérica por filtro spline

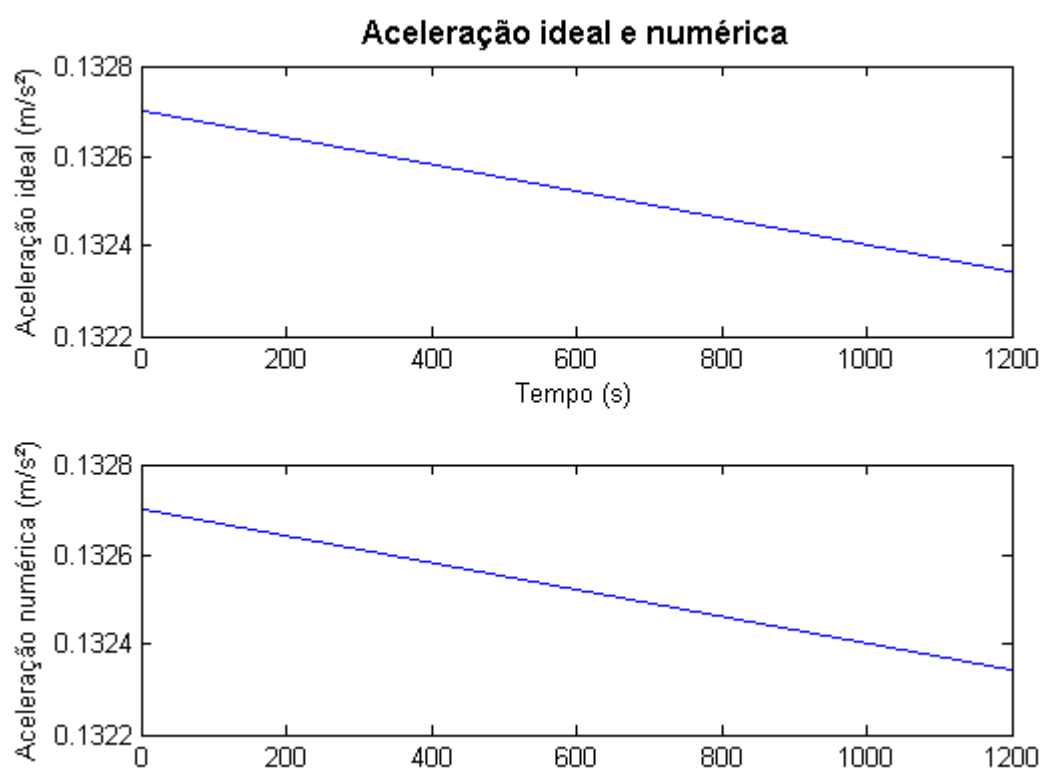


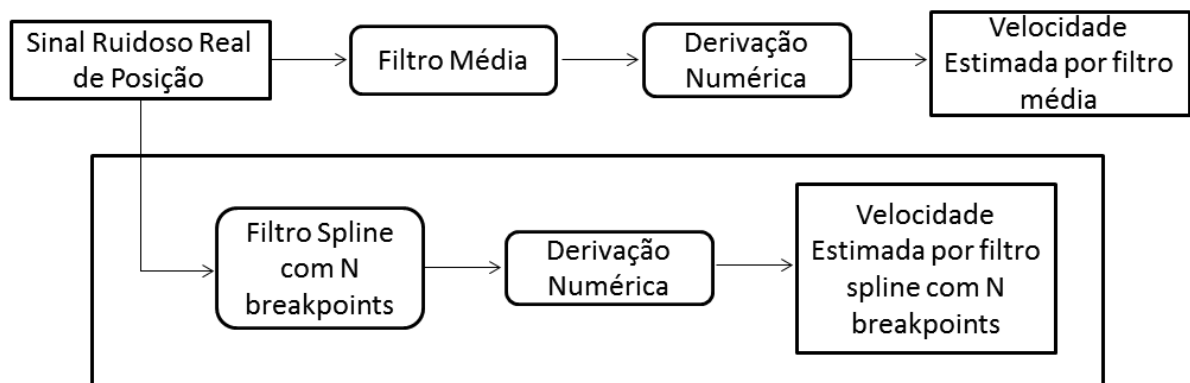
Figura 52. Comparação entre as acelerações ideais e numéricas usando filtro spline

Em vista dos resultados apresentados, o filtro spline foi escolhido como o mais indicado para a aplicação.

7.3 FILTRO SPLINE ITERATIVO

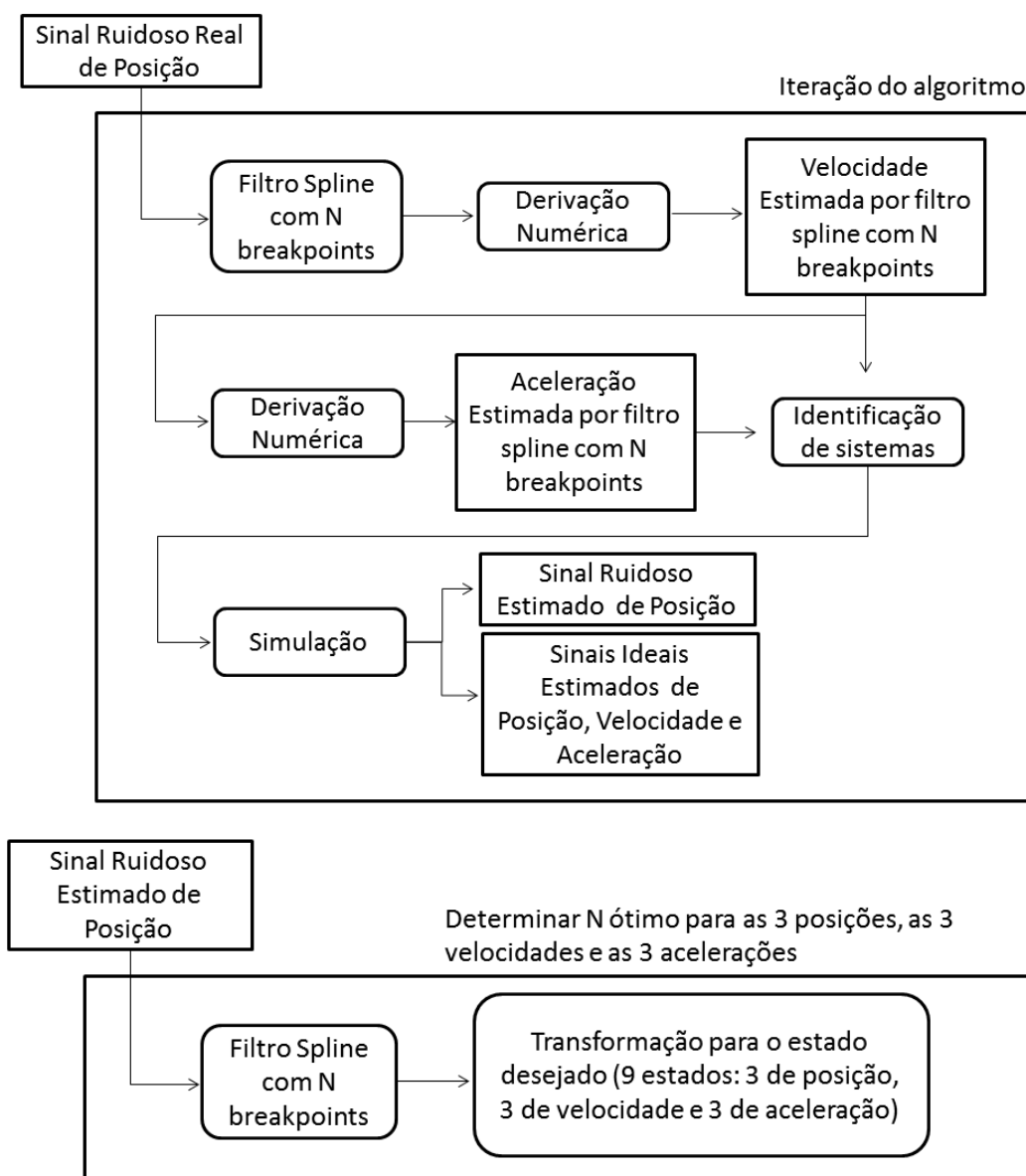
Feita a escolha do filtro, uma questão que surge é como escolher a configuração adequada para que ele desempenhe o resultado ótimo. No caso do filtro spline, o resultado ótimo depende da curva de resposta do sistema dinâmico, que indicará qual o número mínimo de pontos de controle necessários.

Para o algoritmo em questão, fixou-se que os polinômios interpoladores seriam de grau 8, permitindo uma boa flexibilidade da curva de aceleração após a segunda derivação. Optou-se, também, por manter o intervalo entre os pontos de controle fixo. Em uma tentativa de automatizar o processo, um filtro spline iterativo foi proposto de forma a utilizar o resultado de identificações sucessivas para melhorar a estimativa do ótimo número de pontos de controle. A ideia é encontrar curvas que sejam representações das curvas ideais e otimizar o número de *breakpoints*, através da função *fminsearch*, para que o resultado filtrado seja o mais próximo possível delas. Seu algoritmo é ilustrado na Figura 53.



Otimização Inicial: Encontrar N que minimiza a diferença quadrada entre a velocidade estimada por filtro spline e a velocidade estimada por filtro média.

- Filtro média móvel com janela fixa de 21 pontos (escolhido por simulação).
- N inicial da otimização igual a $\text{TempoTotal}/12\text{s}$, determinado, também, por simulação.



Otimização entre as iterações: Encontrar, para cada estado, N que minimiza a diferença quadrada entre o estado estimado por filtro spline, a partir do sinal ruidoso obtido por simulação, e o estado ideal estimado por simulação.

Assume-se que os estados ideais estimados na simulação a partir dos parâmetros identificados são representações boas das curvas ideais reais, ou seja, possuem aproximadamente o mesmo formato exigindo aproximadamente o mesmo número de pontos de controle.

Dessa forma, espera-se encontrar o ponto ótimo de número de pontos de controle para cada estado, um exemplo seria qual o número ótimo de pontos de controle que eu aplico a minha curva de posição east que quando eu derivo chego na curva de velocidade east mais próxima à real.

Encontrado os pontos o passo iterativo é realizado novamente, agora com um filtro melhor que o anterior, logo, com uma identificação melhor que a anterior.

Figura 53. Algoritmo do filtro spline iterativo

De forma geral, inicialmente o algoritmo usa como função objetivo a curva de velocidade obtida pelo filtro média móvel, que é uma primeira estimativa do estado real.

Definidos os primeiros pontos de controle (para cada estado, *north*, *east* e *down*, é determinado um número diferente de pontos de controle), a identificação do sistema é realizada.

Após a identificação do sistema, assume-se que as curvas mais próximas da ideal agora podem ser obtidas através de simulação. Dessa forma, o novo sinal a ser filtrado passa a ser o sinal ruidoso simulado, e as novas curvas objetivo passam a serem as curvas sem ruído simuladas. A partir desse ponto, é possível determinar um número de pontos de controle ótimo para os resultados de posição, velocidade e aceleração separadamente (uma forma clara de ver isso é imaginar que para a velocidade um número maior de pontos de controle pode resultar em uma estimativa melhor, enquanto esse mesmo número de pontos de controle acaba por deturpar o sinal de aceleração, já que a mesma exige uma segunda derivação, ou seja, o número ótimo de pontos de controle para aceleração pode ser tal que aproxima a curva de velocidade apenas por cima, guardando apenas resultados próximos da inclinação da curva).

Definidos os novos ótimos, o sinal real é novamente filtrado e a identificação é realizada novamente, de modo que se espera que a identificação se torne cada vez mais precisa.

Dessa forma, obtém-se um filtro que se ajusta automaticamente de acordo com o experimento realizado, tendo como parâmetros iniciais apenas estimativas feitas a cerca do ruído do equipamento, conceito similar ao filtro de Kalman, porém *off-line*, objetivando uma otimização das curvas em toda a extensão do experimento.

Os resultados são bem aparentes quando a manobra executada mantém a orientação da embarcação constante. Como a identificação é feita nas coordenadas da embarcação, o ruído de orientação tende a prejudicar as estimativas, já que uma transformação de rotação deve ser feita entre as coordenadas absolutas e as relativas. O ruído desaparece após um passo de iteração, já que a simulação resulta em uma curva ideal de orientação constante, pois não há momento atuando na embarcação. A Figura 54 ilustra o exemplo. Ao final, o algoritmo identifica que para o

estado específico apenas 2 *breakpoints* são necessários, não atingindo um resultado melhor devido, apenas, ao valor fixo do grau do polinômio.

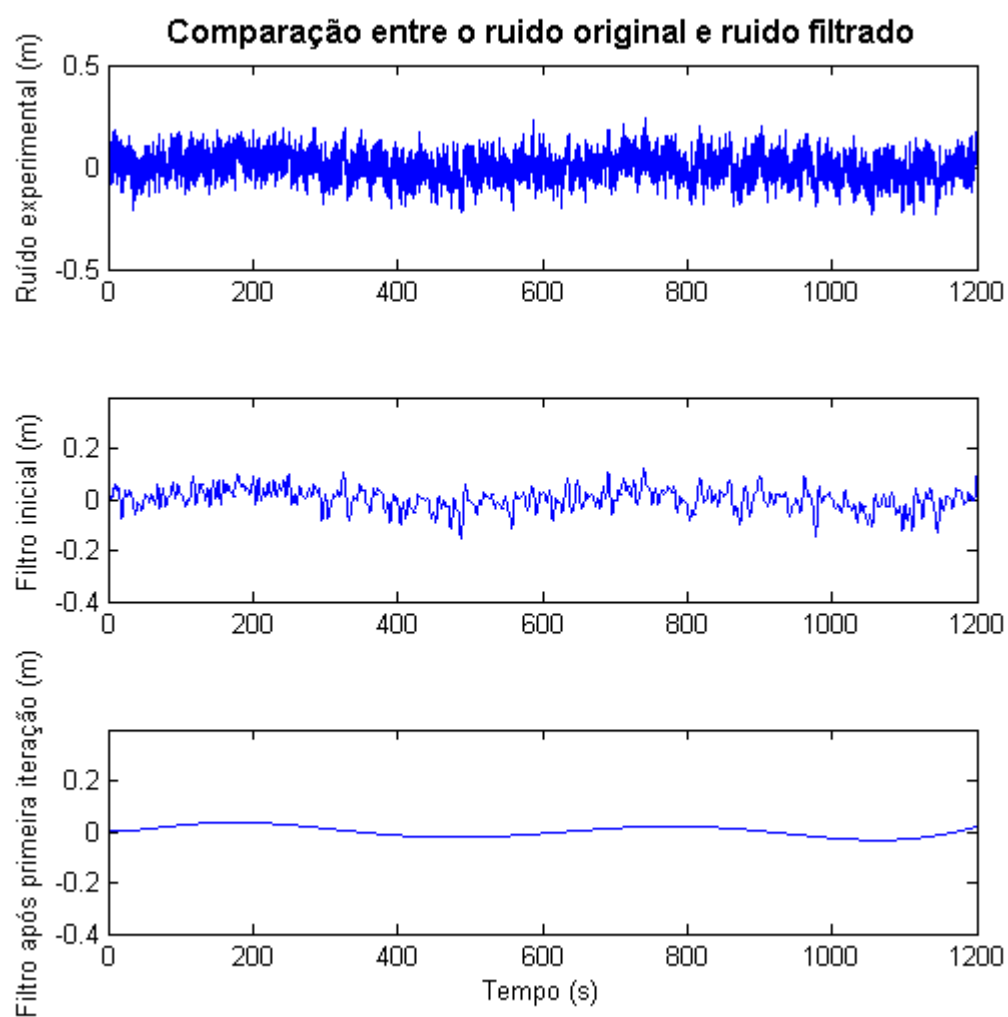


Figura 54. Resultado do filtro spline iterativo

8 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Definidos os algoritmos de identificação, os sistemas de acionamento e aquisição e o filtro a ser utilizado, dá-se início ao desenvolvimento do *software* para gerenciar os dados.

Nessa seção, serão apresentadas as diretrizes utilizadas para o desenvolvimento do programa, de modo a explicar o *software* sem entrar em detalhes sobre o código do mesmo.

É importante observar que as diretrizes não devem ser confundidas com funcionalidades, já que as primeiras são decisões preliminares tomadas de forma a guiar todo desenvolvimento enquanto as últimas são partes do *software* adaptáveis, cuja necessidade evolui junto com o projeto, como foi explicado em metodologia.

8.1 ALGORITMO PRINCIPAL

O algoritmo principal é o responsável pela execução e aquisição de manobras, devendo ser capaz de gerenciar três frentes simultâneas: acionamento, aquisição e atualização da interface gráfica.

Um simples algoritmo sequencial acabaria por atribuir pesos iguais às tarefas, o que não é desejado, já que a atualização da interface assume um papel secundário, devendo ser interrompida quando uma tarefa de maior prioridade solicita execução.

Em MATLAB®, a forma mais simples de gerenciar multitarefas é através do uso de *callbacks*, funções que respondem a eventos e podem, dependendo da configuração das mesmas, serem interrompidas para permitir a execução de outras tarefas, sendo a solução adotada para o *software*.

No caso do acionamento, o *callback* utilizado é disparado pelo objeto *timer*, que permite criar eventos periódicos adicionados à fila de execução.

Dentre suas propriedades, as configurações mais importantes são a forma como os eventos são encadeados e o comportamento quando em espera (quando ocorre o encontro de dois eventos *timer*).

As formas de execução são três:

- *Fixed Spacing*: o modo de execução de espaço fixo adiciona um novo evento à lista de tarefas após um período que se inicia com o fim do

último evento, ou seja, o espaço de tempo entre o fim de um evento *timer* e o início de outro é igual ao período de tempo.

- *Fixed Delay*: o modo de execução de intervalo fixo leva em conta que um evento não é executado assim que é colocado na lista, mas sim após a execução de outros eventos que já estavam na mesma. Contando com isso, o intervalo fixo adiciona um novo evento espaçado de um período do início do evento anterior.
- *Fixed Rate*: o modo de execução de taxa fixa adiciona um novo evento após um período da adição do evento anterior, de modo a tentar forçar que os eventos ocorram em um intervalo determinado.

A Figura 55 ilustra os modos de execução:

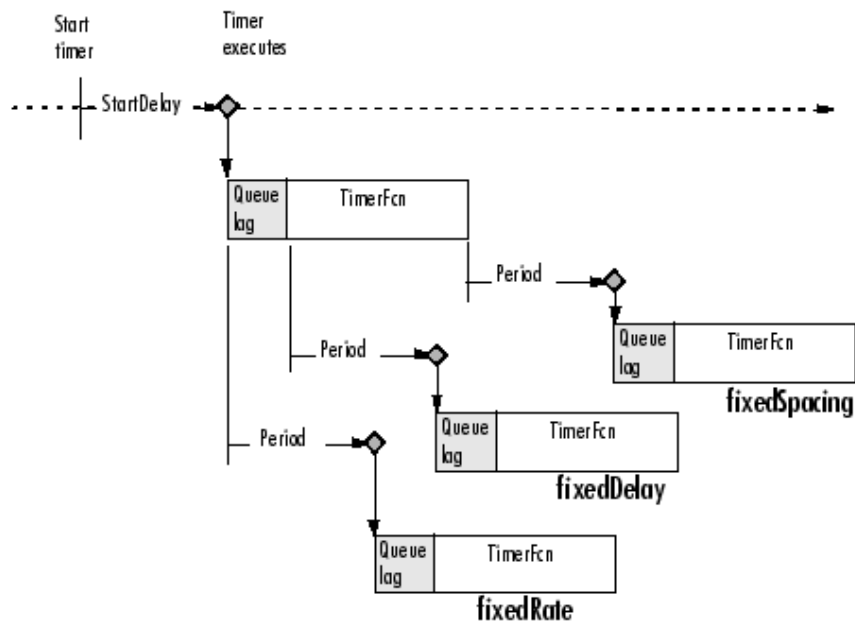


Figura 55. Diferentes tipos de modo de execução de um objeto *timer*, retirada de (MATHWORKS, 2010)

Para o caso do acionamento, o modo de execução mais adequado é o *fixed rate*, já que a manobra deve ser executada o mais próxima possível do tempo de execução planejado.

O comportamento quando em espera, por sua vez, pode ser feito de duas formas:

- *Drop*: nesse caso, quando um evento *timer* solicita execução antes de outro evento *timer* acabar, o solicitante simplesmente pula a execução.
- *Queue*: nesse caso, o evento *timer* espera na fila até acabar a execução do evento *timer* anterior, executando em seguida.

Em acionamentos, adotou-se a abordagem de configurar o período com um intervalo fixo e executar o acionamento caso o tempo programado fosse maior ou igual ao tempo de execução do evento. Dessa forma, é possível ajustar o erro máximo permitido no acionamento, já que o mesmo será sempre menor ou igual ao período do objeto *timer*.

A abordagem adotada faz com que o comportamento em espera mais adequado seja o *drop*, de forma a não sobrecarregar a fila com execuções desnecessárias.

É importante observar que o tempo real do acionamento é armazenado, de forma a oferecer informações mais precisas de *input* para o algoritmo de identificação de sistemas.

A aquisição, por sua vez, foi configurada utilizando um *callback* próprio da comunicação serial, denominado *BytesAvailableFcn*, que dispara um evento sempre que uma mensagem chega na porta serial.

Definidas as configurações de acionamento e aquisição, a interface gráfica deve ser configurada de modo a estar em foco somente quando não houver nenhuma tarefa mais importante a ser executada. Para isso, as atualizações de todos os campos foram concentradas em um único *callback*, disparado pelo início do ensaio, sendo que entre cada uma foi colocado um ponto de interrupção.

Dessa forma, o acionamento e a aquisição podem interromper a interface a qualquer momento, de modo que, após a execução dos dois primeiros, a última volta ao foco automaticamente, atualizando-se com as últimas informações recebidas.

É importante ressaltar que o *callback* único é utilizado apenas em campos que mostram informações, ou seja, campos de interação com o usuário, como botões, caixas de checagem, etc, permanecem com *callbacks* próprios capazes de interromper o algoritmo principal (aspecto importante, por exemplo, para permitir que o usuário pare um ensaio antes do fim do mesmo).

Ao final do ensaio, o mesmo é salvo, podendo ser avaliado posteriormente pelo algoritmo de identificação de sistemas.

8.2 DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE COM USUÁRIO

Definidas as diretrizes gerais para os algoritmos, as diretrizes para a interface com o usuário podem ser definidas.

Os objetivos dessas diretrizes são:

- Definir de forma geral o fluxo do programa.
- Definir configurações a serem disponibilizadas para o usuário.
- Enumerar aspectos que devem ser levados em conta na interface.

Para determinar o fluxo geral do programa, optou-se por segmentar a interface em uma janela principal, módulos do programa e diálogos auxiliares.

A janela principal tem como objetivo apresentar as principais informações em relação ao *software* (nome, autores) e permitir que o usuário selecione o módulo a ser executado.

Foram definidos três módulos:

- Manobra planejada: responsável por executar uma manobra pré-definida e adquirir os *outputs* da mesma;
- Manobra Livre: responsável por executar uma manobra através de *inputs* do usuário via *joystick*, com o intuito de gerar uma manobra arbitrária, assim como adquirir os *outputs*, para a validação dos sistemas identificados;
- Identificação de sistemas: responsável por permitir a seleção dos algoritmos de identificação, assim como os ensaios e validações, previamente executados, a serem utilizados.

Os diálogos utilizados ao longo do programa, por sua vez, são, principalmente, janelas de configuração e janelas de escolha ou salvamento de arquivos.

Definido o fluxo geral, iniciou-se a definição de funcionalidades a serem fornecidas na interface. Objetivando permitir que o usuário configure o *software* de forma a garantir generalidade.

As principais configurações disponibilizadas são:

- Configuração de portas seriais;
- Configuração de protocolo de acionamento;
- Configuração de protocolo de mensagem do DGPS;
- Configuração da atualização de informações (quais informações a respeito do DGPS serão mostradas);
- Configuração da região de ensaio (para definir a matriz de transformação homogênea);
- Configuração de imagem de acompanhamento (configuração da imagem via satélite da região do ensaio, do desenho e das dimensões da embarcação, assim como o *feedback* dos motores no módulo de manobra livre);

Por fim, são definidos os aspectos a serem observados na interface, dentre eles:

- Garantir que os ensaios não serão interrompidos por engano do usuário (o que envolve colocar chaves de segurança);
- Garantir que informações a respeito dos ensaios não sejam perdidas caso o usuário esqueça-se de salvar as mesmas;
- Prover um ambiente simples, porém completo, de forma a facilitar ao máximo a execução dos ensaios.

Concluída a definição de diretrizes, o desenvolvimento do *software* segue baseado no método SCRUM, como explicado em metodologia.

9 RESULTADOS

Nessa seção, são apresentados o *software* desenvolvido assim como os experimentos realizados para sua validação. As interpretações dos resultados são dadas na seção 10.1.

9.1 PLATAFORMA MARINE

O desenvolvimento do *software* deu origem a uma plataforma capaz tanto de executar ensaios como traduzir os resultados obtidos na forma de sistemas dinâmicos, com cerca de 4500 linhas de código.

Denominada de MARINE, acrônimo para *Maneuverability Assessment Routine Implemented with Numerical Estimation*, a plataforma será disponibilizada, ao final do trabalho, na página principal do laboratório TPN.

Seguindo as diretrizes da seção 8.2, a janela principal, assim como a interface dos módulos, podem ser visualizadas abaixo, Figura 56 e Figura 57:



Figura 56. Janela Principal

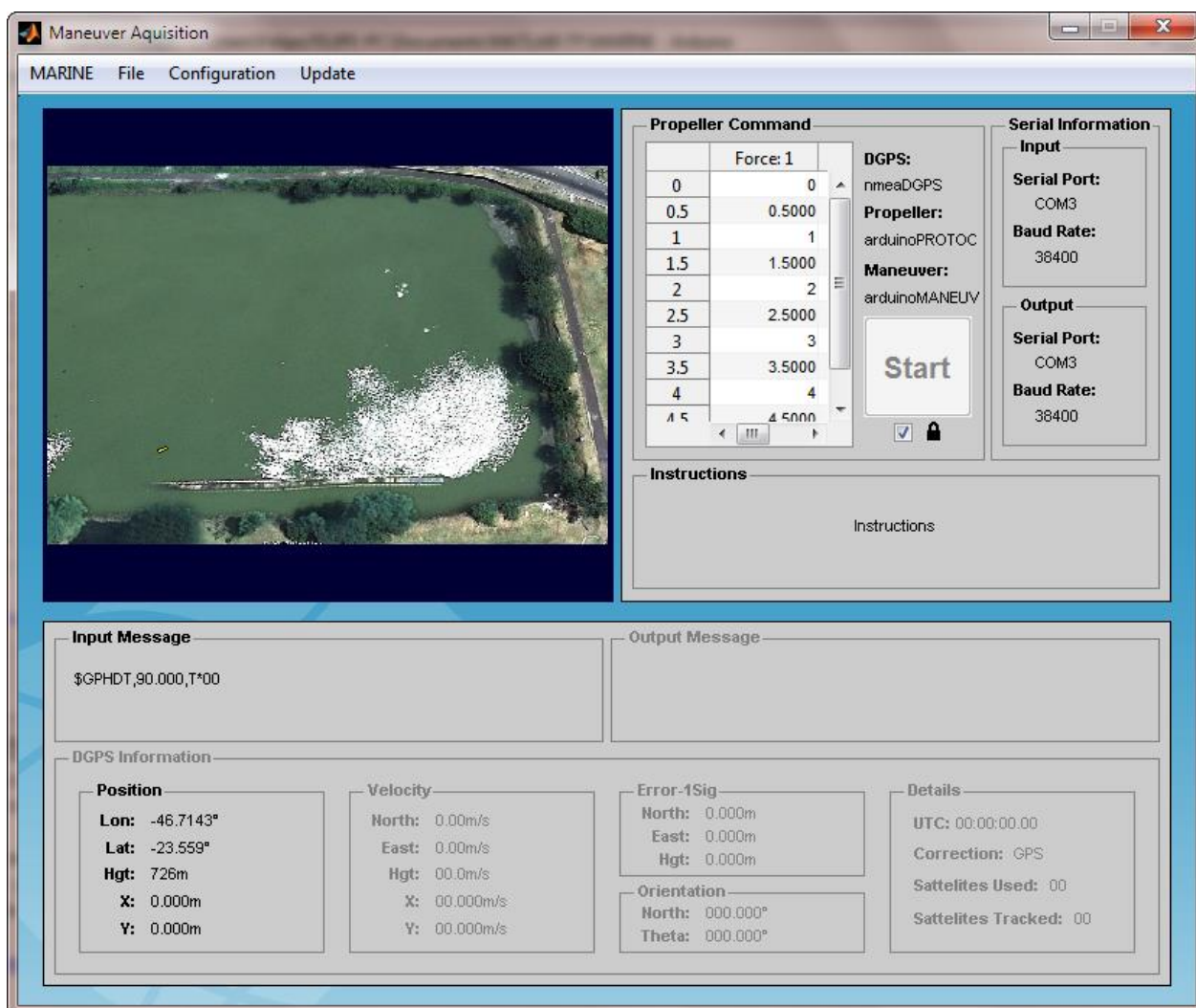


Figura 57. Módulo de planejamento e aquisição de manobra

É importante enfatizar algumas regiões, sendo elas:

- Painel de mensagens: painel que apresenta as mensagens obtidas pelo DGPS, sendo que o usuário pode desabilitar algumas mensagens, no menu *Update*, de modo a aumentar a taxa de atualização dos campos (como explicado na seção 8.1), visualizado na Figura 58;

Input Message \$GPHDT,90.000,T*00		Output Message	
DGPS Information			
Position Lon: -46.7143° Lat: -23.559° Hgt: 726m X: 0.000m Y: 0.000m	Velocity North: 0.00m/s East: 0.00m/s Hgt: 00.0m/s X: 00.000m/s Y: 00.000m/s	Error-1Sig North: 0.000m East: 0.000m Hgt: 0.000m Orientation North: 000.000° Theta: 000.000°	Details UTC: 00:00:00.00 Correction: GPS Sattellites Used: 00 Sattellites Tracked: 00

Figura 58. Painel de mensagens

- Opções do usuário: opções de seleção de porta serial e protocolos, feitas em *Configurations*, e seleção da manobra planejada, aberta por *File-Open*. Visualizado na Figura 59.
- Trava de segurança: evita que um ensaio comece o termine acidentalmente, destacado na Figura 59 (é importante observar que, durante o ensaio, tanto o menu quanto o botão de fechar janela ficam desabilitados).

Propeller Command <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Force: 1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>0.5000</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>1.5000</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>2.5000</td></tr> <tr><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>3.5</td><td>3.5000</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>4.5000</td></tr> </tbody> </table>			Force: 1	0	0	0.5	0.5000	1	1	1.5	1.5000	2	2	2.5	2.5000	3	3	3.5	3.5000	4	4	4.5	4.5000	DGPS: nmeaDGPS Propeller: arduinoPROTOD Maneuver: arduinoMANEUV Start ☒	Serial Information Input Serial Port: COM3 Baud Rate: 38400 Output Serial Port: COM3 Baud Rate: 38400
	Force: 1																								
0	0																								
0.5	0.5000																								
1	1																								
1.5	1.5000																								
2	2																								
2.5	2.5000																								
3	3																								
3.5	3.5000																								
4	4																								
4.5	4.5000																								
Instructions 																									

Figura 59. Opções do usuário, destaque para a trava de segurança

- Acompanhamento do ensaio: região em que o usuário pode acompanhar o ensaio onde o desenho da embarcação em tamanho

real é posicionado por cima de uma imagem de satélite, visualizado na Figura 60.

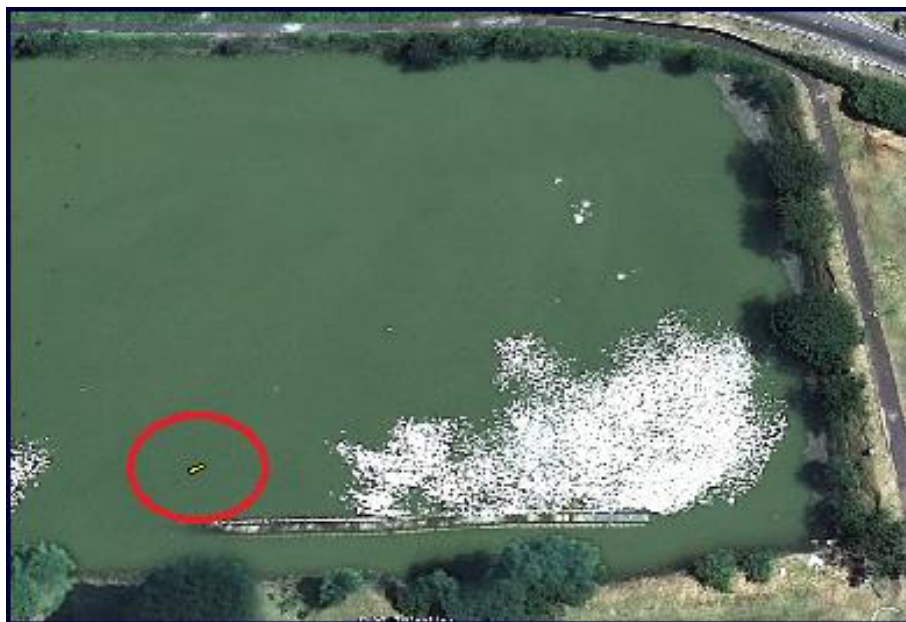


Figura 60. Acompanhamento do movimento da embarcação em imagem de satélite (destaque para a embarcação)

O módulo de manobra livre executa a janela do módulo de manobra planejada com algumas modificações ao mesmo tempo em que mostra o diálogo de *feedback*. O objetivo é permitir que o usuário acompanhe não só as forças e orientações demandadas por ele mas também as forças e orientações atuais dos propulsores, já que estes apresentam um tempo de resposta geralmente não desprezível.

Ao pressionar o botão *start* do diálogo os motores passam a ser acionados pelo *joystick*, sendo que o registro em si da manobra deve ser acionado na janela principal, assim como no módulo de manobra planejada.

O diálogo de *feedback* pode ser visualizado na Figura 61.

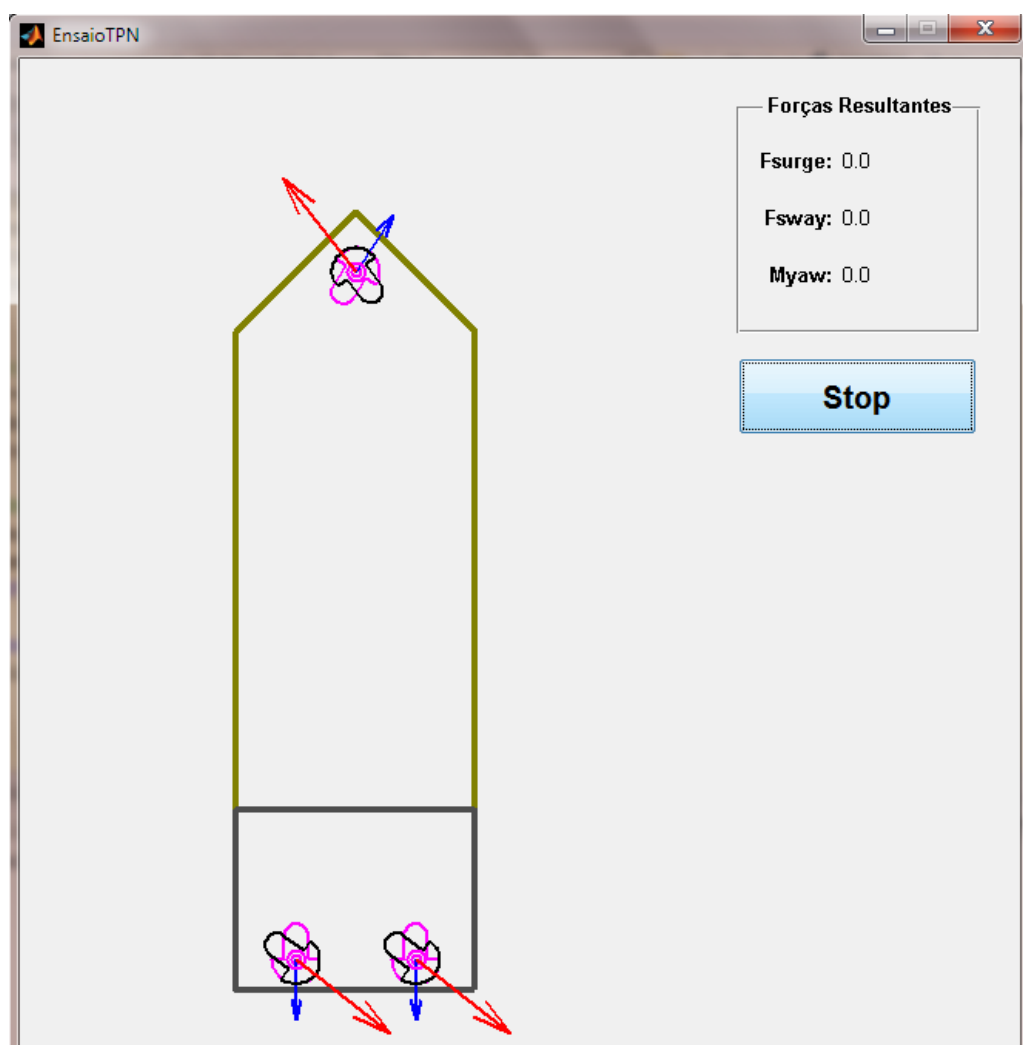


Figura 61. Diálogo para manobra livre, orientações e forças comandadas em preto e vermelho e orientação e forças atuais em rosa e azul

Devido às restrições de tempo e ao constante melhoramento dos algoritmos, não foi desenvolvida uma interface gráfica para o módulo de identificação de sistemas. Ao acionar o módulo, um diálogo questiona ao usuário se este quer executar identificação ou validação, procedendo, em seguida, a abertura e processamento do arquivo selecionado.

Mais informações e um manual sobre o *software* podem ser encontrados no APÊNDICE A.

É importante ressaltar que o programa utiliza quatro algoritmos de outros autores:

- `setDesktopVisibility`: utilizado para esconder o *desktop* do Matlab® durante a execução do programa, escrito por (ALTMAN, 2007)

- `vdist`: utilizado para calcular a distância geodésica no elipsoide WGS48 pelo algoritmo *Vincenty's Formulae*, escrito por (KLEDER, 2005).
- `splinefit`: utilizado para calcular a aproximação de um sinal por uma spline, escrito por (LUNDGREN, 2011).
- `ppdiff`: utilizado para diferenciar analiticamente a spline obtida pelo algoritmo acima, escrito por (LUNDGREN, 2011).

9.2 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para a validação final do algoritmo, uma identificação completa foi realizada, com presença de ruído, filtro spline iterativo e acionamento em malha aberta planejado para minimizar o acoplamento entre os estados.

A manobra a ser realizada, Figura 62, teve como objetivo ter diversas combinações possíveis de acionamento, de forma a desacoplar os estados ao longo da simulação. Para que esse efeito fosse obtido, foi feita uma combinação de senoides de amplitudes proporcionais a 0, 1, 3 e 5 (números que, propositadamente, não são divisíveis entre si).

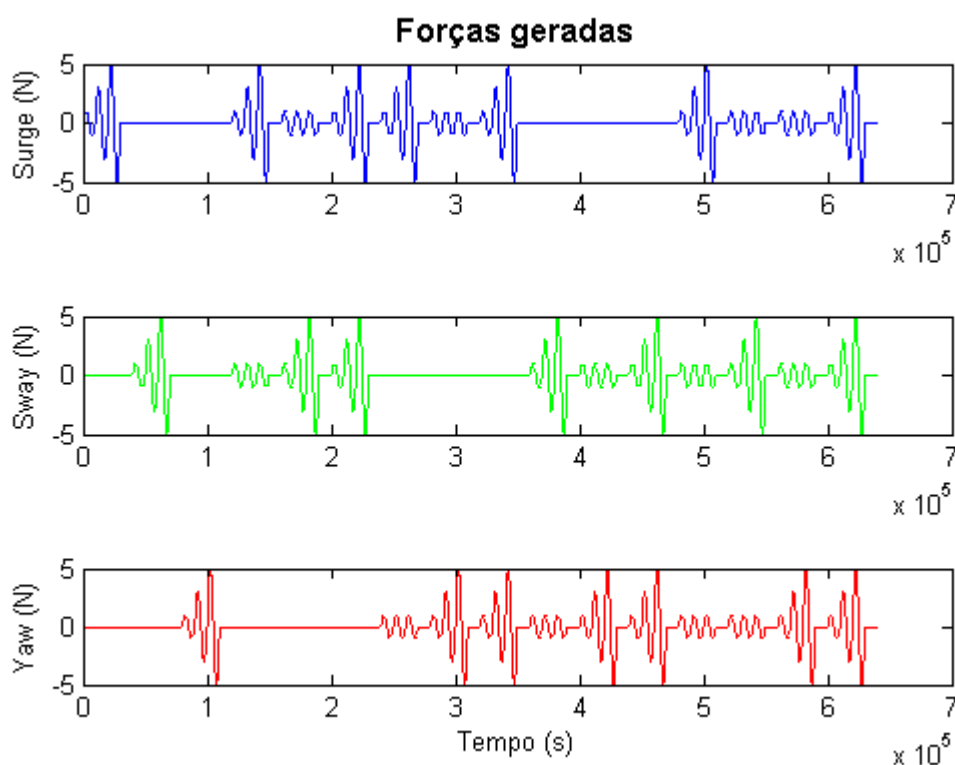


Figura 62. Forças geradas para o ensaio em malha aberta

Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6. Identificação de parâmetros após etapa 1 do filtro spline iterativo

$E(Xu)$ = 12.54%	$E(m * xg - Y\dot{r})$ = 17.23%	$E(m * xg - N\dot{v})$ = 210.56%	$E(Iz - N\dot{r})$ = 48.67%
$E(Nv)$ = 87.03%	$E(m - Y\dot{v}) = 8.92\%$	$E((m - Y\dot{v}) * U - Yr) = -145.09\%$	
$E(Yv)$ = 67.03%	$E(m - X\dot{u}) = 1.21\%$	$E((m * xg - Yr) * U - Nr) = -1047.05\%$	

Tabela 7. Identificação de parâmetros após otimização do filtro

$E(Xu)$ = 10.37%	$E(m * xg - Y\dot{r})$ = 15.79%	$E(m * xg - N\dot{v})$ = 13.82%	$E(Iz - N\dot{r})$ = 4.22%
$E(Nv)$ = 74.44%	$E(m - Y\dot{v}) = 2.18\%$	$E((m - Y\dot{v}) * U - Yr) = -38.54\%$	
$E(Yv)$ = 17.83%	$E(m - X\dot{u}) = 0.65\%$	$E((m * xg - Yr) * U - Nr) = +27.25\%$	

Sendo que o algoritmo completo leva cerca de 300s para efetuar a estimativa.

A interpretação desses resultados é feita na seção 10.1.

9.3 VALIDAÇÃO PARCIAL ATRAVÉS DE ENSAIO EM CAMPO

Concluída a etapa de validação por *software*, iniciaram-se os procedimentos para a validação experimental em campo.

A preparação para o experimento envolveu:

- Finalizar as instalações elétricas do laboratório móvel
- Equipar o laboratório móvel com as ferramentas necessárias
- Blindar os componentes elétricos e a fiação das barcas para evitar interferências entre os motores
- Desenvolver e instalar uma vedação adequada nas barcas
- Levantar as propriedades de massa de cada um dos componentes a serem instalados, assim como suas dimensões, para o correto posicionamento dos lastros de equilíbrio da embarcação
- Ensaios progressivos no tanque de prova numérico para validar a segurança do equipamento
- Levantamento da relação força X RPM dos propulsores

- Preparativos *in loco* como instalação do trailer, fixação de estacas para o levantamento PPP para a base fixa, controle da vegetação ao redor do guincho de apoio, etc.

Tais tarefas acabaram por demandar mais tempo do que o previsto, sendo que o período de ensaios ficou restrito a alguns dias no início de novembro.

Alguns dos procedimentos são ilustrados nas figuras a seguir, Figura 63 até Figura 68.



Figura 63. Vedação na região da tampa da embarcação com fita adesiva de neoprene de 6mm

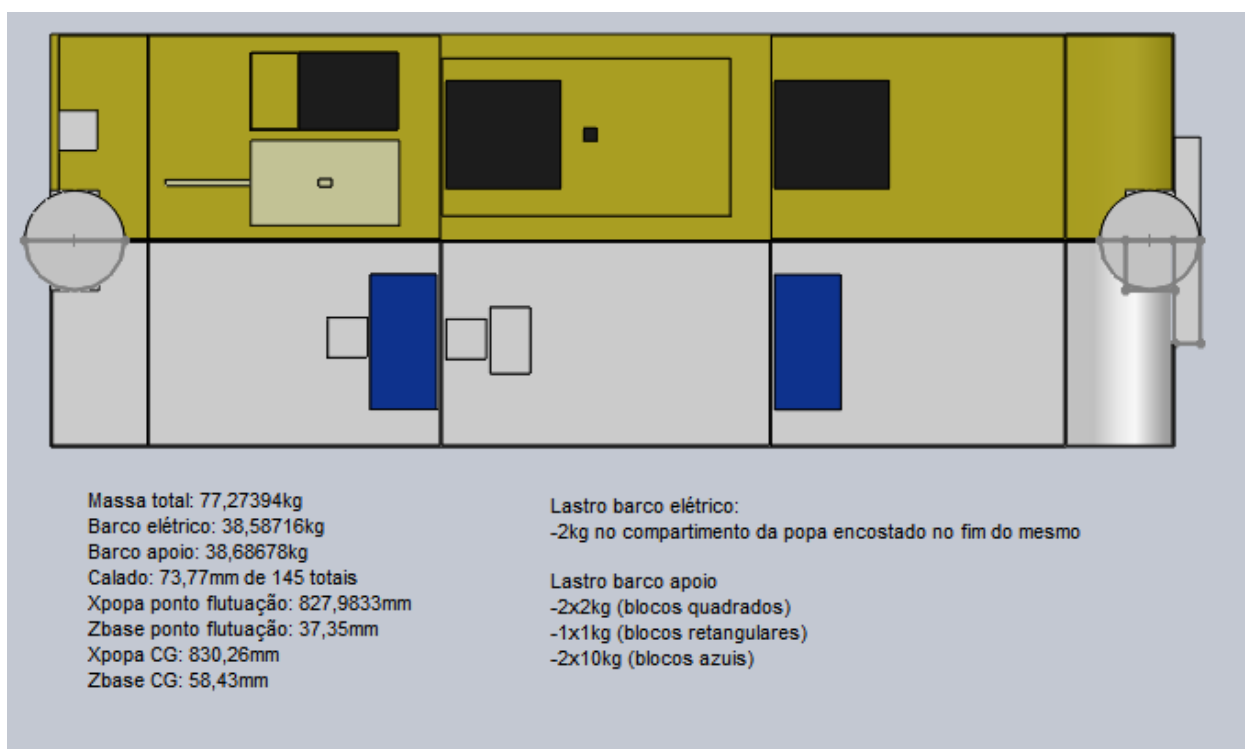


Figura 64. Desenho simplificado dos componentes para o cálculo de calado e lastro do sistema de barcas

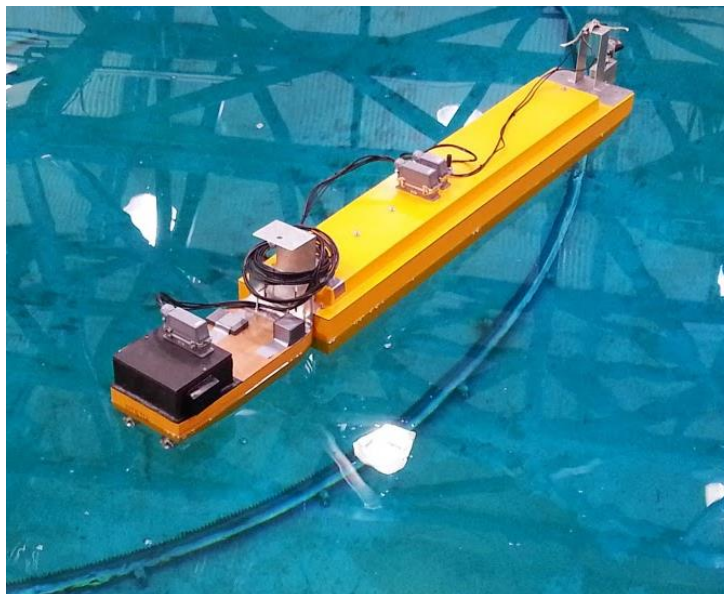


Figura 65. Ensaio dos sistemas de comunicação e validação do procedimento para o cálculo de lastro e calado da embarcação, realizado no tanque de provas do laboratório

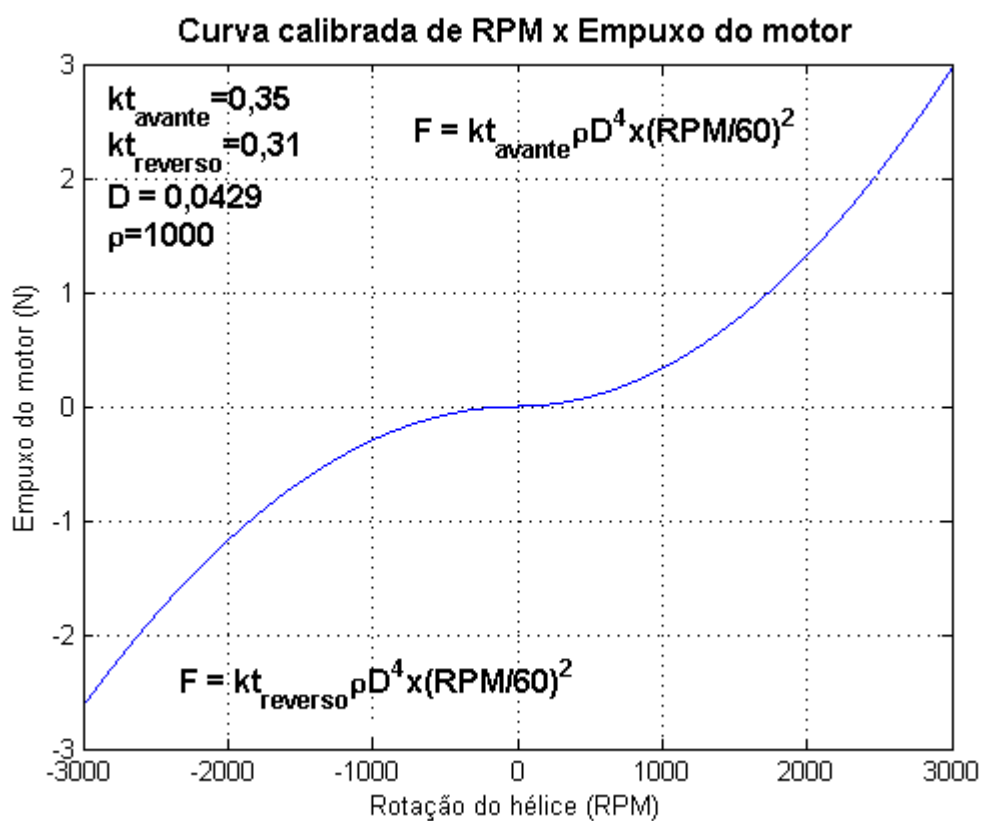


Figura 66. Curva calibrada de RPM versus empuxo do motor (levantada experimentalmente com uma célula de carga e aproximada pela função teórica através de mínimos quadrados)



Figura 67. Fixação de estacas para o levantamento de um ponto preciso para a base fixa (procedimento experimental de cerca de 4 a 5 horas)



Figura 68. Instalação do laboratório móvel (gerador à esquerda e antena de rádio à frente)

Concluída a montagem da infraestrutura, deu-se início aos ensaios com o modelo de barcas. Para aumentar a estabilidade, optou-se por utilizar a configuração 2x1, Figura 69.



Figura 69. Configuração 2x1 do modelo de barcas

As condições climáticas encontradas para o ensaio, entretanto, acabaram por impossibilitar o experimento, já que, devido às altas velocidades do vento no período, a embarcação era incapaz de se movimentar. Mesmo que o experimento pudesse ocorrer, as ondas elevadas para a escala e o próprio vento seriam interferências significativas no procedimento de identificação.

Dessa forma, optou-se por validar parcialmente o software acionando os motores da embarcação atracada ao mesmo tempo em que o sinal de DGPS, instalado em um bote de apoio, era adquirido, Figura 70.



Figura 70. Sistemas atuando em paralelo, embarcação com acionamento à esquerda e aquisição do DGPS à direita

Embora o ensaio não tenha decorrido como esperado, ele foi importante para validar a infraestrutura. O software por si só forneceu todas as ferramentas necessárias para a calibração do experimento, assim como a calibração do plano de referência.

O acionamento e a aquisição foram comparados lado a lado através da inspeção visual de uma manobra simples, que modificava a orientação dos propulsores de 45 em 45 graus a cada 5s, assim como o acompanhamento do bote de apoio sobreposto a imagem de satélite, Figura 71:

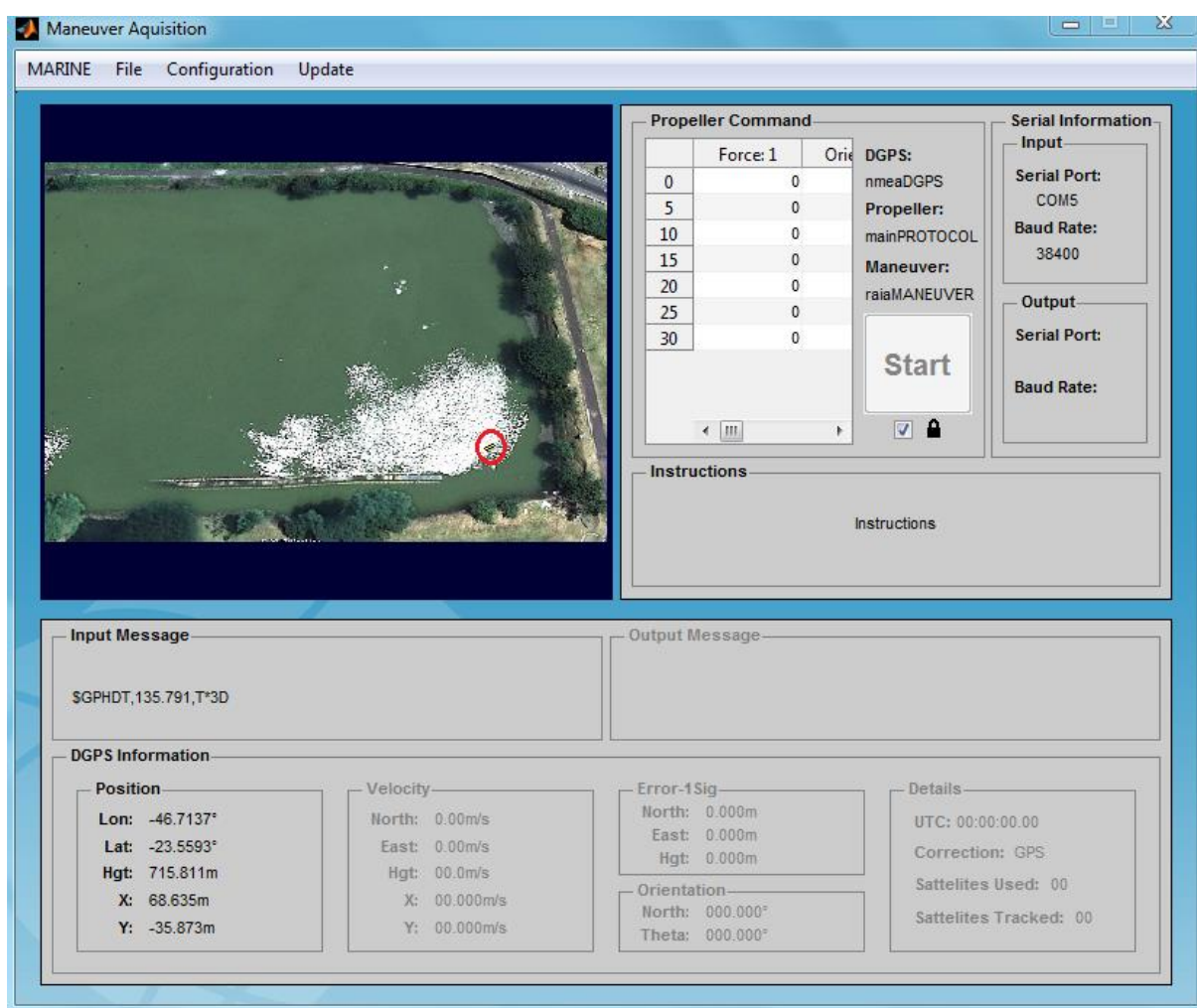


Figura 71. Imagem do programa de aquisição durante o experimento

Nos momentos em que a embarcação se aproximou das margens, que possuem uma posição bem definida na imagem, foi possível observar que o erro de visualização é da ordem de 5m (o programa acusava que a embarcação estava no caminho de asfalto, à direita na imagem) que é aceitável para manobras de grande

extensão e pode ser corrigido, se houver pontos de referência, por uma segunda calibração. Lembrando que o erro na imagem não interfere na identificação.

9.4 DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR EM HARDWARE PARA FUTUROS APRIMORAMENTOS

Tendo em vista a dificuldade da montagem dos aparatos experimentais, que dificulta novas implementações no *software*, um simulador em *hardware* foi desenvolvido usando a plataforma de prototipagem Arduino.

Utilizando o modelo descrito em 4.4, simulado através do método de Euler, o *hardware* retorna, através da porta serial, as respostas esperadas do DGPS, obtidas através da transformação inversa à descrita em 6.2.2.

As forças de acionamento são enviadas através da mesma porta serial, com base em um protocolo simples, que usa a primeira letra pra identificar a direção da força (*surge*, *sway* e *yaw*) com os números seguintes indicando sua magnitude. Ainda é possível selecionar se a resposta virá com ou sem ruído, entretanto é importante observar que mesmo a resposta sem ruído ainda necessita ser filtrada por erros devido a truncamento, como pode ser observado no gráfico de velocidade obtido a partir da derivação numérica do sinal ideal, Figura 72.

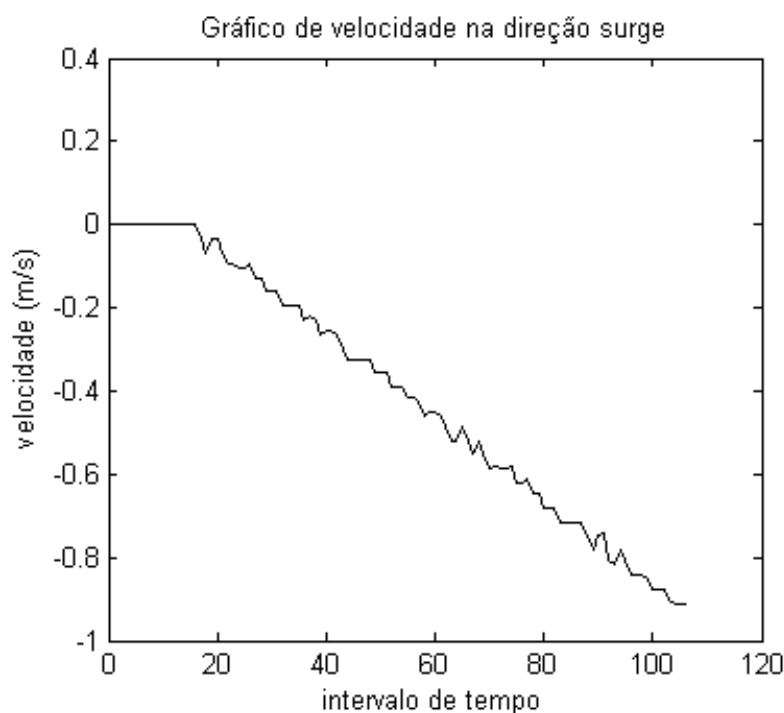


Figura 72. Derivação numérica do sinal obtido, evidenciando ruído de alta frequência

10 DISCUSSÃO

A partir dos resultados apresentados, alguns levantamentos podem ser feitos.

10.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, em relação ao algoritmo de identificação completo, percebe-se que embora o filtro spline adaptativo melhore o resultado de forma geral, a precisão obtida não é tão satisfatória quanto quando um ensaio em *surge* ou *sway* é executado separadamente. Além do acoplamento do sistema, um dos motivos para isso advém da premissa de distribuir os pontos de controle do filtro spline uniformemente pelo sinal. Nos momentos em que um determinado estado não é excitado, ele possui excesso de pontos de controle, que acabam por acompanhar o ruído, deturpando a resposta.

Uma possível solução seria pressupor que a resposta em malha aberta é naturalmente segmentada, de modo que o filtro spline fosse aplicado separadamente para cada segmento. Entretanto, isso exigiria mais estudos em relação a uma excitação em malha aberta geral que evitasse o acoplamento de qualquer sistema.

Outra solução seria incluir a posição dos pontos de controle como uma das variáveis de otimização, o que, frente ao algoritmo de otimização utilizado, fugia ao escopo do projeto.

Ainda sobre os resultados obtidos pelo algoritmo completo, observa-se que os parâmetros relacionados à inércia da embarcação foram mais bem estimados que os parâmetros relacionados ao amortecimento viscoso. A explicação desse fenômeno emerge quando se olha para a resposta temporal que a excitação senoidal produz, em que se constata que os parâmetros inerciais são favorecidos frente às constantes acelerações. Uma forma de contornar esse problema seria intercalar forças senoidais com forças constantes e períodos sem força alguma, de modo que o efeito do amortecimento pudesse ser evidenciado. Novamente, um problema relacionado a determinar qual a excitação ideal em malha aberta.

Dessa forma, conclui-se que embora o filtro spline iterativo seja uma ferramenta promissora, a forma como o mesmo foi implementado ainda não é capaz

de substituir a intervenção humana para a determinação do número e posição dos pontos de controle.

10.2 PROPOSTA PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Tendo em vista o que foi apresentado, algumas propostas são feitas com o intuito de incentivar trabalhos futuros na área.

10.2.1 Utilização de mais sensores

A primeira proposta que pode ser feita é a utilização de uma unidade de medição inercial para obter dados mais confiáveis de aceleração e velocidade angular.

Nesse caso, a identificação por mínimos quadrados poderia ser modificada para:

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{B}\boldsymbol{\tau}$$

$$\mathbf{u} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{B}] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta}(t) = [\mathbf{A} \quad \mathbf{B}]$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{u}$$

$$entrada(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix}$$

De forma que a variável com maior imprecisão, velocidade, passa a ser tratada como a saída ruidosa do sistema, que deve ser aproximada por mínimos quadrados.

Fora isso, as informações a respeito de velocidade angular, aliadas a informação de orientação precisa do DGPS, possibilitariam uma transformação menos ruidosa entre as coordenadas globais e as coordenadas hidrodinâmicas, nas quais a identificação é realizada.

A segunda gama de sensores que poderia ser acrescida ao sistema seria aquela que trabalha com sensores para a medição das forças ambientais, principalmente anemômetros para a medição do vento. Isso acabaria por expandir o problema de identificação de forma a minimizar erros devido a interferências externas.

10.2.2 Outros algoritmos de identificação

Outras propostas que podem ser exploradas estão relacionadas aos diversos outros tipos de algoritmos de identificação disponíveis.

Dentre os estudados dois se destacam, filtro de Kalman e *total least square*.

O filtro de Kalman permite a estimação online dos parâmetros à medida que o experimento é realizado, uma abordagem interessante frente ao elevado tempo de processamento demandado pelos algoritmos apresentados.

O algoritmo *total least square*, por sua vez, considera que os erros não estão apenas presentes na saída do sistema, mas também em sua entrada. Dessa forma, a estimativa de velocidade assim como possíveis erros no envio das forças solicitadas (como os causados pela dinâmica interna dos propulsores) poderiam ser corrigidos.

Segundo (ISERMAN & MUNCHHOF, 2011), entretanto, devido ao acoplamento dos estados em sistemas dinâmicos, restrições devem ser impostas ao método do *total least square*, resultando no método do *structured least square*.

Enquanto os algoritmos acima ainda se enquadram na proposta original do software, outra proposta emerge para contornar o problema da resposta em malha aberta poder acoplar os estados e prejudicar a identificação, que é identificar o sistema em malha fechada.

Para ilustrar a efetividade da proposta, o controle adaptativo proposto por (FOSSEN, 2002) foi implementado. A manobra a ser seguida foi uma manobra senoidal em *north* e *east*, de forma que a mesma só poderia ser executada se o sistema exato fosse conhecido, já que as posições N e E oscilando harmonicamente implicam:

- $\psi = 0, \dot{\psi} = r = 0, \ddot{\psi} = \dot{r} = 0$
- $x = -\frac{u_o}{\omega} \cos(\omega t), \dot{x} = u_o \sin(\omega t), \ddot{x} = u_o \omega \cos(\omega t) \xrightarrow{\psi=0} u = \dot{x}, \dot{u} = \ddot{x}$

De forma que $F_{surge} = (m - X_u)u_o \omega \cos(\omega t) - X_u u_o \sin(\omega t)$

- $y = -\frac{v_o}{\omega} \cos(\omega t), \dot{y} = v_o \sin(\omega t), \ddot{y} = v_o \omega \cos(\omega t) \xrightarrow{\psi=0} v = \dot{y}, \dot{v} = \ddot{y}$

De forma que $F_{sway} = (m - Y_v)\omega v_o \cos(\omega t) - Y_v v_o \sin(\omega t)$ e

$$M_{yaw} = (m x_g - N_v)\omega v_o \cos(\omega t) - N_v v_o \sin(\omega t)$$

Ou seja, quando a manobra desejada é atingida, 6 parâmetros do sistema são conhecidos com precisão. A Figura 73 evidencia a identificação:

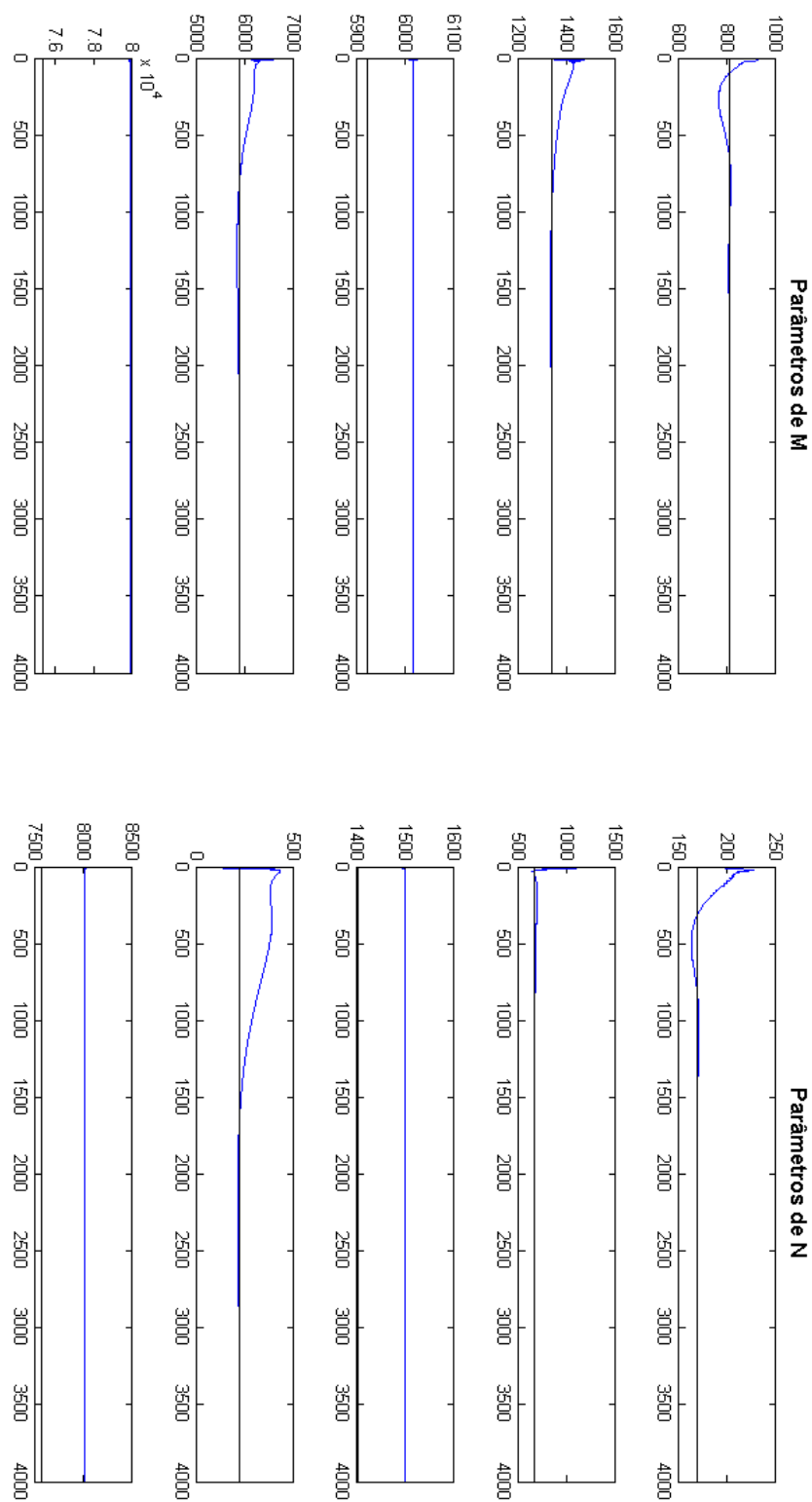


Figura 73: Evolução da estimativa dos parâmetros de acordo com a evolução do sistema

É importante observar que um controlador desse tipo exige que os estados sejam estimados *online* com precisão, o que fugia ao escopo do trabalho. A identificação, portanto, foi realizada considerando-se os estados de velocidade completamente conhecidos.

Dentre as vantagens do método, evidencia-se que a identificação de 6 parâmetros foi bem sucedida com a utilização de apenas uma manobra limitada no espaço, permitindo ensaios em regiões como a raia olímpica, baías e portos sem preocupação.

A derivação completa do controle pode ser encontrada no APÊNDICE B.

11 CONCLUSÕES

A identificação de sistemas é uma área ampla que possui uma importância muitas vezes subestimada frente outras formas de obtenção dos parâmetros (modelos analíticos ou numéricos). Isso, em parte, pode ser explicado pela dificuldade inerente do experimento, que exige condições externas moderadas e demanda energia para seu *setup*. Fora isso, o desenvolvimento de um software que integra o acionamento, a aquisição e a identificação exige tempo e cuidado.

Espera-se que esse trabalho faça frente aos problemas apresentados, pois culminou em uma plataforma robusta, funcional e que pode ser facilmente expandida para levar em conta outros algoritmos, o acréscimo de mais sensores e, até mesmo, uma expansão para outros tipos de modelos como modelos não lineares de embarcações ou mesmo modelos fora da área naval.

Ainda no sentido de facilitar o experimento, vale ressaltar a importância do desenvolvimento de uma interface gráfica completa, que facilitou as configurações do algoritmo e os procedimentos para o ensaio.

Embora a validação experimental não tenha sido realizada devido às condições ambientais, é importante ressaltar que todo o desenvolvimento para tal transcorreu de forma positiva para o laboratório TPN, já que, ao longo do projeto, contribuições duradouras foram feitas, como desenvolvimento de um sistema de comunicação e tradução das coordenadas do DGPS, conclusão do sistema de barcas, levantamento e instalação dos equipamentos do laboratório móvel, entre outros.

Destaca-se, também, a importância de uma metodologia de trabalho para o desenvolvimento de um software de tal proporção (cerca de 4500 linhas de comando). O método adotado permitiu um desenvolvimento contínuo da plataforma ao longo de todo o período de trabalho, de forma a orientar o código no sentido de facilmente incorporar novas funcionalidades, característica que pode vir a ser interessante em trabalhos futuros.

Por fim, espera-se que o trabalho estimule futuros desenvolvimentos na área, como, por exemplo, uma análise mais rigorosa do filtro spline iterativo proposto.

REFERÊNCIAS

ABKOWITZ, A. M. 1964. *Lectures on Ship Hydrodynamics Steering and Maneuverability*. Hydro-Og Aerodynamisk Laboratorium. Lyngby, Dinamarca : s.n., 1964. Report No. Hy-5.

ALTMAN, Y. 2007. File Exchange - Set Desktop Visibility. *Matlab Central*. [Online] Sep 11, 2007. [Cited: Jun 13, 2013.] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/16330-setdesktopvisibility>.

CHEN, H. H., et al. 2007. Identification of Hydrodynamic Parameters for a Remotely Operated Vehicle Using Projective Mapping Method. *Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*. 2007, pp. 427-436.

CLYNCH, J. R. 2006a. Earth Coordinates. *GMAT*. [Online] Feb 2006a. [Cited: Jun 13, 2013.] http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/clynch_pdfs/coorddef.pdf.

—. **2006b.** Geodetic Coordinate Conversions. *GMAT*. [Online] Feb 2006b. [Cited: Jun 13, 2013.] http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/clynch_pdfs/coordcvt.pdf.

CONTE, G., et al. 2004. Evaluation of Hydridynamics Parameters of a UUV - A Preliminary Study. *First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing*. 2004, pp. 545-548.

FOSSEN, T. 2011. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. s.l. : John Wiley & Sons, 2011.

—. **2002.** Marine Control Systems - Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and underwater Vehicles. *Marine Cybernetics*. 2002.

FRACZEK, W. 2003. Mean Sea Level, GPS and the Geoid. *ESRI Applications Prototype Lab*. [Online] Sep 2003. [Cited: Jun 13, 2013.] <http://www.esri.com/news/arcuser/0703/geoid1of3.html>.

FRANÇA & MATSUMURA. 2011. *Mecânica Geral*. 3a. São Paulo : Edgar Blucher, 2011.

IBGE. 2013. *Precise Point Positioning (PPP)*. [Online] 2013. [Cited: 6 13, 2013.] <http://www.ibge.gov.br/english/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>.

ISERMAN & MUNCHHOF. 2011. *Identification of Dynamic Systems*. s.l. : Springer, 2011.

JOHNSON, T. M. 2013. *Introdução ao GPS*. [Online] 2013. [Cited: Jun 13, 2013.] http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/thienne_johnson/gps.html.

KIM, J., KIM, K. and CHOI, H. S. 2002a. Estimation of Hydrodynamic Coefficients for a Test-bed AUV-SNUUV I by Motion Test. *Oceans Conference*. 2002a, Vol. 1, pp. 830-840.

—. **2002b.** Estimation of Hydrodynamic Coefficients for an AUV Using Nonlinear Observers. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2002b, Vol. 27, pp. 830-840.

KLEDER, M. 2005. File Exchange - Vectorized geodetic distance and azimuth on the WGS48 earth ellipsoid . *Matlab Central*. [Online] Oct 3, 2005. [Cited: Jun 13, 2013.] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8607-vectorized-geodetic-distance-and-azimuth-on-the-wgs84-earth-ellipsoid>.

KOWOMA. 2009. Sources of Errors in GPS. [Online] Abr 19, 2009. [Cited: Jun 13, 2013.] <http://www.kowoma.de/en/gps/errors.htm>.

LAVIERI, R. S. 2011. *Métodos de Navegação Inercial Aplicados a Lançamentos Submarinos*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011. Tese de mestrado.

LJUNG & GLAD. 1994. *Modeling of Dynamic Systems*. s.l. : Prentice-Hall, 1994.

LUNDGREN, J. 2011. File Exchange - SplineFit - Curve fitting tool based on B-Splines. *Matlab Central*. [Online] Nov 22, 2011. [Cited: Set 17, 13.] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13812-splinefit>.

MALAMAS & PETRAKIS. 2010. A Software Platform for Real-Time Assessment of Ship Maneuverability. *52nd International Symposium ELMAR*. 2010, pp. 379-382.

MATHWORKS. 2010. Timer Object Execution Modes. *Documentation Center*. [Online] 2010. [Cited: Jun 13, 2013.] http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_prog/timer-object-execution-modes.html.

Melgaard, Axel. 2003. *PMM Tank Tests with a Model of a 258m Syezmax Tanker in Ballast Condition*, Report No. 2. s.l. : COPPE/Petrobras, 2003. DMI 2002189.

MONTEIRO, L. S., MOORE, T and HILL, C. 2005. What is the accuracy of DGPS? *The Journal of Navigation*. 2005, 58, pp. 207-225.

PMI, Project Management Institute. 2008. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*. 4 ed. Pennsylvania, EUA : Project Management Institute, Inc, 2008. p. 467.

PowerService. 2013. *Thrustmaster Texas*. [Online] 2013. [Cited: Jun 13, 2013.] <http://www.portservice.be/frpowerservice.html>.

PRADO, A. A. 2009. *Metodologia Experimental para Obtenção dos Parâmetros Hidrodinâmicos do VSNT JAÚ II, Baseado em Processamento Digital de Imagens*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2009. Tese de mestrado.

PRECIADO, F. S. 2012. Hélices de proa. *Atmosferis*. [Online] Jul 2012, 2012. [Cited: Jun 13, 2013.] <http://www.atmosferis.com/helices-de-proa/>.

SCHWABER & SUTHERLAND. 2008. The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game. [Online] 2008. [Cited: Jun 30, 2013.]

WHAT-WHEN-HOW. 2013. GPS Data and Correction Services. [Online] 2013. [Cited: Jun 13, 2013.] <http://what-when-how.com/gps/gps-data-and-correction-services/>.

APÊNDICE A: MARINE – MANUAL DO USUÁRIO

MARINE é uma plataforma para identificação de parâmetros hidrodinâmicos de embarcações desenvolvida no laboratório TPN – Tanque de Provas Numérico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Seus autores são:

Felipe Lopes de Souza felipe.lopes.mecatronica@gmail.com

Tadeu Ferreira de Sousa Júnior tadeuferreirajr@gmail.com

Sob orientação de:

Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri eduat@usp.br

A plataforma consiste em três módulos:

- **Maneuver Aquisition:** módulo para a execução e aquisição de manobras;
- **System Identification:** módulo para selecionar os algoritmos para identificar o sistema de ensaios executados com o módulo anterior;
- **Free Maneuver:** módulo que permite ao usuário o controle da embarcação através de um joystick. Esse módulo pode registrar a manobra para gerar ensaios de validação para o módulo anterior

Esse manual tem como objetivo familiarizar o usuário com a plataforma através de instruções passo a passo envolvendo desde a configuração até a execução de um ensaio.

SHORTCUT é uma forma de organizar o desktop do Matlab® para que a plataforma MARINE esteja sempre acessível.

Para configurar o shortcut, abra o Matlab® e entre na pasta MARINE.

Em seguida, utilizando o comando `cd`, copie a string obtida (que indica o current folder).

Para adicionar o atalho, clique com o botão esquerdo na toolbar shortcuts e selecione New Shortcut.

A seguir, complete o callback como na janela abaixo, Figura 74, e selecione o ícone MARINE, substituindo <MARINE> pelo diretório obtido com o comando `cd`.

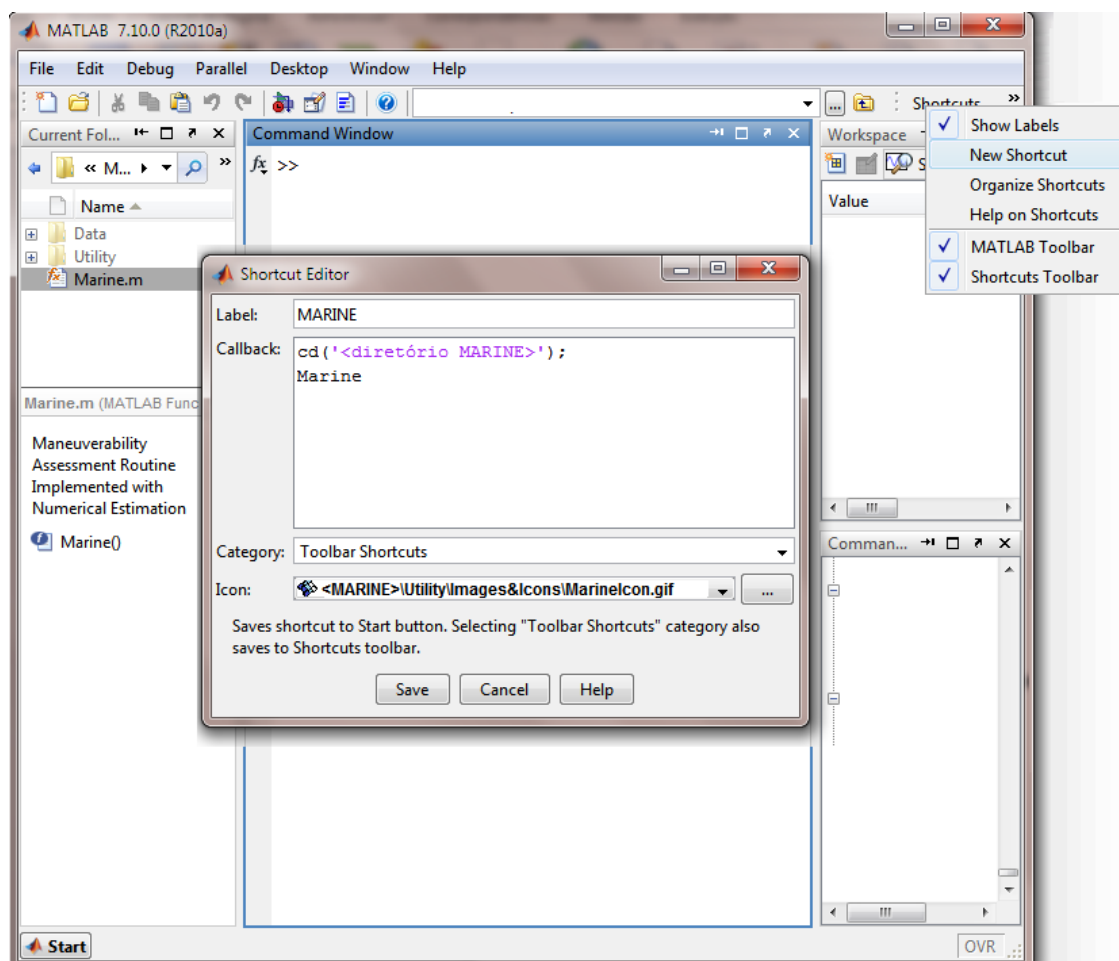


Figura 74. Definição de shortcut

JANELA PRINCIPAL é a interface gráfica aberta ao se clicar no shortcut ou ao digitar Marine na command window.

Ela permite que o usuário escolha o módulo do programa a ser executado.

É importante observar que o Matlab irá permanecer oculto enquanto o MARINE estiver em execução.

A janela pode ser observada na Figura 75.



Figura 75. Janela principal

MANEUVER AQUISITION é o primeiro módulo do programa. Ele permite a execução e aquisição de manobras planejadas, gerando, ao final, um arquivo <nome>TEST.mat. A Figura 76 apresenta o módulo.

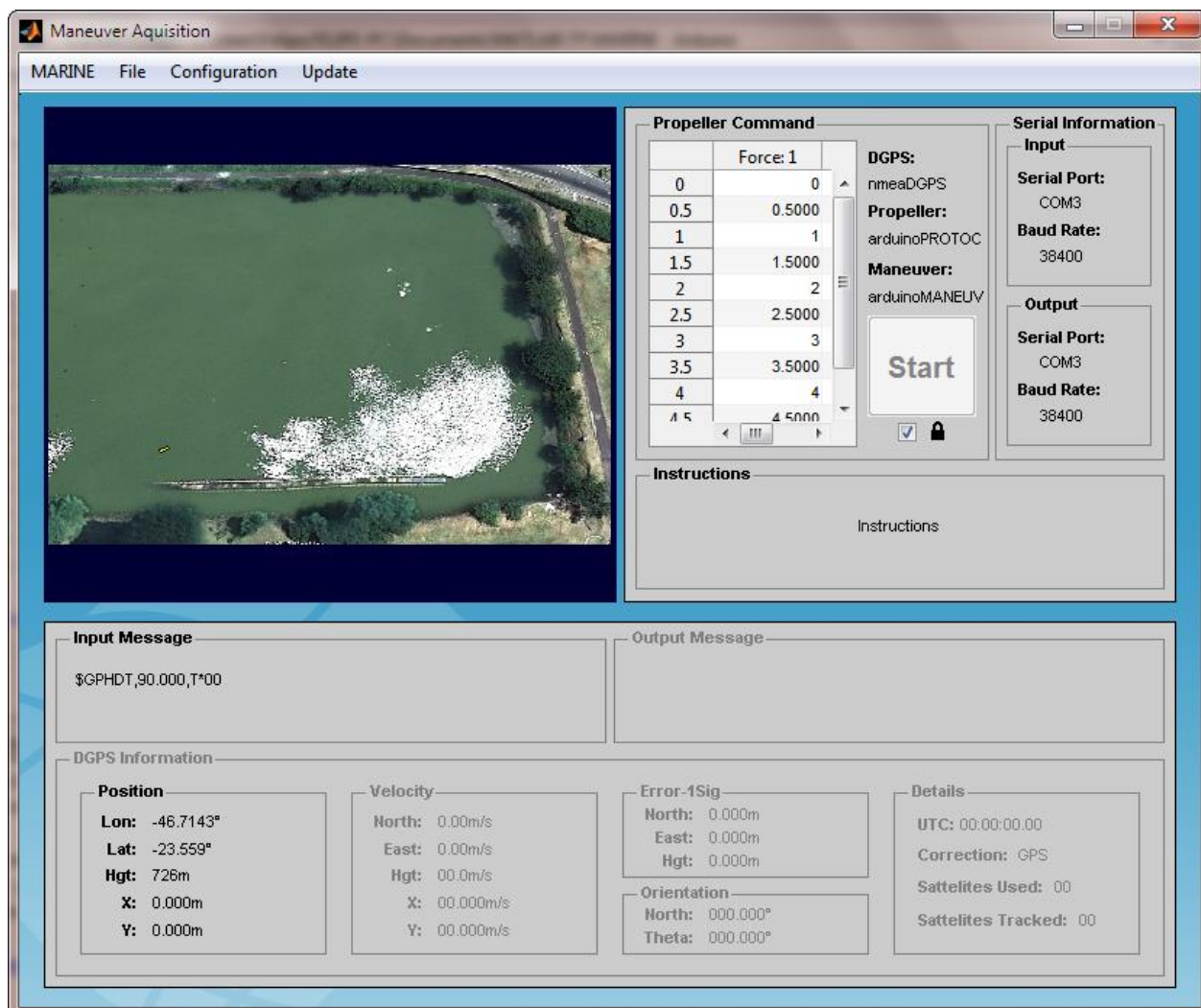


Figura 76. Módulo de aquisição e execução de manobra planejada

MENU: o menu, Figura 77, permite que o usuário navegue entre os módulos e realize as configurações pro ensaio.

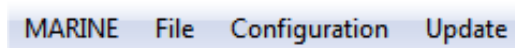


Figura 77. Menu

Marine: volta à janela principal

File: Possui as opções listadas na Figura 78

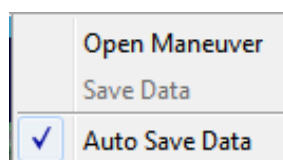


Figura 78. Sub-Menu de File

- **Open Maneuver:** para abrir um arquivo de manobra do tipo <nome>MANEUVER.mat
- **Save Data:** habilitado apenas após um ensaio, permite salvar um arquivo <nome>TEST.mat contendo um ensaio
- **Auto Save Data:** quando habilitado abre automaticamente janelas para que o usuário salve um ensaio em três ocasiões: quando um ensaio termina ou é interrompido, quando o usuário tenta voltar à janela principal ou quando o usuário tenta fechar o programa.

Configurations: Possui as seguintes opções, Figura 79:

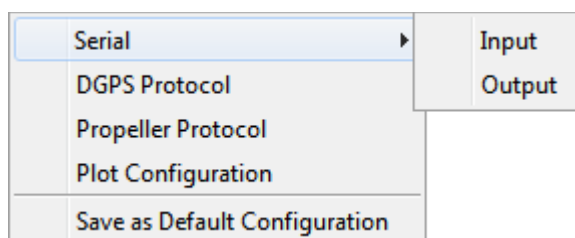


Figura 79. Sub-menu de configurations

- **Serial:** permite configurar a porta serial assim como o BaudRate da mesma. As portas disponíveis são automaticamente detectadas e mostradas no diálogo de seleção, Figura 80.

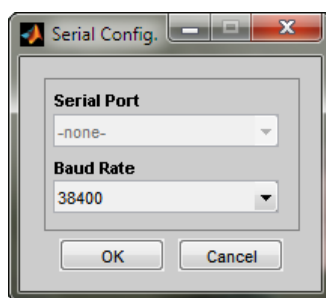


Figura 80. Diálogo de configuração serial

- **DGPS Protocol:** permite seleccionar arquivos do tipo <nome>DGPS.m, contendo a função que interpreta a mensagem do DGPS. Dessa forma, qualquer protocolo pode ser usado.
- **Propeller Protocol:** permite seleccionar arquivos do tipo <nome>PROTOCOL.m, contendo a função que monta uma mensagem serial com base na força e orientação de cada propulsor.
- **Plot Configuration:** permite configurar a imagem de fundo, assim como calibrá-la, através de um novo diálogo, Figura 81. As informações são armazenadas em um arquivo do tipo <nome>BACKPLOT.mat.

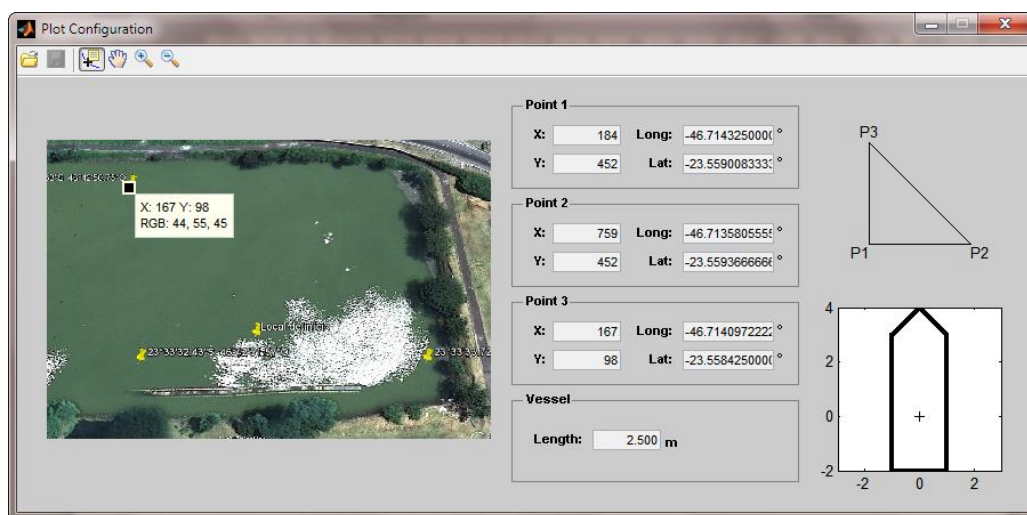


Figura 81. Diálogo de configuração de BackPlot

- **Save as Default Configuration:** permite salvar as configurações atuais de modo que toda a vez que o programa começar ele já esteja configurado.

Update: possui as seguintes opções, Figura 82:

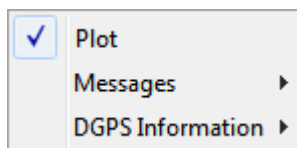


Figura 82. Sub-Menu de Update

Cada uma delas controla se o campo correspondente será ou não atualizado.

- **Plot:** controla se a imagem de fundo será atualizada
- **Messages:** controla se as mensagens input e output serão atualizadas
- **DGPS Information:** controla quais informações recebidas pelo DGPS serão mostradas

Quanto menor o número de campos a serem atualizados, mais rápido a atualização ocorre.

BACKPLOT: o backplot, Figura 83, permite visualizar em tempo real o movimento da embarcação na região do ensaio.

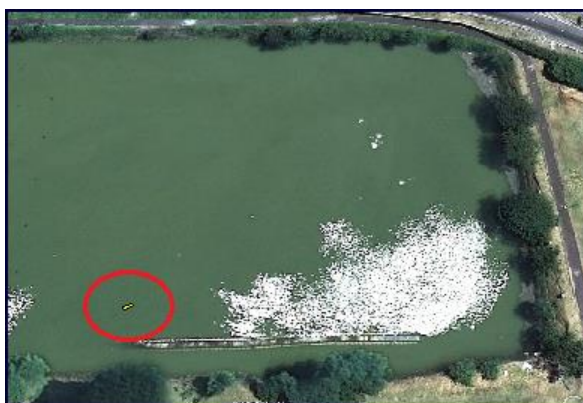


Figura 83. Backplot, destaque para a embarcação

Para que o mesmo possa ser configurado, um arquivo <nome>BACKPLOT.mat deve ser salvo com as seguintes variáveis:

- **BackPlot:** cdata contendo a imagem de satélite a ser mostrada ao fundo
- **BackPlotMark:** cdata contendo a mesma imagem de satélite anterior, porém com as marcas nos pontos de calibração, Figura 84 (os pontos podem ser colocados com o Google Earth e então ocultados para gerar

a imagem BackPlot). Recomendam-se pontos nos extremos da imagem.



Figura 84. BackPlotMark

- **Vessel:** matriz 2xN contendo as posições x e y de N pontos utilizados para o desenho da embarcação. A embarcação deve ser desenhada com a direção surge coincidente com o eixo y
- **Length:** comprimento da embarcação em metros
- **P1, P2 e P3:** structs contendo os campos
 1. **x:** posição x em pixels do ponto (não há necessidade de ser preenchido com o valor correto, já que pode ser determinado com a ajuda do diálogo Plot Configuration)
 2. **y:** posição y em pixels do ponto
 3. **long:** valor da longitude do ponto (determinado com a ajuda do Google Earth)
 4. **lat:** valor da latitude do ponto
 5. **hgt:** altitude do ponto
- **Tdistance:** matriz contendo a transformação homogênea das coordenadas geodésicas para metros. Não há necessidade de ser preenchida com o valor correto, já que é calculada no diálogo Plot Configuration
- **Tpixels:** matriz contendo a transformação homogênea das coordenadas geodésicas para pixels, para desenharmos a embarcação por cima da imagem de fundo na posição e tamanho corretos.

PAINEL DE MENSAGENS: painel que apresenta as informações recebidas pelo DGPS, Figura 85. O menu update permite configurar quais campos serão atualizados.

The interface is divided into several sections:

- Input Message:** Displays the text "\$GPHDT,90.000,T*00".
- Output Message:** An empty field for displaying received messages.
- DGPS Information:** A large section containing four sub-panels:
 - Position:** Shows coordinates: Lon: -46.7143°, Lat: -23.559°, Hgt: 726m, X: 0.000m, Y: 0.000m.
 - Velocity:** Shows speed components: North: 0.00m/s, East: 0.00m/s, Hgt: 0.00m/s, X: 0.000m/s, Y: 0.000m/s.
 - Error-1Sig:** Shows error margins: North: 0.000m, East: 0.000m, Hgt: 0.000m.
 - Orientation:** Shows orientation values: North: 000.000°, Theta: 000.000°.
 - Details:** Shows system status: UTC: 00:00:00.00, Correction: GPS, Satellites Used: 00, Satellites Tracked: 00.

Figura 85. Painel de mensagens

As orientações para os eixos X e Y, assim como para os valores de Theta, são definidas de forma que a posição e orientação da embarcação no início do ensaio sejam consideradas zero.

PAINEL DE EXECUÇÃO: o painel de execução, Figura 86, mostra a manobra selecionada (colunas representando as forças e orientações selecionadas, linhas informando o tempo de acionamento), as configurações das portas seriais e dos protocolos, e contém o botão de início ou parada de ensaio. O último só podendo ser pressionado após desativar a trava de segurança.

The interface contains the following elements:

- Propeller Command:** A table with two columns: Force and Command. The 'Force' column ranges from 0 to 4.5. The 'Command' column shows values like 0, 0.5000, 1, 1.5000, 2, 2.5000, 3, 3.5000, 4, 4.5000.
- DGPS:** A dropdown menu set to 'nmeaDGPS'.
- Propeller:** A dropdown menu set to 'arduinoPROTOD'.
- Maneuver:** A dropdown menu set to 'arduinoMANEUVER'.
- Start Button:** A large blue button labeled 'Start'.
- Serial Information:** Two sections for 'Input' and 'Output', each with fields for 'Serial Port' and 'Baud Rate'.
- Instructions:** A large text area at the bottom labeled 'Instructions'.

Figura 86. Painel de execução

ARQUIVO DE MANOBRA: a manobra consiste em um arquivo <nome>MANEUVER.mat salvo com as seguintes variáveis:

- **time:** matriz $1 \times N$ contendo os N instantes nos quais o acionamento muda (uma manobra contendo uma força constante na direção surge, por exemplo, precisa de apenas dois campos, o primeiro com o instante 0 e o segundo com o tempo em que a manobra acaba)
- **force:** matriz $M \times N$ contendo as forças de M propulsores, uma para cada instante
- **orientation:** matriz $M \times N$ contendo a orientação de M propulsores, uma para cada instante.

PROTOCOLO DGPS: o protocolo de tradução da mensagem DGPS deve ser um arquivo <nome>DGPS.m, contendo uma função com o seguinte formato:

```
function StructuredMessage = <nome>DGPS(Message)

end
```

Sendo Message a mensagem enviada pelo DGPS e StructuredMessage uma struct com os campos da mensagem em valor numérico.

PROTOCOLO DE ACIONAMENTO: o protocolo de acionamento deve ser um arquivo <nome>PROTOCOL.m, contendo uma função com o seguinte formato:

```
function OutputMessage = <nome>PROTOCOL(Force,Orientation,Ind)

end
```

Sendo Force a matriz força, Orientation a matriz orientação, Ind o índice correspondente ao instante do acionamento e OutputMessage a mensagem a ser enviada para o sistema de propulsores.

APÊNDICE B: DERIVAÇÃO – CONTROLE ADAPTATIVO

A dinâmica do movimento plano pode ser linearizada de forma a relacionar a aceleração, velocidade e forças atuantes no sistema de referência solidário à embarcação:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{U}}_{vessel} + \mathbf{N}\mathbf{U}_{vessel} = \mathbf{F}_{vessel}$$

Considerando a embarcação simétrica em relação ao plano *surge-heave*, e o sistema originado no centro de massa e orientado nos eixos principais de inércia, a matriz de inércia do corpo rígido fica:

$$\text{Matriz de inércia} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_g \\ 0 & mx_g & I_z \end{bmatrix}$$

Além da inércia do corpo rígido, uma parcela a mais deve ser considerada para embarcações, denominada de massa adicional, que leva em conta a massa de água deslocada junto ao corpo:

$$\text{Massa adicional} = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & N_{\dot{v}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

Já os termos referentes à velocidade são devido ao amortecimento:

$$\text{Amortecimento} = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix}$$

E as forças inerciais e de rotação referentes a uma velocidade de cruzeiro U :

$$\text{Forças Inerciais} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & mU \\ 0 & 0 & mx_g U \end{bmatrix}$$

$$\text{Forças de Rotação} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{\dot{v}}U \\ 0 & 0 & Y_{\dot{r}}U \end{bmatrix}$$

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_g - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & (m - Y_{\dot{v}})U - Y_r \\ 0 & -N_v & (mx_g - Y_{\dot{r}})U - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{surge} \\ F_{sway} \\ M_{yaw} \end{bmatrix}$$

Levando-se em conta as relações:

$$\begin{aligned}\mathbf{M}\dot{\mathbf{U}}_{vessel} + \mathbf{N}\mathbf{U}_{vessel} &= \mathbf{F}_{vessel} \\ \dot{\mathbf{X}}_{NED} &= \mathbf{R}(\psi) \times \mathbf{U}_{vessel} \\ \ddot{\mathbf{X}}_{NED} &= \dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi) \times \mathbf{U}_{vessel} + \mathbf{R}(\psi) \times \dot{\mathbf{U}}_{vessel}\end{aligned}$$

Pode-se reescrever o sistema na forma:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{U}}_{vessel} &= \mathbf{C}\mathbf{U}_{vessel} + \mathbf{B}\mathbf{F}_{vessel} \\ \text{com } \mathbf{B} &= \mathbf{M}^{-1} \text{ e } \mathbf{C} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N} \\ \dot{\mathbf{U}}_{vessel} &= \mathbf{C}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{B}\mathbf{F}_{vessel} \\ \mathbf{R}(\psi) \times \dot{\mathbf{U}}_{vessel} &= \mathbf{R}(\psi) \times \mathbf{C}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(\psi) \times \mathbf{B}\mathbf{F}_{vessel} \\ \ddot{\mathbf{X}}_{NED} - \dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi) \times \mathbf{U}_{vessel} &= \mathbf{R}(\psi)\mathbf{C}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(\psi)\mathbf{B}\mathbf{F}_{vessel} \\ \ddot{\mathbf{X}}_{NED} - \dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi) \times \mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} &= \mathbf{R}(\psi)\mathbf{C}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(\psi)\mathbf{B}\mathbf{F}_{vessel} \\ \ddot{\mathbf{X}}_{NED} &= [\dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi) + \mathbf{R}(\psi)\mathbf{C}\mathbf{R}(-\psi)]\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(\psi)\mathbf{B}\mathbf{F}_{vessel}\end{aligned}$$

$$\ddot{\mathbf{X}}_{NED} = \mathbf{C}(\psi, \dot{\psi})\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{B}(\psi)\mathbf{F}_{vessel}$$

$$\text{com } \mathbf{B}(\psi) = \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1} \text{ e } \mathbf{C}(\psi, \dot{\psi}) = \dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi) - \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}\mathbf{R}(-\psi)$$

A primeira etapa do projeto de um controlador adaptativo é linearizar o sistema por *feedback* e adicionar a ação de controle que produza um comportamento desejado do sistema. Isso é feito de modo que:

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})\mathbf{u} \\ \mathbf{u} &= \mathbf{g}^{-1}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})[- \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{v}] \rightarrow \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{v} \\ \mathbf{v} &= \ddot{\mathbf{x}}_{def} - 2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{x}}} - \lambda^T\lambda\tilde{\mathbf{x}}, \text{ com } \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{def}\end{aligned}$$

Faz com que:

$$\ddot{\tilde{\mathbf{x}}} + 2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \lambda^T\lambda\tilde{\mathbf{x}} = 0 \rightarrow \tilde{\mathbf{x}} = a\mathbf{e}^{-\lambda t} + b\mathbf{e}^{-\lambda t} \text{ (exponencialmente estável)}$$

Para o modelo em questão:

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{X}}_{NED} &= \mathbf{C}(\psi, \dot{\psi})\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{B}(\psi)\mathbf{F}_{vessel} \\ \mathbf{F}_{vessel} &= \mathbf{B}^{-1}(\psi)[- \mathbf{C}(\psi, \dot{\psi})\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \ddot{\mathbf{X}}_{def} - 2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{def} + 2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{NED} - \lambda^T\lambda\mathbf{X}_{def} + \lambda^T\lambda\mathbf{X}_{NED}] \\ \text{com } \mathbf{B}(\psi) &= \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1} \text{ e } \mathbf{C}(\psi, \dot{\psi}) = \dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi) - \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}\mathbf{R}(-\psi)\end{aligned}$$

Culminando, em sua forma mais simples (matriz $\lambda = \lambda I_{3 \times 3}$):

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{vessel} = \mathbf{M}\mathbf{R}(-\psi) & \left[-\dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \right. \\ & \left. - 2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{NED} - \lambda^2\mathbf{X}_{NED} + \ddot{\mathbf{X}}_{def} + 2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{def} + \lambda^2\mathbf{X}_{def} \right] \end{aligned}$$

O controle adaptativo leva em conta que os parâmetros utilizados para o *feedback-linearization* podem não ser conhecidos completamente, ou seja, a lei de controle anterior na verdade se torna:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{vessel} = \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi) & \left[-\dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(\psi)\hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\mathbf{N}}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \right. \\ & \left. - 2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{NED} - \lambda^2\mathbf{X}_{NED} + \ddot{\mathbf{X}}_{def} + 2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{def} + \lambda^2\mathbf{X}_{def} \right] \end{aligned}$$

O objetivo do controlador, então, será determinar uma lei de adaptação que leve os parâmetros estimados a serem iguais aos parâmetros reais.

O sistema dinâmico completo, substituindo F, fica:

$$\ddot{\mathbf{X}}_{NED} = \mathbf{C}(\psi, \dot{\psi})\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{B}(\psi)\mathbf{F}_{vessel}$$

$$\text{com } \mathbf{B}(\psi) = \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1} \text{ e } \mathbf{C}(\psi, \dot{\psi}) = \dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi) - \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}\mathbf{R}(-\psi)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{X}}_{NED} = [\dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi) - \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}\mathbf{R}(-\psi)]\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\ + \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1}\hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi) & \left[-\dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(\psi)\hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\mathbf{N}}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \right. \\ & \left. - 2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{NED} - \lambda^2\mathbf{X}_{NED} + \ddot{\mathbf{X}}_{def} + 2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{def} + \lambda^2\mathbf{X}_{def} \right] \end{aligned}$$

Multiplicando ambos os lados por $\mathbf{M}\mathbf{R}(-\psi)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\mathbf{R}(-\psi)\ddot{\mathbf{X}}_{NED} \\ = \mathbf{M}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} - \mathbf{N}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\ - \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \hat{\mathbf{N}}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} - \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\ - \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)\lambda^2\mathbf{X}_{NED} + \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)\ddot{\mathbf{X}}_{def} + \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{def} + \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)\lambda^2\mathbf{X}_{def} \end{aligned}$$

Reagrupando:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\mathbf{R}(-\psi)\ddot{\mathbf{X}}_{NED} &= -(\hat{\mathbf{M}} - \mathbf{M})\mathbf{R}(-\psi)\dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + (\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N})\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\ &\quad - \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} - \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)\lambda^2\tilde{\mathbf{X}}_{NED} + \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)\ddot{\mathbf{X}}_{def} \end{aligned}$$

Somando $\mathbf{M}\mathbf{R}(-\psi)2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} + \mathbf{M}\mathbf{R}(-\psi)\lambda^2\tilde{\mathbf{X}}_{NED} - \mathbf{M}\mathbf{R}(-\psi)\ddot{\mathbf{X}}_{def}$ em ambos os lados:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\mathbf{R}(-\psi)[\ddot{\mathbf{X}}_{NED} - \ddot{\mathbf{X}}_{def} + 2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} + \lambda^2\tilde{\mathbf{X}}_{NED}] &= -(\hat{\mathbf{M}} - \mathbf{M})\mathbf{R}(-\psi)\dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + (\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N})\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\ &\quad + (\hat{\mathbf{M}} - \mathbf{M})\mathbf{R}(-\psi)[-2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} - \lambda^2\tilde{\mathbf{X}}_{NED} + \ddot{\mathbf{X}}_{def}] \end{aligned}$$

Definindo que $\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{a} = \tilde{\mathbf{a}}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\mathbf{R}(-\psi)[\ddot{\mathbf{X}}_{NED} + 2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} + \lambda^2\tilde{\mathbf{X}}_{NED}] &= \tilde{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)[-2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} - \lambda^2\tilde{\mathbf{X}}_{NED} + \ddot{\mathbf{X}}_{def} - \dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED}] + \tilde{\mathbf{N}}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\ [\ddot{\mathbf{X}}_{NED} + 2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} + \lambda^2\tilde{\mathbf{X}}_{NED}] &= \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1}\{\tilde{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)[-2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} - \lambda^2\tilde{\mathbf{X}}_{NED} + \ddot{\mathbf{X}}_{def} - \dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED}] \\ &\quad + \tilde{\mathbf{N}}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED}\} \end{aligned}$$

Que pode ser reescrito na forma:

$$\begin{aligned} &\left\{ \tilde{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi) \left[-2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} - \lambda^2\tilde{\mathbf{X}}_{NED} + \ddot{\mathbf{X}}_{def} - \dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \right] + \tilde{\mathbf{N}}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \right\} = \\ &= \tilde{\mathbf{M}} \left[-2\lambda\mathbf{R}(-\psi)\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} - \lambda^2\mathbf{R}(-\psi)\tilde{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(-\psi)\ddot{\mathbf{X}}_{def} - \dot{\psi} \cdot \mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \right] + \tilde{\mathbf{N}}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\ &= \tilde{\mathbf{M}}\mathbf{V} + \tilde{\mathbf{N}}\mathbf{W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= -2\lambda\mathbf{R}(-\psi)\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} - \lambda^2\mathbf{R}(-\psi)\tilde{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(-\psi)\ddot{\mathbf{X}}_{def} - \dot{\psi} \cdot \mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\ \mathbf{W} &= \mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \end{aligned}$$

$$\text{Adotando: } \tilde{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \tilde{m}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{m}_{22} & \tilde{m}_{23} \\ 0 & \tilde{m}_{32} & \tilde{m}_{33} \end{bmatrix} \text{ e de forma na análoga para } \tilde{\mathbf{N}}.$$

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{M}}\mathbf{V} + \tilde{\mathbf{N}}\mathbf{W} &= \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 & v_3 & 0 & 0 & 0 & w_2 & w_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_2 & v_3 & 0 & 0 & 0 & w_2 & w_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{m}_{11} \\ \tilde{m}_{22} \\ \tilde{m}_{23} \\ \tilde{m}_{32} \\ \tilde{m}_{33} \\ \tilde{n}_{11} \\ \tilde{n}_{22} \\ \tilde{n}_{23} \\ \tilde{n}_{32} \\ \tilde{n}_{33} \end{bmatrix} = \\ &= \Phi(\ddot{\mathbf{X}}_{def}, \dot{\mathbf{X}}_{def}, \mathbf{X}_{def}, \dot{\mathbf{X}}_{NED}, \mathbf{X}_{NED})\tilde{\boldsymbol{\theta}}\end{aligned}$$

$$\left[\ddot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} + 2\lambda\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} + \lambda^2\tilde{\mathbf{X}}_{NED} \right] = \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1}\Phi(\ddot{\mathbf{X}}_{def}, \dot{\mathbf{X}}_{def}, \mathbf{X}_{def}, \dot{\mathbf{X}}_{NED}, \mathbf{X}_{NED})\tilde{\boldsymbol{\theta}}$$

Ou seja, o sistema pode ser interpretado como uma equação diferencial ordinária excitada pela imprecisão dos parâmetros.

Para que a lei de adaptação possa ser determinada, convém expressar o sistema como um espaço de estados de primeira ordem, de forma que:

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}_{NED} \\ \dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} \end{bmatrix} \\ \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\Phi\tilde{\boldsymbol{\theta}} \\ \text{com } \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\lambda^2 & -2\lambda \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Feito isso, define-se a função de Lyapunov:

$$\begin{aligned}V(\mathbf{x}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}, t) &= \mathbf{x}^T \mathbf{P}(t) \mathbf{x} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}}, \text{ com } \mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0 \text{ e } \Gamma = \Gamma^T > 0 \\ \dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}, t) &= \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{P}(t) \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \dot{\mathbf{P}}(t) \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P}(t) \dot{\mathbf{x}} + \\ &\quad + \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}\end{aligned}$$

Substituindo a dinâmica, levando em conta que:

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B})^T = \mathbf{A}^T + \mathbf{B}^T \text{ e } (\mathbf{AB})^T = \mathbf{B}^T \mathbf{A}^T \rightarrow \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{y} = k = k^T = \mathbf{y}^T \mathbf{A}^T \mathbf{x}:$$

$$\begin{aligned}\dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}, t) = & (\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\Phi\tilde{\boldsymbol{\theta}})^T \mathbf{P}(t)\mathbf{x} + \mathbf{x}^T \dot{\mathbf{P}}(t)\mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)(\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\Phi\tilde{\boldsymbol{\theta}}) + \\ & + \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}^T \Gamma^{-1}\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \Gamma^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}, t) = & (\mathbf{A}\mathbf{x})^T \mathbf{P}(t)\mathbf{x} + (\mathbf{B}\Phi\tilde{\boldsymbol{\theta}})^T \mathbf{P}(t)\mathbf{x} + \mathbf{x}^T \dot{\mathbf{P}}(t)\mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)\mathbf{B}\Phi\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \\ & + \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}^T \Gamma^{-1}\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T (\Gamma^{-1})^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}, t) = & \mathbf{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{P}(t)\mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)^T \mathbf{B}\Phi\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{x}^T \dot{\mathbf{P}}(t)\mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)\mathbf{B}\Phi\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \\ & + \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}^T \Gamma^{-1}\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T (\Gamma^{-1})^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}, t) = & \mathbf{x}^T \left(\dot{\mathbf{P}}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}(t) \right) \mathbf{x} \\ & + \left(\mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)^T \mathbf{B}\Phi + \mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)\mathbf{B}\Phi + \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}^T \Gamma^{-1} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T (\Gamma^{-1})^T \right) \tilde{\boldsymbol{\theta}}\end{aligned}$$

Resgatando que $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$ e $\Gamma = \Gamma^T > 0$:

$$\dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}, t) = \mathbf{x}^T \left(\dot{\mathbf{P}}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}(t) \right) \mathbf{x} + 2 \left(\mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)\mathbf{B}\Phi + \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}^T \Gamma^{-1} \right) \tilde{\boldsymbol{\theta}}$$

Assumindo que $\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} = 0$, ou seja, os parâmetros não variam com o tempo:

$$\dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}, t) = \mathbf{x}^T \left(\dot{\mathbf{P}}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}(t) \right) \mathbf{x} + 2 \left(\mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)\mathbf{B}\Phi + \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}^T \Gamma^{-1} \right) \tilde{\boldsymbol{\theta}}$$

Para que a função acima seja negativa-definida independente do erro na estimativa dos parâmetros, define-se a lei de adaptação:

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}^T = -\mathbf{x}^T \mathbf{P}(t)\mathbf{B}\Phi \Gamma \rightarrow \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} = -\Gamma \Phi^T \mathbf{B}^T \mathbf{P}(t)\mathbf{x}$$

Definida a lei de controle, procura-se $\mathbf{P}(t)$ que satisfaça as condições propostas anteriormente:

$$\mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}(t) & \mathbf{b}(t) \\ \mathbf{b}(t) & \mathbf{c}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{a}^T(t) = \mathbf{a}(t) \text{ e } \mathbf{c}^T(t) = \mathbf{c}(t)$$

$$\mathbf{B}^T \mathbf{P}(t) = [0 \quad \mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1}] \begin{bmatrix} \mathbf{a}(t) & \mathbf{b}(t) \\ \mathbf{b}(t) & \mathbf{c}(t) \end{bmatrix} = [\mathbf{b}(t)\mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1} \quad \mathbf{c}(t)\mathbf{R}(\psi)\mathbf{M}^{-1}]$$

Para que a lei de adaptação não dependa de um parâmetro desconhecido e assumindo que $\mathbf{M}^T = \mathbf{M}$ (Fossen, pag 80), sabendo que $\mathbf{M} > 0$, as seguintes atribuições satisfazem as condições:

$$\mathbf{b}(t) = c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \text{ e } \mathbf{c}(t) = c_1 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi)$$

$$\mathbf{B}^T \mathbf{P}(t) = \mathbf{C} = [c_0 \mathbf{R}(\psi) \quad c_1 \mathbf{R}(\psi)], c_0 > 0 \text{ e } c_1 > 0$$

Analisando os outros termos da função de Lyapunov, é interessante que:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(t) \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}(t) &= -\mathbf{Q} = \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{a}(t) & c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \\ c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & c_1 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\lambda^2 & -2\lambda \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & -\lambda^2 \\ \mathbf{I} & -2\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}(t) & c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \\ c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & c_1 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \end{bmatrix} \\ \mathbf{Q} &= \mathbf{Q}^T > 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(t) \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}(t) &= -\mathbf{Q} = \\ &= \begin{bmatrix} -c_0 \lambda^2 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & \mathbf{a}(t) - 2\lambda c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \\ -c_1 \lambda^2 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) - 2\lambda c_1 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -c_0 \lambda^2 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & -c_1 \lambda^2 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \\ \mathbf{a}(t) - 2\lambda c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) - 2\lambda c_1 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -2c_0 \lambda^2 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & \mathbf{a}(t) - 2\lambda c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) - c_1 \lambda^2 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \\ \mathbf{a}(t) - 2\lambda c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) - c_1 \lambda^2 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & 2c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) - 4\lambda c_1 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\mathbf{a}(t) = 2\lambda c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) + c_1 \lambda^2 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \rightarrow \mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(t) &= \begin{bmatrix} 2\lambda c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) + c_1 \lambda^2 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \\ c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & c_1 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \end{bmatrix} \\ \mathbf{Q} &= \begin{bmatrix} 2c_0 \lambda^2 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -2c_0 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) + 4\lambda c_1 \mathbf{R}(\psi) \mathbf{M} \mathbf{R}(-\psi) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

De modo que:

$$\dot{V}(x, \tilde{\theta}, t) = x^T \left(\overbrace{\dot{P}(t) - Q}^{\dot{P}(t) - Q} \right) x + 2 \left(\overbrace{x^T P(t) B \Phi + \dot{\tilde{\theta}}^T \Gamma^{-1}}^0 \right) \tilde{\theta}$$

$$\dot{V}(x, \tilde{\theta}, t) = x^T (\dot{P}(t) - Q) x$$

Nota-se que:

$$\dot{P}(t) = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 2\lambda c_0 R(\psi) M R(-\psi) + c_1 \lambda^2 R(\psi) M R(-\psi) & c_0 R(\psi) M R(-\psi) \\ c_0 R(\psi) M R(-\psi) & c_1 R(\psi) M R(-\psi) \end{bmatrix} =$$

$$\frac{d}{dt} c R(\psi) M R(-\psi) = c \dot{\psi} [\overbrace{\dot{R}(\psi) M R(-\psi) - R(\psi) M \dot{R}(-\psi)}^{\text{limitado: multiplicação por cossenos e senos}}]$$

$$x^T \dot{P}(t) x = \dot{\psi} x^T P_{\text{limitado}} x \leq |\dot{\psi}| \beta x^T \left[\overbrace{\begin{bmatrix} R(\psi) M R(-\psi) & 0 \\ 0 & R(\psi) M R(-\psi) \end{bmatrix}}^{\text{limitado}} \right] x, \beta > 0$$

Dessa forma:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, \tilde{\theta}, t) &= x^T (\dot{P}(t) - Q) x \\ &\leq x^T \left(|\dot{\psi}| \beta \begin{bmatrix} R(\psi) M R(-\psi) & 0 \\ 0 & R(\psi) M R(-\psi) \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. - \begin{bmatrix} 2c_0 \lambda^2 R(\psi) M R(-\psi) & 0 \\ 0 & -2c_0 R(\psi) M R(-\psi) + 4\lambda c_1 R(\psi) M R(-\psi) \end{bmatrix} \right) x \end{aligned}$$

$$\dot{V}(x, \tilde{\theta}, t) \leq x^T \begin{bmatrix} (|\dot{\psi}| \beta - 2c_0 \lambda^2) R(\psi) M R(-\psi) & 0 \\ 0 & (|\dot{\psi}| \beta + 2c_0 - 4\lambda c_1) R(\psi) M R(-\psi) \end{bmatrix} x$$

$$(\dot{P}(t) - Q) \text{ negativa definida} \rightarrow (|\dot{\psi}| \beta - 2c_0 \lambda^2) < 0, (|\dot{\psi}| \beta + 2c_0 - 4\lambda c_1) < 0$$

$$Q \text{ positiva definida} \rightarrow 4\lambda c_1 - 2c_0 > 0$$

$$P \text{ positiva definida} \rightarrow \det(P) > 0 \rightarrow (2\lambda c_0 + c_1 \lambda^2) c_1 > c_0^2$$

Concluindo o controle:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_{vessel} &= \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}(-\psi)[-\dot{\psi} \cdot \dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(\psi)\hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\mathbf{N}}\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} - 2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\
 &\quad - \lambda^2\mathbf{X}_{NED} + \ddot{\mathbf{X}}_{def} + 2\lambda\dot{\mathbf{X}}_{def} + \lambda^2\mathbf{X}_{def}] \\
 \begin{bmatrix} \dot{\hat{m}}_{11} \\ \dot{\hat{m}}_{22} \\ \dot{\hat{m}}_{23} \\ \dot{\hat{m}}_{32} \\ \dot{\hat{m}}_{33} \\ \dot{\hat{n}}_{11} \\ \dot{\hat{n}}_{22} \\ \dot{\hat{n}}_{23} \\ \dot{\hat{n}}_{32} \\ \dot{\hat{n}}_{33} \end{bmatrix} &= -\gamma\mathbf{I}_{10 \times 10} \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 & 0 \\ 0 & v_3 & 0 \\ 0 & 0 & v_2 \\ 0 & 0 & v_3 \\ w_1 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 \\ 0 & w_3 & 0 \\ 0 & 0 & w_2 \\ 0 & 0 & w_3 \end{bmatrix} [c_0\mathbf{R}(\psi) \quad c_1\mathbf{R}(\psi)] \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}_{NED} \\ \dot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} &= -2\lambda\mathbf{R}(-\psi)\ddot{\tilde{\mathbf{X}}}_{NED} - \lambda^2\mathbf{R}(-\psi)\tilde{\mathbf{X}}_{NED} + \mathbf{R}(-\psi)\ddot{\mathbf{X}}_{def} - \dot{\psi} \cdot \mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{R}}(\psi)\mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\
 \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} &= \mathbf{R}(-\psi)\dot{\mathbf{X}}_{NED} \\
 c_0 &> \frac{|\psi|\beta}{2\lambda^2}, c_1 > \frac{(|\psi|\beta + 2c_0)}{4\lambda} \text{ e } (2\lambda c_0 + c_1\lambda^2)c_1 > c_0^2
 \end{aligned}$$

ANEXO A: RELATÓRIOS PPP EMITIDOS PELO IBGE



Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: 7657

Início (AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS):	2013/10/25 10:04:00,00
Fim (AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS):	2013/10/25 14:43:30,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	NÃO DISPONÍVEL
Órbitas dos satélites (IGS)¹:	RÁPIDA
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento (s):	15,00
Sigma²da pseudodistância (m):	2,000
Sigma da portadora (m):	0,015
Altura da Antena³ (m):	1,802
Ângulo de Elevação (graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância (m):	1,06
Resíduos da fase da portadora(cm):	1,25

Posição Estimada no Sistema de Referência SIRGAS:

	Latitude	Longitude	Altitude Geométrica (m):
Coordenada Oficial⁴ em 2000.4:	-23° 33' 21,6433"	-46° 43' 48,9250"	718,90
Coordenada na data do levantamento⁵:	-23° 33' 21,6382"	-46° 43' 48,9263"	718,90
Sigma⁶ (m):	0,005	0,010	0,022
Modelo Geoidal:	MAPGEO2010		
Ondulação Geoidal (m):	-3,01		
Altitude Ortométrica (m):	721,91		

Precisão esperada para um levantamento estático em metros:

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 3 horas	0,40	0,70	0,05	0,06
Após 6 horas	0,20	0,40	0,02	0,04
Após 24 horas	0,10	0,30	0,01	0,02

Estaca 1



Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: 7657

Início (AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS):	2013/10/25 18:09:30,00
Fim (AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS):	2013/10/25 22:08:00,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	NÃO DISPONÍVEL
Órbitas dos satélites (IGS)¹:	RÁPIDA
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento (s):	15,00
Sigma²da pseudodistância (m):	2,000
Sigma da portadora (m):	0,015
Altura da Antena³ (m):	1,802
Ângulo de Elevação (graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância (m):	0,97
Resíduos da fase da portadora(cm):	1,12

Posição Estimada no Sistema de Referência SIRGAS:

	Latitude	Longitude	Altitude Geométrica (m):
Coordenada Oficial⁴ em 2000.4:	-23° 33' 21,7073"	-46° 43' 48,6798"	718,91
Coordenada na data do levantamento⁵:	-23° 33' 21,7022"	-46° 43' 48,6811"	718,91
Sigma⁶ (m):	0,005	0,029	0,030
Modelo Geoidal:	MAPGEO2010		
Ondulação Geoidal (m):	-3,01		
Altitude Ortométrica (m):	721,92		

Precisão esperada para um levantamento estático em metros:

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 3 horas	0,40	0,70	0,05	0,06
Após 6 horas	0,20	0,40	0,02	0,04
Após 24 horas	0,10	0,30	0,01	0,02

¹ Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS).

² O termo "Sigma" é referente ao Desvio Padrão.

³ Distância do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

⁴ A coordenada oficial é a data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita da data do levantamento para 2000.4, utilizando o modelo VEMOS.

⁵ A data de levantamento considerada é a data de Início da sessão.

⁶ O "Sigma" representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.



Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: 7657

Início (AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS):	2013/10/28 18:01:15,00
Fim (AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS):	2013/10/28 22:17:30,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	NÃO DISPONÍVEL
Órbitas dos satélites (IGS)¹:	RÁPIDA
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento (s):	15,00
Sigma²da pseudodistância (m):	2,000
Sigma da portadora (m):	0,015
Altura da Antena³ (m):	1,802
Ângulo de Elevação (graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância (m):	0,95
Resíduos da fase da portadora(cm):	1,15

Posição Estimada no Sistema de Referência SIRGAS:

	Latitude	Longitude	Altitude Geométrica (m):
Coordenada Oficial⁴ em 2000.4:	-23° 33' 21,7565"	-46° 43' 48,7246"	718,95
Coordenada na data do levantamento⁵:	-23° 33' 21,7514"	-46° 43' 48,7259"	718,95
Sigma⁶ (m):	0,005	0,027	0,030
Modelo Geoidal:	MAPGEO2010		
Ondulação Geoidal (m):	-3,01		
Altitude Ortométrica (m):	721,96		

Precisão esperada para um levantamento estático em metros:

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 3 horas	0,40	0,70	0,05	0,06
Após 6 horas	0,20	0,40	0,02	0,04
Após 24 horas	0,10	0,30	0,01	0,02

¹ Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS).

² O termo "Sigma" é referente ao Desvio Padrão.

³ Distância do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

⁴ A coordenada oficial é a data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita da data do levantamento para 2000.4, utilizando o modelo VEMOS.

⁵ A data de levantamento considerada é a data de Início da sessão.

⁶ O "Sigma" representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.



Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: 7657

Início (AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS):	2013/10/29 17:00:00,00
Fim (AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS):	2013/10/29 21:28:30,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	NÃO DISPONÍVEL
Órbitas dos satélites (IGS)¹:	RÁPIDA
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento (s):	15,00
Sigma² da pseudodistância (m):	2,000
Sigma da portadora (m):	0,015
Altura da Antena³ (m):	1,802
Ângulo de Elevação (graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância (m):	1,26
Resíduos da fase da portadora(cm):	1,28

Posição Estimada no Sistema de Referência SIRGAS:

	Latitude	Longitude	Altitude Geométrica (m):
Coordenada Oficial⁴ em 2000.4:	-23° 33' 34,1459"	-46° 42' 49,7716"	718,80
Coordenada na data do levantamento⁵:	-23° 33' 34,1408"	-46° 42' 49,7729"	718,80
Sigma⁶ (m):	0,006	0,032	0,034
Modelo Geoidal:	MAPGEO2010		
Ondulação Geoidal (m):	-3,02		
Altitude Ortométrica (m):	721,82		

Precisão esperada para um levantamento estático em metros:

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 3 horas	0,40	0,70	0,05	0,06
Após 6 horas	0,20	0,40	0,02	0,04
Após 24 horas	0,10	0,30	0,01	0,02

¹ Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS).

² O termo "Sigma" é referente ao Desvio Padrão.

³ Distância do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

⁴ A coordenada oficial é a data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita da data do levantamento para 2000.4, utilizando o modelo VEMOS.

⁵ A data de levantamento considerada é a data de Início da sessão.

⁶ O "Sigma" representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.

Estaca Raia – referência da base fixa